
Детализация климатических трендов температуры и осадков на территории России с использованием квантильной регрессии и кластеризации

А.С. Лавров, А.М. Стерин*

ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт
гидрометеорологической информации – Мировой центр данных»,
Россия, 249035, г. Обнинск, ул. Королева, 6

*Адрес для переписки: fliorcid@yandex.ru

Реферат. С использованием метода квантильной регрессии (QR, quantile regression), дающего детальную картину климатических трендов для любого из квантилей значений метеовеличин в интервале от 0 до 1, выполнены расчеты климатических трендов максимальной суточной температуры и суточных сумм осадков для территории РФ. Для расчетов используются данные наблюдений по более чем 1450 метеорологическим станциям РФ за период с 1987 по 2021 годы включительно.

Проведена кластеризация рассчитанных климатических трендов и проанализированы пространственные особенности полученных кластеров метеорологических станций и их соответствие квазиоднородным климатическим регионам, используемым для обобщающих оценок состояния климата в «Докладах об особенностях климата на территории РФ», ежегодно выпускаемых Росгидрометом. Выделены 15 кластеров метеорологических станций на территории РФ, таких, что входящие в кластеры станции демонстрируют схожие особенности («паттерны») трендов максимальной суточной температуры и суточных сумм осадков. При этом в процессе кластеризации величины, определяющие географическое положение метеостанций, не участвовали.

Результаты работы могут быть использованы для уточнений климатического районирования территории РФ, учитывающего особенности тенденций долгопериодных изменений приземного климата.

Ключевые слова. Температура, сумма осадков, климатический тренд, квантиль, квантильная регрессия, кластер, метод К-средних.

Detailing of climatic trends of temperature and precipitation in the territory of the Russian Federation using quantile regression and clustering

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

All-Russian Research Institute of Hydrometeorological Information –
World Data Center,
6, Korolyov Str., Obninsk, 249035, Russian Federation

* Correspondence address: fliorcid@yandex.ru

Abstract. Using the method of quantile regression, which gives a detailed picture of climate trends for any of the quantiles in the range from 0 to 1, calculations of climate trends of maximum daily temperature and daily precipitation for the territory of the Russian Federation were made. For calculations, observational data from more than 1450 meteorological stations for the period from 1987 to 2021 inclusive are used.

The clustering of the calculated climate trends was carried out and the spatial features of the obtained clusters of meteorological stations and their correspondence to the quasi-homogeneous climatic regions used for assessments in the annual “Roshydromet’s Reports on the Peculiarities of the Climate on the Territory of the Russian Federation” were analyzed. 15 clusters of meteorological stations on the territory of the Russian Federation have been identified, such that the stations included in the clusters demonstrate similar features (“patterns”) of trends in maximum daily temperature and daily precipitation amounts. At the same time, the values that determine the geographical location of weather stations did not participate in the clustering process.

The results of the work can be used to refine the climatic zoning of the territory of the Russian Federation, taking into account the features of trends in long-term changes in surface climate.

Keywords. Temperature, total precipitation, climate trend, quantile, quantile regression, cluster, K-means method.

Введение

Квантили являются важной характеристикой распределений метеовеличин, дающей более полную картину по сравнению с традиционно исследуемыми в климатологии моментами первого и второго порядков. Интерес к квантилям в настоящее время возрастает в связи с необходимостью в условиях меняющегося климата анализировать свойства «хвостов» распределений метеовеличин, что в свою очередь важно для исследования свойств метеовеличин, близких к экстремальным и относимых к опасным и неблагоприятным метеорологическим явлениям.

Наряду с анализом распределений метеовеличин, в условиях меняющегося климата важна задача анализа эволюции во времени распределений метеовеличин. Решение такой задачи с рассмотрением независимой переменной X (предиктора), характеризующей положение значений метеовеличины Y (предиктанта) на временной оси, позволяет осуществлять оценку и анализ климатических трендов. Традиционно применяемые в климатологии оценки климатических трендов, основанные на методе наименьших квадратов (МНК), позволяют оценивать долгопериодные тенденции изменения лишь условного математического ожидания предиктанта $E(Y/X)$ в зависимости от предикторов X . Метод квантильной регрессии (Koenker, Bassett, 1978), (МКР) – робастный непараметрический инструментальный регрессионного анализа, дающий оценки значений коэффициента регрессии для произвольной в интервале от нуля до единицы величины квантиля τ ($0 < \tau < 1$) значений предиктанта Y .

Решение задачи построения линейной квантильной регрессии для произвольной величины квантиля τ ($0 < \tau < 1$) ведется путем оптимизации следующего выражения:

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

В случае задачи расчета климатических трендов, когда в роли предиктора рассматривается временной отсчет, МКР дает более детальное, по сравнению с методом наименьших квадратов, представление об изменении метеорологических характеристик с течением времени. В частности, он дает оценки трендов значений метеовеличин Y , близких к экстремально малым (для значений квантилей, близких к нулю – левый хвост распределения Y), и значений метеовеличин Y , близких к экстремально большим (для значений квантилей, близких к единице – правый хвост распределения Y), что весьма актуально в связи с увеличением частоты экстремальных явлений и отмечаемым ростом потерь от таких явлений.

В ходе анализа обычно строятся зависимости значений климатического тренда от величины квантиля из интервала от нуля до единицы, называемые процесс-диаграммами и представляющие детализированный по значениям квантиля тренд.

Результаты такого анализа опубликованы в ряде работ, причем первые появившиеся работы описывали результаты анализа трендов приземной температуры воздуха (Fan Lijun, 2014; Gao, Franzke, 2017; Sterin, Timofeev, 2016; Стерин, Тимофеев, 2016).

Наряду с анализом трендов температуры, метод квантильной регрессии находит широкое применение при анализе пространственных и временных особенностей режима осадков, в том числе трендов экстремально высоких значений осадков и вызываемых при этом соответствующих опасных явлениях (Sertac, 2021; Salam et al., 2019; Bhikhari, Nirajan, 2020; Zheng, 2016; Lausier, Shaleen, 2018; Haugen et al., 2019). В то же время достаточно широкое распространение получили работы по анализу с помощью метода квантильной регрессии режима засух (Willems, Vrac, 2011; Cannon et al., 2015; Zarch et al., 2015).

В ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» с помощью метода квантильной регрессии проводится исследование детальной структуры климатических трендов как для температуры в свободной атмосфере (Стерин, Лавров, 2021) по радиозондовым данным, так и для приземной температуры (Стерин, Лавров, 2022а,б).

Так, в работе (Стерин, Лавров, 2022а) исследование климатических трендов приземной температуры проводится на данных более чем 1400 метеорологических станций на территории России. Для пространственного обобщения полученных квантильных оценок трендов была выполнена кластеризация в многомерном пространстве характеристик квантильных трендов при-

земной температуры. При формировании многомерного пространства учитывались сезонные характеристики процесс-диаграмм трендов аномалий для трех характеристик суточной температуры: минимальной, максимальной и средней суточной температур. В результате кластеризации было показано, что, несмотря на отсутствие среди переменных многомерного пространства характеристик географического положения пунктов наблюдений, полученные кластеры не только располагаются географически компактно, но и в основном соответствуют известным подходам к выделению на территории России квазиоднородных климатических регионов.

В качестве следующего шага анализа климатических трендов методом квантильной регрессии представляются целесообразными вычисление значений трендов с формированием многомерного пространства по характеристикам как температуры, так и осадков, и кластеризация станций по характеристикам трендов обеих этих метеовеличин. Отметим, что квантильная регрессия использовалась для совместного анализа детальной структуры трендов температуры и осадков, например, в работе (Onderka, Pecho, 2023), однако для конкретной локальной территории.

Результаты расчетов и их обсуждение

В данной работе климатические тренды приземной температуры исследуются совместно с климатическими трендами сумм осадков на территории всей РФ.

Как следует из результатов нашей предыдущей работы (Стерин, Лавров, 2022а), различия в результатах использования квантильной регрессии для анализа трендов трех суточных характеристик температуры: максимальной суточной, средней суточной и минимальной суточной температур – имеют место, но незначительны. Поэтому в данной работе используются расчеты температурных трендов на основе квантильной регрессии только для максимальной суточной температуры. Данные по средней суточной и минимальной суточной температуре в настоящих расчётах не использовались.

Для расчета климатических трендов использованы данные по примерно 1450 метеорологическим станциям РФ за период 1987-2021 гг. Оценки аномалий суточных значений максимальной температуры вычислялись по отношению к соответствующим суточным нормам за период 1987-2016 гг.

Для построения процесс-диаграмм и их последующего обобщения расчеты МКР трендов аномалий максимальной суточной приземной температуры T и сумм осадков R для каждой станции наблюдения и для каждого из четырех сезонов года осуществлялись для различных значений квантилей τ . Для каждого из четырех сезонов вводились общепринятые обозначения: DJF – декабрь-февраль, MAM – март-май, JJA – июнь-август и SON – сентябрь-ноябрь. По результатам расчетов, для аномалий максимальной суточной температуры для каждого из четырех сезонов сформированы переменные:

- разности между коэффициентами тренда β для разных значений квантилей: $T_{.25}-T_{.5}$ 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»);
- среднее значение тренда по всем рассчитанным квантилям для аномалий максимальной суточной температуры каждого из четырех сезонов.

Всего, таким образом, на основе расчетов трендов аномалий максимальной суточной температуры были сформированы 16 переменных.

При формировании переменных, описывающих квантильные тренды суточных сумм осадков, очевидно, что из-за присутствия в месячных и сезонных порциях данных значительной доли нулевых значений суточных осадков для малых величин квантилей (обычно, для τ менее 0.5-0.6) тренды принимают нулевые или незначимо малые по абсолютной величине значения. С учетом этого расчеты трендов суточных сумм осадков проводились для всего диапазона квантилей от 0.05 до 0.95, но для кластеризации формирование многомерных описаний трендов осадков ограничивалось диапазоном от $\tau = 0.65$ и заканчивая значением $\tau = 0.95$, а именно: на основании расчетов квантильных трендов для суточных сумм осадков R были сформированы для каждого из четырех сезонов переменные R_{65} , R_{75} , R_{85} и R_{95} – значения квантильных трендов для квантилей τ , равных 0.65, 0.75, 0.85 и 0.95 соответственно. Рассчитывалась также средняя сезонная сумма осадков.

Особенности процесс-диаграмм полного диапазона значений квантилей для суточных сумм осадков продемонстрированы на рис. 1. Интерпретация представленных на рис. 1 процесс-диаграмм состоит в следующем. Для станции Невельск большие значения сумм осадков в зимний сезон, соответствующие квантилям, превышающим 0.2, растут тем быстрее, чем больше значения квантилей. Аналогичная картина, но для весеннего сезона и для квантилей, превышающих 0.6, может быть отмечена для станции Свяяино. Противоположная тенденция, когда с ростом значений квантиля скорость роста значений суммы осадков становится отрицательной, наблюдается для летнего сезона в Астрахани и для осеннего сезона – по станции Тивяку (Хабаровский край). При этом для всех приводимых на рис. 1 случаев с ростом значений квантилей возрастает и неопределенность оценки квантильных трендов, независимо от знака трендов.

Кластеризация станций по значениям только трендов суточных сумм осадков (без трендов аномалий температуры) проводилась, но ее результаты и их обсуждение станут материалом отдельной публикации.

Общее число переменных по результатам расчетов с использованием МКР трендов аномалий максимальной суточной температуры и суточных сумм осадков составило 36. Каждая из 36 выбранных переменных перед использованием для кластеризации проходила процедуру стандартизации.

В пространстве сформированных 36 стандартизованных переменных методом k -средних (k -MEANS) была проведена кластеризация метеорологических станций, участвующих в расчетах. Процедура кластеризации для дан-

ной серии расчетов не имела принципиальных отличий от той, которая использовалась в аналогичных ранее проведенных расчетах для температуры без привлечения расчетов по суммам осадков, и более подробно описана в (Стерин, Лавров, 2022а). В результате кластеризации были выделены 15 групп объектов – станций, причем в каждую группу включены станции, наиболее схожие по проявлению квантильных трендов максимальной суточной температуры и суточных сумм осадков.

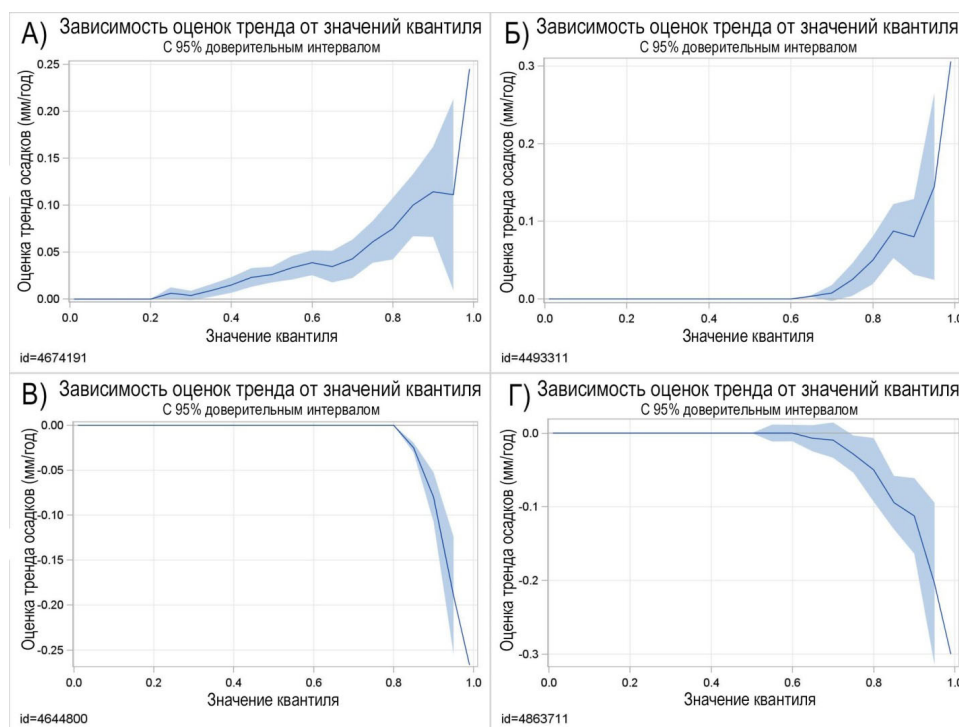


Рисунок 1. Примеры процесс-диаграмм полного диапазона значений квантилей для суточных сумм осадков

А) Невельск (Сахалин), зима; Б) Свиягино (Приморский край), весна; В) Астрахань, лето; Г) Тивяку (Хабаровский край), осень

Figure 1. Examples of quantile regression diagrams of the full range of quantile values for daily precipitation sums

A) Nevelsk (Sakhalin), winter; Б) Sviyagino (Primorsky Krai), spring; В) Astrakhan, summer; Г) Tivyaku (Khabarovsk Krai), fall

На рис. 2 представлены полученные результаты кластеризации методом k-средних – 15 кластеров объектов – метеорологических станций территории России.

Следует отметить, что, несмотря на отсутствие характеристик географического положения пунктов наблюдений среди рассматриваемых 36 переменных, в пределах каждого кластера станции располагаются географически достаточно компактно. Отметим также, что, как и в предыдущей работе, нумерация кластеров на рис. 1 носит чисто условный характер и какой-либо содержательной характеристикой кластера не является.

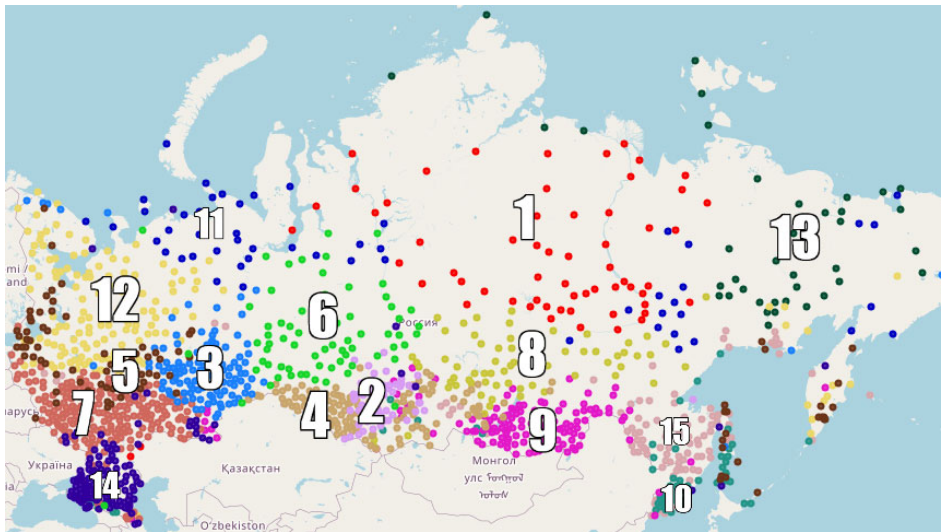


Рисунок 2. Пятнадцать кластеров метеорологических станций территории РФ, объединенных сходством проявления квантильных трендов максимальной суточной температуры и суммы осадков

Станции, вошедшие в каждый из кластеров, отображены определенным цветом

Figure 2. Fifteen clusters of meteorological stations on the territory of the Russian Federation, united by the similarity of quantile trends of maximum daily temperature and precipitation amount
Stations included in each of the clusters are shown in a specific color

Основные статистики кластеров и межцентроидные расстояния между кластерами, характеризующие структуру взаимного расположения «наиболее типичных представителей» каждого из кластеров в пространстве рассматриваемых переменных, представлены в табл. 1.

О вкладах некоторых из используемых в расчетах переменных в объяснение многомерной межкластерной дисперсии позволяет судить содержание табл. 2. Величина D представляет отношение межкластерной дисперсии RSQ к внутрикластерной дисперсии $(1-RSQ)$ для данной стандартизованной переменной. Отметим, что в число десяти переменных с наибольшими значениями D из рассматриваемых тридцати шести переменных входят три переменных, характеризующих квантильные тренды суточных сумм осадков летнего сезона.

Каждому кластеру для отнесенных в этот кластер метеорологических станций были поставлены в соответствие графики типа «ящик с усами» (Box-and-whisker plots), демонстрирующих зависимость разбросов квантильных трендов пунктов наблюдения (метеорологических станций) кластера от значений квантиля. Для каждого из 15 кластеров строились графики типа «ящик с усами» для квантильных трендов аномалий максимальной суточной температуры (4 графика, соответствующих четырем сезонам) и квантильных трендов суточных сумм осадков (4 графика, соответствующих четырем сезонам). Полученная группа 8 графиков составляет «образец» (паттерн) pattern) проявления в соответствующем кластере квантильных трендов температуры и

осадков для четырех различных сезонов года. В табл. 3 для каждого из выделенных 15 кластеров приведены особенности географического расположения основной массы отнесенных к этому кластеру станций и дается краткое описание соответствующего этому кластеру паттерна проявления квантильных трендов температуры и осадков.

Таблица 1. Статистики и межцентроидные расстояния для пятнадцати выделенных кластеров

Table 1. Statistics and intercentroidal distances for fifteen selected clusters

Кластер	N	STD	Ω	Расстояние до центроидов других кластеров														
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	61	0.82	8.86	.	7.62	6.46	6.08	7.74	7.11	6.03	4.78	6.35	9.33	4.83	6.06	5.30	6.58	6.88
2	65	0.69	7.41	7.62	.	5.75	3.31	6.72	4.59	6.64	4.91	5.25	6.19	6.27	6.10	7.80	7.43	5.30
3	123	0.67	8.34	6.46	5.75	.	4.91	5.29	4.17	4.08	4.44	4.97	5.44	5.04	4.51	6.26	5.58	3.92
4	123	0.62	5.56	6.08	3.31	4.91	.	6.66	4.54	6.04	3.39	4.05	6.28	5.60	5.64	6.58	6.66	4.12
5	91	0.81	12.79	7.74	6.72	5.29	6.66	.	5.85	4.95	5.92	6.89	6.02	6.29	3.78	7.11	7.92	5.15
6	71	0.73	10.28	7.11	4.59	4.17	4.54	5.85	.	6.41	4.75	6.66	5.21	5.00	5.49	6.81	7.58	4.52
7	211	0.68	7.66	6.03	6.64	4.08	6.04	4.95	6.41	.	5.20	4.90	6.48	5.91	5.12	6.45	4.30	5.21
8	66	0.68	5.92	4.78	4.91	4.44	3.39	5.92	4.75	5.20	.	3.93	6.70	5.16	4.89	6.29	6.51	4.39
9	128	0.69	14.00	6.35	5.25	4.97	4.05	6.89	6.66	4.90	3.93	.	7.26	6.47	5.60	6.99	5.61	4.94
10	63	0.96	13.93	9.33	6.19	5.44	6.28	6.02	5.21	6.48	6.70	7.26	.	7.76	6.76	9.34	7.91	3.81
11	55	0.85	8.01	4.83	6.27	5.04	5.60	6.29	5.00	5.91	5.16	6.47	7.76	.	4.14	4.62	6.45	5.60
12	144	0.66	6.61	6.06	6.10	4.51	5.64	3.78	5.49	5.12	4.89	5.60	6.76	4.14	.	5.43	6.69	4.46
13	41	0.97	11.34	5.30	7.80	6.26	6.58	7.11	6.81	6.45	6.29	6.99	9.34	4.62	5.43	.	7.09	6.89
14	134	1.08	20.96	6.58	7.43	5.58	6.66	7.92	7.58	4.30	6.51	5.61	7.91	6.45	6.69	7.09	.	6.44
15	101	0.74	7.20	6.88	5.30	3.92	4.12	5.15	4.52	5.21	4.39	4.94	3.81	5.60	4.46	6.89	6.44	.

Примечание. N – число станций в кластере, STD – внутрикластерная стандартная ошибка расстояний объектов кластера до центроида кластера, Ω – радиус кластера – максимальное по всевозможным парам объектов кластера расстояние между объектами кластера в евклидовой метрике.

Таблица 2. Десять переменных с наибольшими значениями D – отношения межкластерной дисперсии RSQ к внутрикластерной дисперсии (1- RSQ) для данной переменной

Table 2. Ten variables with the highest values of D, the ratio of inter-cluster variance RSQ to intra-cluster variance (1- RSQ) for a given variable

Переменная, условное название	Описание переменной	RSQ	D
ave_Max_son	Осредненный квантильный тренд аномалий максимальной суточной температуры для осеннего сезона (SON)	0.65	1.84
ave_Max_djf	Осредненный квантильный тренд аномалий максимальной суточной температуры для зимнего сезона (DJF)	0.63	1.72
ave_Max_jja	Осредненный квантильный тренд аномалий максимальной суточной температуры для летнего сезона (JJA)	0.61	1.56

Продолжение таблицы 2

Переменная, условное название	Описание переменной	RSQ	D
qvalue_75_25_Max_djf	Разность квантильных трендов аномалий максимальной суточной температуры для квантилей 0.75 и 0.25 для зимнего сезона (DJF)	0.55	1.21
ave_Max_mam	Осредненный квантильный тренд аномалий максимальной суточной температуры для весеннего сезона (MAM)	0.53	1.12
precip_85_JJA	Квантильный тренд суточных сумм осадков летнего сезона (JJA) для $\tau=0.85$	0.51	1.05
qvalue_75_25_Max_son	Разность квантильных трендов аномалий максимальной суточной температуры для квантилей 0.75 и 0.25 для осеннего сезона (SON)	0.50	1.01
precip_75_JJA	Квантильный тренд суточных сумм осадков летнего сезона (JJA) для $\tau=0.75$	0.50	1.00
precip_JJA	Средние сезонные суммы осадков для летнего сезона (JJA)	0.50	1.00
qvalue_25_5_Max_son	Разность квантильных трендов аномалий максимальной суточной температуры для квантилей 0.25 и 0.05 для осеннего сезона (SON)	0.49	0.98

Таблица 3. Сведения о географическом расположении метеостанций кластера и об особенностях проявления квантильных трендов температуры и осадков

Table 3. Information on the geographical location of meteorological stations in the cluster and on the specific features of quantile trends for temperature and precipitation

Кластер	Географическое расположение основной массы метеорологических станций, отнесенных к кластеру	Наиболее существенные особенности паттерна квантильных трендов температуры и осадков для кластера
1	Север Красноярского края и северо-запад Якутии. Протяженность кластера – порядка 2.42 тыс. км. Площадь кластера – порядка 2300 тыс. км ² .	Зимой положительные тренды температуры наблюдаются при малых значениях квантилей, при значениях квантилей больше 0.25 они близки к нулю. Весной практически во всем диапазоне квантилей средняя оценка тренда температуры равна 1°C/10 лет, но при квантилях больше 0.9 она уменьшается в два раза. Осенью оценка тренда температуры для станций кластера при малых значениях квантиля составляет в среднем около 2.0°C/10 лет, и уменьшается практически до нуля при стремлении квантилей к единице.

Кластер	Географическое расположение основной массы метеорологических станций, отнесенных к кластеру	Наиболее существенные особенности паттерна квантильных трендов температуры и осадков для кластера
2	<p>Кемеровская область, восток Новосибирской области и Алтайского края, юго-восток Томской области и юг Красноярского края.</p> <p>Протяженность кластера – порядка 1.00 тыс. км.</p> <p>Площадь кластера – порядка 450 тыс. км².</p>	<p>Зимой тренды температуры растут с увеличением значений квантилей от -2°C/10 лет до 0. Весной во всем диапазоне квантилей средние оценки трендов положительны и превышают 0.5°C/10 лет. Летом средние оценки трендов температуры равны 0.75°C/10 лет при квантилях, близких к нулю, а в диапазоне квантилей 0.25-0.95 тренды равны 0.3°C/10 лет. Осенью при квантилях, близких к 0, оценки трендов температуры достигают 1°C/10 лет, а при значениях квантилей больше 0.15 – близки к 0. Зимой и весной наблюдаются положительные тренды сумм осадков при больших значениях квантилей, осенью – отрицательные. Графики для этого кластера представлены на рис. 3А.</p>
3	<p>Пермский край, Свердловская область, Челябинская область, Курганская область, Удмуртия, запад Ханты-Мансийского автономного округа, восток Кировской области, север Башкортостана.</p> <p>Протяженность кластера – порядка 1.12 тыс. км.</p> <p>Площадь кластера – порядка 790 тыс. км².</p>	<p>Зимой при значениях квантилей, близких к 0, тренды температуры превышают 0.5°C/10 лет, но при значениях квантилей больше 0.15 – близки к нулю. Летом тренды температуры близки к 0 для большей части диапазона квантилей, но при квантилях более 0.85 демонстрируют положительные значения и достигают 0.5°C/10 лет. Осенью в диапазоне 0.15-0.85 тренды близки к 0.5°C/10 лет, при малых значениях квантилей – близки к 1.5°C/10 лет, при больших значениях квантилей – близки к 0.</p>
4	<p>Юг Омской и Новосибирской областей, запад Алтайского края, юг Республики Алтай, Хакасия, юг Красноярского края, Республика Тыва и отдельные станции на юге Иркутской области.</p> <p>Протяженность кластера – порядка 1.60 тыс. км.</p> <p>Площадь кластера – порядка 500 тыс. км².</p>	<p>Паттерн квантильных трендов температуры близок к кластеру 2, но зимой и летом абсолютные оценки трендов ниже, чем в кластере 2, а осенью выше.</p> <p>Значимые тренды осадков не наблюдаются.</p>
5	<p>Юг Карелии, запад Ленинградской области, Владимирская, Костромская и Нижегородская области, Марий Эл, Кировская область, отдельные станции Новгородской,</p>	<p>Зимой тренды температуры уменьшаются при увеличении значений квантилей от значений, в среднем превышающих 1.5°C/10 лет при квантилях, близких к 0, до трендов, близких к 0, при квантилях, превышающих 0.5. Весной наибольшие тренды наблюдаются при малых и при больших квантилях.</p>

Продолжение таблицы 3

Кластер	Географическое расположение основной массы метеорологических станций, отнесенных к кластеру	Наиболее существенные особенности паттерна квантильных трендов температуры и осадков для кластера
	<p>Тверской областей, Пермского края и Удмуртии. Протяженность кластера – порядка 1.50 тыс. км. Площадь кластера – порядка 500 тыс. км².</p>	<p>В диапазоне 0.25-0.85 тренды близки к 0.4°C/10 лет. Летом при квантилях, близких к 0, тренды также близки к 0, но при росте значения квантилей тренды достигают 0.5°C/10 лет. Осенью тренды температуры положительны, но уменьшаются от 1.5°C/10 лет при квантилях, близких к 0, до 0.5 – при квантилях, близких к 1. Зимой для суточных сумм осадков наблюдаются положительные тренды при квантилях, близких к 1.</p>
6	<p>Юг Ямало-Ненецкого автономного округа, центр и восток Ханты-Мансийского автономного округа и Тюменской области, север Омской области, центр и восток Томской области, отдельный регион на юго-западе Красноярского края. Протяженность кластера – порядка 1.55 тыс. км. Площадь кластера – порядка 1350 тыс. км².</p>	<p>Летом при малых и больших значениях квантилей тренды превышают 0.5°C/10 лет, в диапазоне квантилей 0.15-0.75 тренды близки к 0. Весной и осенью тренды убывают от 1.5°C/10 лет при квантилях, близких к 0, до 0.25 при больших значениях квантилей – весной и при значениях квантилей больше 0.15 – осенью. Графики для этого кластера представлены на рис. 3Б.</p>
7	<p>Псковская область, центральная и южная часть Центрального и Приволжского федеральных округов. Протяженность кластера – порядка 2.03 тыс. км. Площадь кластера – порядка 1025 тыс. км².</p>	<p>Паттерн квантильных трендов температуры схож с кластером 5. Летом оценки трендов больше, чем в кластере 5, и превышают 0.5°C/10 лет при значениях квантилей больше 0.05. Весной оценки трендов превышают 0.5°C/10 лет во всем диапазоне квантилей. Зимой наблюдаются существенные тренды сумм осадков при значениях квантилей, близких к 1. Графики для этого кластера представлены на рис. 3В.</p>
8	<p>Иркутская область, север Бурятии, юг Якутии и отдельный регион юго-востока Красноярского края. Протяженность кластера – порядка 2.30 тыс. км. Площадь кластера – порядка 1275 тыс. км².</p>	<p>Зимой средние тренды температуры в диапазоне квантилей от 0.1 до 0.75 отрицательные, при других значениях квантилей – положительные. Весной при значениях квантилей меньше 0.85 средние тренды превышают 0.5°C/10 лет. Летом средние тренды во всем диапазоне квантилей превышают 0.5°C/10 лет. Осенью тренды температуры при квантилях, близких к 0, достигают 1.5°C/10 лет, при квантилях, близких к 1, они становятся отрицательными, а при остальных значениях квантилей – близки к 0. Весной наблюдаются</p>

Кластер	Географическое расположение основной массы метеорологических станций, отнесенных к кластеру	Наиболее существенные особенности паттерна квантильных трендов температуры и осадков для кластера
		ся положительные тренды осадков при значениях квантиля, близких к 1.
9	Прибайкальский регион Иркутской области, Бурятия и Забайкальский край, запад Амурской области. Протяженность кластера – порядка 1.83 тыс. км. Площадь кластера – порядка 700 тыс. км ² .	Весной в диапазоне квантилей 0.25-0.99 тренды положительны и достигают 0.5°C/10 лет. Летом тренды во всем диапазоне квантилей для этого кластера в среднем близки к 0.5°C/10 лет.
10	Приморский край, юг Сахалина. Протяженность кластера – порядка 1.22 тыс. км. Площадь кластера – порядка 225 тыс. км ² .	Зимой и осенью во всем диапазоне квантилей средние тренды температуры близки к нулю. Весной тренды температуры положительны и их осредненные для кластера значения увеличиваются от 0.25 до 0.5°C/10 лет при увеличении значений квантилей. Летом наблюдается увеличение положительных трендов температур при росте значений квантилей от 0.1 до 0.4°C/10 лет. Весной и летом наблюдаются большие положительные тренды осадков при значениях квантилей близких к 1.
11	Ненецкий автономный округ, север Республики Коми, север Ямало-Ненецкого автономного округа, отдельный регион в Якутии. Протяженность кластера (без станций в Якутии) – порядка 2.05 тыс. км. Площадь кластера (без станций в Якутии) – порядка 700 тыс. км ² .	Тренды температуры положительны для всех сезонов, но убывают при увеличении значений квантилей. Весной, летом и осенью наблюдаются небольшие положительные тренды осадков при квантилях, близких к 1. Графики для этого кластера представлены на рис. 3Г.
12	Территории Северо-Западного федерального округа. Протяженность кластера – порядка 1.50 тыс. км. Площадь кластера – порядка 1025 тыс. км ² .	Паттерн квантильных трендов температуры и осадков схож с кластером 5. Летом оценки трендов температуры ниже, чем в кластере 5, а осенью выше. В летний сезон тренды осадков на всем диапазоне квантилей близки к нулю. Графики для этого кластера представлены на рис. 3Д.
13	Восток Якутии, Магаданская область, отдельные станции Арктического побережья и Чукотского автономного округа.	Большие средние тренды температуры, превышающие 1.0°C/10 лет во всем диапазоне квантилей, зимой, весной и осенью. Зимой максимальные тренды наблюдаются при квантилях, близких к 1, осенью – при кван-

Продолжение таблицы 3

Кла-стер	Географическое расположение основной массы метеорологических станций, отнесенных к кластеру	Наиболее существенные особенности паттерна квантильных трендов температуры и осадков для кластера
	Протяженность кластера – порядка 1.57 тыс. км. Площадь кластера – порядка 975 тыс. км ² .	тилях, близких к 0. Летом оценки трендов растут от 0 до 0.5°C/10 лет при увеличении значений квантилей. Графики для этого кластера представлены на рис. 3Е.
14	Южный федеральный округ, север Северо-Кавказского федерального округа. Протяженность кластера – порядка 1.05 тыс. км. Площадь кластера – порядка 475 тыс. км ² .	Зимой при малых значениях квантилей оценки трендов температуры близки к 0, а при значениях квантилей больше 0.15 – достигают 0.75°C/10 лет. Весной оценки трендов убывают от 1 до 0.5°C/10 лет при увеличении значений квантилей. Летом оценки трендов достигают 1°C/10 лет при квантилях, близких к 0.5, а при малых и больших значениях квантилей тренды уменьшаются до 0.6°C/10 лет. Осенью при значениях квантилей, близких к 0, оценки трендов достигают 1.5°C/10 лет, а в остальном диапазоне квантилей они равны 0.5°C/10 лет. Летом и осенью наблюдаются отрицательные тренды осадков. Графики для этого кластера представлены на рис. 3Ж.
15	Восток Амурской области, южная половина Хабаровского края, север Сахалина, станции на побережье Охотского моря. Для станций данного кластера следует отметить значительную географическую разреженность Протяженность кластера – порядка 1.23 тыс. км. Площадь кластера – порядка 725 тыс. км ² .	Паттерн квантильных трендов температуры и осадков схож с кластером 10. Весной оценки трендов во всем диапазоне квантилей равны 0.4-0.5°C/10 лет. Зимой, весной и летом оценки трендов осадков для близких к единице значениях квантилей принимают положительные значения.

Примечания: Протяженность кластера, в тыс. км, – географическое расстояние между самыми удаленными друг от друга станциями основной массы станций кластера. Площадь кластера, тыс. км², – площадь территории сосредоточения основной массы станций кластера. Результаты расчетов протяженности кластера и площади кластера – приблизительные, отдельные географически, отдаленные от основной массы станций кластера пункты наблюдения из расчетов исключены.

Совокупности графиков, определяющих паттерны, приводятся на рис. 3А-3Ж для некоторых из 15 выделенных кластеров.

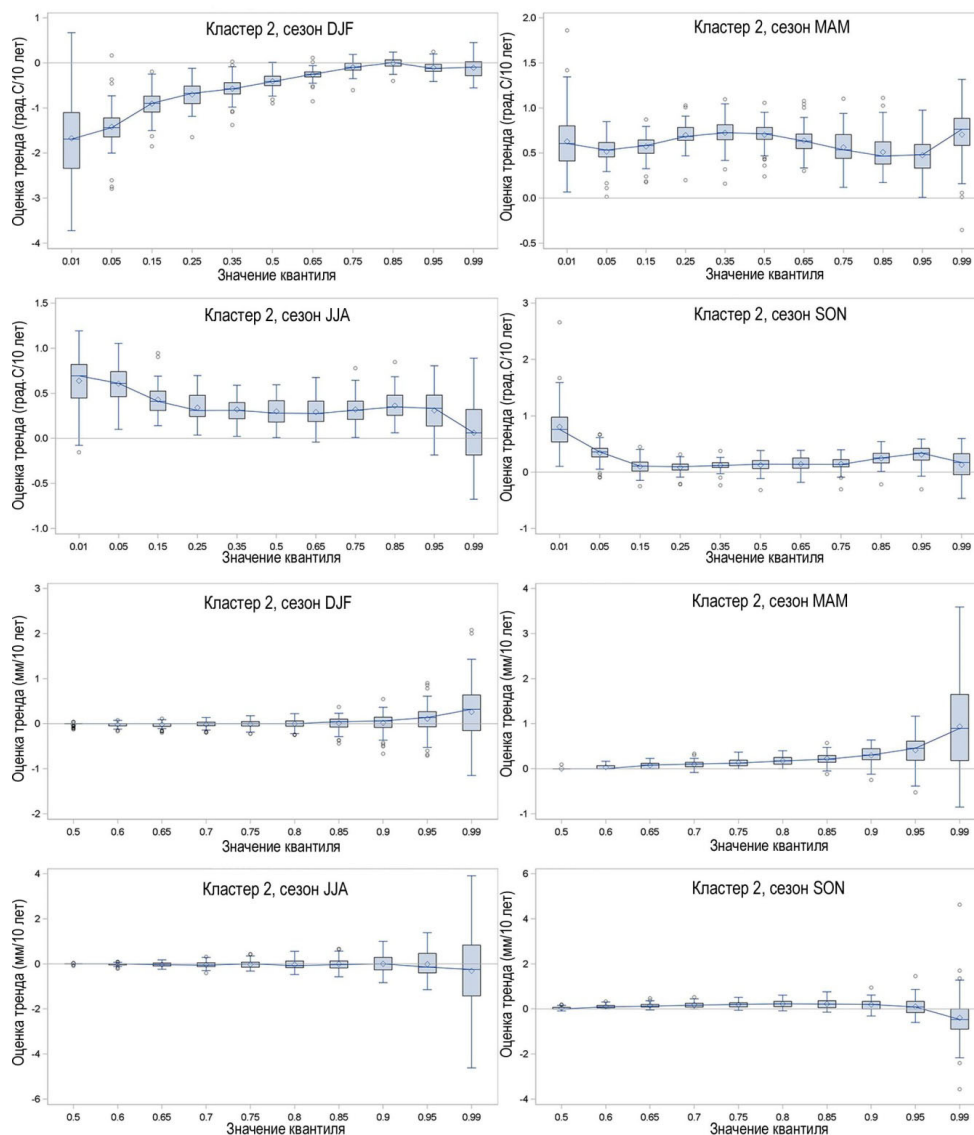


Рисунок 3А. Паттерны проявления квантильных трендов для аномалий максимальной суточной температур и суточных сумм осадков по метеорологическим станциям, отнесенным к кластеру 2 (Кемеровская область, восток Новосибирской области и Алтайского края, юго-восток Томской области и юг Красноярского края)

Первый ряд – обобщения в виде «ящичков с усами» процесс-диаграмм квантильных трендов аномалий температуры для зимнего (левый столбец) и весеннего (правый столбец) сезонов, второй ряд – для летнего (левый столбец) и осеннего (правый столбец) сезонов. Третий и четвертый ряды – аналогичные первому и второму рядам, но для квантильных трендов суточных сумм осадков

Figure 3A. Patterns of quantile trends for anomalies of maximum daily temperature and daily precipitation sums for meteorological stations classified into cluster 2 (Kemerovo Oblast, east of Novosibirsk Oblast and Altai Krai, southeast of Tomsk Oblast and south of Krasnoyarsk Krai)
The first row – generalizations in the form of "boxes with whiskers" process-diagrams of quantile trends of temperature anomalies for winter (left column) and spring (right column) seasons, the second row – for summer (left column) and autumn (right column) seasons. The third and fourth rows are similar to the first and second rows, but for quantile trends of daily precipitation amounts

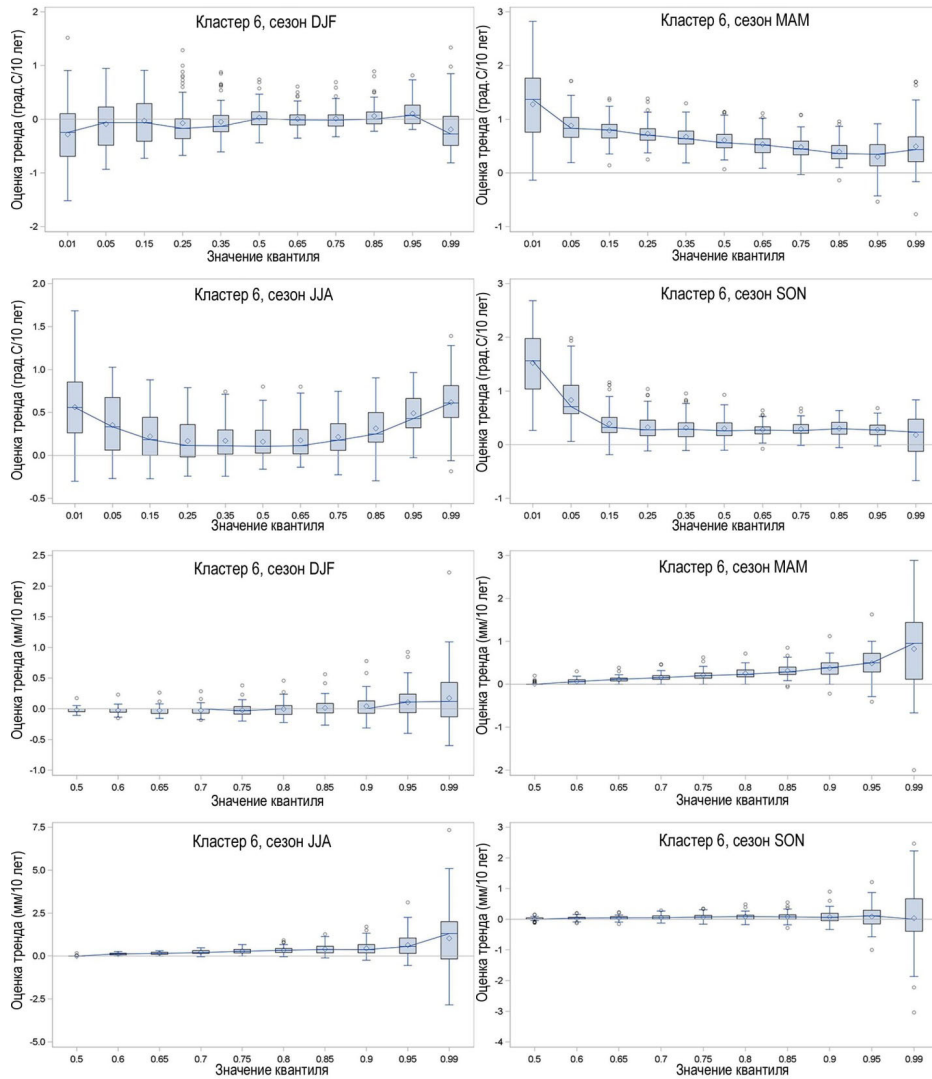


Рисунок 3Б. То же, что и на рис. 3А, но для станций, отнесенных к кластеру 6 (Юг Ямало-Ненецкого автономного округа, центр и восток Ханты-Мансийского автономного округа и Тюменской области, север Омской области, центр и восток Томской области, отдельный регион на юго-западе Красноярского края)

Figure 3B. Same as in Fig. 3A, but for stations assigned to cluster 6 (South of Yamalo-Nenets Autonomous District, center and east of Khanty-Mansiysk Autonomous District and Tyumen Region, north of Omsk Region, center and east of Tomsk Region, a separate region in the southwest of Krasnoyarsk Krai)

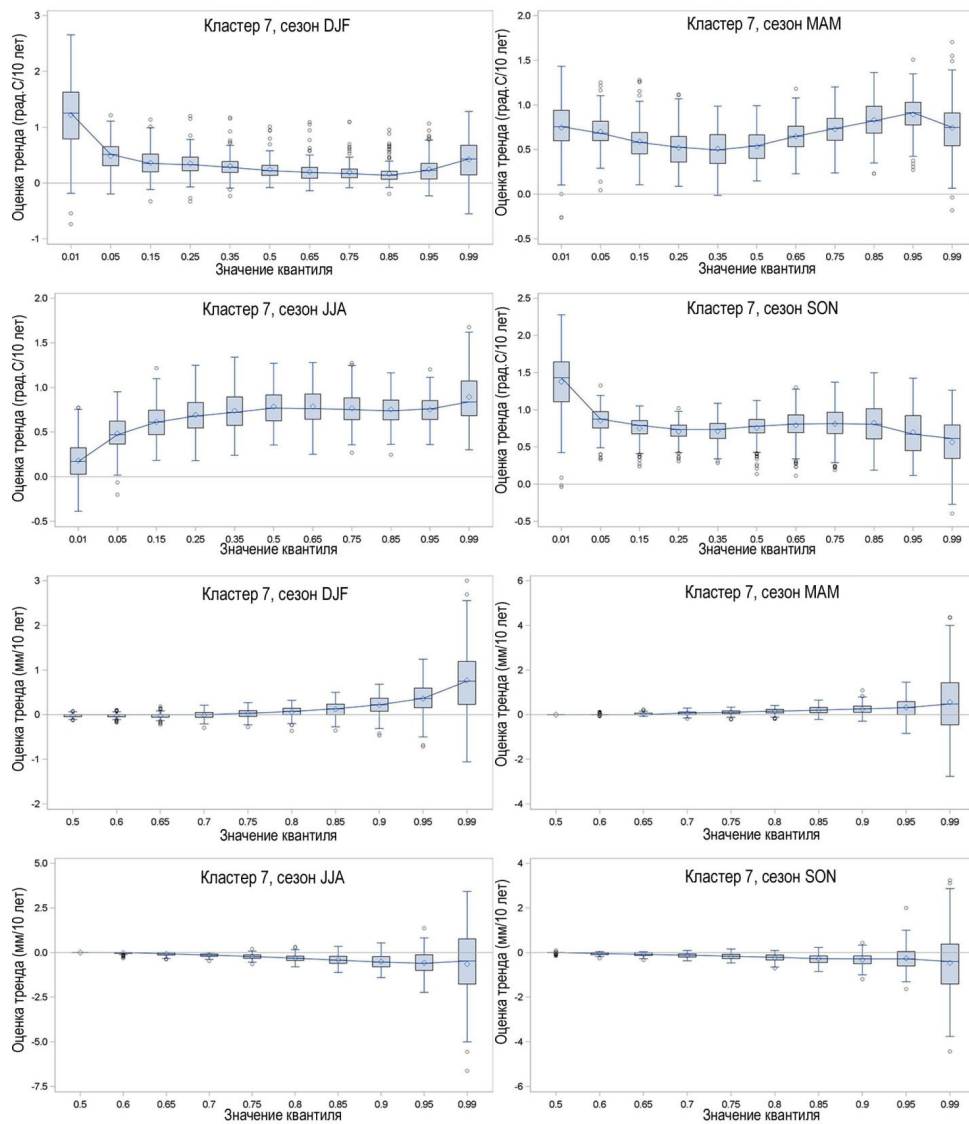


Рисунок 3В. То же, что и на рис. 3А, но для станций, отнесенных к кластеру 7 (Псковская область, центральная и южная часть Центрального и Приволжского федеральных округов)

Figure 3B. Same as in Fig. 3A, but for stations assigned to cluster 7 (Pskov Region, central and southern part of the Central and Volga Federal Districts)

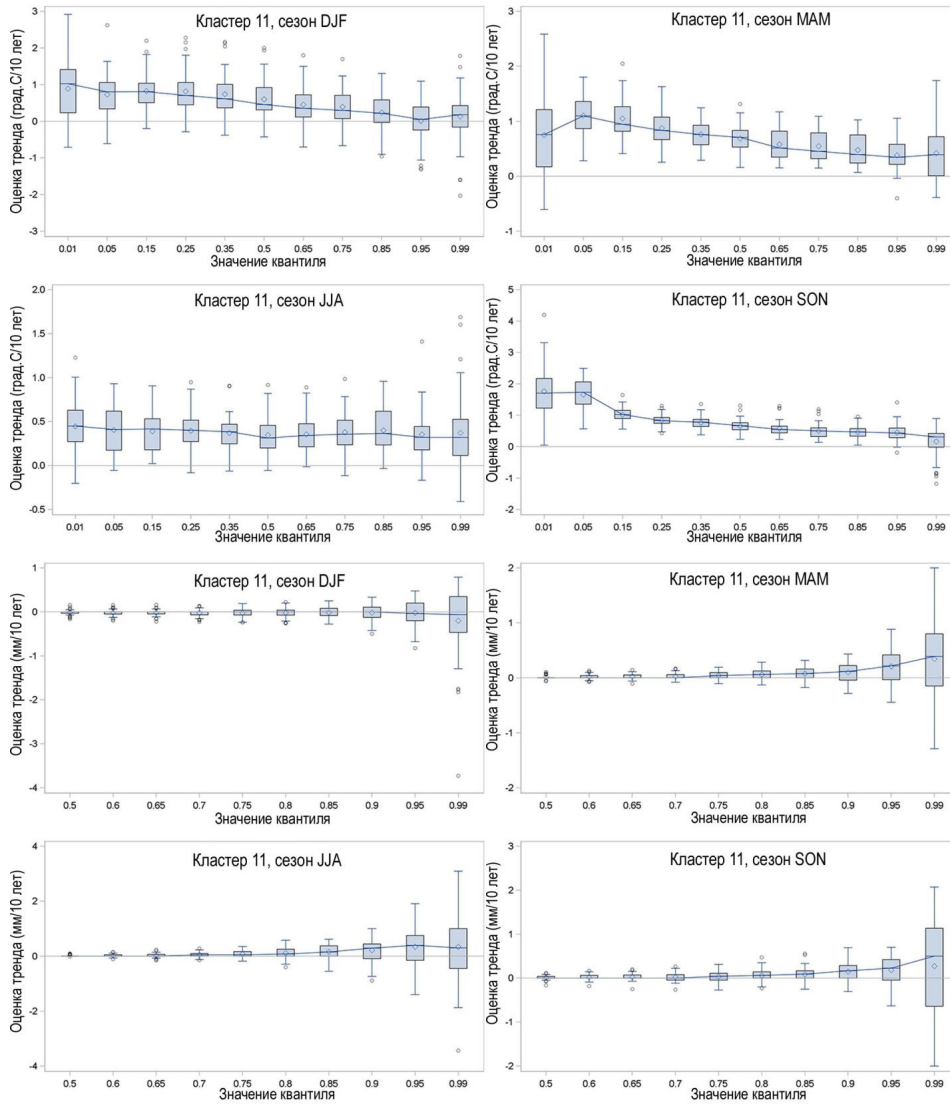


Рисунок 3Г. То же, что и на рис. 3А, но для станций, отнесенных к кластеру 11 (Ненецкий автономный округ, север Республики Коми, север Ямало-Ненецкого автономного округа, отдельный регион в Якутии)

Figure 3Г. Same as in Fig. 3А, but for stations assigned to cluster 11 (Nenets Autonomous Okrug, north of Komi Republic, north of Yamalo-Nenets Autonomous Okrug, separate region in Yakutia)

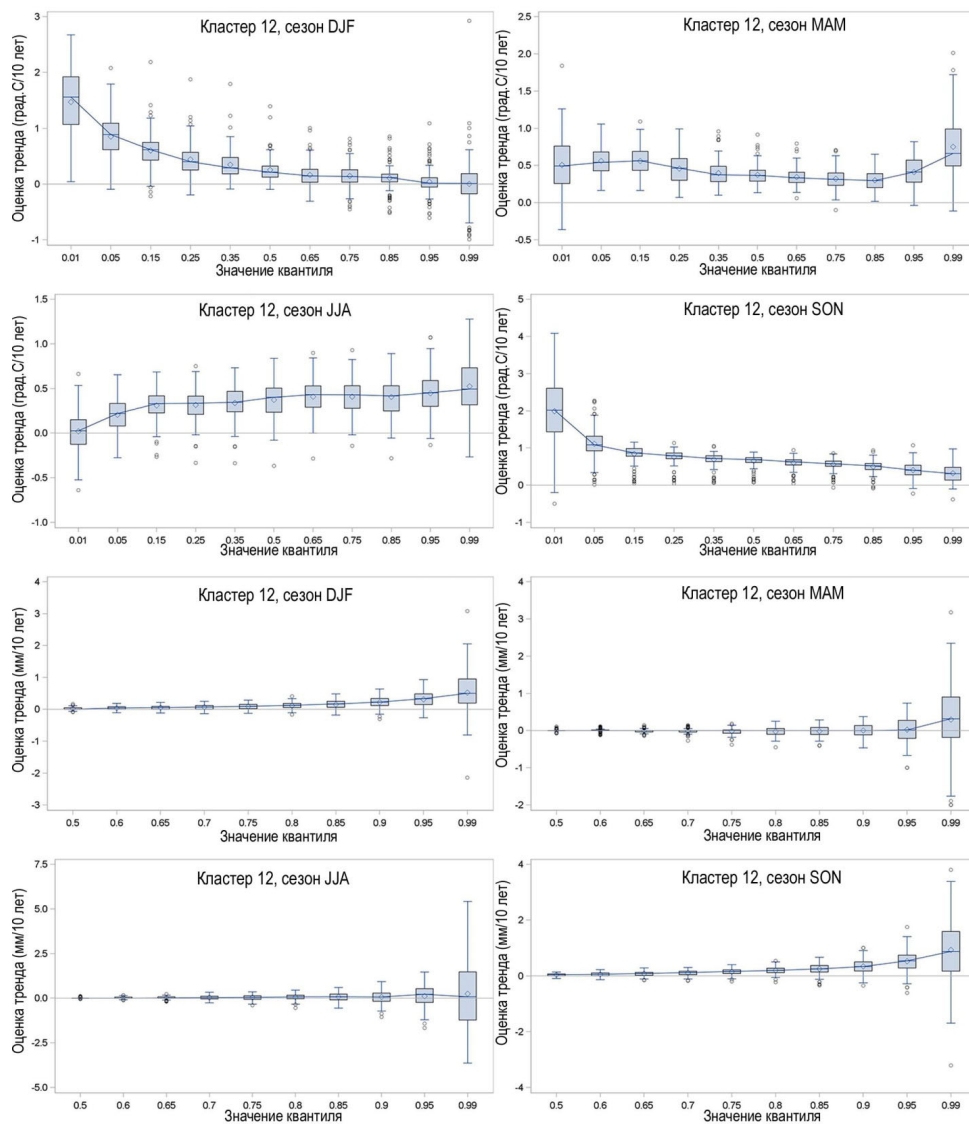


Рисунок 3Д. То же, что и на рис. 3А, но для станций, отнесенных к кластеру 12 (Территории Северо-Западного федерального округа)

Figure 3Д. Same as in Fig. 3А, but for stations assigned to cluster 12 (Territories of the North-West Federal District)

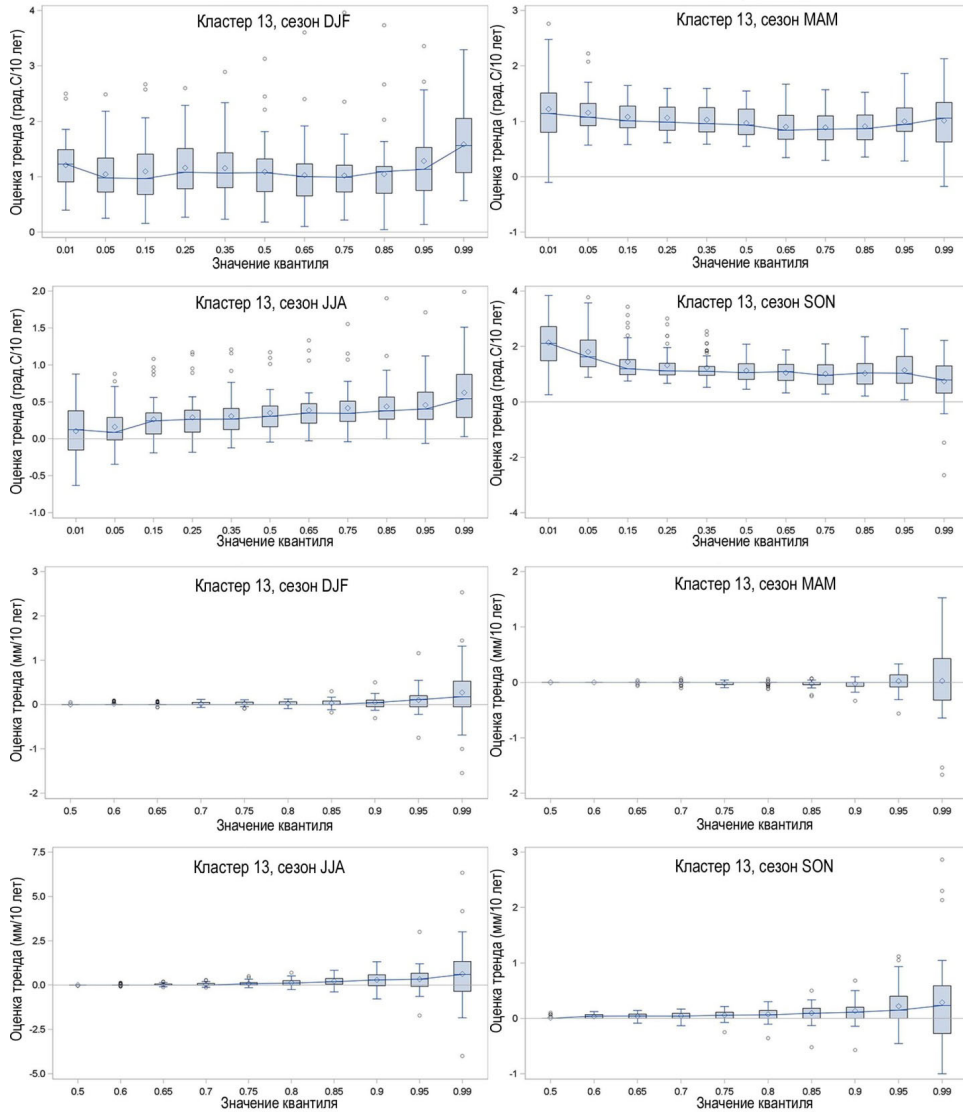


Рисунок 3Е. То же, что и на рис. 3А, но для станций, отнесенных к кластеру 13 (Восток Якутии, Магаданская область, отдельные станции Арктического побережья и Чукотского автономного округа)

Figure 3E. Same as in Fig. 3A, but for stations assigned to cluster 13 (East Yakutia, Magadan Oblast, selected stations of the Arctic coast and Chukotka Autonomous Okrug)

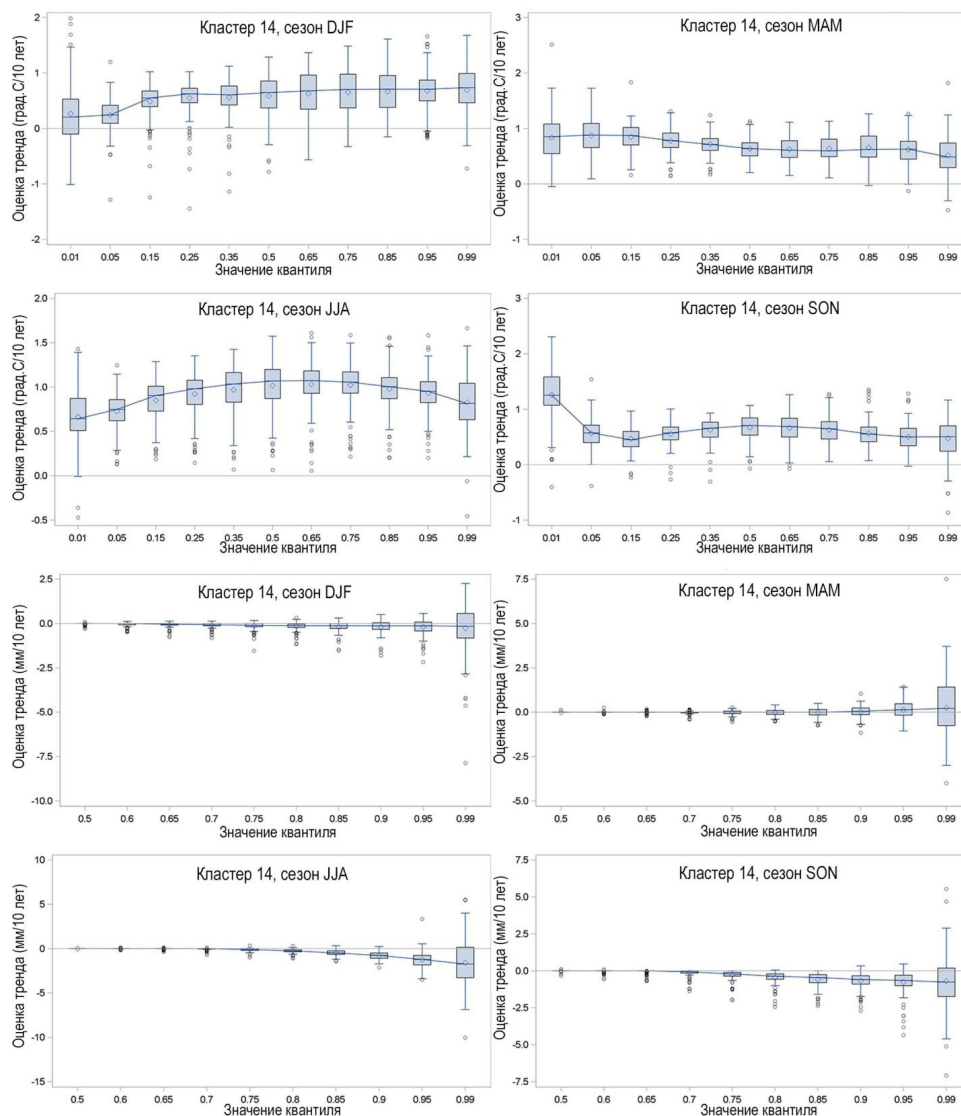


Рисунок 3Ж. То же, что и на рис. 3А, но для станций, отнесенных к кластеру 14 (Южный федеральный округ, север Северо-Кавказского федерального округа)

Figure 3Ж. Same as in Fig. 3A, but for stations assigned to cluster 14 (Southern Federal District, north of the North Caucasus Federal District)

Была проведена оценка вхождения станций различных кластеров в квазиоднородные климатические регионы России (Лавров, Стерин, 2023). В частности, в качестве квазиоднородных климатических регионов были выбраны 9 регионов России, уже в течение многих лет рассматриваемых в качестве основы климатического районирования территории Российской Федерации при подготовке Ежегодных докладов Росгидромета о состоянии и изменении климата на территории РФ.

Была построена таблица в виде матрицы размером 9 на 15, содержащая значения числа станций кластеров, входящих в каждый из 9 квазиоднородных климатических регионов. Результаты анализа таблицы позволяют судить о том, что практически каждому выделенному кластеру станций может быть поставлен в соответствие квазиоднородный географический регион, к которому относится большинство станций выделенного кластера. При многократном повторении расчетов со случайным выбором начальных станций – зародышей кластеров (1000 повторов) – результаты кластеризации и анализа таблиц соответствия вхождения станций кластеров в квазиоднородные климатические регионы демонстрируют стабильность.

В заключение следует отметить, что результаты настоящей работы могут оказаться полезными для уточнений климатического районирования территории РФ, когда при климатическом районировании следует учитывать характер проявления и скорость изменений климата. В частности, результаты работы позволяют осуществлять климатическое районирование на основе тенденций изменений значений двух важнейших из перечня существенных климатических переменных (температуры приземного воздуха и сумм осадков). При этом рассматриваются тенденции изменения в широком диапазоне их значений, в том числе тенденции изменений значений этих переменных, близких к экстремальным.

Список литературы

Лавров, А.С., Стерин, А.М. (2023) Сравнение результатов кластеризации квантильных трендов приземной температуры на территории Российской Федерации с квазиоднородными климатическими регионами России, *CITES-2023*, с. 78-79.

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.

Стерин, А.М., Лавров, А.С. (2022а) Использование квантильной регрессии для оценки пространственных особенностей характеристик трендов приземной температуры на территории России, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 8, № 2, с. 92-111.

Стерин, А.М., Лавров, А.С. (2022б) Детализация климатических трендов, оцененных методом квантильной регрессии с использованием данных наблюдений, *ENVIRONMENTIS 2022*, с. 389-391.

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.

Bhikhari Tharu, Nirajan Dhakal (2020) On the use of Bayesian quantile regression method to explore the historical trends in extreme precipitation and their

connections with large-scale climate patterns over the contiguous USA, *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 139, pp. 1277-1290.

Cannon, A.J., Sobie, S.R., Murdock, T.Q. (2015) Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: How well do methods preserve changes in quantiles and extremes? *Journal of Climate*, vol. 28, pp. 6938-6959.

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

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

Haugen, M.A., Michael, L., Stein, M.L. et al. (2019) Future climate emulations using quantile regressions on large ensembles, *Advances in Statistical Climatology Meteorology and Oceanography*, vol. 5, pp. 37-55, URL: <https://doi.org/10.5194/ascmo-5-37-2019>.

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

Lausier, A.M., Shaleen J. (2018) Diversity in global patterns of observed precipitation variability and change on river basin scales A conditional quantile approach, *Climatic Change*, vol. 149, pp. 261-275, URL: <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2225-z>.

Onderka, M., Pecho, J. (2023) On how precipitation temperature coupling affects drought severity in the western Carpathians and the adjacent northern part of the Pannonian Plain, *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 152, pp. 681-692.

Salam, A. Abbas, Yunqing Xuan, Xiaomeng Song (2019) Quantile Regression Based Methods for Investigating Rainfall Trends Associated with Flooding and Drought Conditions, *Water Resources Management*, vol. 33, pp. 4249-4264.

Sertac Oruc (2021) Quantile trends of subhourly extreme rainfall: Marmara Region Turkey, *Acta Geophysica*, vol. 69, pp. 2453-2473, URL: <https://doi.org/10.1007/s11600-021-00692-5>.

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

Willems, P., Vrac, M. (2011) Statistical precipitation downscaling for small-scale hydrological impact investigations of climate change, *Journal of Hydrology*, vol. 402, pp. 193-205.

Zarch, M.A.A., Sivakumar, B., Sharma, A. (2015) Droughts in a warming climate: A global assessment of Standardized Precipitation Index (SPI) and Reconnaissance Drought Index (RDI), *Journal of Hydrology*, vol. 526, pp. 183-195.

Zheng, Y., Ming Xue et al. (2016) Spatial Characteristics of Extreme Rainfall over China with Hourly through 24-Hour Accumulation Periods Based on National-Level Hourly Rain Gauge Data, *Advances in Atmospheric Sciences*, vol. 33, pp. 1218-1232.

References

Lavrov, A.S., Sterin, A.M. (2023) Sravnenie rezul'tatov klasterizacii kvantil'nyh trendov prizemnoj temperatury na territorii Rossijskoj Federacii s kvaziodnorodnymi klimaticheskimi regionami Rossii [Comparison of the results of clustering of quantile trends of surface temperature on the territory of the Russian Federation with quasiuniform climatic regions of Russia], *CITES-2023*, pp. 78-79.

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.

Sterin, A.M., Lavrov, A.S. (2022a) Ispol'zovanie kvantil'noj regressii dlya ocenki prostranstvennyh osobennostej harakteristik trendov prizemnoj temperatury na territorii Rossii [Using quantile regression to estimate spatial patterns of surface temperature trends over the territory of Russia], *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, vol. 8, no. 2, pp. 92-111.

Sterin, A.M., Lavrov, A.S. (2022b) Detalizaciya klimaticheskikh trendov, ocenennyh metodom kvantil'noj regressii s ispol'zovaniem dannyh nablyudenij [Detailing climate trends estimated by quantile regression using observational data], *ENVIROMIS 2022*, pp. 389-391.

Sterin, A.M., Timofeev, A.A. (2016) Ob ocenke trendov prizemnoj temperatury vozduha dlya territorii Rossii metodom kvantil'noj regressii [On estimation of surface air temperature trends for the territory of Russia by the quantile regression method], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 6, pp. 17-30.

Bhikhari Tharu, Nirajan Dhakal (2020) On the use of Bayesian quantile regression method to explore the historical trends in extreme precipitation and their connections with large-scale climate patterns over the contiguous USA, *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 139, pp. 1277-1290.

Cannon, A.J., Sobie, S.R., Murdock, T.Q. (2015) Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: How well do methods preserve changes in quantiles and extremes? *Journal of Climate*, vol. 28, pp. 6938-6959.

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

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

Haugen, M.A., Michael, L., Stein, M.L. et al. (2019) Future climate emulations using quantile regressions on large ensembles, *Advances in Statistical Climatology Meteorology and Oceanography*, vol. 5, pp. 37-55, URL: <https://doi.org/10.5194/ascmo-5-37-2019>.

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

Lausier, A.M., Shaleen J. (2018) Diversity in global patterns of observed precipitation variability and change on river basin scales A conditional quantile approach, *Climatic Change*, vol. 149, pp. 261-275, URL: <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2225-z>.

Onderka, M., Pecho, J. (2023) On how precipitation temperature coupling affects drought severity in the western Carpathians and the adjacent northern part of the Pannonian Plain, *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 152, pp. 681-692.

Salam, A. Abbas, Yunqing Xuan, Xiaomeng Song (2019) Quantile Regression Based Methods for Investigating Rainfall Trends Associated with Flooding and Drought Conditions, *Water Resources Management*, vol. 33, pp. 4249-4264.

Sertac Oruc (2021) Quantile trends of subhourly extreme rainfall: Marmara Region Turkey, *Acta Geophysica*, vol. 69, pp. 2453-2473, URL: <https://doi.org/10.1007/s11600-021-00692-5>.

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

Willems, P., Vrac, M. (2011) Statistical precipitation downscaling for small-scale hydrological impact investigations of climate change, *Journal of Hydrology*, vol. 402, pp. 193-205.

Zarch, M.A.A., Sivakumar, B., Sharma, A. (2015) Droughts in a warming climate: A global assessment of Standardized Precipitation Index (SPI) and Reconnaissance Drought Index (RDI), *Journal of Hydrology*, vol. 526, pp. 183-195.

Zheng, Y., Ming Xue et al. (2016) Spatial Characteristics of Extreme Rainfall over China with Hourly through 24-Hour Accumulation Periods Based on National-Level Hourly Rain Gauge Data, *Advances in Atmospheric Sciences*, vol. 33, pp. 1218-1232.

Статья поступила в редакцию (Received): 04.03.2024.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 04.04.2024.

Принята к публикации (Accepted): 16.04.2024.

Для цитирования / For citation:

Лавров, А.С., Стерин, А.М. (2024) Детализация климатических трендов температуры и осадков на территории России с использованием квантильной

регрессии и кластеризации, *Фундаментальная прикладная климатология*, т. 10, № 2, с. 219-243, doi: 10.21513/0207-2564-2024-2-219-243.

Lavrov, A.S., Sterin, A.M. (2024) Detailing of climatic trends of temperature and precipitation in the territory of the Russian Federation using quantile regression and clustering, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 10, no. 2, pp. 219-243, doi: 10.21513/0207-2564-2024-2-219-243.