

УДК 551.501

# Основные статистические характеристики теплового поля температуры в приземном слое атмосферы над территориями России и сопредельных государств

В.А. Крутиков, А.И. Кусков, В.А. Тартаковский, Э.В. Иванова\*

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

Поступила в редакцию 13.07.2012 г.

Предлагается способ разложения полей температуры на ортогональные составляющие. В качестве исследуемой территории была выбрана территория России и стран ближнего зарубежья, а также Северной Европы. Рассчитаны величина долговременного тренда, амплитуда годового хода и аномалия. Построены поля средней многолетней, минимальной и максимальной температуры воздуха, тренда, амплитуды и сезонной составляющей. Показан отопляющий эффект Гольфстрима в холодный сезон года. Выявлены характерные поля температуры для зимнего и летнего периодов времени.

*Ключевые слова:* температурное поле, разложение на составляющие, глобальный масштаб; thermal decomposition of a field into components, global scale.

## Введение

Климатические условия всегда оказывали существенное воздействие на жизнь и деятельность человека. В процессе эволюции планеты Земля эти условия постоянно изменялись. В последние годы проблема изменения климата вызывает особый интерес у специалистов из разных областей науки и техники. Основная причина этого интереса заключается в том, что не только жизнь и деятельность общества зависят от состояния окружающей среды и тенденции ее развития, но и антропогенная составляющая стала в значительной мере влиять на состояние природы и направление эволюции. Поэтому все более актуальным становится вопрос последствий антропогенного воздействия человека на климат.

Под изменением климата обычно понимается изменение комплекса статистических характеристик метеорологических величин от одного многолетнего периода к другому. Эти изменения происходят более или менее плавно под влиянием естественных и антропогенных факторов. Изучение масштабов и закономерностей современных изменений климата является главной задачей мониторинга. В то же время мониторинг может стать эмпирико-статистической основой долгосрочных прогнозов погоды.

Целью работы является получение статистических характеристик поля температуры в приземном слое атмосферы над территориями России и сопредельных государств, что раскрывает основные закономерности распределения температуры в пространстве и времени.

## История вопроса

Выявлению изменений климата в различных регионах мира посвящено большое количество научных исследований. Наиболее часто изменение климата ученые связывают с долговременным изменением полей температуры. На основе материала, накопленного за многие десятилетия, изменение термического режима достаточно широко представлено в отечественной и зарубежной литературе. Над этой проблемой работали А.И. Будыко, К.Я. Винников, Г.В. Груза, Э.Я. Ранькова, П.Я. Гройсман, К.М. Лугина, R. van Hans, D. Parker и др. [1–6].

В работе [7] проанализированы многолетние метеорологические наблюдения в Северо-Западном регионе России и представлены исследования среднемесячных значений основных метеорологических величин с 1961 по 1993 г. Полученные результаты свидетельствуют об изменении климатического режима северо-запада России. При этом оказалось, что рост среднемесячной температуры приземного воздуха наиболее сильно выражен весной, что приводит к более раннему наступлению периода с температурой выше 0,5 и 10 °С. Минимальные температуры растут быстрее максимальных. За исследуемый период в Северо-Западном регионе наблюдается увеличение относительной влажности, что способствует росту количества облаков и уменьшению числа часов солнечного сияния.

\* Владимир Алексеевич Крутиков (krutikov@imces.ru); Аркадий Игнатьевич Кусков (arcus1309@rambler.ru); Валерий Абрамович Тартаковский (tv@imces.ru); Элла Владимировна Иванова (ehllai@rambler.ru).

В работе [8]-с использованием вейвлет-преобразования исследованы межгодовые колебания солнечной активности и температуры воздуха в Томске.

Авторы работы [9] исследовали современные изменения температуры воздуха на территории Европы. В частности, рассматривался метод определения однородных климатических районов, основанный на подобии параметров функции, описывающей сезонные и долговременные изменения температуры воздуха в каждом пункте наблюдений. Этот метод применялся для климатического районирования территории Европы. Для его реализации авторы использовали ряды среднемесячных температур воздуха за столетний период наблюдений, на основе которых рассчитывались среднегодовая температура воздуха и параметры сезонной функции. По каждой рассматриваемой характеристике было выделено несколько однородных районов с однотипными климатическими тенденциями. Анализ полученных в работе территориальных закономерностей вековых изменений температуры воздуха в однородных районах позволяет сделать следующие общие выводы.

1. Отмечается увеличение среднегодовой температуры воздуха во всей Европе за исключением ее юго-восточной части, где она уменьшается.

2. При общем тренде увеличения температуры имеются региональные различия. В Восточной Европе тенденция роста температуры монотонная и устойчивая, в Центральной и Западной Европе существенное увеличение температуры началось только в 1960–1970-х гг., а в Северной Европе происходило уменьшение температуры и с 1990-х гг. наметилась тенденция ее увеличения.

Вместе с тем сложность климатической системы и большое количество взаимосвязанных физических процессов, происходящих с различной скоростью и различными временами релаксации, вызывают большие трудности в выделении истинных причин климатического изменения. По-видимому, в большинстве случаев нет одной единственной причины, и относительное значение различных эффектов зависит в большей степени от масштабов времени и пространства, характерных для рассматриваемого состояния климата. Например, межгодовые различия в температуре поверхности моря и общем количестве тепла, запасаемого океаном, могут быть связаны с годовыми изменениями циркуляции атмосферы, в то время как для межгодовых различий в распространении горных ледников такой зависимости не существует.

Одной из основных задач анализа ~~временных рядов~~ составляющих температурного поля является выявление из них наиболее значимых составляющих [10, 11]. К настоящему времени известно, что изменение приземной температуры характеризуется хорошо выраженным годовым ходом, который обусловлен астрономическим фактором с временным масштабом в один год (изменение притока солнечной радиации связано с изменением угла наклона земной оси по отношению к плоскости эклиптики).

Анализ работ [8–11] свидетельствует о наличии во временных рядах температуры долговременных трендов. В этой связи принцип разложения времен-

ных рядов на составляющие основан на предпосылке, что значения температуры, порожденные процессами меньшего масштаба, колеблются около величин, сформированных процессами большего масштаба. Это вполне увязывается с принципом иерархичности строения геосистем и иерархии их «целей». Цель развития системы высокого уровня иерархии — организовать работу входящих в нее систем более низкого ~~иерархического~~ уровня таким образом, чтобы не нарушалась иерархия. Так, среднемесячные значения температуры в годовом цикле совершают колебания около долговременного тренда, аномалии среднемесячных значений колеблются около годового хода и т.д.

Мы в своей работе сформулировали некоторое правило, которое, к сожалению, часто упускается из виду: при анализе рядов наблюдений необходимо предложить процедуру анализа, соответствующую природе полученных данных. Так, в классической климатологии, по существу, принималась гипотеза о постоянстве климата, т.е. ~~гипотеза~~ о том, что все данные, которые подвергаются анализу, являются выборкой из стационарной (однородной) совокупности. В связи с этим и было распространено мнение, что чем длиннее выборка, тем лучше для получения оценок климатических характеристик [11]. Однако в условиях перестройки климата отмечаются периоды длительной нестационарности тенденций хода температуры.

Основную задачу эмпирико-статистического исследования климатической системы можно, вообще говоря, сформулировать как задачу идентификации состояния ~~климатической~~ системы и количественной оценки параметров этого состояния на основе некоторой вероятностной модели. В зависимости от использованной априорной информации о системе задача идентификации может быть сформулирована в узком и широком смысле.

-Задача идентификации состоит в оценивании параметров состояния системы по результатам наблюдений за этой системой в реальных условиях. При этом считается, что структура системы и класс моделей, к которым относится система, известны, т.е. априорная информация о климатической системе достаточно велика.

Однако априорная информация об объекте при идентификации в широком смысле практически отсутствует или очень бедна. В связи с этим на основании только эмпирических данных приходится решать, какую выбрать структуру модели или класс моделей, нужно ли оценить степень стационарности, оценить линейность связей между переменными, какие переменные, характеризующие состояние системы и ее изменений, следует выбрать. Таким образом, чем меньше количество априорной информации используется, тем задача становится ближе к задаче простого статистического оценивания.

Однако сразу следует заметить, что никакое оценивание невозможно при полном отсутствии априорной информации, которую в минимальном случае составляет статистическая гипотеза о постоянстве генеральной совокупности (или статистического

ансамбля) либо стационарности процесса. Принятые гипотезы в этом случае характеризуют выбранную вероятностную модель, диктующую методы статистической обработки.

Для интерпретации поля температуры на исследуемой территории была принята априорная гипотеза, заключающаяся в том, что среднемесячную температуру любого месяца можно представить в виде трех составляющих — долговременного тренда, годового хода и аномалий. При этом предполагается, что астрономические и внешние геофизические факторы остаются неизменными. Исходя из такой постановки вопроса, предполагают, что долговременный тренд сформирован изменениями газового состава атмосферы, тогда как годовой ход в основном зависит от совместного влияния притока тепла и характера подстилающей поверхности, а аномалии порождаются изменениями характера атмосферной циркуляции.

### Разложение температурных рядов на составляющие

Представим среднемесячные значения температуры  $T(t)$  следующим образом:

$$T(t) = T_{tr}(t) + T_m + \Delta T(t), \quad (1)$$

где  $T_{tr}(t)$  — величина долговременного тренда температуры;  $T_m$  — среднее значение температуры конкретного месяца  $m$ ;  $\Delta T(t)$  — отклонение средних месячных значений температуры конкретных месяцев от их климатических значений (аномалия);  $t$  — ~~усл~~ порядковый номер (время) с начала временного ряда.

Разложение ряда на компоненты осуществляется поэтапно. С учетом исходных значений среднемесячной температуры выделяется долговременный тренд  $T_{tr}(t)$ . Для определения характера наблюдаемого долговременного изменения температуры целесообразно определять тренд в виде линейной функции

$$T_{tr}(t) = \alpha t + \beta, \quad (2)$$

где  $\alpha$  — средняя скорость изменения температуры за исследуемый период;  $\beta$  — постоянная составляющая. Для оценивания параметров линейного тренда используется метод наименьших квадратов.

Далее из исходного ряда удаляется величина тренда и находится разность

$$T_m + T(t) = T(t) - T_{tr}(t). \quad (3)$$

Годовой ход можно определять разными способами. Одним из них является стандартный расчет средних многолетних значений конкретного месяца. Другой способ определения годового хода заключается в описании его гармонической функцией

$$T_m = a \sin \left[ \frac{\pi}{6}(m-1) \right] + b \cos \left[ \frac{\pi}{6}(m-1) \right], \quad (4)$$

где постоянные для временного ряда коэффициенты  $a$  и  $b$  рассчитываются как

$$a = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n T_i \sin \left[ \frac{\pi}{6}(i-1) \right]; \quad b = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n T_i \cos \left[ \frac{\pi}{6}(i-1) \right], \quad (5)$$

где  $i$  — порядковый номер члена ряда.

Для определения амплитуды годового хода используется выражение

$$A = \sqrt{a^2 + b^2}. \quad (6)$$

С помощью амплитуды годового хода и величины фазового сдвига

$$\varphi = \arctg(a/b) + \pi \quad (7)$$

выражение для годового хода температуры можно представить в виде

$$T_m = A \cos \left[ \frac{\pi}{6}(m-1) - \varphi \right]. \quad (8)$$

Аномалии (остаток) температуры получаются как разность между фактическим значением температуры конкретного месяца и суммой долговременного тренда и сезонной составляющей:

$$\Delta T(t) = T(t) - [T_{tr}(t) + T_m]. \quad (9)$$

### Материалы исследования и обсуждение полученных результатов

Для исследования были привлечены среднемесячные температуры воздуха на 249 станциях на территориях России, государств ближнего зарубежья, Финляндии, Швеции, Норвегии, Северной Германии. Станции Скандинавского п-ова и Северной Германии были привлечены для более объективного изучения влияния течения Гольфстрим. При таком охвате территорий исследования ранее не проводились.

Характер среднего многолетнего поля температуры над рассматриваемой территорией представлен на рис. 1, а (цв. вклейка).

Анализ показывает, что средняя годовая многолетняя температура имеет очаговый характер с одним очагом, центр которого расположен в районе моря Лаптевых, и вид замкнутой изотермы  $-14^\circ\text{C}$ . Остальные изотермы огибают очаг холода. Поле изотерм от  $0$  до  $-12^\circ\text{C}$  характеризуется большим горизонтальным градиентом, при этом изотермы до  $2^\circ\text{C}$  ориентированы с северо-запада на юго-восток. Такой характер ориентации изотерм распространяется до верхнего течения Оби и Енисея, а южнее изотермы характеризуются распределением, близким к зональному.

Из анализа рис. 1, б следует, что минимальная температура воздуха за весь исследуемый период изменяется от  $-50$  до  $-5^\circ\text{C}$ . Очаг минимальных температур имеет замкнутый характер и расположен в районе Верхоянск—Оймякон, от центра отходят две ложбины, одна ориентирована на запад, а другая на восток. Очаг минимальных температур связан с восточным отрогом азиатского антициклона.

Восточная ложбина достигает Берингова пролива, а западная доходит до Уральских гор. Изотермы в районе Скандинавии расположены практически меридионально, и гребень тепла доходит до острова Новая Земля. Над Каспийским морем отмечается также локальный гребень тепла с изотермой до 10 °С. Северный гребень тепла связан с наибольшим влиянием Гольфстрима, южный гребень — с отепляющим воздействием Каспийского моря. На востоке континента изотермы повторяют береговую линию с большими градиентами.

Анализ поля максимальных температур (рис. 1, *в*) показывает, что в зоне на южной конечности острова Шпицберген поле температур является малоградиентным. В высоких широтах изотермы имеют широтный характер с высоким горизонтальным градиентом. Изотерма 16 °С на востоке повторяет береговую линию, на юге, между Аральским и Каспийским морями, отмечается гребень тепла, что обусловливается влиянием пустынного климата плато Устюрт.

На всей исследуемой территории величина тренда (рис. 1, *з*) практически одинакова и изменяется от 0,1 до 0,4 °С/10 лет. Однако со статистической точки зрения такой тренд не значим и ошибка расчета практически равна величине самого тренда или больше.

Амплитуда годового хода имеет четко выраженную структуру (рис. 1, *д*) с максимальным значением в районе Верхоянска и Оймякона и составляет 32 °С. По мере удаления от этого центра амплитуда уменьшается до 10 °С.

Вклад сезонной составляющей в общую изменчивость поля температуры максимален в районе Верхоянска и Оймякона (рис. 1, *е*) и равен 98%. Минимальное значение вклада наблюдается на станции Vjølmoåa (остров Шпицберген) и составляет 74%, что объясняется выраженным морским климатом и возможным охлаждающим эффектом Гольфстрима. На большей части исследуемой территории доля сезонной составляющей превышает 90%.

Если учесть небольшой вклад тренда в общую изменчивость, то изолинии аномальной температуры повторяют изолинии вклада сезонной составляющей. Таким образом, в районе Верхоянска и Оймякона вклад аномалий в общую изменчивость минимален, что свидетельствует об устойчивости климата данного района. А над морями, особенно на северо-западе, вклад значителен (26%).

Результаты разложения поля температуры (с применением метода главных компонент) на ортогональные составляющие, которые позволяют получить типовое поле температуры за каждый сезон года, приведены в таблице.

Видно, что с сентября по апрель температурное поле соответствует первой компоненте с коэффициентами корреляции 0,88–0,99. В июне–июле отмечается перестройка температурного поля и конфигурация изотерм соответствует второй компоненте с коэффициентами корреляции 0,77–0,80. В мае и августе отмечается переходный тип, в это время температурные поля имеют характер как первой, так и второй компоненты. (Цифры, выделенные курси-

вом, указывают на отношение поля температуры конкретного месяца к той или иной компоненте.)

**Параметры разложения поля температуры в годовом цикле на ортогональные составляющие ( $a$  — собственный вектор,  $r$  — коэффициент корреляции,  $\sigma$  — дисперсия,  $T$  — средняя температура класса, подстрочные индексы указывают на номер компоненты)**

Месяц	$\bar{T}$	$\sigma$	$a_1$	$a_2$	$r_1$	$r_2$
Январь	-15,3	0,74	0,399	-0,321	0,96	-0,28
Февраль	-13,8	0,68	0,377	-0,202	0,98	-0,19
Март	-7,5	0,58	0,325	0,042	0,99	0,05
Апрель	0,8	0,52	0,267	0,295	0,92	0,37
Май	8,6	0,43	0,194	0,38	0,80	0,58
Июнь	14,6	0,36	0,126	0,425	0,62	0,77
Июль	17,5	0,33	0,107	0,411	0,57	0,80
Август	15,7	0,32	0,132	0,329	0,73	0,66
Сентябрь	10,1	0,32	0,162	0,201	0,88	0,4
Октябрь	2,2	0,43	0,240	0,056	0,98	0,08
Ноябрь	-6,9	0,65	0,358	-0,15	0,98	-0,15
Декабрь	-13,0	0,74	0,401	-0,299	0,96	-0,26
Год	1,1	0,46	0,257	0,097	0,99	0,14

Следует отметить (таблица), что при переходе от типового поля к полям конкретных месяцев рассчитанные значения температуры и фактическая температура в полной мере не совпадают. Тем не менее коэффициент корреляции между фактическими и расчетными значениями температуры позволяет оценить, является полученное поле типовым или нет. Ошибку расчетных значений можно свести к минимуму, если использовать не одну, а несколько компонент. Однако в этом случае затруднено выявление общих закономерностей. При этом следует иметь в виду, что максимальные ошибки расчетных значений будут максимальными в случае, когда по одной компоненте отмечаются минимальные значения, а по другой максимальные.

Этот эффект отмечается в районе Верхоянска, Оймякона, Якутска, где поле компонент указывает на то, что в этом районе летом отмечаются максимальные температуры на исследуемой территории. Однако и такой недостаток не умаляет достоинств метода. *Во-первых*, метод главных компонент позволяет получить поле, конфигурация изолиний которого не изменяется при переходе от месяца к месяцу внутри периода, к которому относится типовое поле, а изменяются только значения компонент; *во-вторых*, переход к типовым полям позволяет значительно сжать информацию; *в-третьих*, дает возможность выделить основные этапы формирования поля.

Применение метода главных компонент позволило выделить два типа поля по зимнему и летнему сезонам.

*Зимний тип* поля (рис. 2, *а*) (цв. вклейка) охватывает период с сентября по май, характеризуется циклической структурой с минимальными значениями первой компоненты в районе Верхоянска и Оймякона.

С удалением от центра величина ее растет и на западе территории значения из отрицательных переходят в положительные. Выделяются два очага тепла в районе Скандинавии и Каспийского и Аральского морей. В районе Скандинавии это обусловлено

отепляющим воздействием Гольфстрима, а на юго-западе территории влиянием двух крупных водоемов — Каспийского и Аральского морей.

*Летний тип* поля (рис. 2, б) наблюдается в течение 2 мес (июнь, июль) и характеризуется положительными значениями второй компоненты с центром в районе Верхоянска—Оймякона—Якутска. Изолинии располагаются вдоль береговой линии как на севере, так и на востоке исследуемой территории. Май и август характеризуют переходной тип, имеющий свойства как холодного, так и теплого периодов. Именно в этот период времени Гольфстрим оказывает охлаждающее влияние. А на юго-западе при этом отмечается отепляющий эффект, связанный с пустынными ландшафтами.

### Заклучение

Итак, на основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. Среднее многолетнее поле температуры над исследуемой территорией характеризуется циклической структурой с замыканием изотерм вокруг района Верхоянска—Оймякона. По мере удаления от центра температура увеличивается.

2. Поле амплитуды температуры повторяет поле средней многолетней температуры.

3. Вклад сезонной составляющей в общую изменчивость поля температуры в районе Верхоянска—Оймякона составляет 98%, а минимальные значения (74% общей изменчивости) наблюдаются в районе Баренцева моря. Из этого следует, что территории, расположенные на континенте, в меньшей степени подвержены влиянию циркуляции, чем морские территории.

4. Выявлены два типа температурного поля зимнего и летнего характера, которые имеют циклическую

структуру. При этом зимой Гольфстрим оказывает отепляющее воздействие, а летом охлаждающее.

1. Будыко М.И. Климат в прошлом и будущем. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 350 с.
2. Будыко М.И., Ефимова Н.А., Лугина К.М. Современное потепление // Метеорол. и гидрол. 1993. № 7. С. 29–35.
3. Винников К.Я., Гройсман П.Я., Лугина К.М. и др. Изменения средней температуры воздуха Северного полушария за 1841–1985 гг. // Метеорол. и гидрол. 1987. № 1. С. 45–56.
4. Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Структура и изменчивость современного климата // Метеорол. и гидрол. 1989. № 7. С. 14–18.
5. van Hans R. Zmiany klimatu w Europie: wplywy urbanizacji i efekt cieplarniany // Wiad. inst. meteorol. i gosp. wod. 1993. V. 16, N 1. P. 75–89.
6. Parker D., Jones P., Follang C. Interdecadal changes of surface temperature since the late nineteenth century // J. Geophys. Res. D. 1994. V. 99, N 7. P. 14373–14399.
7. Кобак К.И., Лугина К.М., Кондрашева А.А. и др. Анализ многолетних метеорологических наблюдений в Северо-Западном регионе России // Метеорол. и гидрол. 1999. № 1. С. 30–40.
8. Ипатов И.И., Кабанов М.В., Логинов С.В. Применение вейвлет-преобразования для анализа межгодовых колебаний приземной температуры в Томске и солнечной активности // Оптика атмосф. и океана. 2001. Т. 14, № 4. С. 280–285.
9. Лобанов В.А., Анисимов О.А. Современные изменения температуры воздуха на территории Европы // Метеорол. и гидрол. 2003. № 2. С. 5–14.
10. Груза Г.В. Мониторинг современного климата как эмпирико-статистическая основа долгосрочных прогнозов погоды // Тр. ВНИИГМИ-МЦД. 1979. Вып. 129. С. 3–16.
11. Груза Г.В., Рейтенбах Р.Г. Статистика и анализ гидрометеорологических данных. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 216 с.

### *V.A. Krutikov, A.I. Kuskov, V.A. Tartakovskii, E.V. Ivanova. Basic statistical characteristics of the temperature field in the ground atmospheric layer above the Russia and contiguous states.*

We propose a method of temperature fields for orthogonal decomposition of components. The territory of Russia and CIS countries was studied, as well as Northern Europe. Value of the long-term trend, the amplitude of the annual progress and the anomaly were calculated. Fields were built of multi-year minimum and maximum temperatures, the trend, the amplitude, and the seasonal component. The effect of the Gulf stream in the cold season was shown. Characteristics of temperature field for winter and summer periods were revealed.

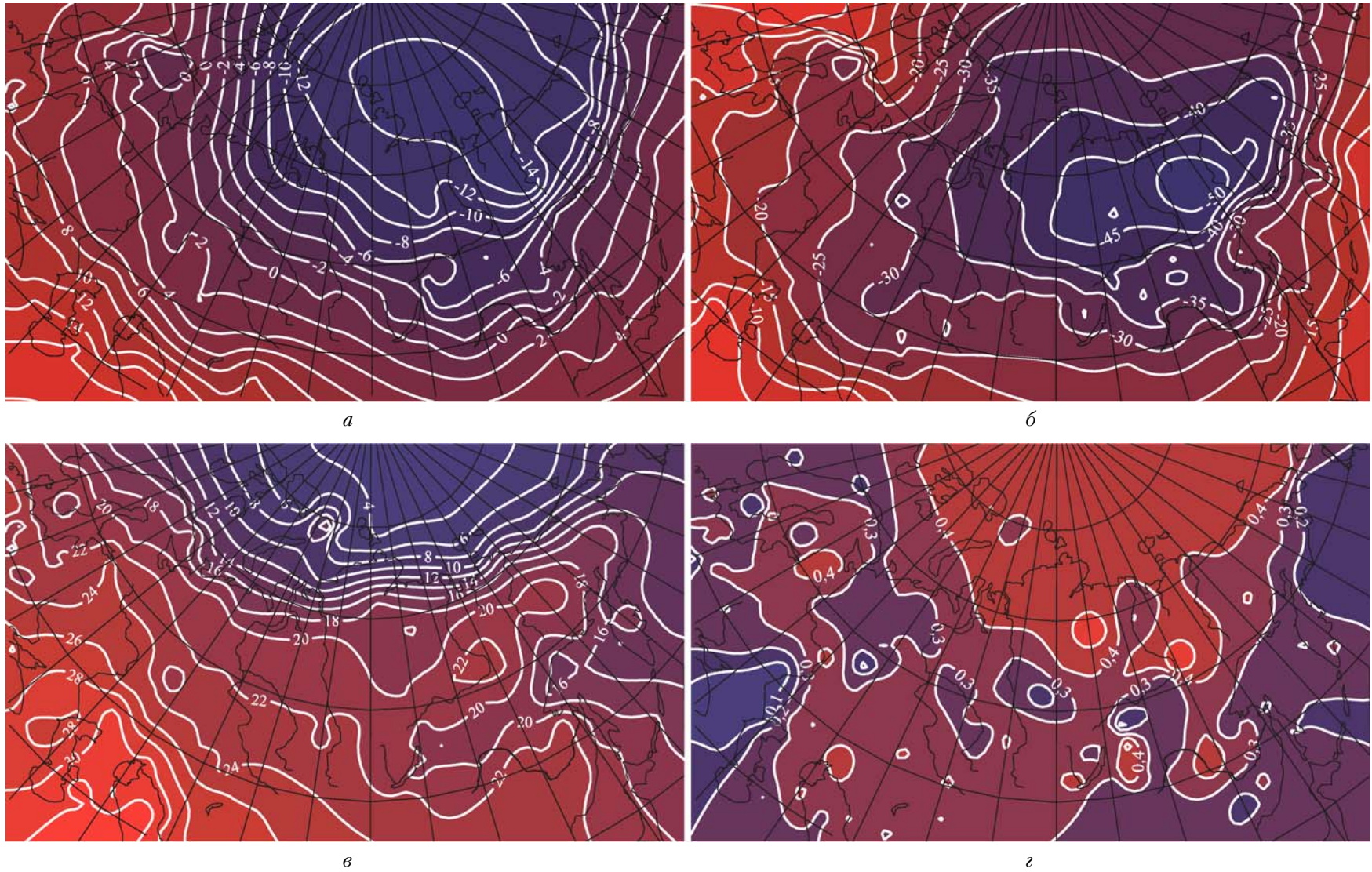
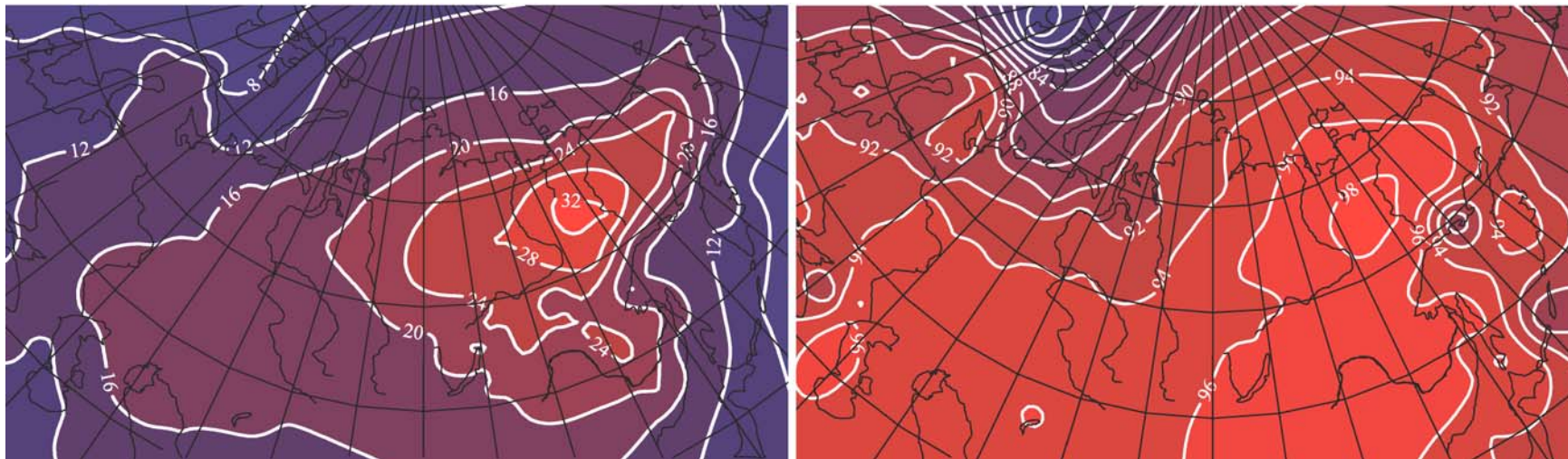


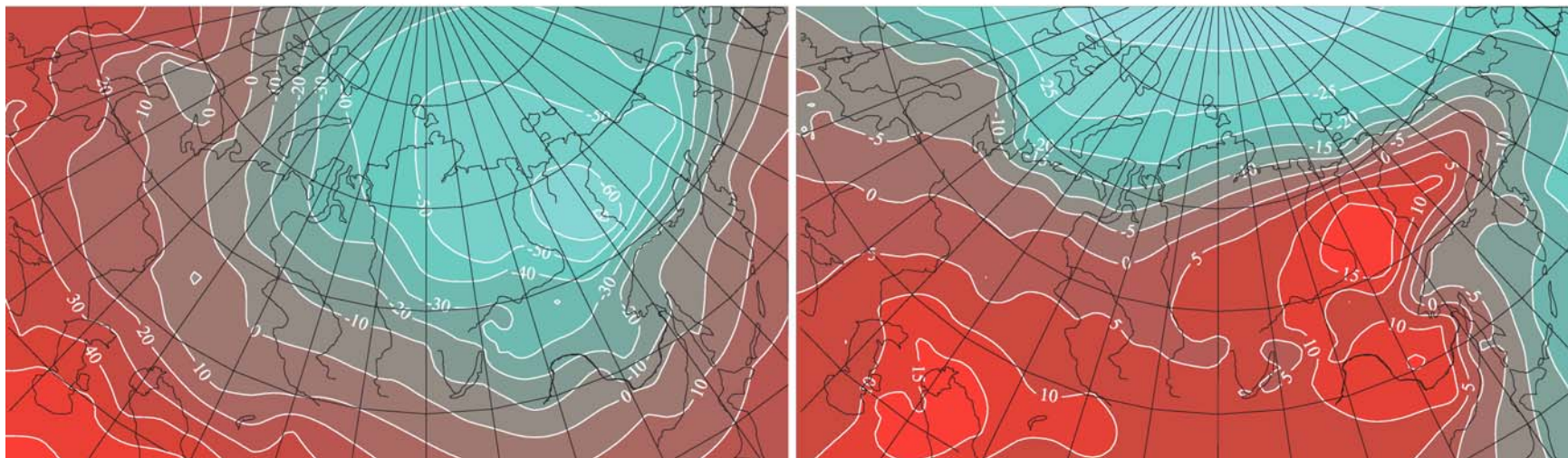
Рис. 1. Территориальное разложение температурных рядов на составляющие: *a* – годовая многолетняя температура воздуха; *б* – минимальная температура воздуха; *в* – максимальная температура воздуха; *г* – тренд



*d*

*e*

Рис. 1. Окончание: *d* – амплитуда; *e* – сезонная составляющая



*a*

*b*

Рис. 2. Распределение компонент по исследуемой территории: *a* – 1-я компонента; *b* – 2-я компонента