

Классификация климатов Северного полушария на основе оценки фазы температурного сигнала

Н.Н. Чередыко¹, В.А. Тартаковский¹, В.А. Крутиков¹, Ю.В. Волков^{1,2*}

¹Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

Поступила в редакцию 6.06.2016 г.

Приведены результаты структурирования поля приземной температуры Северного полушария для периода современных климатических изменений. В основе предложенной классификации – гипотеза географической обусловленности особенностей фазовой модуляции температурного сигнала. Критерием служит согласованность, а именно фазированность колебаний температуры в отдельных географических районах.

Полагаем, что изменения режимов синхронизации природно-климатических процессов в условиях меняющегося климата приводят к пространственной трансформации структуры температурного поля, что есть следствие перехода системы в новое качественное состояние. Температурные ряды представлены как фазомодулированное колебание. Совокупность внешних и внутренних возмущающих воздействий, оказываемых на климатическую систему, формирует сложный вид фазовой модуляции, но она находится в некотором соответствии этим возмущениям. Исходное пространство 818 температурных рядов структурировано в 17 региональных кластеров. В них изменения температуры происходят синхронно. Проанализированы свойства полученных структур и их соответствие известным климатическим классификациям. Алгоритм дает возможность исследователю выбирать степень дифференциации исследуемого поля в зависимости от поставленной задачи. Для выявления особенностей трансформации внешнего сигнала в поле приземной температуры была получена оценка индекса фазовой модуляции. Величина отклонения индексов от известных закономерностей для гармонической фазовой модуляции позволяет количественно оценить роль региональных климаторегулирующих факторов. Модуляция, наиболее близкая к гармонической, выявлена в районе Североатлантического термогалинного конвейера.

Предложенный подход может использоваться как аналитическая основа для изучения изменений климата в любом пространственном масштабе только по данным о приземной температуре до заданного исследователем качественного уровня. Поиск синхронизации в нелинейных хаотических системах, чувствительных к начальным условиям, может стать одним из перспективных путей оптимизации прогнозных моделей.

Ключевые слова: синхронность, фаза температурных рядов, классификация климата, Северное полушарие, внешние факторы; synchronicity, temperature series phase, climate classification, Northern hemisphere, external factors.

Введение

Современное социально-экономическое планирование неэффективно без учета информации о свойствах среды обитания, экологическое состояние которой характеризуется состоянием отдельных компонент геосистемы планеты. Классификация является одной из фундаментальных основ любой науки, а также предпосылкой для дальнейших исследований. Классификация климата, которая, с одной стороны, систематизирует пространственную структуру полей климатических характеристик, а с другой стороны, выделяет специфику различных частей климатической системы, должна отражать как региональные кли-

маторегулирующие особенности, так и факторы генезиса климата. Развитие фундаментальной климатологии послужило основой физико-математических моделей климата. В последние десятилетия диагностируются климатические изменения [1], которые сопровождаются существенной трансформацией полей характеристик климата, что может повлечь, в свою очередь, сдвиги биоклиматических, сельскохозяйственных зон, изменения в способах и эффективности эксплуатации промышленных объектов, изменения показателей комфортности территорий. Дальнейшее усовершенствование моделей и улучшение прогнозов климата связаны с выявлением закономерностей и предикторов перестроек климатической системы, что должно поддерживаться разработкой новых эффективных методов анализа и обработки данных наблюдений. Таким образом, актуальная задача классификации климатов расширяется до необходимости получения их в оперативном режиме на основе постоянного объективного анализа изменений.

* Наталья Николаевна Чередыко (atnik3@rambler.ru); Валерий Абрамович Тартаковский (trtk@list.ru); Владимир Алексеевич Крутиков (krutikov@imces.ru); Юрий Викторович Волков (yvvolkov@tpu.ru).

Разработаны различные классификации климатов, приводящие разнообразные климатические условия в определенную систему и фиксирующие границы распространения отдельных типов и видов климата. В работах [2, 3] приводятся описания известных классических климатических классификаций. Одной из наиболее широко используемых является классификация Кеппена–Гейгера (Köppen–Geiger) [4, 5]. В последние годы растет число работ, в которых говорится о необходимости пересмотра классических границ климатических зон в связи с наблюдаемыми климатическими изменениями и важностью корректного учета таких процессов при разработке прогнозных климатических сценариев [6–11]. Авторами [7] проанализированы несколько интервалов лет и получен прогноз изменения границ типов климата по Кеппену–Гейгеру, который дает, например, расширение аридных территорий к концу века. В статье [10] рассмотрен вопрос изменения климатической структуры для трех прогнозных сценариев климата МГЭИК и показана возможность существенных сдвигов границ климатических зон, выделенных Кеппеном. Во многих работах проблема трансформации климатических границ по Кеппену рассматривается в региональных масштабах [11].

Повышение объективности климатических классификаций стало возможным с быстрым развитием электронных вычислительных систем, что позволило активно привлекать к структуризации полей элементов климата статистические методы. Ряд исследователей для структурирования полей метеорологических величин используют различные модификации кластерного анализа [9, 12 и др.]. Часто такой подход позволяет получать формальные классификации для исследования пространственной структуры полей климатических параметров и их изменений в первом приближении. Для более глубокого анализа, выявления закономерностей и предикторов перестроек климатических процессов на глобальном и региональных уровнях важна физически обоснованная гипотеза.

Оболочки геосферы характеризуются соответствующими энергетическими характеристиками, меняющимися во времени, находящимися в постоянном развитии. Взаимодействие энергополей разных компонент геосферы определяет особенности и направленность всех динамических процессов планеты. Колебательный характер внутренних и внешних факторов, возбуждающих и контролируемых природно-климатические процессы, структурирует поля параметров в соответствии с основными энергопотоками в системе. В связи с этим возрастает актуальность исследования диссипации энергетических воздействий внешних вынуждающих факторов в сложной многоуровневой и разномасштабной геосистеме планеты. Основным внешним воздействующим фактором и регулятором иных крупномасштабных сигналов является Солнце. Естественным свойством солнечно-земных связей является синхронность. Опыт говорит о согласованности составляющих вынуждающего воздействия и различных природно-климатических процессов. Обобщение опытных фактов позволяет сформулировать новый принцип: «по своей

природе внешнее вынуждающее воздействие синхронизует инициированные им элементарные процессы в геосферах» [13].

Если рассматривать синхронность как сфазированность изучаемых процессов, то декомпозиция исходного множества на подмножества сильно связанных элементов дает возможность исследовать и их пространственную, и их временную структуру, в частности, использовать в задачах классификации климата. Разрабатываемые нами и описанные ранее [13–15] методы и алгоритмы оценки синхронности позволяют выделять локальные неоднородности в пространственно-временной структуре полей параметров компонент геосферы. В настоящей статье представлен один из таких подходов, реализующий фазовую группировку температурных данных с целью выделения климатических структур Северного полушария, характерных для периода современных климатических изменений. В качестве исходных взяты ряды данных приземной температуры с метеостанций, расположенных в Северном полушарии Земли, за период 1955–2010 гг. [16]. Расчеты проводились с использованием пакета Mathcad. Данные приземной температуры выбраны как один из основных интегральных индикаторов изменения глобального и регионального климата [17].

Алгоритм и метод исследования

Критерием предложенной классификации служит согласованность, а именно фазированность колебаний температуры в отдельных географических районах. В основу гипотезы географической обусловленности особенностей фазовой модуляции температурного сигнала положено следующее. Определяющее широтой места количество поступающей энергии модулируется вращением Земли, далее фаза первоначального сигнала трансформируется крупномасштабными циркуляционными процессами и местными условиями. Периодически под действием влияющих факторов различной природы происходят возмущающие воздействия на геосферу, что выражается в изменении характера колебаний параметров различных ее компонент, формируется сложный вид фазовой модуляции. Тем не менее существует согласованность этих изменений, степень которой может служить критерием классификации. В силу цикличности вращения Земли вокруг Солнца температурные значения, усредненные за короткие промежутки времени, имеют повторяемости во времени с периодом, соответствующим одному календарному году, а значит, они укладываются в понятие колебания и к ним применимы общие закономерности теории колебаний.

Фаза температурных рядов введена в рассмотрение как фактор их общей изменчивости. С этой целью применен аналитический сигнал. Кратко теория аналитического сигнала приведена нами в предыдущей работе [15]. Известно [18], что при наличии гармонической фазовой модуляции спектр колебания будет состоять из бесконечного числа боковых частот, кратных несущей частоте и расположенных попарно симметрично относительно нее. Величина

этих мод пропорциональна функциям Бесселя $J_q(m)$ первого рода q -го порядка от аргумента m , равного индексу гармонической фазовой модуляции. На рис. 1 показан нормированный спектр мощности S , рассчитанный для 818 рядов средних месячных температур, там видны четыре моды на частотах, кратных несущей частоте $\nu_c = 1/56$. Такой вид спектра возникает при нелинейных преобразованиях исходного полосового колебания и может быть обусловлен фазовой модуляцией. Выделенная на рис. 1 часть спектра использовалась в дальнейшем для классификации.

Классификация температурных рядов осуществляется итерационным алгоритмом, который будем

в дальнейшем называть «алгоритм фазовой группировки». Выполняется последовательность действий, представленная на рис. 2.

В этом алгоритме: i – номер итерации; ϵ – малое число; τ – дискретное время; Π – интервал наблюдения; k и j – номера метеостанций; N – число метеостанций; l – номер элемента климатического класса; n – номер климатического класса и номер типовой фазы; $\Phi_{n,\tau}$ – типовая фаза для климатического класса. Фигурными скобками обозначен набор величин, длинной чертой сверху обозначено среднее значение внутри набора, а угловыми скобками – коэффициент корреляции двух наборов. Косая черта \setminus обозначает вычитание множеств.

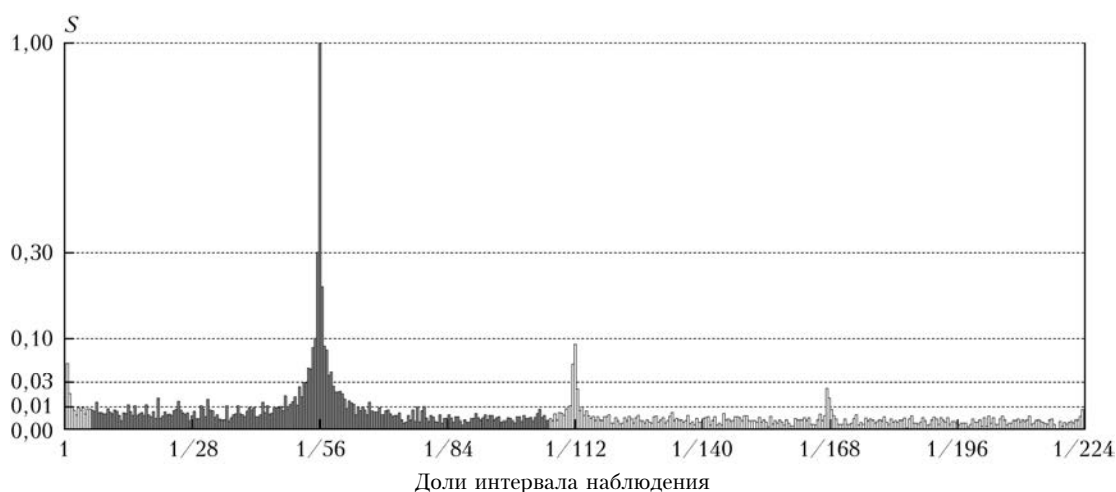


Рис. 1. Нормированный спектр мощности 818 температурных рядов

```

#1. Формирование матрицы среднемесячных температур –
 $\|T_{k,\tau}\|; k = 1, 2, \dots, N; \tau = 1, 2, \dots, \Pi$ .
#2. Вычисление главных значений фаз –
 $i := 0, \quad {}^i\varphi_{k,\tau} := \arctg\left(\frac{H[T_{k,\tau}]}{T_{k,\tau}}\right)$ .
#3. Вычисление непрерывных фаз –
if  $|{}^i\varphi_{k,\tau+1} - {}^i\varphi_{k,\tau}| \geq \pi, \quad {}^i\varphi_{k,\tau+1} := {}^i\varphi_{k,\tau+1} + 2\pi$ .
#4. Удаление линейных составляющих фаз –
 ${}^i\varphi_{k,\tau} := {}^i\varphi_{k,\tau} - {}^i\varphi_{k,1} - ({}^i\varphi_{k,\Pi} - {}^i\varphi_{k,1})(\tau - 1)/(\Pi - 1)$ .
#5. Вычисление текущих фаз –
 ${}^i\varphi_{j,\tau} := \overline{{}^i\varphi_{k,\tau}} : \langle {}^i\varphi_{j,\tau}, {}^i\varphi_{k,\tau} \rangle > r; j = 1, 2, \dots, N$ .
#6. if  $|{}^i\varphi_{j,\tau} - {}^{i-1}\varphi_{j,\tau}| < \epsilon, \quad \mathbf{\#7};$  else  ${}^{i-1}\varphi_{j,\tau} := {}^i\varphi_{j,\tau}, \quad i := i + 1, \quad \mathbf{\#5}$ .
#7.  $i := \text{end}, n := 1$ .
#8. Формирование типовых фаз –
 $\{l\} \subset \{j\} : |\varphi_{j,\tau} - \varphi_{k,\tau}| < \epsilon; \quad \Phi_{n,\tau} := \overline{\varphi_{j,\tau}} : j \in \{l\}; \{k\} := \{k\} \setminus \{l\}, \{j\} := \{j\} \setminus \{l\}$ .
#9. if  $\{k\} = \emptyset, \quad \mathbf{\#10};$  else  $n := n + 1, \quad \mathbf{\#8}$ .
#10. Вычисление коэффициентов корреляции –
 $r_{n,k} := \langle \Phi_{n,\tau}, {}^0\varphi_{k,\tau} \rangle; \text{ stop}$ .

```

Рис. 2. Итерационный алгоритм метода фазовой группировки

Символом \hat{H} обозначено преобразование Гильберта по аргументу τ . Мерой взаимосвязи между отдельными оценками фазы или критерием группировки выбран коэффициент корреляции r . Группы оценок, удовлетворяющие заданному уровню коэффициента корреляции, формируют по завершению итерационного процесса типовую фазу, рассчитываемую как среднее из формирующих группу оценок фаз. Каждая типовая фаза характеризует некоторый климатический класс. Эксперимент, проведенный для выборки из 818 рядов среднемесячных температур, показал сходимость итерационного процесса до установленного уровня вычислительной точности.

Преимуществами предложенного способа классификации климата являются в первую очередь его объективность, использование точно измеряемых данных, отсутствие необходимости использования биоклиматических данных, база данных которых неоднородна. Другое преимущество применения фазы обусловлено тем, что изменения температуры, характеризующие локальные климатические особенности, невелики в сравнении с годовым ходом температуры. Однако именно эти изменения необходимо выделить для классификации. Корректно устранить годовой ход температуры непосредственно из исходного ряда достаточно проблематично. В случае анализа фазы колебания эта процедура проста и сводится к удалению одной линейной функции для всего анализируемого интервала.

На основе фазовой характеристики можно строить новые оценки, определяющие законы поведения исследуемых параметров за определенные временные интервалы. Применительно к значениям, отражающим годовой ход приземной температуры воздуха, разработанный метод позволяет выделять климатические структуры, имеющие близкие закономерности изменения температурного поля.

Результаты исследования и обсуждение

В результате реализации предложенного алгоритма фазовой группировки на данных метеостанций Северного полушария исходное 818-мерное

пространство температурных рядов структурировалось в 17-мерное пространство типовых фаз, соответствующих районам, где изменения температуры происходят синхронно (рис. 3).

Как видно, получена четкая географическая локализация классов станций. С увеличением дробности разбиения на классы проявляется большее влияние региональных факторов, но каждый класс несет информацию о глобальных сигналах. Несмотря на то что описанный алгоритм реализован только на данных приземной температуры, климатические классы в общем соответствуют классической классификации климата по Кеппену. Так, получено почти полное совпадение класса № 15 с субтропическим муссонным климатом Японских островов и восточной окраины Азии, класса № 17 с территорией, характеризующейся жарким семиаридным климатом *Bsh* по Кеппену (Индия, Пакистан). Но в целом выявлено некоторое расширение к северу климатических границ более теплых территорий. Например, в Северной Америке можно отметить расширение на север территории, соответствующей жаркому климату степей *Bsh* по Кеппену (класс № 16). Также отмечено сглаживание различий термического режима двух типов климата с равномерным увлажнением по Кеппену *Cf* (влажного субтропического) и *Df* (влажного континентального) — колебания температуры на этих территориях имеют один тип фазы. И наоборот, средиземноморский тип климата при использовании алгоритма фазовой группировки не выделяется как отдельный класс. Станции, расположенные на этой территории, разделились по двум классам (№№ 13, 14), различным по типу фазы колебаний температуры. Полагаем, что изменения режимов синхронизации природно-климатических процессов в условиях меняющегося климата приводят к пространственной трансформации структуры температурного поля, что есть следствие перехода системы в новое качественное состояние.

Несколько станций (см. рис. 3) имеют особый тип фазы и поэтому не вошли ни в один из классов. В основном они расположены в экваториальных и субэкваториальных широтах. В первом приближении можно заметить, что общим для этих районов является их принадлежность областям влияния

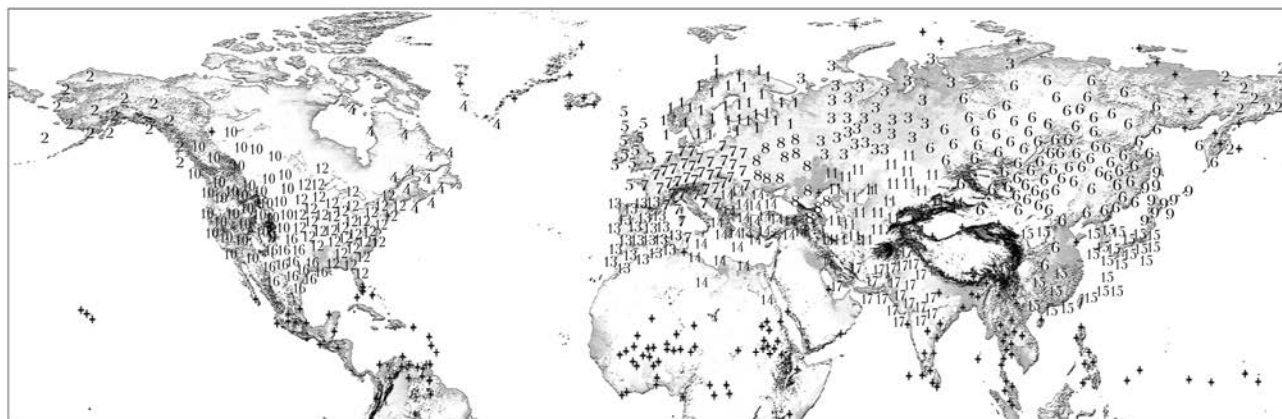


Рис. 3. Классификация поля приземной температуры Северного полушария (1955–2010 гг.)

муссонной циркуляции. Выраженность муссонов в различных регионах неодинакова. Так, например, в Центральной Америке узкая полоса суши и водные пространства Атлантического и Тихого океанов по обе стороны от экватора способствуют слабому развитию муссонов из-за не столь выраженного сезонного смещения зон давления (различия нагрева в разные сезоны невелико). Напротив, наличие на севере и западе Индийского океана огромных сплошных пространств суши способствует максимальной выраженности здесь муссонной циркуляции. Вообще, в области субэкваториального климата (климат тропических муссонов) Алисовым [19] выделены четыре существенно различных типа: континентальный, океанический, западных берегов, восточных берегов. Этот факт является еще одним подтверждением асинхронности процессов в этих районах. Энергетическую базу всех природных процессов в приземном слое той или иной территории определяет радиационный баланс, различия которого, обуславливаемые особенностями муссонной циркуляции (продолжительность дождливого и сухого периода), параметрами воздуха, приносимого пассатами, характеристиками подстилающей поверхности, соотношением суши и водной поверхности, характерной плотностью облачного покрова в этих «особых» районах, полагаем, и формируют особый тип фазы. Кроме того, эти районы относятся к зоне максимального влияния глобальной аномалии Эль-Ниньо – Южное колебание [20], что еще более усложняет динамику параметров приземного воздуха.

Возможность выбора степени дифференциации исследуемого поля (насколько это возможно при его объективных характеристиках) в зависимости от поставленной задачи – еще одно из преимуществ предложенного подхода. В предыдущей работе было показано, как меняется степень дифференциации

в структуре температурного поля Евразии в зависимости от заданного уровня взаимной корреляции [15]. В данном случае типовые фазы определялись при пороговом уровне $r = 0,8$. При этом оказалось, что классы №№ 3 и 11 на рис. 3, расположенные рядом, имеют коэффициент корреляции типовых фаз, равный 0,62 (табл. 1).

В эксперименте было установлено, что при уменьшении порогового значения r до 0,7 класс № 3 захватывает часть станций из класса № 11, и он исчезает. Фазы колебаний захваченных станций наиболее тесно связаны с типовой фазой класса № 3, оставшиеся станции имеют низкую взаимную корреляцию и не могут сформировать при данных условиях отдельный класс. Подобные изменения происходят, в частности, и с классом № 8, имеющим коэффициент корреляции 0,61 с классом № 14 и 0,43 с № 7. Отдав часть станций классам №№ 14 и 7, класс № 8 исчезает.

Очевидно, что степень дифференциации обусловлена естественными причинами, а пороговый коэффициент корреляции является инструментом для их выявления. Станции классов №№ 3 и 11 отнесены Алисовым [19] к зоне континентального климата умеренного пояса, но, очевидно, следует ожидать различий в структуре колебаний температуры в районах, например, Средней Азии и центральной части Западной Сибири, так как эти зоны имеют свои уникальные особенности (характерный тип циркуляции, влагосодержание, количество осадков, режим облачности, почвенный режим, наличие многолетнемерзлых пород и т.д.). Таким образом, в зависимости от поставленной задачи исследователю необходимо понимать, какая степень дифференциации исследуемой территории для него достаточна, и определяться, исходя из этого, со значением критерия пороговой тесноты связи, чтобы выбор принадлежности станции к тому или иному классу был однозначным.

Таблица 1

Связность типовых фаз

1	1																	
2	0,01	1																
3	0,30	0,14	1															
4	-0,16	-0,07	0,01	1														
5	0,33	-0,12	0,06	-0,21	1													
6	0,12	0,03	0,42	-0,05	0,27	1												
7	0,56	-0,01	0,05	-0,01	0,39	0,26	1											
8	0,39	0,13	0,40	0,29	-0,01	0,16	0,43	1										
9	0,20	-0,38	0,18	-0,14	0,10	0,39	0,18	0,06	1									
10	0,03	0,09	0,09	0,14	-0,04	0,12	0,02	0,17	0,05	1								
11	-0,12	0,03	0,62	0,14	0,14	0,51	0,07	0,34	0,31	0,13	1							
12	-0,06	-0,18	0,11	0,12	0,26	0,21	0,01	-0,02	0,18	0,09	0,21	1						
13	-0,05	-0,08	0,16	0,10	0,44	0,25	0,36	0,10	0,02	-0,08	0,39	0,05	1					
14	0,09	0,04	-0,01	0,32	-0,43	0,01	0,35	0,61	0,04	0,21	0,04	-0,14	-0,16	1				
15	0,26	-0,25	-0,13	0,03	0,17	0,05	0,26	0,03	0,48	-0,15	0,02	0,33	0,08	0,01	1			
16	-0,01	-0,18	0,08	0,01	0,11	0,22	0,01	-0,12	0,23	0,09	0,09	0,55	0,10	-0,12	0,22	1		
17	-0,03	-0,07	-0,07	-0,01	-0,09	-0,06	-0,03	-0,07	0,14	0,09	-0,01	0,09	-0,23	0,04	0,08	0,11	1	
<i>n</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	

Примечание. Коэффициенты корреляции типовых фаз выше 0,3 выделены жирным шрифтом; объем выборки равен 672; n – номер класса.

Часть типовых фаз (см. табл. 1) имеют между собой отрицательную корреляцию, причем для некоторых из них связь характеризуется коэффициентом корреляции среднего уровня (выше 0,3). Например, слабую обратную зависимость показывали типовые фазы для классов станций, расположенных на противоположных берегах Атлантического океана: станции Фенноскандии (класс № 1), расположенные на полуостровах Лабрадор, Новая Шотландия, на острове Ньюфаундленд (класс № 4). Еще более интересны пары типовых фаз с отрицательными связями, характеризующимися средним уровнем коэффициента корреляции (см. табл. 1): типовые фазы классов № 2 (Дальний северо-восток Евразии и Аляска) и № 9 (северные Восточно-Азиатские острова); № 5 (Британские острова) и № 14 (Причерноморская низменность, Карпаты, Нижне-Дунайская равнина, юг Балкан, Понтийские горы, Анатолия, Тавр, Армянское нагорье, средиземноморское побережье Северной и Восточной Сахары); № 13 (Пиренейская область, Средиземноморские хребты, Центральный и Южный Атлас) и № 17 (Низменность Инда, Северный Индостан, север плато Декан). Выявленные закономерности требуют дальнейших углубленных исследований.

Оценка отклонения типовых фаз от гармонической фазовой модуляции

Для выявления особенностей трансформации внешнего сигнала в поле приземной температуры была получена оценка индекса фазовой модуляции m . Индекс определялся путем сопоставления величины модулей первых четырех хорошо различимых кратных спектральных мод $M_{q,n}$ на рис. 1 с функцией Бесселя $J_q(m)$ при $q = 1, 2, 3, 4$. Расчет производился в соответствии с уравнениями

$$m : \varepsilon_n = \min_m \left(\frac{P_n(m)}{Q(m)} \right)^{1/2},$$

где

$$P_n = \sum_{q=2}^4 \left(\frac{M_{q,n}}{M_{1,n}} - \frac{J_q(m)}{J_1(m)} \right)^2, \quad Q = \sum_{q=2}^4 \left(\frac{J_q(m)}{J_1(m)} \right)^2. \quad (1)$$

В качестве оценки индекса модуляции m выбиралось его значение, обеспечивающее минимум относительной ошибки ε_n , для каждого климатического класса с номером n . Результаты расчетов для каждого класса приведены в табл. 2.

Величина ε_n характеризует отклонение от гармонической фазовой модуляции, что позволяет количественно оценить роль региональных климатоформирующих факторов. Малая величина ошибки обусловлена модуляцией, близкой к гармонической. Большое значение ошибки может говорить о наличии более сложного закона фазовой модуляции в связи с особенностями подстилающей поверхности. Модуляция, наиболее близкая к гармонической, выявлена в районе Североатлантического термогалинного

конвейера (классы №№ 16, 13) — центральная линзообразная масса теплой соленой воды (Саргассово море). Это подтверждает высокую энергетическую емкость и глобальное климатообразующее значение процессов Северной Атлантики. Здесь происходят максимально активные процессы тепло- и влагообмена. С удалением от этого района фазовая модуляция усложняется с усилением континентальности территории и сложности подстилающей поверхности. Вообще, это свойство характерно для классов станций, расположенных на побережьях с повышенной соленостью вод, к которым также относятся станции класса № 17 (побережье Персидского залива и Аравийского моря). Более слабая активность Тихого океана в этом смысле может быть связана с тем, что там выпадает гораздо больше осадков, распресняющих воду и «размывающих» отклик атмосферы на изменения внешних условий. Полагаем, эти зоны существенно реагируют даже на малые возмущения внешних влияющих факторов, приводя к изменениям скоростей испарения водяного пара в атмосферу и влияя так на процессы крупномасштабной циркуляции.

Таблица 2

Характеристики фазовой модуляции

Средняя широта климатического класса	n	m	$\varepsilon_n \cdot 100\%$
63,28	1	0,2643	40,77
61,16	2	0,4330	39,46
59,67	3	0,3325	57,28
56,16	4	0,3617	57,79
55,15	5	0,3801	20,72
53,82	6	0,3278	32,72
49,44	7	0,2390	45,21
49,34	8	0,5053	62,27
46,34	9	0,4795	33,94
45,56	10	0,4843	22,98
45,05	11	0,3380	55,12
39,23	12	0,2893	37,16
38,85	13	0,6406	9,45
38,39	14	0,3346	30,54
34,41	15	0,4295	55,49
30,91	16	0,3372	10,85
30,15	17	0,7762	15,40

Необходимы дальнейшие исследования выявленных особенностей в пространственной структуре, описание их механизмов. Подтверждение и обоснование этих закономерностей может существенно расширить возможности моделей климатической системы и оправдываемости прогнозных сценариев.

Заключение

Представлен алгоритм фазовой группировки, реализация которого для поля приземной температуры Северного полушария позволила 818-мерное пространство исходных рядов данных, измеренных за 56 лет, сократить до 17 кластеров с типовыми фазами, характеризующими синхронные изменения температурных колебаний. Оценены отклонения фазовой модуляции температурных рядов от гармонической фазовой модуляции. Классы станций, характе-

ризующиеся модуляцией, наиболее близкой к гармонической, расположены в районах максимально активного крупномасштабного энергообмена. Фаза как характеристика температурного колебания позволяет объективно выделять климатические классы и дает возможность в дальнейшем получать динамические климатические классификации, что актуально на фоне меняющихся климатических условий и имеет большое значение для стратегического планирования. Предложенный подход может использоваться как аналитическая основа для изучения изменений климата в любом пространственном масштабе только по данным о приземной температуре до заданного исследователем качественного уровня. Физическая обоснованность метода выделения климатических структур подтверждается соответствием основным закономерностям классических климатических типизаций, что позволяет еще раз убедиться в том, что фазированность, синхронность есть существенные свойства природно-климатических процессов, введение которых в анализ температурных полей позволило выявить ранее неизвестные закономерности, которые требуют дальнейших детальных исследований. Возможно, поиск синхронизации в нелинейных хаотических системах, чувствительных к начальным условиям, может стать одним из эффективных путей оптимизации прогнозных моделей.

1. *Изменения климата*, 2013 г.: Физическая научная основа. Вклад Рабочей группы I в Пятый оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата / Т.Ф. Стокер, Д. Цинь, Платтнер и др. Нью-Йорк, США; Соединенное Королевство, Кембридж: Кембридж юниверсити пресс, 2013. 222 с.
2. Григорьев А.А., Будыко М.И. Классификация климатов СССР // Изв. АН СССР. Сер. геогр. 1959. № 3. С. 3–19.
3. *Essenwanger O.M.* Classification of climates, World Survey of Climatology 1C, General Climatology. Amsterdam: Elsevier, 2001. 113 p.
4. *Köppen W.* Das geographische System der Klimate. Berlin: Verlag von Gebrüder Bornträger, 1936. 44 s.
5. *Kottek M., Grieser J., Beck C., Rudolf B., Rubel F.* World map of the Köppen–Geiger climate classification updated // *Meteorologische Zeitschrift*. 2006. V. 15, N 3. P. 259–263.
6. *Peel M.C., Finlayson B.L., McMahon T.A.* Updated world map of the Köppen–Geiger climate classification // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2007. V. 11, iss. 5. P. 1633–1644.
7. *Rohli R.V., Joyner T.A., Reynolds St.J., Shaw C., Vazquez J.R.* Globally Extended Köppen–Geiger climate classification and temporal shifts in terrestrial climatic types // *Phys. Geogr.* 2015. V. 36, iss. 2. P. 142–157.
8. *Stern H., DeHoedt G., Ernst J.* Objective classification of Australian climates // *Austral. Meteorol. Mag.* 2000. V. 49, N 2. P. 87–96.
9. *Zhang X., Yan X.* Spatiotemporal change in geographical distribution of global climate types in the context of climate warming // *Clim. Dyn.* 2014. V. 43, N 3. P. 595–605. DOI: 10.1007/s00382-013-2019-y.
10. *Franziska H., Körper J., Spanghel T., Cubasch U.* Shifts of climate zones in multi-model climate change experiments using the Köppen climate classification // *Meteorologische Zeitschrift*. 2012. V. 21, N 2. P. 111–123.
11. *Crosbie R.S., Pollock D.W., Mpelasoka F.S., Barron O.V., Charles S.P., Donn M.J.* Changes in Köppen–Geiger climate types under a future climate for Australia: Hydrological implications // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2012. V. 16. P. 3341–3349. DOI: 10.5194/hess-16-3341-2012.
12. *Bieniek P.A., Bhatt U.S., Thoman R.L., Angeloff H., Partain J., Papineau J., Fritsch F., Holloway E., Walsh J.E., Daly C., Shulski M., Hufford G., Hill D.F., Calos S., Gens R.* Climate divisions for Alaska based on objective methods // *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 2012. V. 51, iss. 8. P. 1276–1289.
13. *Тартаковский В.А.* Синхронный анализ рядов чисел Вольфа и температуры с метеостанций Северного полушария Земли // *Оптика атмосф. и океана*. 2015. Т. 28, № 2. С. 182–188.
14. *Тартаковский В.А., Кусков А.И.* Декомпозиция наблюдаемых рядов температуры и чисел Вольфа. Свойства средних величин // *Оптика атмосф. и океана*. 2013. Т. 26, № 5. С. 414–421.
15. *Тартаковский В.А., Крутиков В.А., Волков Ю.В., Чередыко Н.Н.* Классификация климата путем анализа фазы температурных рядов // *Оптика атмосф. и океана*. 2015. Т. 28, № 8. С. 711–718.
16. *Архив Университета Восточной Англии.* URL: <http://www.metoffice.gov.uk>, <http://www.cgu.uea.ac.uk>
17. *Кондратьев В.И., Светлова Т.П., Далюк И.В.* О выделении информатив-нооднородных зон по климатическим данным // *Труды ГГО*. 2003. Вып. 551. С. 51–57.
18. *Гоноровский И.С.* Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Радио и связь, 1986. 512 с.
19. *Алисов Б.П., Полтараус Б.В.* Климатология. М.: Изд-во Московского ун-та, 1974. 300 с.
20. *Hsiang S.M., Meng K.C., Cane M.A.* Civil conflicts are associated with the global climate // *Nature (Great Brit.)*. 2011. V. 476, iss. 7361. P. 438–441.

N.N. Cheredko, V.A. Tartakovsky, V.A. Krutikov, Yu.V. Volkov. **Classification of climate of the Northern hemisphere using phases of temperature signals.**

This paper presents the results of structuring surface temperatures in the Northern hemisphere for the period of modern climate changes. Main idea of the proposed classification is the geographic conditionality of the phase modulation of the temperature signal. The criterion is the consistency, namely, phasing of the temperature oscillations in certain geographic areas. We believe that changes in the synchronization modes of climatic processes during changing climate lead to transformations of the spatial structure of the temperature field because of transition of the system to the new state.

The temperature series are represented as phase-modulated oscillations. External and internal disturbances, having influenced on the climate system, form a complicated modulation of the phase, and it is partly corresponded to these ones. Initial temperature space of 818 series is structured into 17 regional clusters, where the temperature changes occur synchronously. Properties of the resulting clusters and their compliance with the known climatic classifications are discussed. The classifying algorithm affords ground for the researchers to choose the degree of differentiation of the investigated field depending on the task. The phase modulation indices were evaluated, to identify manifestations of the external forcing in the surface temperature. Inconsistency

of the indices to those in the case of the harmonic phase modulation allows quantifying the role of the regional climate-factors for each class. Modulation, which is the closest to the harmonic one, was found in the area of the North Atlantic thermohaline conveyor.

During the study of the climate change, the proposed approach can be used as an analytical framework on any spatial scale, only by data on the surface temperature, and with predetermined level of detalisation. Searching synchronization in nonlinear chaotic systems may become one of the perspective ways to optimize the predictive models.