

ПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ДИНАМИКА ГЕОСИСТЕМ

УДК 551.583/551.581.2/551.585

ТРАНСФОРМАЦИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ ПОЛЯ
ПРИЗЕМНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЯ

© 2020 г. Н. Н. Чередыко^{а, *}, В. А. Тартаковский^{а, **}, Ю. В. Волков^{а, ***}, В. А. Крутиков^{а, ****}

^аФГБУН Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

*e-mail: atnik3@rambler.ru

**e-mail: trtk@list.ru

***e-mail: yvvolkov@tpu.ru

****e-mail: krutikov@imces.ru

Поступила в редакцию 15.10.2018 г.

После доработки 26.03.2019 г.

Принята к публикации 03.10.2019 г.

Выбор информативных критериев и объективных методов классификации остается актуальной задачей климатологии. Исследуются изменения температуры по данным 818 станций Северного полушария за 1955–2011 гг. Приведены результаты климатической кластеризации для разных временных периодов, соответствующих основным тенденциям изменения глобальной температуры, на основе алгоритма, использующего для классификации согласованность изменений фазы колебаний приземной температуры. Степень согласованности оценивалась коэффициентом корреляции между фазами исходных температурных рядов. Выявлено, что на фоне роста глобальной температуры происходит перестройка в структуре согласованности температурных колебаний, наблюдается переход многих станций более северных классов в более южные. Районами Северного полушария, где метеостанции изменили свою структурную принадлежность в разные периоды, что может служить показателем чувствительности к глобальным климатическим трендам, являются территории Фенноскандии, Британских островов, Центральноевропейской географической области и Среднеевропейской равнины, Гренландии, Российской горно-островной Арктики и Субарктики, п-ва Флорида, а также станции, расположенные в районах горного рельефа Евразии и в зонах влияния основных центров действия атмосферы.

Ключевые слова: классификация и изменения климата, согласованность температурных колебаний

DOI: 10.31857/S2587556620010057

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Выявление зон со сходными климатическими особенностями признавалось важным еще древними греками, выделявшими пять зон на земном шаре по углу падения солнечных лучей к подстилающей поверхности. Простые классификации климата по температуре воздуха появились в конце XIX в. [34]. Позже создаются классификации, основанные на комплексе метеопараметров [26, 27]. Определяющая роль в развитии климатических классификаций принадлежит В.П. Кеппену, А.И. Воейкову, Л.С. Бергу, Б.П. Алисову, позднее А.А. Григорьеву совместно с М.И. Будыко.

Повышенное внимание данной тематике обусловлено потребностями увеличивающегося населения планеты и развитием его хозяйственной деятельности. Выбор информативных критериев и объективных методов классификаций, по-прежнему, остается актуальной задачей климатологии. Классические климатические классификации яв-

ляются индикацией климатических различий, но не изменений климата, которые, безусловно, должны сопровождаться трансформацией полей отдельных его элементов, что выводит задачу классификации климатов в разряд решаемых в оперативном режиме для повышения эффективности социально-экономической адаптации к меняющимся условиям.

В ряде работ предлагается пересмотр структуры классических климатических классификаций, главным образом, классификации В.П. Кеппена как наиболее используемой в мире [28, 30–32]. Целью данного исследования являлось выявление особенностей структурирования температурного поля Северного полушария в разные временные интервалы с использованием алгоритма “климатической кластеризации”, разработанного нами ранее [19] как варианта объективной классификации климата, для выявления территорий, наиболее чувствительных и наиболее устойчивых к изменениям глобальной температуры.

Чувствительными принимаем территории, где метеостанции изменяли свою структурную принадлежность в разные периоды, устойчивыми — где не выявлены изменения структуры поля. Полученные закономерности климатического структурирования в целом сравнивались с классификацией климатов В.П. Кеппена, в которой зональность климата выделяется, главным образом, по термическим границам.

Чаще всего для задач объективной классификации применяют методы кластерного [6, 12, 20, 22, 35] и факторного анализа [9, 18]. Подходы к определению критериев классификации сводятся, в основном, к определению максимума сходства параметров внутри класса и максимума различности между классами. Обзор основных количественных методов оценки качества кластеризации приведен в [16]. К недостаткам можно отнести отсутствие подхода к выбору критериев классификации, имманентных климатической системе. Кроме того, вносится субъективность, когда изначально задается количество классов.

В предлагаемом нами методе количество классов заранее не задается, однородные районы выделяются в результате итераций объективно. Экспертно выбирается только пороговый уровень коэффициента корреляции как показатель отделимости классов. Путем его варьирования можно получать структуру классов для различного временного или пространственного масштаба, в зависимости от задач исследования. Результат представляет естественную совокупность структур, которая отражает объективную картину согласованности колебаний исследуемой климатической характеристики.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В основе данного исследования лежит принцип синхронности, который состоит в совпадении существенных признаков колебательных природно-климатических процессов [17]. Внешнее вынуждающее воздействие возмущает геосферу, что выражается в изменении характера колебаний параметров ее компонент, а также в синхронизации инициированных им процессов, что позволяет получать новую информацию в рамках феноменологического подхода. Изменения режимов синхронизации природно-климатических процессов могут быть признаком перехода системы в новое качественное состояние [11], в частности, происходит пространственная трансформация структуры температурного поля и климатической системы в целом. Если рассматривать синхронность как сфазированность температурных колебаний, то группировка станций по особенностям изменения фазы температурных рядов дает возможность проводить классификацию климата и исследо-

вать пространственную и временную трансформацию этих структур.

Температурные колебания $T(\tau)$ в силу наличия в них несущего колебания, связанного с движением Земли по орбите, имеют полосовой Фурье-спектр. В этом случае может быть однозначно введена фаза колебания на основе введенного Д. Габором [24] аналитического сигнала $W(\tau)$:

$$W(\tau) = T(\tau) + iV(\tau), \quad V(\tau) = \frac{1}{\pi} \text{v.p.} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{T(s)}{\tau - s} ds, \quad (1)$$

где $V(\tau)$ — мнимая составляющая $W(\tau)$, которая является Гильберт-трансформантой [24] его действительной части $T(\tau)$, s — переменная интегрирования, несобственный интеграл определен в смысле главного значения по Коши (v.p.) в тех случаях, когда $s \rightarrow \pm\infty$ и при $\tau = s$. Аналитический сигнал $W(\tau)$ позволяет определять полную фазу $\Phi(\tau)$ известным способом:

$$\Phi(\tau) = \arctg \frac{V(\tau)}{T(\tau)} = L(\tau) + \varphi(\tau). \quad (2)$$

Здесь $\varphi(\tau)$ есть, собственно, фаза, которая и является объектом классификации, а $L(\tau)$ — линейная функция, определяемая движением Земли по орбите.

Алгоритм “климатической кластеризации” построен на взаимном сравнении всех оценок фазы из общей выборки и выделении классов со сходными закономерностями их изменения. Критерием тесноты связи выбран коэффициент корреляции r , уровень которого задается исходя из задач исследования для достижения требуемой детализации кластеров.

На первом этапе рассчитывается корреляционная матрица для исходных функций фазы, определенных по (2). В процессе итерации каждый текущий кластер формируется из функций, попарно соответствующих заданному уровню корреляции. Объединенные в текущий кластер фазы формируют текущую фазу, рассчитываемую как среднее из образующих кластер оценок фаз. Формируется новый массив текущих фаз. Рассчитывается отклонение как сумма абсолютных величин разностей текущих и исходных фаз за весь период. Если отклонение ϵ превышает заданный уровень, в данном случае, $\epsilon = 0.001$, то повторяется итерационный процесс. При $\epsilon \leq 0.001$ процесс останавливается. Текущие фазы, сформированные на последнем этапе итерации, принимаются типовыми, исходные фазы объединяются в группы по уровням парной корреляции с типовыми фазами. Каждая типовая характеризует некоторую климатическую закономерность, вокруг которой формируется климатический класс. При этом, способ классификации соответствует принципам любого районирования: различия внутри класса

меньше, чем между классами, и каждый класс географически четко локализован. Как и ранее в [19], полученное в данной работе распределение климатических классов согласовано с географией климатов, что подтверждает физическую обоснованность метода.

В работе [14] показано, что при небольшой корректировке граничных значений наиболее используемые методы климатических классификаций дают близкие результаты, так как в их основе лежат температурный и влажностный показатели климата, определяющие более половины изменчивости всей совокупности измеряемых метеовеличин [10]. Здесь мы используем для классификации только среднюю температуру, которую можно считать непрерывным интегральным индикатором влияния всего комплекса климаторегулирующих факторов и итогом реализации прямых и обратных связей внутри геосистемы. Следует ожидать, что в трансформации структуры поля температуры изменения климата отражаются наиболее информативно.

Выделение климатических классов на основе однотипности изменения температуры с учетом фазы колебания известны, например, [15]. Однако здесь не раскрывается понятие однотипности колебаний и не затрагивается вопрос однозначного вычисления фазы. В работах [1, 4] предлагается критерий районирования на основе оценки однородности изменения температуры с использованием коэффициента корреляции аномалий температуры для каждой из станций соответствующего административного субъекта России со средним для него рядом температуры. При этом теряются детали, по которым можно судить о причинно-следственных связях в климатической системе, что авторы подчеркивают позже в [2, 3].

Преимуществом предлагаемого нами способа классификации являются его компактность и объективность, которые выражаются в получении естественной совокупности структур, отражающей картину согласованности колебаний температуры, и в использовании точно измеряемых данных без учета биоклиматических критериев, база данных которых недостаточна. Информативные изменения температуры, отражающие региональные климатические особенности, невелики в сравнении с годовым ходом. Однако именно эти изменения необходимо выделить для классификации. В случае анализа фазы процедуру выделения информативной компоненты $\varphi(\tau)$ из исходного ряда можно свести к вычитанию из полной фазы (2) одной линейной функции $L(\tau)$, заранее известной для всех станций и всего анализируемого интервала.

Материалы исследования — ряды среднемесячной температуры с 818 метеостанций Северного полушария за период 1955–2011 гг. [5]. Отбира-

лись станции, суммарный период отсутствия данных на которых не превышал 3% от числа рассмотренных среднемесячных значений, при этом, стремились к равномерной и достаточной представленности различных территорий.

Классификация получена для нескольких временных интервалов: полный период исследований — 1955–2011 гг. (П), период нормы — 1961–1990 гг. (P_N), период наибольших темпов глобального потепления — 1976–2011 гг. (ГП), период до ГП 1955–1975 гг. (P_{55}). Число лет в каждом периоде различно, привязка осуществлялась с учетом изменения глобального климата, интегральным показателем которого является динамика глобальной температуры [7, 8]. Задавался наиболее высокий пороговый уровень коэффициента корреляции: $r = 0.8$. При этом получена четкая географическая локализация классов в любом из рассмотренных периодов (рис. 1), а также высокая делимость классов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Классификация, полученная для периода П, совпала с результатом, полученным для 1955–2010 гг. и представленном в [19]. Увеличение общего интервала исследования на один год не внесло изменений в структуру температурного поля Северного полушария.

Реализация метода для обозначенных выше других периодов выявила изменения в степени согласованности колебаний температуры в разные интервалы лет, а также позволила определить районы полушария, где станции меняют свою структурную принадлежность в зависимости от глобальных тенденций. Эти территории можно назвать наиболее чувствительными к изменениям глобальной температуры.

Результаты классификации климата по В.П. Кеппену [23], выполненной по данным Европейских станций (до 40° в.д.) для периодов 1951–1977 и 1977–2003 гг., показали, что 12.2% станций меняют климатический тип в зависимости от временного интервала. Для этого же региона по результатам классификации, полученным нами, за ГП эта часть станций составила 14.9%. По оценкам для всего полушария свою структурную принадлежность сменили 12.2% рассмотренных станций.

На некоторых станциях фаза определяется по (1) неоднозначно, поэтому они не вошли ни в один из классов (см. рис. 1), расположены, как правило, на территориях, где вклад, связанный с движением Земли по орбите, подавлен иными составляющими, что выводит температурные колебания из области применимости определения (1). Большинство таких станций расположены в областях влияния муссонной циркуляции, выра-

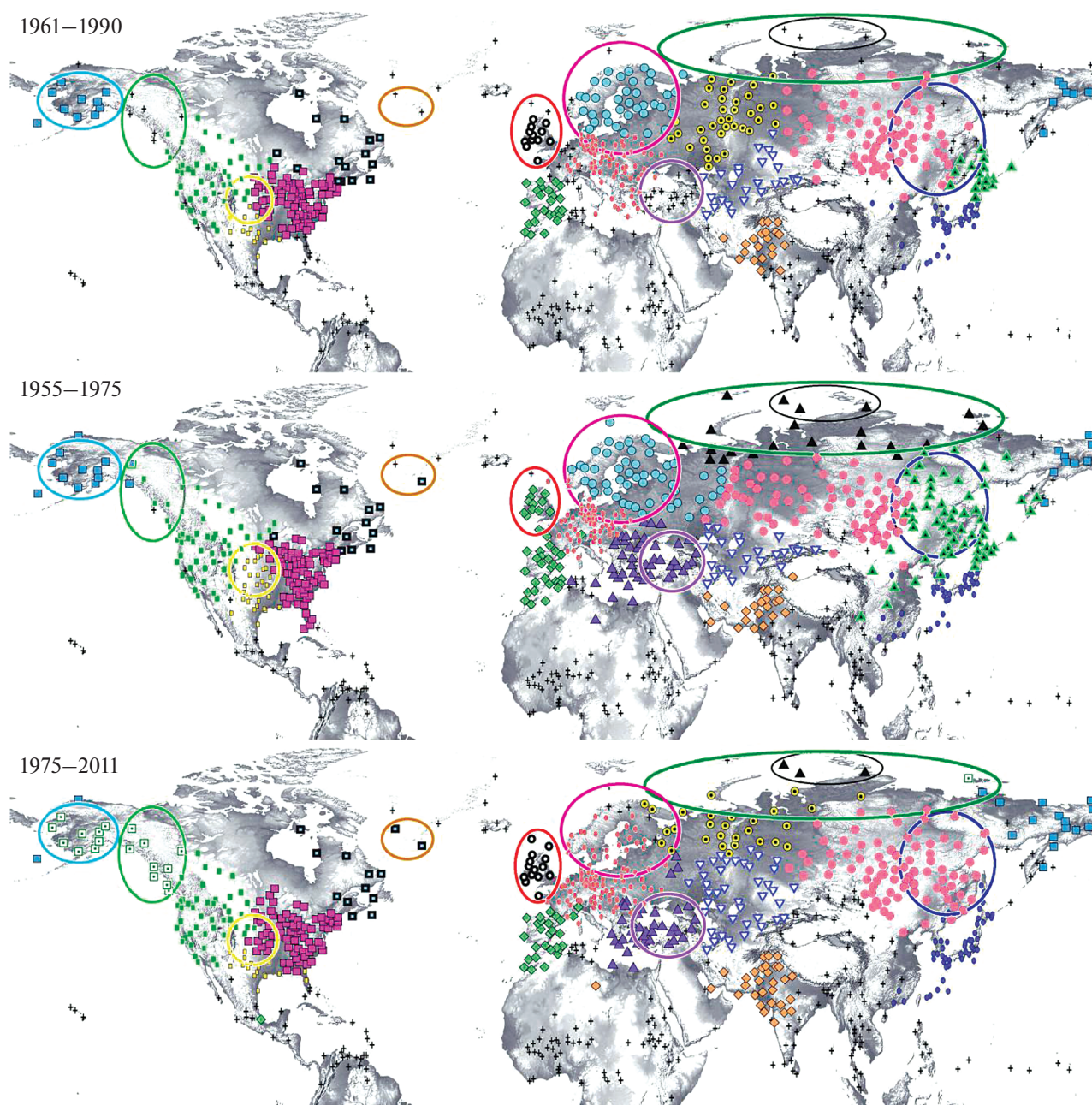


Рис. 1. Классификация поля приземной температуры Северного полушария в различные временные интервалы. Значения порогового коэффициента корреляции $r = 0.8$. Станции, не вошедшие ни в один из классов, обозначены знаком "+". Разные классы станций обозначены разными значками. Разноцветными овалами выделены зоны, где произошли изменения в структуре поля.

женность которой в различных регионах неодинакова.

В период P_N выявлено максимальное число станций (35%), не вошедших ни в один из классов, в сравнении с 24% таких станций в период ГП и с 22% в периоды P_{55} и П. Можно заключить, что в периоды, отличные от P_N , в целом, наблюдается сглаживание климатических различий, ранее обособленные станции включились в устойчивые

классы. Это характерно для станций побережья залива Аляска и западного пояса Канадских Кордильер, юга Гренландии, Месопотамии, Малоазиатского и Армянского нагорий, Закавказья, Кавказа, крайнего юга Восточно-Европейской равнины, Восточного и Северо-Восточного Китая, Яно-Колымской области Северо-Восточной Сибири, Камчатки (см. рис. 1). Часть обособленных в P_N станций объединились в классы. Так, в период

нормы почти все станции российского побережья Северного Ледовитого океана были обособлены, в P_{55} они образовали класс, включающий и станции субарктического пояса. Станции Британских островов, наоборот, в P_{55} потеряли свою обособленность, слившись в ГП с классом, включающим станции Пиренейской физико-географической области и Атласской горной страны. В этой связи, можно развивать дискуссию, какое состояние климатической системы следует считать нормой, какие критерии для выделения этих периодов целесообразно использовать. Ориентация на рекомендации МГЭИГ позволяет сравнивать и обобщать результаты разных авторов. Этой точки зрения на данном этапе исследований придерживаемся и мы, хотя выскажем предположение, что развитие метода динамических классификаций может в перспективе способствовать решению задачи выявления нормы состояния климатической системы.

В период ГП можно отметить общую тенденцию к снижению согласованности динамики температуры по сравнению с P_{55} — возросло число станций, не вошедших ни в один из классов (см. рис. 1). Часть станций Восточного и Северо-Восточного Китая вышли из-под влияния включавших их классов. Следует ожидать, что динамика температуры здесь стала менее предсказуемой. Станции островов Сахалин и Японских, ранее распределенные по двум классам, в ГП образовали один класс. Это может являться следствием усиления и расширения зоны охвата влияния мощного регионального влияющего фактора на колебания температуры здесь. Действительно, по данным [13], в Японском море наблюдается устойчивый положительный тренд температуры воды и уровня моря в результате перестройки атмосферного режима на фоне глобального потепления. Там же [13] отмечается уменьшение активности и продолжительности зимнего муссона и увеличение — летнего, следствием чего и может быть усилившееся синхронизирующее влияние океана в поле температуры в этом регионе.

Территориями, наиболее чувствительными к глобальным климатическим трендам, являются Фенноскандия, Британские острова, Центральноевропейская географическая область и Среднеевропейская равнина (то же показано и в модельных сценариях в [25]), Гренландия, п-в Флорида, Западная Сибирь. Кроме того, в ГП наблюдается переход многих станций более северных классов в более южные. Так, подтверждена чувствительность к изменениям глобальной температуры территорий Российской Горно-островной Арктики и Субарктики. На рис. 1 видно, что станции этой территории в каждом из рассмотренных периодов меняют свою структурную принадлежность. В ГП большая часть этих стан-

ций уже не выделяются в один класс, как в P_{55} , а динамика температуры на них синхронизируется с условиями более южных территорий (см. рис. 1, зеленая и черная границы зоны). Такой переход заметен в Фенноскандии, в юго-восточной части Восточно-Европейской равнины (см. рис. 1, розовая граница зоны), на юго-западе Западно-Сибирской равнины, на равнинах и возвышенностях Средней и Центральной Азии.

Существенная перестройка структуры поля в ГП выявилась в Евразии. Выявлена синхронизация колебаний температуры практически на всех станциях Западной Европы — один пространственно распределенный класс, занимающий большую часть территории, которая соответствует умеренно теплomu климату с равномерным увлажнением, тип *Cfb* по Кеппену [28]. Станции Британских островов обособились в отдельный класс, вернувшись в состояние периода нормы (см. рис. 1, красная граница зоны). Если в P_{55} станции Средней Сибири образовывали один класс со станциями Западной Сибири, то в ГП колебания температуры на них стали более согласованы с динамикой климата в Восточной Сибири.

В Северной Америке в P_{55} , как и в P_N , станции полуострова Аляска входили в один класс со станциями Кордильер Аляски и Канады. В период ГП эти станции, кроме станций Barrow и St. Paul, образовали отдельный класс, включивший в себя еще и прибрежные станции Кордильер юго-запада Канады (см. рис. 1, голубая граница зоны). Станции запада Центральных равнин вышли из класса, который они образовывали со станциями западной части Береговых низменностей, и вошли в обширный класс, простирающийся до Атлантического побережья Северной Америки (см. рис. 1, желтая граница зоны).

Чувствительными к изменениям глобальной температуры являются, также, станции, расположенные в зонах влияния основных центров действия атмосферы. Это территории Фенноскандии, Британских островов, южного побережья Гренландии, где максимально влияние Исландского минимума (см. рис. 1, коричневая граница зоны), Южная Аляска и Западные хребты Канадских Кордильер (см. рис. 1, светло-зеленая граница зоны), находящиеся под преобладающим влиянием Алеутского минимума, а также Монгольский Алтай и Хангай, где расположен климатический центр Азиатского максимума.

Станции, расположенные в районах горного рельефа Евразии, подтвердили свою высокую чувствительность к меняющемуся климату. То, что высота расположения станции является важным фактором изменения климата, показано во многих работах. В [29] дан подробный анализ динамики температуры на горных станциях мира, в том числе и на рассмотренных здесь, показавший

Таблица 1. Высокогорные станции, наиболее чувствительные к колебаниям глобальной температуры

Индекс ВМО	Название	Страна	Широта	Долгота	Высота	П _N	П ₅₅	ГП
11212	Villacheralpe	Австрия	46.7	14.3	2140	+	К	К
42147	Mukteswar	Индия	29.5	79.7	2311	+	+	К
6680	Saentis	Швейцария	47.3	9.4	2494	+	К	К
11146	Sonnblick	Австрия	47.1	13	3111	+	К	К

Примечание: + обозначает станции, не вошедшие ни в один из классов; К — станция входит в класс.

рост изменчивости температуры воздуха с высотой расположения пункта наблюдений. Полученные нами результаты показали, что порядка 24% станций, расположенных выше 800 м, чувствительны к изменениям глобальной температуры и сменили структурную принадлежность в том или ином периоде. В среднегорье (800–2000 м) таких станций порядка 22%. Из 12 станций, высота расположения которых более 2000 м, меняли свою принадлежность классам в зависимости от периода четыре станции (табл. 1). При этом альпийские станции Villacheralpe, Saentis и Sonnblick в П_N не входили ни в один из классов, а в П₅₅ и в ГП динамика температуры на них согласована с таковой на станциях Западной и Центральной Европы. По данным измерений на станции Saentis в [21] было выявлено увеличение частоты волн тепла в зимний период с конца 1960-х годов, что приближает температурные условия здесь к станциям, расположенным значительно ниже. В обзорной статье [33] приведены данные о более сильном повышении по сравнению со средней глобальной в XX в. температуры на станции Sonnblick, расположенной на высоте 3100 м на основном альпийском водоразделе, где непрерывные наблюдения ведутся более 130 лет. Индийская станция Mukteswar, расположенная в сельской Гималайской горной местности на высоте 2311 м, утратила свою обособленность только в ГП. Остальные высокогорные станции сохранили свою обособленность в любом из рассмотренных периодов.

Увеличение согласованности колебаний температуры при росте глобальной, укрупнение классов выявлено на следующих территориях (см. рис. 1): Западная Европа, Внекордильерский Восток Северной Америки, Средняя Азия, Средняя и Восточная Сибирь, Северный Индостан и Индо-Гангская равнина, Восточноазиатские острова.

Регионами, где классы наиболее стабильны в разные периоды, являются Средняя Сибирь, Северо-Восток Азии, Пиренейская область и Атласская горная страна, Прикаспийско-Туранская страна, Памиро-Алтай, Северный Индостан и Индо-Гангская равнина, Южные Аппалачи, Южная Кордильера, восточные части Центральных равнин и Береговых низменностей Северной Америки, п-ов Лабрадор.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Контроль региональной изменчивости природно-климатических процессов дает основу для принятия научно обоснованных эффективных решений на разных уровнях управления и способствует рационализации природопользования. Традиционные климатические классификации являются для этого удовлетворительной основой. Тем не менее, изменения окружающей среды, ускорившиеся в последние десятилетия, требуют своевременной и объективной оценки перестройки структуры полей параметров климата. Очевидно преимущество примененного в работе способа классификации, позволяющего лишь по данным о температуре оперативно и объективно оценивать состояние климатической системы.

Выявлена трансформация структуры согласованности изменений температуры в разные интервалы лет, что позволило определить наиболее чувствительные районы Северного полушария, где станции меняют свою структурную принадлежность в зависимости от глобальных климатических трендов. При росте глобальной температуры на части территорий согласованность температурных колебаний возрастает, а на части — уменьшается. В Западной Европе, в северо-западной и юго-восточной части Северной Америки, во Внутренней Азии, в Средней и Восточной Сибири, на Восточноазиатских островах выявлено укрупнение климатических классов, что отражает увеличение согласованности процессов на этих территориях при росте глобальной температуры. Наиболее чувствительными к глобальным климатическим трендам являются территории Фенноскандии, Британских островов, Центральноевропейской географической области и Среднеевропейской равнины, Гренландии, Российской Горно-островной Арктики и субарктики, п-ва Флорида, а также станции, расположенные в районах горного рельефа Евразии и в зонах влияния основных центров действия атмосферы. Наиболее чувствительные к изменениям глобального климата территории в России совпадают с районами крайне редкой сети наблюдений. Дальнейшее сокращение пунктов наблюдений может резко сократить возможности обеспечения потребителей достоверной метеоинформацией.

Использование для классификации только температуры позволяет значительно упростить динамический анализ трансформации структуры климатической системы, а обнаруженная пространственная синхронизация в нелинейной хаотической климатической системе вносит элемент порядка, и может стать одним из эффективных путей оптимизации как развития инструментальной сети наблюдения, так и создания региональных прогнозных моделей динамики климатической системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анисимов О.А., Жильцова Е.Л., Кокорев В.А. Пространственные и временные закономерности изменения температуры воздуха на территории России в XX в.—начале XXI в. // Пробл. экологич. монит. и моделир. экосистем. 2011. Т. XXIV. С. 83–98.
2. Анисимов О.А., Жильцова Е.Л. Об оценках изменений климата 20 и начала 21 веков по данным наблюдений на территории России // Мет. и гидр. 2012. № 6. С. 95–107.
3. Анисимов О.А., Кокорев В.А. Об оптимальном выборе гидродинамических моделей для оценки влияния изменений климата на криосферу // Лёд и снег. 2013. Т. 53. № 1. С. 83–92.
4. Анисимов О.А., Лобанов В.А., Ренева С.А. Анализ изменений температуры воздуха на территории России и эмпирический прогноз на первую четверть 21 в. // Мет. и гидр. 2007. № 10. С. 20–30.
5. Архив Университета Восточной Англии. <http://www.metoffice.gov.uk>, <http://www.cru.uea.ac.uk> (дата обращения 01.12.2017).
6. Волкова М.А., Чередыко Н.Н., Соколов К.И., Огурцов Л.А. Современная пространственно-временная структура поля экстремальных осадков на территории Западной Сибири // Вестн. Томс. ун-та. 2015. № 390. С. 202–210.
7. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. М.: Росгидромет, 2014. 62 с.
8. Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Наблюдаемые и ожидаемые изменения климата России: температура воздуха. Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2012. 194 с.
9. Закусилов В.П., Закусилов П.В. Использование компонентного анализа для характеристики атмосферной циркуляции над западным географическим районом // Вестн. ВГУ. Сер.: География. Геоэкология. 2009. № 2. С. 67–71.
10. Кондратюк В.И., Светлова Т.П., Далюк И.В. О выделении информативно однородных зон по климатическим данным // Тр. ГГО. 2003. Вып. 551. С. 51–57.
11. Любушин А.А. Анализ данных систем геофизического и экологического мониторинга. М.: Наука, 2007. 228 с.
12. Поляков Д.В., Кужевская И.В. Применение кластерного анализа для оценки температурно-влажностных условий в период активной вегетации на территории юга Западной Сибири и его связь с гидротермическим коэффициентом Т.Г. Селянинова // Вестн. Томс. ун-та. 2012. № 360. С. 188–192.
13. Ростов И.Д., Рудых Н.И., Ростов В.И., Воронцов А.А. Проявления глобальных климатических изменений в прибрежных водах северной части Японского моря // Вестн. ДВО. 2016. № 5. С. 100–112.
14. Русин И.Н., Мосолова Г.И. Принципы климатического районирования и климатический прогноз // Вестн. СПбГУ. 2010. Сер. 7. Вып. 2. С. 99–108.
15. Салугашвили Р.С. Колебания климата на территории первого естественного синоптического района и климатическое районирование // Уч. Зап. Казанс. ун-та. Ест. науки. 2012. Т. 154. Кн. 3. С. 216–227.
16. Сивоголовко Е.В. Методы оценки качества четкой кластеризации // Компьютер. инстр. в образов. 2011. № 4. С. 14–31.
17. 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.
18. Чередыко Н.Н., Журавлев Г.Г., Кусков А.И. Оценка современных климатических тенденций и синхронности их проявления в Алтайском регионе // Вестн. Томс. ун-та. 2014. № 379. С. 200–208.
19. Чередыко Н.Н., Тартаковский В.А., Крутиков В.А., Волков Ю.В. Классификация климатов Северного полушария на основе оценки фазы температурного сигнала // Оптика атмосф. и океана. 2017. Т. 30. № 1. С. 63–69. <https://doi.org/10.1134/S1024856017010043>
20. Шерстюков Б.Г. Региональные и сезонные закономерности изменений современного климата. Обнинск: Изд-во ВНИГМИ-МЦД, 2008. 302 с.
21. Beniston M. Warm winter spells in the Swiss Alps: Strong heat waves in a cold season? A study focusing on climate observations at the Saentis high mountain site // Geophys. Res. Lett. 2005. V. 32. L01812. <https://doi.org/10.1029/2004GL021478>
22. DeGaetano A.T. Spatial grouping of United States climate stations using a hybrid clustering approach // Int. J. Climatol. 2001. V. 21. № 7. P. 791–807.
23. Delière A., Nicolay S. Köppen–Geiger Climate Classification for Europe Recaptured via the Hölder Regularity of Air Temperature Data // Pure and Appl. Geophys. 2016. V. 173. № 8. P. 2885–2898.
24. Gabor D. Theory of communication // J. Inst. Electr. 1946. V. 93. № 26. Pt. 3. P. 429–441.
25. Gallardo C., Gil V., Hagel E., Tejeda C., Castro M. Assessment of climate change in Europe from an ensemble of regional climate models by the use of Köppen–Trewartha classification // Int. J. Climatol. 2013. V. 33. № 9. P. 2157–2166.
26. Köppen W. Klassifikation der Klimate nach Temperatur, Niederschlag und Jahreslauf // Peterm. Mitt. 1918. P. 194–203, 243–248.
27. Köppen W. Das geographische System der Klimate. Berlin: Verlag von Gebrüder Bornträger, 1936. 44 p.
28. Kottek M., Grieser J., Beck C., Rudolf B., Rubel F. World map of the Köppen–Geiger climate classification up-

- dated // *Meteorol. Zeitschrift*. 2006. V. 15. № 3. P. 259–263.
29. Ohmura A. Enhanced temperature variability in high-altitude climate change // *Theor. Appl. Climatol.* 2012. V. 110. № 4. P. 499–508.
<https://doi.org/10.1007/s00704-012-0687-x>
30. Peel M.C., Finlayson B.L., McMahon T.A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification // *Hydrol. and Earth Sys. Sc. Disc.* 2007. V. 4. № 2. P. 439–473.
31. 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. Geographi.* 2015. V. 36. № 2. P. 142–157.
32. Rubel F., Brugger K., Haslinger K., Auer I. The climate of the European Alps: Shift of very high resolution Köppen–Geiger climate zones 1800–2100 // *Meteorol. Zeitschrift*. 2017. V. 26. № 2. P. 115–125.
33. Schoner W., Bohm R., Auer I. 15 years of high-mountain research at Sonnblick Observatory (Austrian Alps) – from “the house above the clouds” to a unique research platform // *Theor. Appl. Climatol.* 2012. V. 110. № 4. P. 491–498.
34. Supan A. Die Temperaturzonen der Erde // *Peterm. Mitt.* 1879. № 25. P. 349–358.
35. Zhang X., Yan X. Spatiotemporal change in geographical distribution of global climate types in the context of climate warming // *Clim. Dyn.* 2014. V. 43. № 3–4. P. 595–605.
<https://doi.org/10.1007/s00382-013-2019-y>

Transformation of Spatial Structure of the Surface Temperature Field in the Northern Hemisphere

N. N. Cheredko^{1, #}, V. A. Tartakovsky^{1, ##}, Y. V. Volkov^{1, ###}, and V. A. Krutikov^{1, ####}

¹*Institute of monitoring of climatic and ecological systems SB RAS, Tomsk, Russia*

[#]*e-mail: atnik3@rambler.ru*

^{##}*e-mail: trtk@list.ru*

^{###}*e-mail: yvvolkov@tpu.ru*

^{####}*e-mail: krutikov@imces.ru*

Received October 15, 2018; revised March 26, 2019; accepted October 3, 2019

The selection of informative criteria and objective classification methods is the current task of climatology. In this paper we present the results of the clustering algorithm of climate. The temperature signals are classified by the degree of similarity of the phase modulation characteristics. Different time periods were considered. They correspond to the main trends in the global temperature dynamics. Such an approach may be a variant of the objective dynamic classification of the Northern Hemisphere climate. Data from 818 meteorological stations were used. The transformation of the system and changes in the degree of temperature dynamics' consistency at different intervals of years are revealed. This made it possible to identify the most sensitive areas of the Northern Hemisphere. In these areas the stations changed its structural affiliation depending on global trends. With increasing global temperature, the structure of the regional fields is changing. Coherence of temperature fluctuations varies. There is a transition of many stations of more northern classes to more southern ones. The most sensitive to global climate trends are the territories of Fennoscandia and Central Europe, Greenland, the Russian Arctic and Subarctic, Florida Peninsula, and stations located in a mountainous terrain Eurasian areas and areas of influence of basic centers of atmospheric action.

Keywords: classification, climate changes, consistency of temperature fluctuations

REFERENCES

- Anisimov O.A., Zhiltsova E.L., Kokorev V.A. Spatial and temporal patterns of air temperature changes in Russia in the 20th century and early 21st century. *Probl. Ekol. Monit. i Modelir. Ekosistem*, 2011, vol. XXIV, pp. 83–98. (In Russ.).
- Anisimov O.A., Zhiltsova E.L. Climate change estimates for the regions of Russia in the 20th century and at the beginning of the 21st century based on the observation data. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2012, vol. 37, no. 6, pp. 421–429.
- Anisimov O.A., Kokorev V.A. The optimal choice of hydrodynamic models to assess the impact of climate change on the cryosphere. *Led i Sneg*, 2013, vol. 53, no. 1, pp. 83–92. (In Russ.).
doi 10.15356/2076-6734-2013-1-83-92
- Anisimov O.A., Lobanov V.A., Renova S.A. Analysis of changes in air temperature in Russia and empirical forecast for the first quarter of the 21st century. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2007, vol. 32, no. 10, pp. 620–626.
- Archive of the University of East Anglia. Available at: <http://www.metoffice.gov.uk>, <http://www.cru.uea.ac.uk> (accessed: 01.12.17).
- Volkova M.A., Cheredko N.N., Sokolov K.I., Ogurtsov L.A. The current space-time structure of the extreme precipitation field in Western Siberia. *Vestn. Tomsk. Gos. Univ.*, 2015, no. 390, pp. 202–210. (In Russ.).

7. *Vtoroi otsenochnyi doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii. Obshchee resyume* [Second Roshydromet Assessment Report on Climate Change and its Consequences in the Russian Federation. Summary]. Moscow: Rosgidromet, 2014. 62 p.
8. Gruza G.V., Rankova E.Ya. *Nablyudaemye i ozhidaemye izmeneniya klimata Rossii: temperatura vozdukha* [Observed and Expected Climate Changes in Russia: Surface Air Temperature]. Obninsk: VNIIGMI-MTsD, 2012. 194 p.
9. Zakusilov V.P., Zakusilov P.V. Use of component analysis to characterize the atmospheric circulation over a given geographical area. *Vestn. Voronezh. Gos. Univ., Ser. Geogr. Geokol.*, 2009, no. 2, pp. 67–71. (In Russ.).
10. Kondratyuk V.I., Svetlova T.P., Dalyuk I.V. Introduction of information-content homogeneous zones by climatic data. *Tr. GGO*, 2002, no. 551, pp. 51–57. (In Russ.).
11. Lyubushin A.A. *Analiz dannykh sistem geofizicheskogo i ekologicheskogo monitoringa* [Geophysical and Ecological Monitoring Systems Data Analysis]. Moscow: Nauka Publ., 2007. 228 p.
12. Poliakov D.V., Kuzhevskaya I.V. Use of cluster analysis for assessing heat and moisture during active vegetation in south of Western Siberia and its relation to T.G. Sel'yaninov hydrothermal coefficient. *Vestn. Tomsk. Gos. Univ.*, 2012, no. 360, pp. 188–192. (In Russ.).
13. Rostov I.D., Rudykh N.I., Rostov V.I., Vorontsov A.A. Expressions of global climatic changes in coastal waters of Northern part of the Sea of Japan. *Vestn. DVO RAN*, 2016, no. 5, pp. 100–112. (In Russ.).
14. Rusin I.N., Mosolova G.I. Principles of climatic classifications and climatic forecast. *Vestn. S.-Peterb. Univ., Ser. 7: Geol. Geogr.*, 2010, no. 2, pp. 99–108. (In Russ.).
15. Salugashvili R.S. Climate fluctuations within the first natural synoptic area and climatic zoning. *Uch. Zap. Kazan. Univ., Ser. Estestv. Nauki*, 2012, vol. 154, no. 3, pp. 216–227. (In Russ.).
16. Sivogolovko E.V. Methods of estimation of smooth clustering quality. *Komp'yut. Instr. v Obrazovanii*, 2011, no. 4, pp. 14–31. (In Russ.).
17. Tartakovsky V.A. Synchronous analysis of the Wolf numbers and temperature series from weather station in the Northern Hemisphere of the Earth. *Optika Atmosf. i Okeana.*, 2015, vol. 28, no. 2, pp. 182–188. (In Russ.).
18. Cheredko N.N., Zhuravlev G.G., Kuskov A.I. Estimation of modern climate trends and their synchronicity in the Altai region. *Vestn. Tomsk. Gos. Univ.*, 2014, no. 379, pp. 200–208. (In Russ.).
19. Cheredko N.N., Tartakovsky V.A., Krutikov V.A., Volkov Yu.V. Climate classification in the Northern Hemisphere using phases of temperature signals. *Atmos. Ocean. Opt.*, 2017, vol. 30, no. 1, pp. 63–69. doi 10.1134/S1024856017010043
20. Sherstyukov B.G. *Regional'nye i sezonnye zakonomernosti izmenenii sovremennogo klimata* [Regional and Seasonal Patterns of Changes in the Current Climate]. Obninsk: VNIIGMI-MTsD, 2008. 247 p.
21. Beniston M. Warm winter spells in the Swiss Alps: Strong heat waves in a cold season? A study focusing on climate observations at the Saentis high mountain site. *Geophys. Res. Lett.*, 2005, vol. 32, no. 1, L01812. doi 10.1029/2004GL021478
22. DeGaetano A.T. Spatial grouping of United States climate stations using a hybrid clustering approach. *Int. J. Climatol.*, 2001, vol. 21, no. 7, pp. 791–807.
23. Deliège A., Nicolay S. Köppen–Geiger climate classification for Europe recaptured via the Hölder regularity of air temperature data. *Pure Appl. Geophys.*, 2016, vol. 173, no. 8, pp. 2885–2898.
24. Gabor D. Theory of communication. *J. Inst. Electr. Eng.-Part III: Radio Com. Eng.*, 1946, vol. 93, no. 26, pp. 429–441.
25. Gallardo C., Gil V., Hagel E., Tejeda C., Castro M. Assessment of climate change in Europe from an ensemble of regional climate models by the use of Köppen–Trewartha classification. *Int. J. Climatol.*, 2013, vol. 33, no. 9, pp. 2157–2166.
26. Köppen W. Klassifikation der Klimate nach Temperatur, Niederschlag und Jahreslauf. *Peterm. Mitt.*, 1918, pp. 194–203, 243–248.
27. Köppen W. *Das geographische System der Klimate*. Berlin: Verlag von Gebrüder Bornträger, 1936. 44 p.
28. Kottek M., Grieser J., Beck C., Rudolf B., Rubel F. World map of the Köppen–Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 2006, vol. 15, no. 3, pp. 259–263.
29. Ohmura A. Enhanced temperature variability in high-altitude climate change. *Theor. Appl. Climatol.*, 2012, vol. 110, no. 4, pp. 499–508. doi 10.1007/s00704-012-0687-x
30. Peel M.C., Finlayson B.L., McMahon T.A. Updated world map of the Köppen–Geiger climate classification. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 2007, vol. 4, no. 2, pp. 439–473.
31. 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, vol. 36, no. 2, pp. 142–157.
32. Rubel F., Brugger K., Haslinger K., Auer I. The climate of the European Alps: Shift of very high resolution Köppen–Geiger climate zones 1800–2100. *Meteorologische Zeitschrift*, 2017, vol. 26, no. 2, pp. 115–125.
33. Schöner W., Böhm R., Auer I. 15 years of high-mountain research at Sonnblick Observatory (Austrian Alps) – from “the house above the clouds” to a unique research platform. *Theor. Appl. Climatol.*, 2012, vol. 110, no. 4, pp. 491–498.
34. Supan A. Die Temperaturzonen der Erde. *Peterm. Mitt.*, 1879, no. 25, pp. 349–358.
35. Zhang X., Yan X. Spatiotemporal change in geographical distribution of global climate types in the context of climate warming. *Clim. Dyn.*, 2014, vol. 43, nos. 3–4, pp. 595–605. doi 10.1007/s00382-013-2019-y