

Использование квантильной регрессии для оценки пространственных особенностей характеристик трендов приземной температуры на территории России

*А.М. Стерин**, *А.С. Лавров*

Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации –
Мировой центр данных (ВНИИГМИ-МЦД),
Россия, 249035, Обнинск Калужской области, ул. Королева, 6

*Адрес для переписки: sterin@meteo.ru

Реферат. В работе использованы расчеты климатических трендов аномалий минимальной, максимальной и средней суточных температур воздуха, основанные на методе квантильной регрессии (МКР), позволяющем оценивать тренды с детализацией для любого значения квантиля в диапазоне изменения квантилей от 0 до 1. На основе выполненных расчетов, детализированных для различных квантилей трендов суточных аномалий температуры воздуха, выполнена кластеризация более чем 1400 метеорологических станций территории РФ. Кластеризация выполнена в многомерном пространстве, при формировании которого учтены сезонные особенности проявления МКР трендов аномалий для трех видов суточных температур (суточных минимальной, максимальной и средней температуры), особенности проявления МКР трендов в разных частях диапазона квантилей. В сформированном многомерном пространстве методом *k*-средних выявлены двенадцать кластеров метеорологических станций. Станции, входящие в каждый из выделенных кластеров, схожи с точки зрения проявления МКР трендов температуры. Несмотря на отсутствие среди переменных многомерного пространства характеристик географического положения станций наблюдений, в пределах каждого из 12 выделенных кластеров станции располагаются географически достаточно компактно. Продемонстрировано и обсуждено географическое распределение станций, отнесенных к различным кластерам.

По результатам кластеризации описаны некоторые особенности квантильных трендов аномалий температуры конкретных сезонов в пределах групп станций, отнесенных к отдельным кластерам.

Очевидными являются различия в проявлении квантильных трендов между 12 кластерами станций территории РФ, выделенными на основе МКР квантильных трендов. При этом, однако, между отдельными парами кластеров может быть отмечено существенное сходство.

Подходы и результаты настоящей работы могут быть использованы для уточнения климатического районирования территории РФ, что представляется весьма актуальным при подготовке и реализации региональных планов адаптации к изменениям климата. Результаты могут также быть использованы при решении различных задач прикладной климатологии, в основе которых лежат расчеты квантилей различных метеовеличин.

Ключевые слова. Климат, изменение климата, климатические тренды, квантильная регрессия, распределение, кластер, кластерный анализ, метод k-средних.

Using quantile regression to estimate spatial patterns of surface temperature trends over the territory of Russia

A.M. Sterin, A.S. Lavrov*

All-Russian Research Institute of Hydrometeorological Information – World Data Centre
(RIHMI-WDC),
6, Korolyov Str., Obninsk, Kaluga Region, 249035, Russian Federation

*Correspondence address: sterin@meteo.ru

Abstract. Calculations of climatic trends of anomalies of daily minimum, maximum and average air temperatures based on the quantile regression method (QRM), which allows us to estimate trends in detail for any quantile in the range of quantile values from 0 to 1. Based on the QRM climate trend calculations detailed for different quantiles of daily air temperature anomalies, clustering of more than 1400 meteorological stations of Russia was performed. Clustering was carried out in the multidimensional space, the formation of which took into account seasonal peculiarities of the QRM trends of anomalies for three types of daily temperatures (daily minimum, maximum and average temperatures), the features of the QRM trends in different parts of the quantile range. Twelve clusters were identified in the created multidimensional space using the k-means method. The stations that are included in these clusters are similar in terms of manifestation of the QRM trends of temperature. Despite the absence of characteristics of the geographical location of observation stations among the variables of the multidimensional space, within each of the twelve selected clusters, the stations are geographically quite compact. The geographical distribution of stations assigned to different clusters is demonstrated and discussed.

Based on the results of clustering, some features of quantile trends of temperature anomalies of specific seasons within the groups of stations assigned to individual clusters are described.

Differences in manifestation of quantile trends between twelve clusters of stations over the Russian territory, selected from QRM quantile trends, are obvious. At the same time, however, significant similarities can be observed between some individual pairs of clusters.

Approaches and results of this work can be used to clarify climatic zoning of the Russian territory, which seems very relevant for preparation and implementation of regional plans of adaptation to climate change. The results can also be used to solve various problems of applied climatology, which are based on calculations of quantiles of different meteorological parameters.

Keywords. Climate, climate change, climate trends, quantile regression, distribution, cluster, cluster analysis, k-means method.

Введение

В условиях меняющегося климата необходимо иметь наиболее полную информацию о статистических характеристиках распределения метеорологических величин. К числу важнейших для климатологии статистических характеристик относятся как долгопериодные тенденции изменения средних значений метеовеличин, так и более детальные оценки характеристик распределений метеовеличин и их эволюции в масштабах десятилетий. Особый интерес представляют долгопериодные тенденции изменения экстремальных и близких к экстремальным значений метеовеличин. В условиях глобального потепления интересны не только характеристики скорости потепления «в среднем», но и возможные различия в скоростях потепления для разных частей диапазона квантилей значений температуры воздуха, например, близких к «наиболее холодным» и к «наиболее теплым» значениям температуры.

Традиционный аппарат линейной регрессии для оценки климатических трендов – МНК – Метод Наименьших Квадратов. Однако, во-первых, его применение корректно, только если выполняются ряд условий, среди которых условия гомоскедастичности (постоянства ошибки зависимой переменной на интервале изменений предикторов), и некоррелированности рядов. Последнее, например, для задачи оценки климатических трендов зачастую далеко не так.

Во-вторых, МНК дает картину изменения только средних значений предиктанта, но при этом ничего не дает для характеристик изменений «хвостов» распределений предиктанта (значений предиктанта, близких к экстремальным). При этом оценки МНК оказываются очень чувствительными к выбросам.

В качестве альтернативы МНК для оценки климатических трендов используются различные статистические методы, в частности робастные и непараметрические методы. Одним из получивших распространение в задачах детального анализа климатических трендов методов (Тимофеев, Стерин, 2010; Timofeev, Sterin, 2010) является квантильная регрессия.

Можно выделить три направления использования квантильной регрессии в климатологии:

Анализ климатических трендов во всем диапазоне изменения квантилей τ значений метеовеличины (вычисляемых методом квантильной регрессии и называемых в данной работе МКР трендами). При этом график зависимости коэффициента регрессии (в данном случае – МКР тренда), от значения квантиля τ носит название процесс-диаграммы. В частности, во ВНИИГМИ-МЦД с участием авторов на основе метода квантильной регрессии был выполнен анализ трендов в широком диапазоне изменения квантилей τ значений как приземной температуры (Стерин, Тимофеев, 2016; Sterin, Timofeev, 2016), так и температуры в свободной атмосфере (Стерин, Лавров, 2021). В зарубежной литературе это направление представлено достаточно широко для анализа тенденций изменения значений температуры (Fan Lijun, 2014; Gao, Franzke, 2017; Grillakis et al., 2017; Lee et al., 2013) и осадков (Xuan et al., 2017).

Иные, чем анализ климатических трендов на основе данных наблюдений, задачи регрессии в климатологии (оценки регрессионной связи между харак-

теристиками климата, задачи даунскейлинга, расчеты на основе результатов климатического моделирования) (Yang et al., 2018; Zhang et al., 2020; Chapman et al., 2015; Haugen et al., 2018, 2019);

Обновление используемых в статистической климатологии и в прикладной климатологии (для нужд строительства, транспорта, энергетики и др.) индексов и других характеристик, основанных на квантилях, обоснование необходимости таких обновлений из-за тенденций изменения этих квантилей в масштабах десятилетий.

Детальный обзор направлений и результатов использования квантильной регрессии в гидрометеорологии и климатологии станет предметом отдельной публикации.

Оценки особенностей географического распределения климатических трендов для статистик конкретных метеовеличин, выполняемые на основе массивов данных наблюдения в конкретных пунктах станций (либо на основе сеточных полей), обычно учитывают особенности статистик (например, месячные статистики, суточные статистики и т. д.), особенности годового хода метеовеличин. При использовании аппарата квантильной регрессии к детализации этих особенностей добавляется детализация по значениям квантиля τ ($0 < \tau < 1$). Как отмечалось выше, зависимость коэффициента линейной квантильной регрессии от τ носит название процесс-диаграммы.

Различия процесс-диаграмм квантильной регрессии при оценках трендов приземной температуры воздуха отмечались для разных регионов территории России (Стерин, Тимофеев, 2016; Sterin, Timofeev, 2016), разных регионов территории Китая (Fan Lijun, 2014; Gao, Franzke, 2017). При этом отмечаемые авторами различия процесс-диаграмм имели место для разных сезонов года и для разных использованных характеристик приземной температуры (суточных минимальной T_{\min} , максимальной T_{\max} и средней T_{mean} температуры). В то же время, как было показано в упомянутых работах и в ряде других публикаций, в разных климатических регионах находятся достаточно компактно расположенные группы пунктов наблюдений, имеющих схожие как по знаку, так и по величине значения оцененных с помощью квантильной регрессии трендов (для конкретных характеристики суточной температуры воздуха, сезона и значений квантиля τ). Наличие географически компактно расположенных групп станций со сходным проявлением МКР трендов температуры отмечалось как по территории России, так и по территории Китая.

В работе (Стерин, Тимофеев, 2016; Sterin, Timofeev, 2016) для обобщения оценок МКР трендов приземной температуры по территории Российской Федерации использовались данные наблюдений приземной температуры воздуха суточного разрешения на 517 метеорологических станциях за период с 1961 по 2010 г. Станции были расположены на территории России в 9 выделенных квазиоднородных климатических регионах, (Bulygina et al., 2007). В качестве обобщенной для квазиоднородного региона зависимости МКР-тренда от значения квантиля τ (обобщенной процесс-диаграммы) рассматривалась зависимость медианного по всем станциям региона значения тренда от квантиля τ . Рассматривалось соотношение двух мер неопределенности при

обобщениях по группам станций оценок МКР трендов. Первая мера характеризовала неопределенность в утверждении, что значения оценок трендов квантильной регрессии для разных станций в пределах рассматриваемого региона близки. Вторая мера характеризовала результат обобщения в пределах региона индивидуальных для каждой из станций этого региона неопределенностей оценки трендов на основе МКР. Анализировались особенности значений этого соотношения в различных выделенных 9 квазиоднородных климатических регионах для отдельных значений квантиля τ .

Таким образом, в указанном предыдущем исследовании задавалось жёсткое разбиение множества станций на отдельные климатические регионы, и при такой регионализации свойства климатических трендов внутри регионов напрямую не учитывались. Было ранее отмечено, что более полная объективная картина особенностей пространственного распределения характеристик МКР климатических трендов, учитывающая их особенности одновременно для разных квантилей τ ($0 < \tau < 1$), разных сезонов года и разных характеристик приземной температуры могла бы быть получена при использовании методов многомерного анализа данных, в частности, кластерного анализа.

Настоящая работа посвящена анализу пространственного распределения полученных на основе МКР климатических трендов аномалий приземной температуры на территории Российской Федерации, выполненному с использованием метода кластерного анализа.

Данные и методика.

Метод квантильной регрессии (МКР), впервые предложенный в 1978 году, (Koenker, Bassett, 1978) – робастный непараметрический инструментальный регрессионного анализа, дающий оценки значений коэффициента регрессии для произвольного значения квантиля τ ($0 < \tau < 1$) значений предиктанта.

Поиск решения $\hat{\beta}$ линейной квантильной регрессии для произвольного значения квантиля τ ($0 < \tau < 1$) ведется путем оптимизации по β следующего выражения для функции потерь:

$$\hat{\beta} = \operatorname{argmin}_{\beta} \left[\sum_{i \in \{i: y_i \geq x_i' \beta\}} \tau |y_i - x_i' \beta| + \sum_{i \in \{i: y_i < x_i' \beta\}} (1 - \tau) |y_i - x_i' \beta| \right],$$

здесь первая сумма – для выбранного произвольного значения квантиля представляет сумму модулей неотрицательных невязок – разностей между наблюдаемыми y_i и восстановленными $x_i' \beta$ значениями зависимой переменной y . При этом в первой сумме модули неотрицательных невязок участвуют в суммировании с весами τ . Соответственно, вторая сумма есть сумма модулей отрицательных невязок – разностей между наблюдаемыми y_i и восстановленными $x_i' \beta$ значениями зависимой переменной y , но участвующих в суммировании с весами $(1 - \tau)$. При произвольных зависимости функции потерь для квантильной регрессии от невязок представляет собой, вообще говоря, несимметричную для положительных и отрицательных значений невязок линейную

функцию, недифференцируемую в точке нулевого значения невязки. Лишь в частном случае $\tau=0.5$ (т.н. медианная регрессия), функция потерь симметрична относительно нулевого значения невязки.

В настоящей работе оценка трендов приземной суточной температуры методом квантильной регрессии осуществлялась на основе данных метеорологических станций, имеющих не менее 30 лет наблюдений за период 1987-2020 гг. Таких станций на территории России насчитывалось более 1400.

Оценки аномалий суточных значений вычислялись по отношению к суточным нормам за период 1987-2020 гг. Для построения процесс-диаграмм и последующего обобщения расчеты МКР трендов аномалий приземной температуры для каждой станции наблюдения и для каждого из четырех сезонов года осуществлялись для следующих 21 значений квантилей τ :

$$\tau = 0.01;$$

интервала значений квантилей τ от 0.05 до 0.95 включительно с шагом 0.05 (всего 19 значений);

$$\tau = 0.99.$$

Оптимизационная задача при вычислении коэффициента квантильной регрессии решалась симплекс-методом (см., например, Dantzig, 1987). Стандартные ошибки коэффициентов β оценивались методом бутстрепа (Efron, 1979) с 200 повторениями и с доверительной вероятностью 0.95.

Перечисленные выше оценки квантильных трендов для различных τ рассчитывались для каждого из четырех сезонов для аномалий суточных температур: T_{\min} (суточный минимум), T_{\max} (суточный максимум) и T_{mean} (средняя суточная).

Далее, на основе рассчитанных коэффициентов квантильных трендов по каждой станции рассчитывались характеристики:

– разности между коэффициентами тренда для разных значений квантилей: $T_{.25}-T_{.05}$ между квантилями $\tau=0.25$ и 0.05 (характеристика «левого хвоста распределения»); $T_{.75}-T_{.25}$ – разности между квантилями $\tau=0.75$ и 0.25 (характеристика «срединной части распределения»); $T_{.95}-T_{.75}$ – разности между квантилями $\tau=0.95$ и 0.75 (характеристика «правого хвоста распределения») – всего 36 характеристик для трех интервалов квантилей, аномалий трех характеристик температуры T_{\min} (суточный минимум), T_{\max} (суточный максимум) и T_{mean} (средняя суточная), и для четырех сезонов года – всего 36 значений;

– среднее значение тренда по всем рассчитанным квантилям для аномалий каждой из трех характеристик температуры и каждого из четырех сезонов – всего 12 значений.

Всего таким образом рассчитывались значения 48 характеристик, каждая из них затем проходила процедуру стандартизации – приведение к нулевому среднему и единичной стандартной ошибке.

На следующем этапе расчетов для кластеризации станций в пространстве стандартизованных значений 48-ми переменных – характеристик квантильных трендов, использовалась стандартная процедура, реализующая метод k-средних (k-MEANS) (см., например, основополагающие публикации по методу

к-средних: Steinhaus, 1956; Lloyd, 1982). Кластеризация осуществлялась по 1414 станциям, имеющим не менее 30 лет наблюдений по всем сезонам.

Было априорно выбрано число «начальных зародышей» (seeds) кластеров, равное 60. В качестве 60 «зародышей» центров кластеров были выбраны координаты в пространстве размерности 48 характеристик МКР трендов температуры по таким 60 станциям, что евклидовы расстояния в 48-мерном пространстве между любой парой отобранных «зародышей» не увеличиваются при любых заменах отбираемых 60 станций - «зародышей» на другие станции. Отобранные в качестве «зародышей центров кластеров» 60 станций представлены на рис. 1.

Процесс кластеризации проводился с удалением кластеров, содержащих менее 20 станций, и перераспределением по другим кластерам содержащихся в них станций. Отметим, что, как при выборе 60 «зародышей», так и в ходе дальнейшей кластеризации переменные, учитывающие географию точек станций, не были использованы.

В итоге при последующей кластеризации методом к-средних в пространстве 48 переменных, описывающих многомерные характеристики МКР трендов аномалий суточных значений температур относительно соответствующих суточных норм, были выделены 12 кластеров.

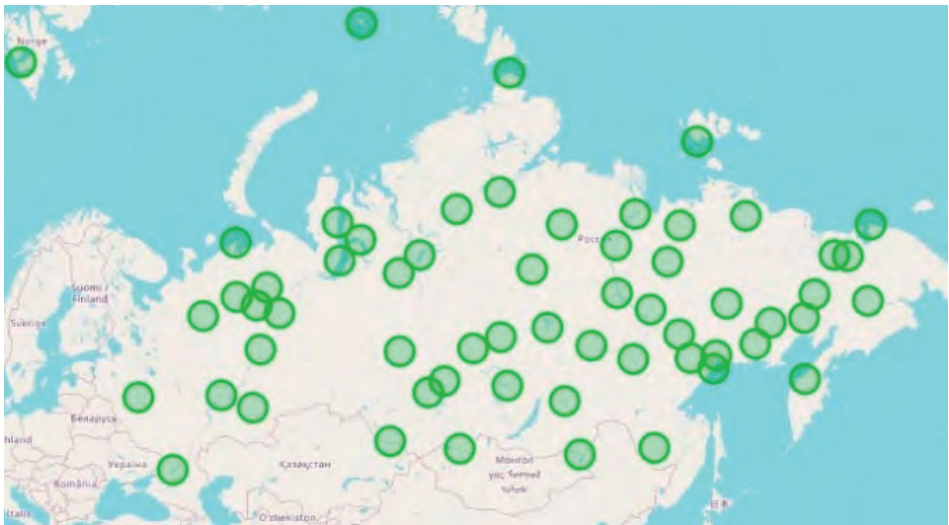


Рисунок 1. Расположение 60 метеорологических станций, отобранных в качестве «зародышей» центров кластеров

Figure 1. Location of 60 meteorological stations selected as "seeds" of cluster centers

На рис. 2 представлены результаты кластеризации методом к-средних – 12 кластеров метеорологических станций территории России, таких, что в состав каждого из кластеров включаются станции, схожие по проявлению 48 основанных на методе квантильной регрессии характеристик трендов приземной температуры. Станции, вошедшие в каждый из 12 кластеров, выделены на рис.2 определенным цветом. Следует отметить, что, несмотря на отсутствие среди рассматриваемых 48 переменных характеристик географического

положения станций наблюдений, в пределах каждого кластера станции располагаются географически достаточно компактно. Нумерация кластеров при этом носит чисто условный характер.



Рисунок 2. Двенадцать кластеров метеорологических станций территории РФ, объединенных по схожести характеристик МКР трендов приземной температуры
 Станции, вошедшие в каждый из 12 кластеров, выделены определенным цветом

Figure 2. Twelve clusters of meteorological stations on the territory of the Russian Federation, united by the similarity of the characteristics of the MCR surface temperature trends
 The stations included in each of the 12 clusters are highlighted in a certain color

Ниже в табл. 1 приводятся сведения о географическом положении основной массы станций, отнесенных к каждому из 12 выделенных кластеров.

Таблица 1. Географическое положение основной массы станций, отнесенных к каждому из 12 выделенных кластеров

Table 1. Geographical location of the bulk of the stations assigned to each of the 12 identified clusters

Номер кластера	Географическое расположение основной массы метеорологических станций, отнесенных к кластеру
1	Северная часть Восточной Сибири и зоны азиатского побережья арктических морей
2	Территории Южного Урала, Тюменской области
3	Средние широты Западной и Центральной Сибири
4	Северная часть ЕТР, территории Карелии, Кольского полуострова, северной части Урала, и несколько станций территории Чукотки *
5	Забайкалье, регионы верхнего и среднего течения Амура
6	Территория южной части ЕТР, Северного Кавказа
7	Регионы Алтая, южная часть Западной Сибири
8	Центральная часть ЕТР – с выходом к побережью Белого моря
9	Центральная часть ЕТР южнее регионов, отнесенных к кластеру 8, в западной части ЕТР – с выходом к южной части побережья Финского залива

Продолжение таблицы 1.

Номер кластера	Географическое расположение основной массы метеорологических станций, отнесенных к кластеру
10	Хабаровский край, Приморский край, побережье Охотского моря, территории п-ова Камчатка и о-ва Сахалин
11	Иркутская область, регионы к северу от Забайкалья, юг Восточной Сибири
12	Средние широты Восточной Сибири, территория Республики Саха (Якутия) за исключением побережья арктических морей, северные районы Центральной Сибири

* попадание станций Чукотки в кластер 4 может быть объяснено редкой сетью удовлетворяющих условиям отбора станций указанного региона, из-за чего для образования отдельного кластера станций их количество оказывается недостаточным.

Основные статистические характеристики каждого из 12 выделенных кластеров, информация о ближайшем кластере и о расстоянии до центроида ближайшего кластера, приведены в табл. 2. Детальная информация о взаимных межцентроидных расстояниях всех выделенных 12 кластеров приведена в табл. 3. Все статистики в табл. 2 и 3 приведены для стандартизованных 48 характеристик квантильных трендов.

Таблица 2. Основные статистические характеристики 12 кластеров метеостанций, содержащих сходные параметры трендов аномалий температуры, основанных на методе квантильной регрессии

Table 2. Main statistical characteristics of 12 clusters of weather stations containing similar parameters of temperature anomaly trends based on the quantile regression method

Номер кластера	Число станций	Стандартная ошибка *	Радиус	Ближайший кластер	Расстояние до центроида ближайшего кластера
1	31	1.26	20.52	4	7.90
2	116	0.68	6.94	10	4.48
3	53	0.90	7.71	11	5.79
4	108	0.90	11.29	9	5.14
5	99	0.66	8.59	11	3.96
6	191	0.67	9.83	9	4.58
7	147	0.68	7.46	11	4.70
8	118	0.64	8.85	9	4.23
9	204	0.61	8.57	8	4.23
10	183	0.68	8.30	5	4.07
11	96	0.72	7.63	5	3.96
12	68	1.02	10.29	3	7.33

* имеется в виду стандартная ошибка расстояний объектов кластера до центроида этого кластера

Таблица 3. Взаимные межцентроидные расстояния выделенных 12 кластеров метеорологических станций

Table 3. Mutual intercentroid distances of 12 identified clusters of meteorological stations

Номер кластера	Расстояние между центроидами кластеров											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	.	10.24	10.56	7.90	11.65	8.73	11.37	9.05	8.48	10.27	10.72	8.59
2	10.24	.	6.88	6.64	6.17	7.11	6.40	6.83	5.23	4.48	5.88	9.49
3	10.56	6.88	.	7.44	7.26	7.42	6.89	9.67	7.86	6.80	5.79	7.33
4	7.90	6.64	7.44	.	8.57	6.02	9.56	5.25	5.14	7.00	8.86	7.60
5	11.65	6.17	7.26	8.57	.	6.20	5.89	8.81	6.37	4.07	3.96	10.06
6	8.73	7.11	7.42	6.02	6.20	.	8.37	7.58	4.58	5.67	7.27	8.54
7	11.37	6.40	6.89	9.56	5.89	8.37	.	10.17	8.25	6.76	4.70	10.39
8	9.05	6.83	9.67	5.25	8.81	7.58	10.17	.	4.23	6.95	9.31	8.17
9	8.48	5.23	7.86	5.14	6.37	4.58	8.25	4.23	.	4.71	7.31	8.16
10	10.27	4.48	6.80	7.00	4.07	5.67	6.76	6.95	4.71	.	4.73	8.89
11	10.72	5.88	5.79	8.86	3.96	7.27	4.70	9.31	7.31	4.73	.	8.86
12	8.59	9.49	7.33	7.60	10.06	8.54	10.39	8.17	8.16	8.89	8.86	.

Результаты анализа

Отметим некоторые особенности результатов кластеризации характеристик квантильных трендов аномалий приземной температуры для метеостанций территории РФ.

Наименьшим из межцентроидных расстояний среди всевозможных пар выделенных кластеров является расстояние между кластерами 5 и 11, что представляется вполне логичным, поскольку большинство отнесенных к этим кластерам станций географически близки, и температурный режим регионов их расположения сходен.

Межцентроидные расстояния для выделенного кластера 1 по отношению к центроидам других выделенных кластеров, представляются наиболее значительными. Для кластера 1 можно отметить максимально большие значения его стандартной ошибки и его радиуса по сравнению с другими кластерами, что представляется вполне естественным, с учетом низкой освещенности данными и весьма значительной протяженности территорий расположения отнесенных к кластеру 1 станций. Для центроида выделенного кластера 1 наименьшим среди расстояний до центроидов других кластеров является расстояние до центроида кластера 4, причем станции кластера 4 располагаются не только на севере ЕТР и Уральского региона, но и к востоку от станций региона кластера 1, охватывая при этом территорию Чукотки. Последнее, впрочем, может быть объяснено тем, что из-за недостатка количества станций на крайнем северо-востоке России отдельный кластер в этом регионе сформирован быть не может. В целом же можно отметить сходство проявления особенностей квантильных трендов температуры для зон побережья арктических морей в европейской и азиатской частях РФ.

В свою очередь, для центроида кластера 4 (Северная часть ЕТР, территории Карелии, Кольского полуострова, северной части Урала) наиболее близкими являются центроиды кластеров 8 и 9, т.е. кластеров, отнесенные к которым станции располагаются в ЕТР южнее основной массы станций кластера 4.

По полученным результатам расчетов квантильных трендов температуры и результатам кластеризации, для значений квантильных трендов температуры на станциях каждого в отдельности из выделенных 12 кластеров были построены диаграммы «ящик с усами». По горизонтальной оси этих диаграмм были отложены различные значения квантилей τ . Всего для удобства построения графиков из расчетных 21 значения квантильных трендов были выбраны квантильные тренды для 11 значений квантилей: $\tau=0.01, 0.05, 0.15, 0.25, 0.35, 0.50, 0.65, 0.75, 0.85, 0.95, 0.99$. Соответственно, на вертикальной оси были отображены значения квантильных трендов приземной температуры воздуха в градусах С/10 лет.

Построенные таким образом диаграммы «ящик с усами» в отдельности для каждого из четырех сезонов и в отдельности для аномалий каждого из трех значений суточной температуры (T_{\min} (суточный минимум), T_{\max} (суточный максимум) и T_{mean} (средняя суточная)), – представляют обобщения процесс-диаграмм квантильных трендов отдельных станций, отнесенных к каждому из выделенных 12 кластеров. Они позволяют визуализировать особенности проявления свойств квантильных трендов для каждого из 12 выделенных кластеров.

На рис. 3 представлены 12 диаграмм для каждого из 12 выделенных кластеров, для зимнего сезона (декабрь-февраль) для аномалий максимальной суточной температуры. Очевидны различия в проявлении квантильных трендов между 12 кластерами станций территории РФ, выделенными на основе МКР квантильных трендов.

Так, кластеры 4, 8, 9, 10 и 12 могут быть охарактеризованы тем, что в зимний сезон на большинстве отнесенных к каждому из них станций тенденция потепления отмечается главным образом для малых значений квантилей. Иными словами, имеет место долгопериодная тенденция увеличения самых холодных значений температуры, в то время как по мере увеличения значений квантилей тенденции потепления становятся все менее заметными, а для больших значений квантилей эти тенденции практически не наблюдаются.

Для станций, отнесенных к кластеру 1 и расположенных в северной части Восточной Сибири, включая побережья арктических морей, характерны значительные тенденции потепления на всем диапазоне квантилей. При этом для квантилей, соответствующих обоим «хвостам распределений», они несколько более выражены, чем для других значений квантилей.

Для станций, отнесённых к кластерам 7 и 11 (преимущественно регионы Алтай, южной части Западной Сибири, Иркутской области) характерны долгопериодные тенденции похолодания зимних сезонов для малых значений квантилей, т.е. тенденции дальнейшего усиления наиболее сильных морозов. Наиболее значительные тенденции усиления самых сильных морозов (таким морозам соответствуют малые значения квантиля τ), могут быть

отмечены для территории станций, отнесенных к кластеру 7. Более того, для территорий, отнесенных к кластеру 7, для большинства станций преобладают отрицательные тренды на всем диапазоне τ за исключением самых больших τ : $\tau=0.95$ и $\tau=0.99$. Особенности проявления квантильных трендов зимнего сезона на станциях кластера 7 определили необходимость изменения масштаба вертикальной оси на графиках рис. 3 и рис.4, по сравнению с остальными графиками.

Аналогичный анализ 12 диаграмм по остальным трем сезонам для 12 выделенных кластеров, результаты которого здесь не приводятся, позволяет отметить различия проявления квантильных трендов между кластерами и для остальных сезонов.

На рис. 4 представлены диаграммы «ящик с усами», демонстрирующие различия характера изменений квантильных трендов аномалий максимальной суточной температуры для четырех сезонов года. Рис. 4а демонстрирует диаграммы для кластера 7 (Регионы Алтая, южная часть Западной Сибири), а рис. 4б – для станций кластера 8 (Центральная часть ЕТР, с выходом к побережью Белого моря).

Для станций, отнесенных к кластеру 7, следует отметить противоположный характер тенденций изменения квантильных трендов в диапазоне изменения квантилей, для зимнего сезона, с одной стороны, и для весеннего и осеннего сезонов, с другой стороны.

Для станций, отнесённых к кластеру 8, следует отметить сходство тенденций изменения квантильных трендов в диапазоне изменения квантилей для зимнего и для осеннего сезонов.

Для обоих рассматриваемых на рис. 4 кластеров характерно, что в летний сезон квантильные тренды во всем диапазоне изменения квантилей выражены относительно слабо, причём их разброс между отдельными станциями обоих рассматриваемых кластеров невелик. Указанная особенность летнего сезона при детальном рассмотрении может быть отмечена и для остальных кластеров.

Следует также отметить некоторые имеющиеся различия между диаграммами для одних и тех же сезонов и кластеров, для трендов аномалий трех рассмотренных суточных температур: T_{\min} (суточный минимум), T_{\max} (суточный максимум) и T_{mean} (средняя суточная). Указанные различия продемонстрированы на рис. 5. Более детальный анализ квантильных трендов не позволяет утверждать о существенных отличиях между проявлениями трендов для трех рассматриваемых суточных температур в пределах одних и тех же выделенных кластеров и одноименных сезонов.

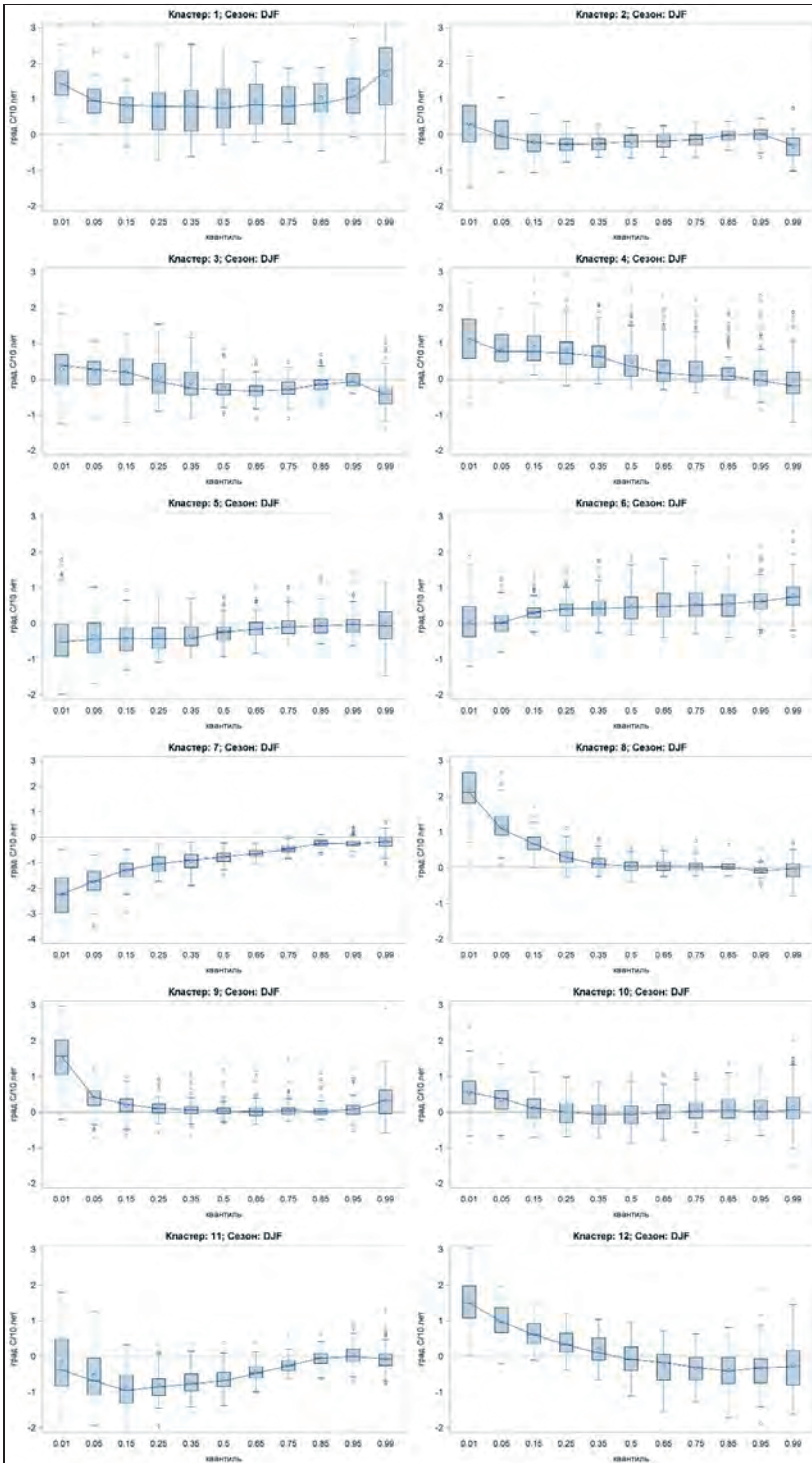


Рисунок 3. Обобщения в виде «ящиков с усами» процесс-диаграмм квантильных трендов для различных значений квантиля τ , рассчитанных для аномалий максимальной суточной температуры зимнего сезона для станций каждого из 12 выделенных кластеров
Для каждого «ящика с усами» по отнесенным к кластеру станциям: верхняя и нижняя крышки «ящика» – третья и первая квартили, ромб – среднее значение, горизонтальная черта

– медианное значение квантильного тренда, длина верхнего и нижнего «усов» соответствует 1.5 межквартильного расстояния («высоты ящика»)

Figure 3. Generalizations in the form of "boxes with whiskers" process diagrams of quantile trends for different values of the quantile τ , calculated for the anomalies of the maximum daily temperature of the winter season for the stations of each of the 12 identified clusters

For each "box with a mustache" for the stations assigned to the cluster: the upper and lower covers of the "box" are the third and first quartiles, the rhombus is the average value, the horizontal line is the median value of the quantile trend, the length of the upper and lower "whiskers" corresponds to 1.5 interquartile distance ("height of the box")

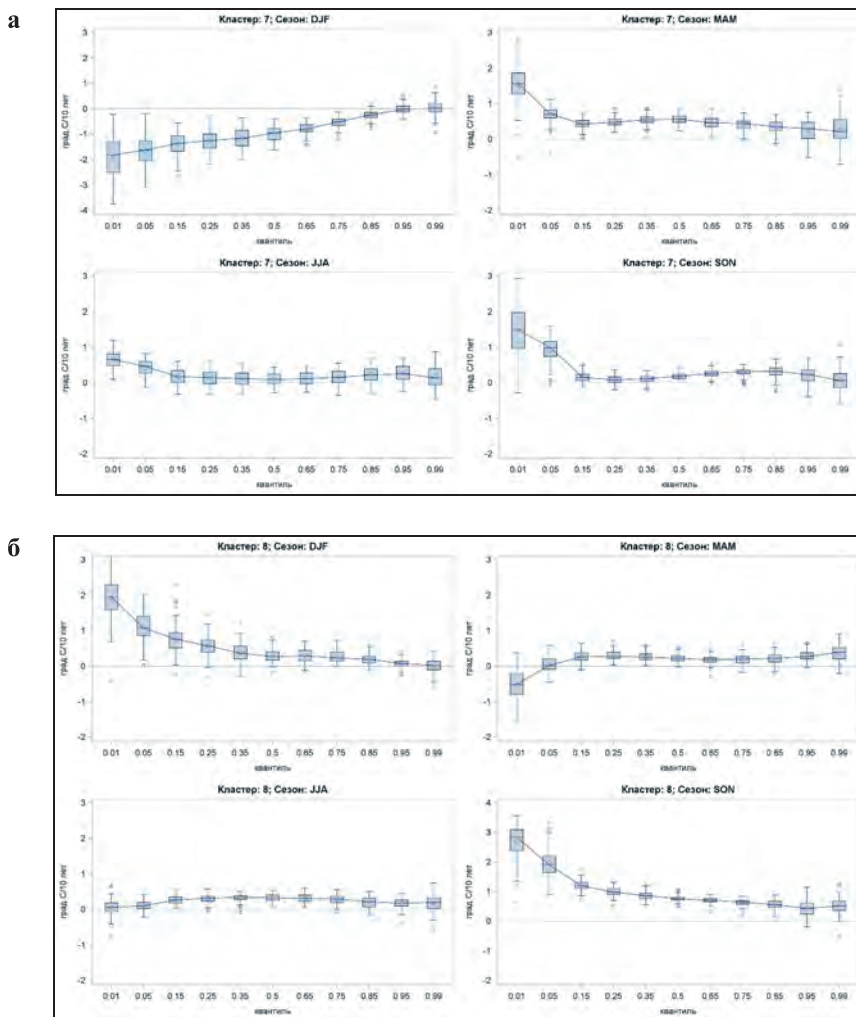


Рисунок 4. Как на рис. 3, но для аномалий максимальной суточной температуры для четырех сезонов года:

а) для станций кластера 7, б) для станций кластера 8

Figure 4. As in fig. 3, but for maximum daily temperature anomalies for the four seasons of the year: а) for cluster 7 stations, б) for cluster 8 stations

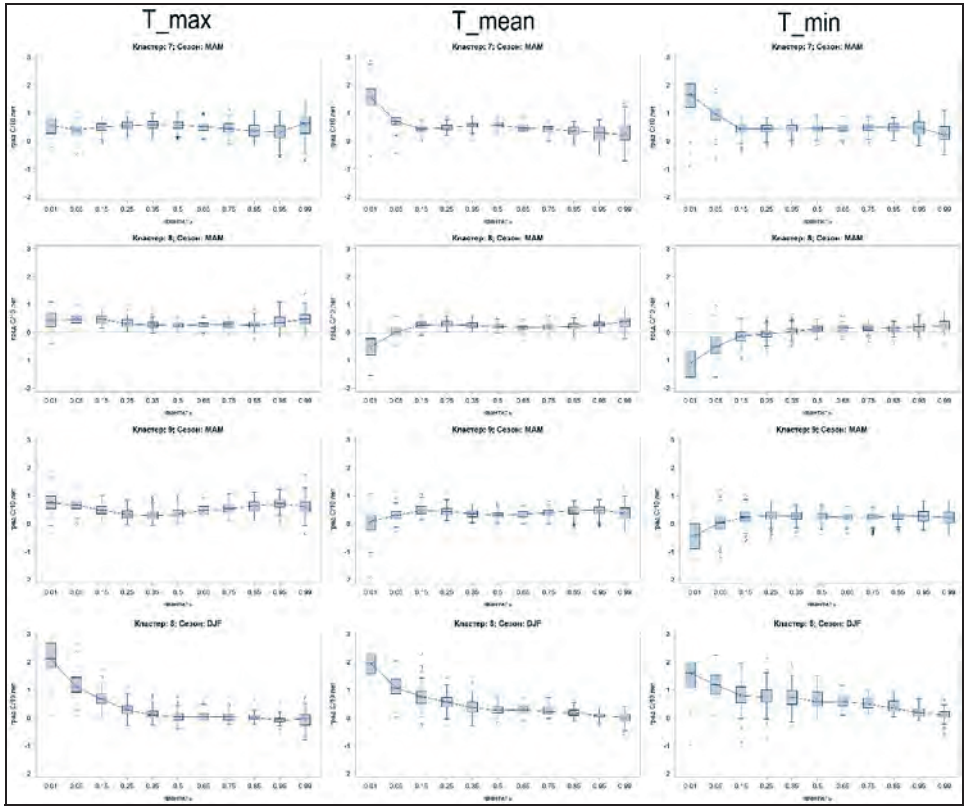


Рисунок 5. Как на рис.3, но для квантильных трендов аномалий максимальной (левый столбец) средней (средний столбец) и минимальной (правый столбец) суточных температур
Горизонтальные ряды 1,2 и 3 – для весеннего сезона кластеров 7, 8 и 9 соответственно, горизонтальный ряд 4 – для зимнего сезона кластера 8.

Figure 5. As in Fig. 3, but for quantile anomaly trends of maximum (left column), mean (middle column) and minimum (right column) daily temperature anomalies
Horizontal rows 1,2 and 3 are for the spring season of clusters 7, 8 and 9, respectively, horizontal row 4 is for the winter season of cluster 8.

Закключение.

В работе использованы расчеты климатических трендов аномалий суточных минимальной, максимальной и средней суточных температур воздуха, основанные на методе квантильной регрессии (МКР), позволяющие оценивать тренды с детализацией для любого значения квантиля в диапазоне изменения квантилей от 0 до 1. На основе выполненных расчетов детализированных для различных квантилей трендов температуры произведена кластеризация метеорологических станций территории РФ. Кластеризация выполнена в многомерном пространстве, при формировании которого учтены сезонные особенности проявления МКР трендов для всех трех видов суточных температур, особенности проявления МКР трендов в разных частях диапазона квантилей. В сформированном многомерном пространстве выявлены двенадцать

цать кластеров метеорологических станций, схожих, с точки зрения проявления МКР трендов температуры. Несмотря на отсутствие среди переменных многомерного пространства характеристик географического положения станций наблюдений, в пределах каждого из 12 выделенных кластеров станции располагаются географически достаточно компактно.

По результатам кластеризации описаны некоторые особенности квантильных трендов аномалий температуры конкретных сезонов в пределах групп станций, отнесенных к отдельным кластерам.

Очевидными являются различия в проявлении квантильных трендов между 12 кластерами станций территории РФ, выделенными на основе МКР квантильных трендов. При этом, однако, между отдельными парами кластеров может быть отмечено существенное сходство.

Существенные отличия в пределах групп станций, отнесенных к конкретным кластерам, могут быть отмечены в проявлении МКР трендов температуры для разных сезонов. При этом летние сезоны, как показывает анализ, демонстрируют меньшие значения квантильных трендов температуры на всем диапазоне квантилей.

Кроме того, были рассмотрены различия между проявлениями МКР трендов в пределах одних и тех же сезонов и выделенных кластеров, для аномалий трех рассмотренных суточных температур: T_{\min} (суточный минимум), T_{\max} (суточный максимум) и T_{mean} (средняя суточная). Как показал анализ, при таких сопоставлениях различия между тремя вариантами суточных температур имеются, однако они не представляются существенными.

Ряд полученных результатов из-за ограниченного объема статьи здесь не анализируется, и их интерпретация не приводится. Так, предметом отдельного анализа может стать оценка и интерпретация вкладов в межкластерную изменчивость конкретных переменных, из которых было сформировано многомерное пространство для кластеризации станций. Не в полной мере приведены и обсуждены особенности проявления квантильных трендов по двенадцати кластерам для остальных, помимо зимнего, сезонов.

Подходы и результаты настоящей работы могут быть использованы для уточнения климатического районирования территории РФ, что представляется весьма актуальным при подготовке и реализации региональных планов адаптации к изменениям климата. Результаты могут также быть использованы при решении различных задач прикладной климатологии, в основе которых лежат расчеты квантилей различных метеовеличин.

Список литературы.

Стерин, А.М., Лавров, А.С. (2021) Тренды температуры в свободной атмосфере: расчеты с использованием метода квантильной регрессии, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 7, № 2, с. 99-114, doi: 10.21513/2410-8758-2021-2-101-116.

Стерин, А.М., Тимофеев, А.А. (2016) Об оценке трендов приземной температуры воздуха для территории России методом квантильной регрессии, *Метеорология и гидрология*, № 6, с. 17-30.

Тимофеев, А.А., Стерин, А.М. (2010) Применение метода квантильной регрессии для анализа изменений характеристик климата, *Метеорология и гидрология*, № 5, с. 27-41.

Bulygina, O.N., Razuvaev, V.N., Korshunova, N.N., Groisman, P.Ya. (2007) Climate variations and changes in extreme climate events in Russia, *Environ. Res. Lett.*, vol. 2, no. 4, 045020, 7 p.

Chapman, S., Stainforth, D., Watkins, N. (2015). Limits to the quantification of local climate change, *Environ. Res. Lett.*, vol. 10, no. 094018.

Dantzig, G.B. (1987) *Origins of the simplex method (PDF)*. In Nash, Stephen G. (ed.). A History of Scientific Computing. Association for Computing Machinery, pp. 141-151, doi:10.1145/87252.88081. ISBN 978-0-201-50814-7.

Efron, B. (1979) Bootstrap Methods: Another Look at the Jackknife, *The Annals of Statistics*, vol. 7, no. 1, pp. 1-26.

Fan Lijun, (2014) Quantile Trends in Temperature Extremes in China, *Atmos. and Oceanic Sci. Lett.*, vol. 7, no. 4, pp. 304-308.

Gao, M., Franzke, C., (2017) Quantile Regression-based Spatio-temporal Analysis of Extreme Temperature Change in China, *J. Climate*, 30, 9897-9914, doi:10.1175/JCLI-D-17-0356.1.

Grillakis, M., Koutroulis, A. et al. (2017) A method to preserve trends in quantile mapping bias correction of climate modeled temperature, *Earth System Dynamics*, vol. 8, pp. 889-900.

Haugen, M., Stein, M., Moyer, E. (2018) Estimating Changes in Temperature Distributions in Large Ensemble of Climate Simulations Using Quantile Regression, *Jour. Climate*, vol. 31, pp. 8573-8588.

Haugen, M., Stein, L., Srivier, R., Moyer, E. (2019) Future climate emulations using quantile regressions on large ensembles, *Adv. Stat. Clim. Meteorol. Oceanogr.*, vol. 5, pp. 37-55.

Koenker, R., Bassett, G. Jr. (1978) Regression Quantiles., *Econometrica*, vol. 46, no. 1, pp. 33-50.

Lee, K., Baek, H-J and ChunHo Cho Ch H. (2013) Analysis of changes in extreme temperatures using quantile regression, *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.*, vol. 49, pp. 313-323.

Lloyd, S.P. (1982) Least Squares Quantization in PCM, *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 28, no. 2, pp. 129-137.

Steinhaus, H. (1956) Sur la division des corps materiels en parties, *Bulletin de l'academie Polonaise des sciences*, vol. 4, no. 12, pp. 801-804.

Sterin, A.M., Timofeev, A.A. (2016) Estimation of Surface Air Temperature Trends in Russia Using the Quantile Regression Method. ISSN 1068-3739, *Russian Meteorology and Hydrology*, vol. 41, no. 6, pp. 388-397. Ó Allerton Press, Inc., 2016.

Timofeev, A.A., Sterin, A.M. (2010) Using the Quantile Regression Method to Analyze Changes in Climate Characteristics, *Meteorol. Gidrol.*, no. 5, p. 27-41.

Timofeev, A.A., Sterin, A.M. (2010) Using the Quantile Regression Method to Analyze Changes in Climate Characteristics, *Russian Meteorology and Hydrology*, vol. 35, no. 5, pp. 310-319, Allerton Press, Inc., 2010.

Xuan, Y., Abbas, S.A., Song, X., Reeve, D.E. (2017) Quantile regression based method for investigating rainfall trends associated with flooding and drought conditions, *European Water. E.W. Publications*, vol. 59, pp. 137-143.

Yang, C., Li, L., Xu, J. (2018) Changing temperature extremes based on CMIP5 output via semi-parametric quantile regression approach, *Int. J. Climatol.*, vol. 38, pp. 2736-3748.

Zhang, S., Yew, Gan T., Bush, A. (2020) Variability of Arctic Sea Ice Based on Quantile Regression and the Teleconnection with Large-Scale Climate Patterns, *Jour. Climate*, vol.33, pp. 4009-4025.

References.

Sterin, A.M., Lavrov, A.S. (2021) Trendy temperatury v svobodnoj atmosfere: raschety s ispol'zovaniem metoda kvantil'noj regressii [Upper-air temperature trends: calculations based on quantile regression methodology], *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, vol. 7, no. 2, pp. 99-114, doi: 10.21513/2410-8758-2021-2-101-116.

Sterin, A.M., Timofeev, A.A. (2016) Ob ocenke trendov prizemnoj temperatury vozduha dlya territorii Rossii metodom kvantil'noj regressii [Estimation of Surface Air Temperature Trends in Russia Using the Quantile Regression Method], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 6, pp. 17-30.

Timofeev, A.A., Sterin, A.M. (2010) Primenenie metoda kvantil'noj regressii dlya analiza izmenenij harakteristik klimata [Using the Quantile Regression Method to Analyze Changes in Climate Characteristics], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 5, pp. 27-41.

Bulygina, O.N., Razuvaev, V.N., Korshunova, N.N., Groisman, P.Ya. (2007) Climate variations and changes in extreme climate events in Russia, *Environ. Res. Lett.*, vol. 2, no. 4, 045020, 7 p.

Chapman, S., Stainforth, D., Watkins, N. (2015). Limits to the quantification of local climate change, *Environ. Res. Lett.*, vol. 10, no. 094018.

Dantzig, G.B. (1987) *Origins of the simplex method (PDF)*. In Nash, Stephen G. (ed.). *A History of Scientific Computing*. Association for Computing Machinery, pp. 141-151. doi:10.1145/87252.88081, ISBN 978-0-201-50814-7.

Efron, B., (1979) Bootstrap Methods: Another Look at the Jackknife, *The Annals of Statistics*, vol. 7, no. 1, pp. 1-26.

Fan Lijun, (2014) Quantile Trends in Temperature Extremes in China, *Atmos. and Oceanic Sci. Lett.*, vol. 7, no. 4, pp. 304-308.

Gao, M., Franzke, C. (2017) Quantile Regression-based Spatio-temporal Analysis of Extreme Temperature Change in China, *J. Climate*, 30, 9897-9914, doi:10.1175/JCLID-17-0356.1.

Grillakis, M., Koutroulis, A. et al. (2017) A method to preserve trends in quantile mapping bias correction of climate modeled temperature, *Earth System Dynamics*, vol. 8, pp. 889-900.

Haugen, M., Stein, M., Moyer, E. (2018) Estimating Changes in Temperature Distributions in Large Ensemble of Climate Simulations Using Quantile Regression, *Jour. Climate*, vol. 31, pp. 8573-8588.

Haugen, M., Stein, L., Srivier, R., Moyer, E. (2019) Future climate emulations using quantile regressions on large ensembles, *Adv. Stat. Clim. Meteorol. Oceanogr.*, vol. 5, pp. 37-55.

Koenker, R., Bassett, G. Jr. (1978) Regression Quantiles., *Econometrica*, vol. 46, no. 1, pp. 33-50.

Lee, K., Baek, H-J and ChunHo Cho Ch H. (2013) Analysis of changes in extreme temperatures using quantile regression, *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.*, vol. 49, pp. 313-323.

Lloyd, S.P. (1982) Least Squares Quantization in PCM, *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 28, no. 2, pp. 129-137.

Steinhaus, H. (1956) Sur la division des corps materiels en parties, *Bulletin de l'academie Polonaise des sciences*, vol. 4, no. 12, pp. 801-804.

Sterin, A.M., Timofeev, A.A. (2016) Estimation of Surface Air Temperature Trends in Russia Using the Quantile Regression Method. ISSN 1068-3739, *Russian Meteorology and Hydrology*, vol. 41, no. 6, pp. 388-397. Ó Allerton Press, Inc., 2016.

Timofeev, A.A., Sterin, A.M. (2010) Using the Quantile Regression Method to Analyze Changes in Climate Characteristics, *Meteorol. Gidrol.*, no. 5, p. 27-41.

Timofeev, A.A., Sterin, A.M. (2010) Using the Quantile Regression Method to Analyze Changes in Climate Characteristics, *Russian Meteorology and Hydrology*, Vol. 35, no. 5, pp. 310-319, Allerton Press, Inc., 2010.

Xuan, Y., Abbas, S.A., Song, X., Reeve, D.E. (2017) Quantile regression based method for investigating rainfall trends associated with flooding and drought conditions, *European Water: E.W. Publications*, vol. 59, pp. 137-143.

Yang, C., Li, L., Xu, J. (2018) Changing temperature extremes based on CMIP5 output via semi-parametric quantile regression approach, *Int. J. Climatol.*, vol. 38, pp. 2736-3748.

Zhang, S., Yew, Gan T., Bush, A. (2020) Variability of Arctic Sea Ice Based on

Quantile Regression and the Teleconnection with Large-Scale Climate Patterns,
Jour. Climate, vol.33, pp. 4009-4025.

Статья поступила в редакцию (Received): 05.05.2022.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 19.05.2022.

Принята к публикации (Accepted): 22.05.2022.

Для цитирования / For citation:

Стерин, А.М., Лавров, А.С. (2022). Использование квантильной регрессии для оценки пространственных особенностей характеристик трендов приземной температуры на территории России, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 8, № 2, с. 238-257, doi: 10.21513/2410-8758-2022-2-238-257.

Sterin, A.M., Lavrov, A.S. (2022) Using Quantile Regression to Estimate Spatial Patterns of Surface Temperature Trends over the Territory of Russia, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 8, no. 2, pp. 238-257, doi: 10.21513/2410-8758-2022-2-238-257.