

Тренды температуры в свободной атмосфере: расчеты с использованием метода квантильной регрессии

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. Рассматриваются и анализируются результаты расчетов трендов температуры в свободной атмосфере (тропосфере и нижней стратосфере) с использованием аппарата квантильной регрессии. Квантильная регрессия, в отличие от традиционно применявшихся в климатологии методик оценки трендов с использованием регрессии на основе метода наименьших квадратов, дает возможность оценки параметров регрессии для каждого квантиля значений предиктанта в диапазоне квантилей от нуля до единицы. Результатом применения квантильной регрессии для оценки изменений климата является детализированная картина зависимости климатических трендов от диапазона изменений метеовеличин в интервале квантилей этих метеовеличин от нуля до единицы. В частности, могут быть оценены климатические тренды для значений метеовеличин, близких к экстремальным. В работе используются глобальный массив радиозондовых данных, из которого отбираются станции, полнота данных которых отвечает сформулированным требованиям. По радиозондовым данным отобранных станций вычисляются, представляются графически и анализируются зависимости климатических трендов температуры на изобарических поверхностях от значений квантилей (т.н. процесс-диаграммы), а также вертикально-квантильные сечения значений климатических трендов. Для тринадцати станций высоких широт Северного полушария из числа отобранных станций оценки трендов температуры выполняются как с использованием радиозондовых данных, так и на основе реанализов ERA 5/ERA 5.1.

Анализ результатов позволяет отметить неравномерный для диапазона изменения квантилей характер трендов тропосферного потепления, в большей степени проявляющийся для зимнего сезона. Неравномерный для диапазона изменения квантилей характер трендов температуры в тропосфере заключается в том, что скорость тропосферного потепления в «холодной» части диапазона квантилей выше, чем в «теплой» части. Это соответствует результатам анализа трендов приземной температуры методом квантильной регрессии, полученным ранее.

Отмечается неравномерный для диапазона изменений квантилей характер трендов похолодания в нижней стратосфере. В зимний период, и в меньшей мере – в весенний период, на некоторых станциях северных широт при увеличении значений квантилей скорость стратосферного похолодания убывает по

абсолютной величине. Более того, для квантилей, приближающихся к 1.0, отрицательные тренды могут менять знак на противоположный положительный. Это может быть как результатом неполноты данных о температуре в нижней стратосфере, что особенно присуще высокоширотным регионам Северного полушария, так и результатом влияния участвовавших внезапных стратосферных потеплений (ВСП) на детализированную в пределах диапазона значений квантилей структуру трендов температуры.

Отмечается достаточно высокая степень сходства детализированных структур климатических трендов температуры, полученных на основе радиозондовых данных и полученных на основе массивов реанализа ERA 5/ERA 5.1.

Ключевые слова. Климат, изменение климата, климатические тренды, квантильная регрессия, тропосфера, нижняя стратосфера.

Upper-air temperature trends: calculations based on quantile regression methodology

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

Russian Research Institute for Hydrometeorological Information – World Data Center (RIHMI-WDC)
6 Korolyov Str., Obninsk, Kaluga region, Russian Federation 249035;

*Correspondence address: sterin@meteo.ru

Abstract. Results of calculations of temperature trends in the free atmosphere (troposphere and lower stratosphere) are considered and analyzed by using quantile regression device. Quantile regression, unlike a traditional procedure of estimating trends by using regression based on the least square method, allows regression parameters to be estimated for each quantile of predictant values in the quantile range from zero to one. The result of quantile regression application to estimating climate change is a detailed picture of the climate trends dependence on the range of variations in meteorological values in the quantile range of these meteorological values from zero to one. Specifically, climate trends can be estimated for meteorological values close to extremes. The paper uses the global radiosonde data set from which the stations are selected whose data meet the requirements stated. These radiosonde data are used to calculate, present graphically and analyze dependences of climate temperature trends on the pressure surfaces on quantile values (the so-called diagram process), as well as vertical quantile cross-sections of climate trend values. For thirteen selected high-latitude stations in the Northern Hemisphere, temperature trends are estimated by using both radiosonde data and ERA 5/ERA 5.1 reanalyses.

The analysis of the results suggests the non-uniform character of tropospheric warming trends in the range of quantile variation, which is more apparent in the winter season. The non-uniform (for the range of quantile variation) character of tropospheric temperature trends is in the fact that the tropospheric warming rate in the “cold” part of the quantile range is higher than that in its “warm” part. This is in

agreement with the results of analyzing surface temperature trends by the earlier method of quantile regression.

The non-uniform character of cooling trends in the lower stratosphere is noted for the range of quantile variations. In the winter and, to a lesser degree, in the spring, at some of the stations in the northern latitudes, with the increase in quantile values, the rate of stratospheric cooling decreases in absolute magnitude. Moreover, for the quantiles close to 1.0, negative trends can change sign. This can be both due to incomplete data on lower stratospheric temperature, which is particularly inherent in the high-latitude regions of the Northern Hemisphere, and due to the influence of more frequently occurring abrupt warming events in the stratosphere on the temperature trends structure that is detailed within the range of quantile values.

The detailed structures of climate temperature trends that are obtained on the basis of radiosonde data proved to be very similar to those obtained by ERA 5/ERA 5.1 reanalysis.

Keywords. Climate, climate change, climate trends, quantile regression, troposphere, lower stratosphere.

Введение

Вопрос о том, становится ли климат более вариабельным и более экстремальным, сегодня стоит не менее остро, чем традиционный для климатологии вопрос о том, каковы тенденции изменения за периоды масштаба десятилетий осредненных за месяцы, сезоны, отдельные годы значений метеовеличин.

Задача нахождения ответа на традиционный второй вопрос обычно решается в климатологии путем оценки трендов с использованием регрессии (чаще всего – линейной), основанной на методе наименьших квадратов (МНК-регрессии). МНК-регрессия, как известно, предполагает использование параболической функции потерь. Однако МНК-оценки позволяют рассчитывать лишь тренды матожиданий предиктанта, не позволяют оценить долгопериодные тенденции изменения близких к экстремальным значений метеовеличин и, соответственно, тенденции изменения характеристик вариабельности климата. Кроме того, МНК-оценки могут корректно применяться для решения задач климатологии лишь при выполнении ряда условий (в том числе, постоянство дисперсии ошибки предиктанта на всем множестве значений предикторов, отсутствие автокорреляций в рядах), которые в реальных условиях меняющегося климата зачастую не выполняются. Более подробно об этом сказано в (Тимофеев, Стерин, 2010; Стерин, Тимофеев, 2016).

От ограничений, характерных для МНК-оценок климатических трендов, свободны методы оценки климатических трендов на основе метода квантильной регрессии. Метод квантильной регрессии (далее МКР) предложен впервые в работе (Koenker, Bassett, 1978). В отличие от МНК-регрессии, обеспечивающей лишь оценку зависимости матожидания предиктанта от предикторов, МКР обеспечивает оценку зависимости любого квантиля значений предиктанта от предикторов (интервал изменений квантиля – от 0 до 1).

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

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

В отличие от решения задачи линейной регрессии методом наименьших квадратов решение для задачи линейной квантильной регрессии (1) не может быть найдено аналитически. Данная оптимизационная задача представляет собой проблему выпуклого программирования и может быть решена, например, симплекс-методом. Стандартные ошибки решения данной задачи могут быть найдены различными методами, в частности, методом бутстрепа.

Функции потерь для решения задачи квантильной регрессии при конкретном выборе значения квантиля τ ($0 < \tau < 1$) являются непрерывными, но не гладкими, и для каждого конкретного τ на графиках зависимости потерь от невязок представляют собой два отрезка прямых, сходящихся в точке (0.0) разрыва производной и наклоненных, вообще говоря, под разными при положительных и отрицательных невязках углами к горизонтальной оси.

Пример зависимости функций потерь в МКР от невязки для трех различных значений τ представлен на рис. 1.

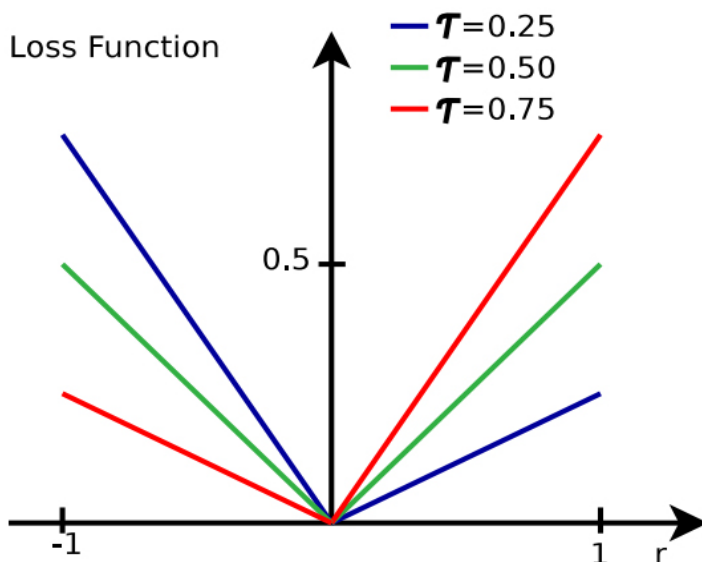


Рисунок 1. Зависимость функции потерь от невязки для вычисления квантильной регрессии при различных значениях квантиля τ

(Источник: [Christian Viller Hansen. *Efficient Numerical Methods for Adaptive Quantile Regression. Informatics and Mathematical Modelling, Technical University of Denmark, DTU. 2007. IMM-M.Sc-2007-62*])

Figure 1. Dependence of the loss function on the residual for calculating the quantile regression for different values of the quantile τ

(Source: [Christian Viller Hansen. *Efficient Numerical Methods for Adaptive Quantile Regression. Informatics and Mathematical Modeling, Technical University of Denmark, DTU. 2007. IMM-M.Sc-2007-62*])

При этом для $\tau=0.5$ (медиана) отрезки симметричны относительно вертикальной оси (это т.н. задача поиска медианной регрессии, решением которой является метод минимальных модулей). Для других значений квантиля τ симметрия отрезков относительно вертикальной оси не имеет места.

Следует отметить, что использование функций потерь, отличных от традиционных квадратических зависимостей потерь от невязок (т.е. от используемых для традиционного МНК), в задачах построения регрессий встречается достаточно часто. Так, широко известны методы т.н. робастной регрессии с функциями потерь, более «мягкими», чем параболическая функция потерь в МНК-регрессии (Huber, 1981).

Другим примером является регрессия на основе Системы Опорных Векторов (Support Vector Machine Regression – SVM-Regression), где для небольшого диапазона отличных по абсолютной величине от нуля невязок (для точек, входящих в т.н. полосу малых невязок), допускается нулевой штраф, а для остальных точек – линейно зависящий от значений невязок штраф. (Smola, Scholkopf, 2004).

В отличие от перечисленных робастных оценок регрессии и SVM-регрессии МКР предполагает, в общем случае, несимметричную относительно вертикальной оси с $\tau=0$ линейную зависимость потерь от невязки.

Зависимость коэффициента регрессии предиктанта в МКР от значений квантилей τ в интервале от 0 до 1 носит название процесс-диаграммы. В частности, при расчетах трендов с помощью процесс-диаграммы может быть представлен результат оценки климатических трендов метеовеличин для разных значений квантилей. Такая «развернутая» по всему диапазону изменения квантиля τ информация может быть использована для оценки тенденций климатических изменений метеовеличин, близких к экстремальным, либо для оценки долгопериодных тенденций изменения характеристик variability метеовеличин.

В последние годы может быть отмечен значительный рост числа публикаций, в которых МКР используется для решения задач климатологии. Из направлений использования МКР в задачах гидрометеорологии уместно выделить:

- оценку климатических трендов;
- решение задач изменения масштабов детализации метеорологических полей (задач даунскейлинга) с использованием регрессии;
- решение задач прикладной климатологии, использующих оценки квантилей метеовеличин для формулировки норм и правил в метеозависимых отраслях, в условиях, когда в масштабах десятилетий значения квантилей претерпевают изменения.

Представляется целесообразной подготовка и публикация отдельной обзорной статьи по разным современным направлениям использования МКР в гидрометеорологии.

В отечественной литературе метод квантильной регрессии применялся авторами для исследования трендов экстремальных и близких к ним значений приземной температуры (Стерин, Тимофеев, 2016). Были продемонстрированы

различия скорости изменения температуры для различных сезонов и различных регионов территории РФ в разных диапазонах значений квантилей τ .

В нашей публикации (Sterin, Lavrov, 2020) основанные на МКР оценки климатических трендов впервые рассчитывались для температуры в свободной атмосфере, что может представить не меньший, чем для приземной температуры, интерес для климатологии. При этом расчеты в указанной публикации велись на основе радиозондовых данных. Значительное влияние на точность и достоверность таких оценок, как отмечалось, оказывали наличие пропусков данных и неравномерность наличия данных вдоль вертикального профиля температуры. Другие публикации по применению МКР к анализу радиозондовых данных неизвестны.

Целью настоящей работы является продолжение анализа климатических трендов температуры в свободной атмосфере (тропосфере и нижней стратосфере) для различных диапазонов изменения квантилей значений температуры, с использованием метода квантильной регрессии. При этом для анализа используются как данные радиозондовых наблюдений, так и массивы реанализа ERA 5.

Данные и порядок расчетов

В качестве исходных данных наблюдений для анализа трендов температуры в свободной атмосфере методом квантильной регрессии использовались суточные радиозондовые данные о температуре на стандартных изобарических поверхностях (от 850 до 30 гПа) более чем для 900 аэрологических станций из массива «АЭРОСТАС». «АЭРОСТАС» содержит данные для российских станций с 1979 года по настоящее время, а для зарубежных – с 1984 года по настоящее время. «АЭРОСТАС» регулярно пополняется месячными порциями срочных данных по глобальной сети станций. В настоящей работе в расчетах участвовали данные «АЭРОСТАС» по 2018 год включительно. Все данные перед включением в массив «АЭРОСТАС» проходят через комплексный контроль качества, в результате которого каждому значению метеовеличин присваивается флаг качества.

Существенной проблемой для расчетов на основе МКР является количество доступных наблюдений на станции. Особо остро эта проблема проявляется для радиозондовых данных, где имеют место пропуски в данных, отсутствие данных по целым периодам наблюдений, неравномерность наличия данных вдоль вертикального профиля, особенно для поверхностей, расположенных в нижней стратосфере, неравномерность наличия данных в зависимости от сезона года, и т.д. Поэтому из всех аэрологических станций для расчетов были отобраны станции, удовлетворяющие следующим условиям:

- количество признанных правильными при контроле значений температуры (имеющих флаг качества 1) в течение рассматриваемого сезона на высоте 50 гПа, – не менее 40 (из 90 максимально возможных, с учетом того, что все расчеты проводились для срока наблюдений 00 UTC);
 - количество лет, удовлетворяющих условию 1, – не менее 30.
-

Количество станций на Земном шаре, удовлетворяющих условиям 1 и 2, зависит от исследуемого сезона и изменяется от 323 для зимнего (DJF) сезона до 352 для весеннего (МAM) сезона. Эти станции нами были отобраны для дальнейшего анализа трендов температуры в свободной атмосфере с помощью метода квантильной регрессии.

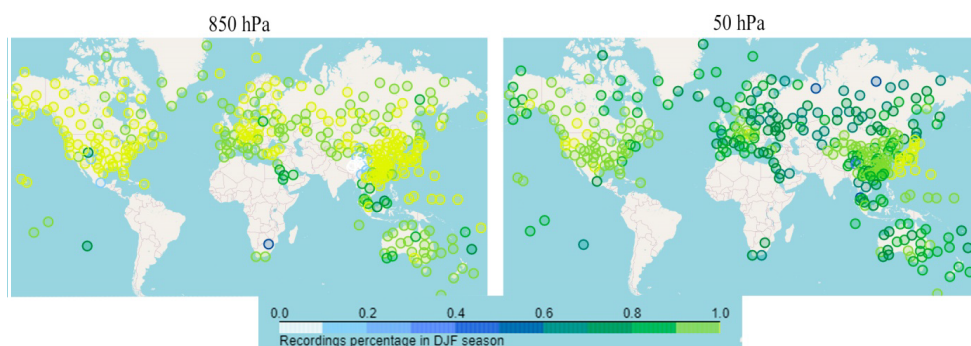


Рисунок 2. Среднее количество наблюдений на станциях на изобарических поверхностях 850 (слева) и 50 (справа) гПа в процентах от максимально возможного

Figure 2. Average number of observations at stations on isobaric surfaces of 850 (left) and 50 (right) hPa as a percentage of the maximum possible

Даже при таком отборе на станциях возникает существенная разница в количестве наблюдений на разных высотах. На рис. 2 представлено среднее количество наблюдений на станциях за зимний период (декабрь-февраль) на высотах 850 гПа и 50 гПа в процентах от максимально возможного (90 наблюдений). Также наблюдается неоднородность количества наблюдений в разных регионах земного шара. Над территориями Северной Америки, Китая и Японии наблюдений в среднем больше, чем над Европой и Россией. Это усложняет анализ трендов температуры, особенно на больших высотах.

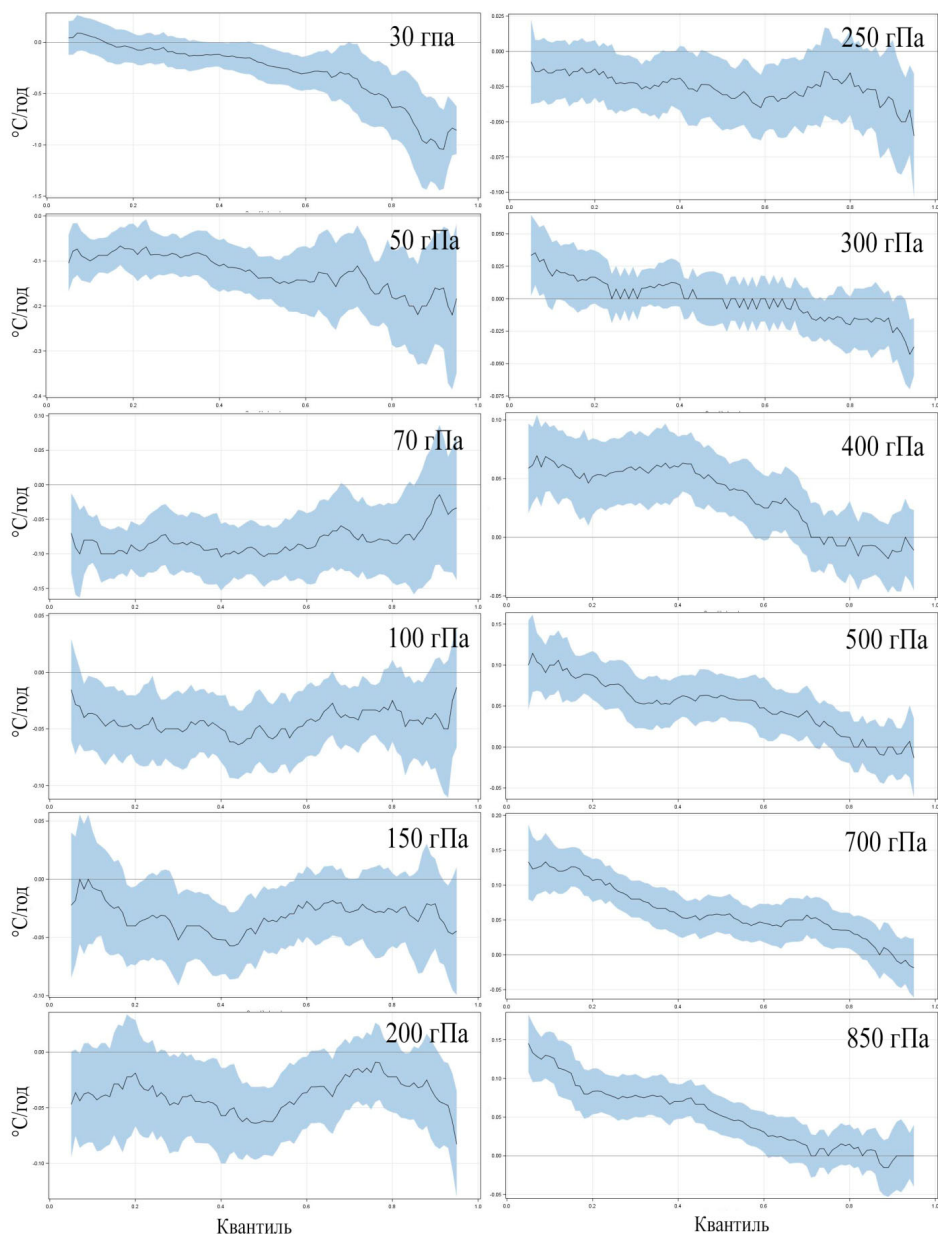
Крайне плохо обстоит дело с отбором по установленным жестким критериям аэрологических станций для территорий Южной Америки и Африки.

При обработке данных оценка линейных трендов методом квантильной регрессии осуществлялась для всех значений квантилей от 0.05 до 0.95 с шагом 0.01. Задача оптимизации выражения (1) решалась с помощью симплекс-метода. Доверительный интервал значений трендов был рассчитан с помощью бутстрепа с 200 повторениями. Расчеты линейных трендов осуществлялись для каждой станции для каждого из четырех сезонов: зима DJF (декабрь предыдущего года, январь и февраль следующего), весна (МAM), лето (JJA) и осень (SON) – по ежесуточным данным для срока 00 UTC.

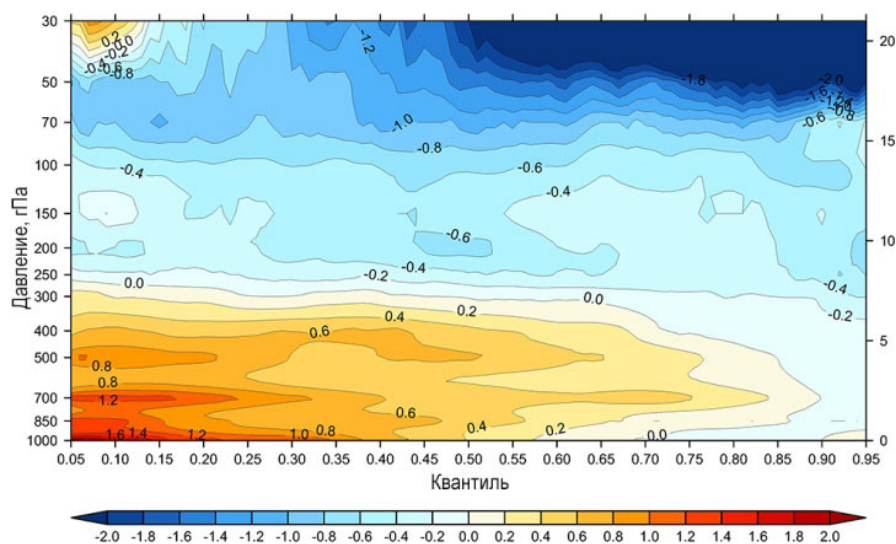
В результате для каждой станции были получены:

- процесс-диаграммы для каждой из стандартных изобарических поверхностей (с «трубками» доверительных интервалов 0.95);
- графики временных рядов температуры для всех рассматриваемых стандартных изобарических поверхностей;
- вертикально-квантильные распределения значений трендов температуры, полученных методом квантильной регрессии.

По станциям радиозондирования, отобранным в соответствии со сформулированными жесткими критериями, строились процесс-диаграммы зависимости трендов температуры от величины квантиля для отдельных сезонов и отдельных изобарических поверхностей. Пример семейства таких процесс-диаграмм, а также вертикально-квантильного сечения значений трендов для одной станции (станция Lulea Kallax (ВМО индекс 02185)) – для зимнего сезона представлен на рис. 3. На процесс-диаграммах всюду в настоящей работе представлены 95% доверительные границы значений трендов.



а)



б)

Рисунок 3. Вычисленные с помощью метода квантильной регрессии тренды температуры для станции Lulea Kallax (ВМО индекс 02185) – для зимнего сезона: а) Пример семейства процесс-диаграмм для разных изобарических поверхностей, построенных с помощью МКР; б) Вертикально-квантильные распределения трендов, $^{\circ}\text{C}/10$ лет, построенных с помощью МКР

Figure 3. Temperature trends calculated using the quantile regression method for Lulea Kallax station (WMO index 02185) – for the winter season: а) An example of a family of process diagrams for different isobaric surfaces constructed using MCS б) Vertical-quantile distributions of trends, $^{\circ}\text{C}/10$ years, constructed using MCS

Для оперативного просмотра большого объема графического материала были реализованы веб-приложения, позволяющие на картографической основе с выбором локализации станций в режиме диалога отображать процесс-диаграммы изменения трендов температуры с выбором изобарической поверхности, сезона. Аналогичные веб-приложения с выбором локализации станций были реализованы для отображения вертикально-квантильных сечений с выбором каждого из четырех сезонов.

Ниже дана следующая интерпретация представленным на рис. 3а и 3б процесс-диаграммам и вертикально-квантильному распределению трендов для рассматриваемой станции. Для тропосферы значения трендов температуры распределены по интервалу значений квантилей крайне неравномерно: их положительные значения уменьшаются при увеличении значений квантилей, причем особенно это имеет место для нижней части тропосферы. Иначе говоря, в тропосфере наименьшие значения температуры растут быстрее наибольших. Это свидетельствует об уменьшении изменчивости рядов температуры воздуха в тропосфере со временем. Также следует отметить, что в нижней тропосфере оценки трендов при значениях квантилей τ близких к 1, незначимо отличны от 0, то есть изменение температуры со временем происходит в основном при низких и близких к средним значениям квантилей, в то время как для близких к максимальным значениям температуры значимые дол-

гопериодные изменения не имеют места. Это отчетливо видно на графиках исходных рядов температуры, представленных на рис. 4, где также проведены линии трендов для разных значений квантилей. Отметим также, что с помощью МНК-регрессии можно получить лишь значения трендов, близких к значениям МКР трендов для квантиля $\tau=0.5$. Таким образом, МКР обеспечивает значительно более развернутую картину структуры трендов на всем диапазоне наблюдаемых значений.

Для нижней стратосферы, как следует из рис. 3а и 3б, значимые отрицательные тренды имеют место на изобарических поверхностях от 100 до 30 гПа в диапазоне значений квантилей от 0.4 и выше. Для меньших значений квантилей тренды температуры нижней стратосферы меньше по абсолютной величине, а для поверхности 30 гПа – незначимы.

По мере увеличения высоты количество имеющихся данных наблюдений убывает и метод квантильной регрессии оказывается очень чувствительным к недостатку данных. При интерпретации представленных на рис. 3а и 3б результатов следует учитывать, что в высоких широтах Северного полушария в зимний сезон низкий потолок полета радиозондов имеет место, как правило, при наиболее низких температурах, поэтому в выборках случаи, соответствующие относительно небольшим значениям квантилей τ , представлены недостаточно.

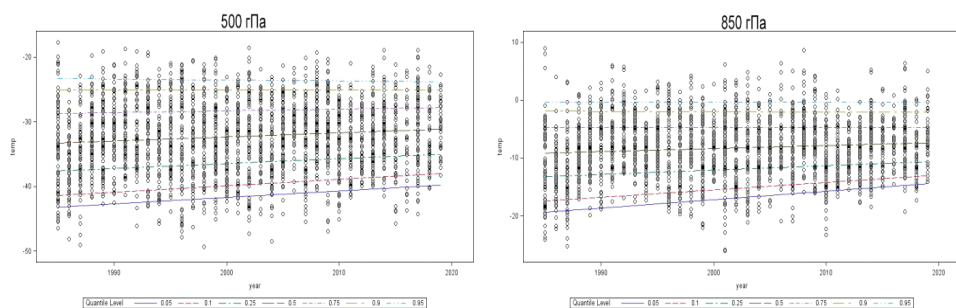


Рисунок 4. Временные ряды температуры на станции Lulea Kallax (02185) в зимний период на поверхностях 500 и 850 гПа

Figure 4. Time series of temperatures at Lulea Kallax station (02185) in winter on surfaces of 500 and 850 hPa

Проводилось сопоставление оценок трендов, полученных методом квантильной регрессии по аэрологическим данным на некоторых станциях с аналогичными оценками, полученными для этих отобранных станций на основе данных из массивов глобального атмосферного реанализа пятого поколения ERA5 (Hersbach et al., 2018). Реанализ ERA5 предоставляет пользователям в свободном доступе суточные данные за период с 1979 года по настоящее время (с 1950 года по 1978 год – имеется в предварительной версии). Пространственное разрешение реанализа – $0.25^\circ \times 0.25^\circ$; вертикальное – 137 уровней по высоте до 0.01 гПа.

Доступ пользователей к массивам реанализа ERA5 осуществляется по ссылке: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-preure-levels?tab=overview>.

При расчетах за период с 01.01.2000 по 31.12.2006 использовались данные реанализа ERA5.1, в котором были исправлены заниженные температуры в нижней стратосфере, наблюдавшиеся в реанализе ERA5 для указанного периода (Simmons et al. 2020). Расчеты по реанализам ERA5 проводились в узлах сетки, ближайших к каждой из отобранных для сопоставления станций радиозондирования, за период, равный периоду доступных данных на станции.

Сопоставления результатов расчетов проводились для каждой станции из группы отобранных станций, включавшей 13 аэрологических станций, расположенных преимущественно в высоких широтах Северного полушария. Перечень станций, включающий их названия, индекс ВМО и принадлежность странам, приведен ниже.

Bodo Vi, 01152, Норвегия;
Santander, 08023, Испания;
Нарьян-Мар, 23205, Россия;
Туруханск, 23472, Россия;
Верхоянск, 24266, Россия;
Тура, 24507, Россия;
Якутск, 24959, Россия;
Черский, 25123, Россия;
Сеймчан, 25703, Россия;
Магадан, 25913, Россия;
Чита, 30758, Россия;
Петропавловск-Камчатский, 32540, Россия;
Cambridge Bay, 71925, Канада.

На рис. 5 для четырех изобарических поверхностей представлены для сопоставления процесс-диаграммы трендов температуры зимнего периода по станции Нарьян-Мар, вычисленные по данным радиозондовых наблюдений и по данным массивов ERA 5/ERA 5.1.

Результаты сопоставления процесс-диаграмм для расчетов по радиозондовым данным и по реанализам, представленные на рис. 5, позволяют отметить для исследуемой станции высокую степень их схождения для тропосферы. Сходство состоит в том, что скорость потепления для относительно низких значений температуры тропосферы превосходит скорость потепления относительно высоких значений температуры.

Для нижней стратосферы (50 гПа) процесс-диаграммы по обоим источникам данных схожи по форме (возрастание значений трендов при увеличении значения квантиля τ), однако оказывается, что для расчетов по радиозондовым данным значимых отрицательных трендов на всем интервале изменения τ нет, в то время когда для расчетов по реанализам значимые отрицательные тренды имеют место для значений квантилей τ , не превышающих примерно 0.5.

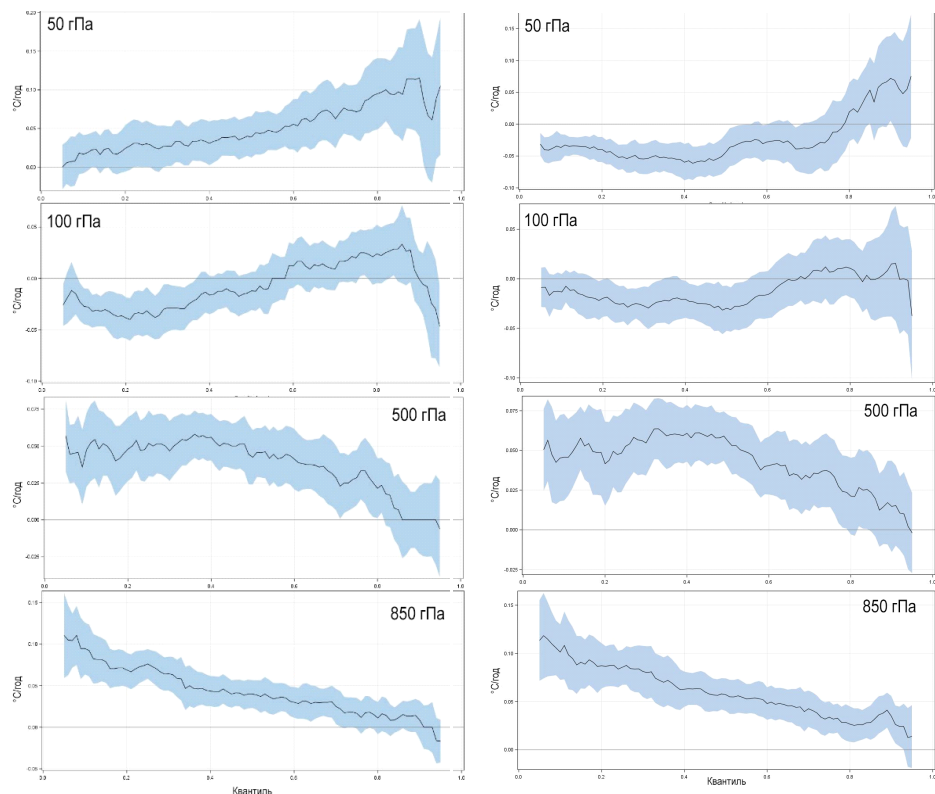


Рисунок 5. Сопоставление процесс-диаграмм трендов температуры зимнего периода на четырех изобарических поверхностях, рассчитанных с применением МКР, для аэрологической станции Нарьян-Мар (индекс ВМО 23205)
левый столбец – по данным радиозондовых наблюдений; правый столбец – по данным массива реанализов ERA 5/ERA 5.1

Figure 5. Comparison of process diagrams of winter temperature trends on four isobaric surfaces, calculated using MKR, for the aerological station Naryan-Mar (WMO index 23205)
left column – according to radiosonde observation data; right column – according to ERA 5 / ERA 5.1 reanalysis array data

На рис. 6 представлены вертикально-квантильные сечения трендов температуры для трех станций для каждого из четырех сезонов, рассчитанные как по данным радиозондирования, так и на основе массивов реанализов ERA 5/ERA 5.1.

Отмечавшаяся выше для зимы для станции Нарьян-Мар особенность различий скорости потепления тропосферы в разных диапазонах изменений квантилей τ , состоявшая в том, что скорость потепления для относительно низких значений температуры тропосферы превосходит скорость потепления относительно высоких значений температуры, имеет место и для других сезонов, однако проявляется в значительно меньшей степени, чем для зимнего сезона. В наименьшей степени, как показывает дальнейший анализ графиков по большому числу станций, эта особенность проявляется для летнего сезона. Отметим, что подобные особенности распределения в диапазоне изменений τ от 0 до 1.0 значений трендов, но для приземной температуры, имели место для территории РФ (Стерин, Тимофеев, 2016).

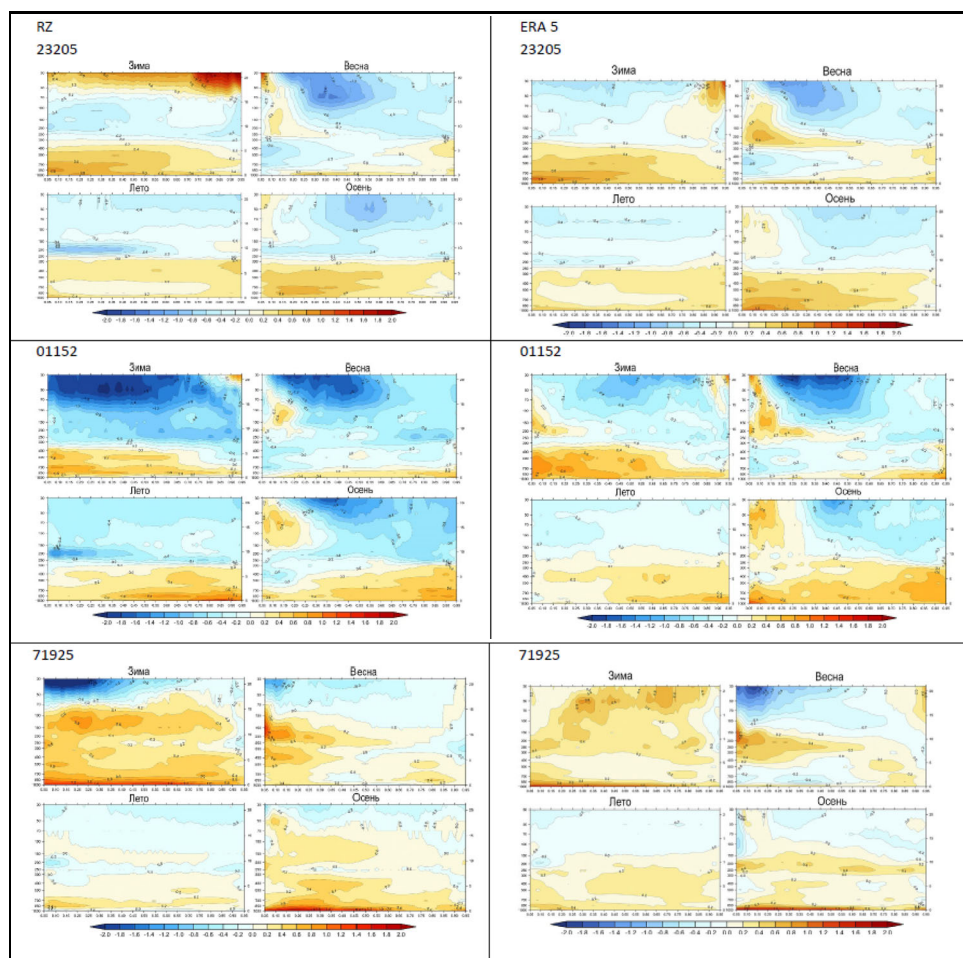


Рисунок 6. Вертикально-квантильные сечения трендов температуры в свободной атмосфере для четырех сезонов по трем аэрологическим станциям: левая половина – расчеты на основе радиозондовых данных, правая половина – расчеты на основе массивов реанализов ERA 5/ERA 5.1 по ближайшим к станциям узлам сетки $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, верхний ряд – станция 23205, средний ряд – станция 01152, нижний ряд – станция 71925

Figure 6. Vertical-quantile sections of temperature trends in the free atmosphere for four seasons at three aerological stations: left half – calculations based on radiosonde data, right half – calculations based on ERA 5/ERA 5.1 reanalysis arrays at $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, grid points closest to stations top row: station 23205, middle row – station 01152, bottom row – station 71925

Как показывает анализ большого объема графического материала, частично представленного в настоящей статье, для значительного числа станций высоких широт Северного полушария отмечается неравномерное для диапазона изменений квантилей τ от 0 до 1.0 распределение значений трендов температуры в нижней стратосфере. Подобное неравномерное распределение имеет место для зимнего сезона и в меньшей степени для весеннего сезона. Неравномерное распределение значений трендов здесь состоит в том, что скорость похолодания в нижней стратосфере для τ приближающихся к 1.0, оказывается меньше, чем для основной части диапазона значений τ . Более того, в ряде случаев при близ-

ких к 1.0 значениях τ отрицательный знак трендов меняется на положительный. Помимо проблем с обеспеченностью данными, особенно остро стоящих в ситуациях с малыми τ , подобный эффект может быть объяснен наблюдаемым увеличением частоты и амплитуды внезапных стратосферных потеплений (ВСП), по поводу чего в литературе имеется достаточно обширная библиография (например, Butler et al., 2015; Kim, Son, 2017; Cao et al., 2019).

Заключение

Применение метода квантильной регрессии при анализе долгосрочных изменений температуры в свободной атмосфере помогает детальнее определить сезонные особенности и особенности вертикального распределения трендов. В настоящей работе использовались радиозондовые данные, причем отбор станций радиозондирования для дальнейшего анализа был достаточно жестким.

Анализ большого объема графического материала, частично представленного в статье, подтверждает неравномерный для диапазона изменения квантилей характер трендов тропосферного потепления, в большей степени проявляющийся для зимнего сезона, а именно, что скорость тропосферного потепления в «холодной» части диапазона квантилей выше, чем в «теплой» части. Это соответствует результатам анализа трендов приземной температуры методом квантильной регрессии, полученным в предыдущих работах.

Анализ материалов подтверждает неравномерный для диапазона изменений квантилей характер трендов похолодания в нижней стратосфере. При этом в зимний период, и в меньшей мере – в весенний период, на некоторых станциях северных широт при увеличении значений квантилей скорость стратосферного похолодания убывает по абсолютной величине, и, более того, для квантилей, приближающихся к 1.0, отрицательные тренды могут менять знак на противоположный положительный. Это может быть как результатом неполноты данных о температуре в нижней стратосфере, так и результатом влияния участвовавших внезапных стратосферных потеплений (ВСП) на детализированную по диапазону значений квантилей структуру трендов.

Несмотря на наличие серьезных проблем с полнотой данных радиозондовых наблюдений, следует отметить достаточно высокую степень сходства детализированных с помощью метода квантильной регрессии структур климатических трендов температуры, полученных на основе радиозондовых данных, и полученных на основе массивов реанализа ERA 5/ERA 5.1.

Дальнейшей проблемой в данном исследовании представляется обобщение полей трендов в атмосфере, полученных на основе МКР, с учетом зависимости значений трендов от их географического положения и положения вдоль вертикального профиля температуры, от внутригодового цикла (сезонности), а также от конкретных квантилей интервала от 0 до 1.

Список литературы

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.

Butler, A., Seidel, D., Hardiman, S., Butchart N., Birner, T., Match, A. (2015) Defining sudden Stratospheric Warmings, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, vol. 96, pp. 1913-1928.

Cao, C., Chen, Y., Rao, J., Liu, S., Li, S., Ma, M., Wang, Y. (2019) Statistical characteristics of major sudden stratospheric warming events in CESM1-WACCM: a comparison with the JRA55 and NCEP/NCAR reanalyses, *Atmosphere*, no. 10, 519 p.

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., Thépaut, J.-N. (2018) *ERA5 hourly data on pressure levels from 1979 to present*, Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), accessed 20-02-2021, 10.24381/cds.bd0915c6.

Huber, P. (1981) *Robust Statistics*, A Wiley-Interscience publication, John Wiley & Sons, Inc., 317 p.

Kim, J., Son, S., (2017) Defining Sudden Stratospheric Warming in Climate Models: Accounting for Biases in Model Climatologies, *J. Climate*, vol. 30, pp. 5529-46.

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

McLandress, C., Shepherd, T. (2009) Impact of Climate Change on Stratospheric Sudden Warmings as Simulated by Canadian Middle Atmosphere Model, *J. Climate*, vol. 22, pp. 5449-63.

Simmons, A., Soci, C., Nicolas, J. et al. (2020): Global stratospheric temperature bias and other stratospheric aspects of ERA5 and ERA5.1., *ECMWF Technical Memoranda. Technical Memorandum*, no. 859.

Smola, A., Scholkopf, B. (2004) A tutorial on support vector regression, *Statistics and Computing*, no. 14, pp. 199-222.

Sterin, A.M., Lavrov, A.S. (2020) On long period trend estimates of upper-air extreme and sub-extreme temperatures by use of quantile regression, *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 611 012043.

References

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], *Russian Meteorology and hydrology*, 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], *Russ. Meteorol. Hydrol.*, no. 5, pp. 27-41.

Butler, A., Seidel, D., Hardiman, S, Butchart N., Birner, T., Match, A. (2015) Defining sudden Stratospheric Warmings, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, vol. 96, pp. 1913-1928.

Cao, C., Chen, Y., Rao, J., Liu, S., Li, S., Ma, M., Wang, Y. (2019) Statistical characteristics of major sudden stratospheric warming events in CESM1-WACCM: a comparison with the JRA55 and NCEP/NCAR reanalyses, *Atmosphere*, no. 10, 519 p.

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., Thépaut, J-N. (2018) *ERA5 hourly data on pressure levels from 1979 to present*, Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), accessed 20-02-2021, 10.24381/cds.bd0915c6.

Huber, P. (1981) *Robust Statistics*, A Wiley-Interscience publication, John Wiley & Sons, Inc., 317 p.

Kim, J., Son, S. (2017) Defining Sudden Stratospheric Warming in Climate Models: Accounting for Biases in Model Climatologies, *J. Climate*, vol. 30, pp. 5529-46.

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

McLandress, C., Shepherd, T. (2009) Impact of Climate Change on Stratospheric Sudden Warmings as Simulated by Canadian Middle Atmosphere Model, *J. Climate*, vol. 22, pp. 5449-63.

Simmons, A., Soci, C., Nicolas, J. et al. (2020): Global stratospheric temperature bias and other stratospheric aspects of ERA5 and ERA5.1., *ECMWF Technical Memoranda. Technical Memorandum*, no. 859.

Smola, A., Scholkopf, B. (2004) A tutorial on support vector regression, *Statistics and Computing*, no. 14, pp. 199-222.

Sterin, A.M., Lavrov, A.S. (2020) On long period trend estimates of upper-air extreme and sub-extreme temperatures by use of quantile regression, *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 611.

Статья поступила в редакцию (Received): 09.04.2021;

Статья доработана после рецензирования (Revised): 17.04.2021;

Принята к публикации (Accepted): 06.05.2021.

Для цитирования / For citation:

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: 10.21513/2410-8758-2021-2-99-114.

Sterin, A.M., Lavrov, A.S. (2012) Upper-air temperature trends: calculations based on quantile regression methodology, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 7, no. 2, pp. 99-114, doi: 10.21513/2410-8758-2021-2-99-114.
