МОНИТОРИНГ КЛИМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

DOI: 10.21513/2410-8758-2023-4-482-505

УДК 551.576.1: 551.58

Сезонные и географические особенности вертикальной структуры трендов температуры в атмосфере Земли (в слое 0-30 км), оцененные по данным радиозондирования

О.А. Алдухов, И.В. Черных*

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

* Адрес для переписки: *civ@meteo.ru*

Реферат. Информация о вертикальной структуре трендов температуры воздуха в атмосфере, полученная на основе наблюдений, необходима для исследования изменений климата. Статья представляет серии трендов первого и второго порядка для температуры воздуха на стандартных высотах в атмосферном слое 0-30 км над уровнем моря для различных месяцев, сезонов, для года – в целом для земного шара, Северного и Южного полушарий за период радиозондовых наблюдений 1964-2018 гг. Цель данной статьи и ряда других работ авторов – показать долгопериодные изменения в атмосфере за один период наблюдений для основных аэрологических величин. Исследования проведены на основе данных глобального массива результатов радиозондирования атмосферы CARDS, дополненных текущими данными, собираемыми с каналов связи в ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД». Метод интерполяции на базе кубического сплайна Акимы был использован для расчетов значений температуры воздуха на основе стандартных уровней по давлению и особых точек вертикального профиля. Линейные тренды были рассчитаны для каждой станции с помощью метода наименьших квадратов. Статистики, полученные для каждой станции, были осреднены с учетом площади влияния станции. Для земного шара и обоих полушарий было найдено следующее. Вертикальная структура линейных трендов первого и второго порядка аномалий температуры воздуха неоднородна в слое 0-30 км. Потепление в слое 0-8 км и похолодание в слое 16-30 км зафиксировано для всех месяцев. По мере приближения к 2018 г. наибольшее усиление изменения температуры воздуха при рассмотрении года в целом определено в слоях 6-10 и 14-16 км. Соответствующие тренды были определены с доверительной вероятностью более 95%.

Ключевые слова. Климат, температура, атмосфера, данные радиозондирования, земной шар, Северное, Южное, полушарие.

Seasonal and geographical features of the vertical structure of temperature trends in the Earth's atmosphere (in the 0-30 km layer) assessed using radiosonde data

O.A. Aldukhov, I.V. Chernykh*

Russian Institute of Hydrometeorological Information – World Data Center, 6, Koroleva str., 249035, Obninsk, Russian Federation

* Correspondence address: civ@meteo.ru

Abstract. The information about the vertical structure of trends in the atmospheric air temperature obtained from observations is necessary to study climate change. The paper presents the series of the first- and second-order trends in air temperature at standard heights in the 0-30 km atmospheric layer above sea level. Trends are obtained from radiosonde observations over the period of 1964-2018 for different months, seasons and for the year as a whole, for the globe and for the Northern and Southern Hemispheres. The goal of this paper and some other research papers is to show the longtime changes in the atmosphere for the main aerological values over one period of observations. Results of observations from the CARDS global aerological dataset that were updated with the current data from RIHMI-WDC were used in this research. The Akima cubic spline interpolation method was used to calculate air temperature values on the basis of standard pressure levels and specific points of vertical profiles. The linear trends were estimated for each station by using the least squares method. The statistics obtained for all stations were averaged taking into account the area of the station influence. The following was found for the globe and for both hemispheres. The vertical macrostructures of the first-order and second-order linear trends in air temperature anomalies are not uniform in the 0-30 km atmospheric layer above sea. Warming at 0-8 km and cooling at 16-30 km were detected for all months. With approaching to 2018 the highest intensifying in air temperature changes was fixed at 6-10 km and at 14-16 km for the year as a whole. The corresponding trends were detected with confidence level of more than 95%.

Keywords. Climate, temperature, atmosphere, radiosonde data, globe, Northern Hemisphere, Southern Hemisphere.

Введение

В связи с происходящими изменениями климата (Hartmann et al., 2013; Стерин, 2004; Груза и др., 1992; Ранькова, 2005; Бекряев, 2022) информация о вертикальной структуре трендов аэрологических величин, полученная на основе данных наблюдений, необходима для исследования климата атмосферы и его изменений. Знания об изменениях температуры, включая структурные изменения и изменения во взаимосвязи между тропосферой и стратосферой, имеют большое значение для понимания динамики атмосферы и ее воздействия на глобальный и региональный климат. Однако данные о тренде приземной температуры, особенно над сушей, имеют ряд ограничений, которые могут внести неопределенность, т.к. на данные приповерхностной температуры оказывают влияние эффекты пограничного слоя, такие, как инверсии, кроме того, на них влияют урбанизация или другие изменения окружающей среды.

Суть современных тенденций изменения температуры в свободной атмосфере сводится к потеплению в тропосфере (850-300 гПа) и похолоданию в нижней стратосфере (100-50 гПа) (Доклад ..., 2020, 2021; Стерин, 1999; 2004; Hartmann et al., 2013; IPCC 2014). В данной работе приведены оценки трендов аномалий температуры воздуха на стандартных высотах в слое атмосферы 0-30 км над уровнем моря с учетом сезонных и географических особенностей. Знания о вертикальной структуре трендов температуры в атмосфере Земли могут быть полезны для принятия оптимальных стратегий реагирования на происходящие изменения климата атмосферы.

Следует отметить, что на величину расчетных трендов влияет выбор исходного массива данных, а также период, за который они оценивались (Стерин, 2004; Груза и др., 1992). В частности, оценки трендов за различные периоды (т.н. скользящие периоды) выполнялись в т.ч. в работе (Ранькова, 2005).

Исследования вертикальной структуры многолетних статистик аэрологических величин и ее долгопериодных изменений были проведены авторами для отдельных станций (Алдухов, Черных, 2015), для земного шара в целом (Aldukhov, Chernykh, 2019; Chernykh, Aldukhov, 2020), а также для его отдельных регионов, в частности для Арктики (Алдухов, Черных, 2018; Черных, Алдухов, 2020) за разные периоды радиозондовых наблюдений. Ряд работ был посвящен исследованию вертикальной структуры трендов аэрологических величин в разных атмосферных слоях за один период радиозондовых наблюдений 1964-2018 гг., например, температуры и влажности воздуха в атмосферном слое 0-2 км (Алдухов, Черных, 2021; Chernykh, Aldukhov, 2020); относительной влажности в слое 0-30 км (Chernykh, Aldukhov, 2022).

При изучении изменений климата важны оценки линейных трендов во временных рядах аномалий средних значений основных метеорологических величин и их среднеквадратических отклонений (σ) (тренды первого порядка), а также оценки их изменения в зависимости от периода расчета трендов (тренды второго порядка).

Данная работа является частью исследований вертикальной структуры трендов аэрологических величин на уровне земли и в разных атмосферных слоях за один период радиозондовых наблюдений 1964-2018 гг. Цель статьи – исследовать внутригодовые изменения вертикальной структуры трендов первого и второго порядка температуры воздуха (T) в атмосферном слое 0-30 км над уровнем моря для Северного и Южного полушария на фоне ее изменения для земного шара, по данным радиозондирования за 1964-2018 гг. Для достижения этой цели были рассчитаны средние значения, тренды первого и втосредних значений температуры рого порядка аномалий возлуха соответствующих значений среднеквадратических отклонений на стандартных высотах в слое атмосферы 0-30 км над уровнем моря для различных месяцев, сезонов и года – в целом для земного шара, Северного и Южного полушарий за указанный выше период радиозондовых наблюдений; проведен совместный анализ внутригодовых изменений их вертикальной структуры; определены соответствующие интервалы внутригодовых изменений рассчитанных статистик для стандартных высот в изучаемом слое атмосферы и месяцы, в которые были отмечены абсолютные минимумы и максимумы статистических характеристик, а также высоты, на которых они были зафиксированы.

Методы и материалы

Предметом особого внимания при использовании глобальных данных радиозондовых наблюдений для климатических оценок являются качество и однородность данных, используемых при расчетах (Доклад..., 2020, 2021; Стерин, 1999; 2004; Eskridge et al., 1995). Анализ данных аэрологических наблюдений имеет свою специфику по сравнению с другими метеорологическими наблюдениями, т.к. на многих уровнях в атмосфере имеется множество пропусков. Основная причина этого – недостаточная высота подъема радиозонда. Данные по тропосфере являются более благополучными как в отношении обеспеченности, так и относительно возникновения систематических ошибок, связанных с максимальной высотой полета зондов (Стерин, 2004). Однако, кроме изменений максимальной высоты полетов зондов, существуют и другие источники возможной неоднородности рядов температуры, полученных по данным радиозондирования (недостаточное число точек наблюдения, и их неравномерное географическое распределение, смена датчиков, изменение методик, алгоритмов и программ обработки) (Eskridge et al. 1995; Gaffen, 1993). При анализе результатов расчетов необходимо учитывать, что наиболее плотно аэрологическими станциями покрыты умеренные широты Северного полушария и сравнительно редко – Южного полушария, Африка и океанские территории. Одной из основных характеристик радиозондирования атмосферы является его вертикальное разрешение, которое в долгопериодных массивах со временем в основном увеличивается в связи с развитием системы радиозондирования. За 1964-2017 гг. многолетнее глобальное среднее разрешение для слоя атмосферы 0-30 км составляет около 0.7 км, для нижнего слоя тропосферы оно существенно более высокое и составляет около 0.4 км, соответственно многолетнее глобальное среднее число уровней наблюдения составляет 42 уровня и 8 уровней (Алдухов, Черных, 2015).

Исследования были проведены на основе данных глобального массива результатов радиозондирования атмосферы *CARDS* (Comprehensive Aerological Reference Data Set) (Eskridge et al., 1995), прошедших процедуру комплексного контроля качества (Алдухов, Черных, 2013) и дополненных проконтролированными текущими данными, собираемыми с каналов связи в ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» (Руденкова, 2010), для периода 1964-2018 гг. Для расчетов были включены только наблюденные и восстановленные во время прохождения процедуры контроля значения. Необходимым условием для включения станции в исследование было наличие наблюдений за 15 лет из полного периода наблюдений, включая 2018 г. После нескольких этапов обработки исходных данных по

глобальной аэрологической сети: объединения близкорасположенных станций, взаимно заменяемых в процессе эксплуатации, исключения коротких и очень старых рядов наблюдения, был сформирован массив данных по 774 станциям глобальной аэрологической сети за период 1964-2018 гг.

Выбор периода наблюдений 1964-2018 гг. обусловлен тем фактом, что за более ранний период, конец 1950-х – начало 1960-х годов, однородных данных радиозондовых наблюдений на глобальной аэрологической сети недостаточно для климатических расчетов ввиду ряда причин (Алдухов, Черных, 2013; Зайцева, 1990; Стерин, 2004). При расчетах были использованы данные радиозондовых измерений, проводимых в сроки 0 и 12 ч ВСВ (Всемирное скоординированное время).

Условием для включения месяца в расчеты трендов было наличие 15 измерений за месяц и 15 лет из рассматриваемого 55-летнего периода наблюдений, включая 2018 г. Если число наблюдений за месяц на некотором уровне составляло менее 30% от среднего числа наблюдений на всех уровнях в слое 0-30 км, то данные на таком уровне в расчеты не включены. Это сделано для возможности объективного сопоставления результатов расчетов на разных уровнях.

Метод интерполяции на базе кубического сплайна Акимы (Де Бор, 1985) был использован для расчетов значений Т на стандартных высотах в слое 0-30 км над уровнем моря на основе стандартных уровней по давлению и особых точек вертикального профиля. Согласно (Алдухов, Черных, 2013) она обеспечивает для большинства аэрологических параметров наиболее точную интерполяцию с наименьшей погрешностью по сравнению с другими ее видами. Долгопериодные тенденции изменения метеорологических величин, характеризующих состояние климатической системы, исследовались с использованием метода наименьших квадратов.

В (Aldukhov, Chernykh, 2020) для изучения характера долгопериодных изменений метеорологических величин, в частности, для возможности предположения об изменении трендов в следующие ближайшие годы, были введены логически обоснованные понятия трендов первого и второго порядка. Напомним их определения. Рассмотрим линейную аппроксимацию $\tilde{F}(t, t_0, t_1)$ метеовеличины F(t) на временном отрезке $t \in [t_0, t_1]$:

$$\tilde{F}(t,t_0,t_1) = a_1(t_0,t_1) \cdot t + b_1(t_0,t_1), \quad t_0 \le t \le t_1,$$

которая минимизирует интеграл квадрата разности $\tilde{F}(t, t_0, t_1) - F(t)$ на временном отрезке $t \in [t_0, t_1]$:

$$\int_{t_0}^{t_1} \left(\tilde{F}(t, t_0, t_1) - F(t) \right)^2 \cdot dt \to \min.$$

Трендом первого порядка является коэффициент $a_1(t_0,t_1)$. Он показывает среднюю скорость изменения F(t) на изучаемом временном отрезке $t \in [t_0, t_1]$ и соответствует классическому линейному тренду. Как отмечалось выше, на величину расчетных трендов влияет выбор исходного массива данных, а также период, за который они оценивались (Груза и др., 1992; Ранькова, 2005; Стерин, 2004). При анализе достаточно длинного ряда значений метеовеличины F(t) возникает вопрос о том, как скорость изменения метеовеличины F(t) зависит от начальной точки t_0 по мере приближения ее к t_1 – концу отрезка? Для ответа на этот вопрос процедура линейной аппроксимации была применена к временным рядам трендов первого порядка $a_I(\tau, t_1)$:

$$\tilde{a}_1(\tau, t_0, t_1) = a_2(t_0, t_1) \cdot \tau + b_2(t_0, t_1), \quad \tau \in [t_0, t_1]$$

Трендом второго порядка является коэффициент $a_2(t_0,t_1)$. Он показывает среднюю скорость изменения тренда первого порядка в зависимости от приближения начальной точки отрезка t_0 к фиксированной конечной точке t_1 .

Для определения значимости трендов использовался критерий Стьюдента. На рисунках тренды с доверительной вероятностью не менее 95% отмечены сеткой.

Для аномалий средних значений температуры воздуха на стандартных высотах в изучаемом слое атмосферы для месяцев, сезонов и года в целом были рассчитаны тренды первого и второго порядка. Тренды второго порядка были оценены по соответствующим временным рядам трендов первого порядка за последовательно уменьшающиеся на один год периоды наблюдения 1964-2018, 1965-2018, ... до 2003-2018 гг. При вычислении аномалий за базовый период (период осреднения при расчете среднего значения метеовеличины, относительно которого рассчитываются аномалии) был выбран полный 55-летний период наблюдений 1964-2018 гг.

Статистики, полученные для каждой станции, были осреднены с учетом площади влияния станции. Статистики для месяцев и сезонов были двукратно сглажены. Было использовано сглаживание по трем точкам, при котором центральной точке присваивался двойной вес, а двум крайним – единичный вес. Использование сглаженных статистических характеристик позволяет более наглядно представить внутригодовые изменения их вертикальной структуры в изучаемых слоях атмосферы.

Для визуализации изменений средних значений и трендов с высотой была использована линейная интерполяция соответствующих значений, рассчитанных для стандартных высот в атмосферном слое 0-30 км над уровнем моря.

Ниже под сезонами подразумеваются: зима: декабрь-февраль; весна: март-май; лето: июнь-август; осень: сентябрь-ноябрь.

В качестве примера на рис. 1 приведены временные ряды годовых аномалий температуры воздуха на уровне земли для земного шара, сглаженные временные ряды, линейные тренды первого и второго порядка аномалий за 1964-2018 гг. Линейные тренды первого и второго порядка за весь период равны $0.12C^{\circ}$ за десятилетие и $0.054C^{\circ}$ за десятилетие² соответственно. Рис. 2 показывает тренды первого и второго порядка для временных рядов годовых значений среднеквадратических отклонений температуры, они равны -0.053 C° за десятилетие и $0.016C^{\circ}$ за десятилетие². Все эти тренды определены с доверительной вероятностью 99 %.



Рисунок 1. Тренды первого (а, *C*° за десятилетие) и второго (б, *C*° за десятилетие²) порядка аномалий средних годовых значений температуры воздуха *T* (*C*°) на уровне земли для земного шара, определенные для периода наблюдений 1964-2018 гг.

Аномалии были вычислены по отношению к многолетним средним значениям Т за полный период. Черные точки (а) – временные ряды аномалий средних годовых значений температуры Т (С°) на уровне земли; красные линии (а) – тренды первого порядка аномалий средних годовых значений температуры Т (С°) на уровне земли для периодов с 5-летним шагом: 1964-2018, 1969-2018, ... 2009-2018 гг.; красные точки (б) – временные ряды трендов первого порядка для

соответствующих периодов с шагом в 1 год; голубые линии – соответствующие сглаженные временные ряды; зеленые линии – соответствующие тренды второго порядка

Figure 1. First ($C^{\circ} per decade$) and second-order ($C^{\circ} per decade^2$) trends in anomalies of means for annual air temperatures $T(C^{\circ})$ at the surface level over the Globe for the observational period of 1964-2018

The anomalies were calculated with respect to the long-term mean values T for the full period. Black points (a) are time series of anomalies of means for annual temperatures T (C°) at the surface level; red lines (a) are the first order trends in anomalies of means for annual temperatures T at the surface level for the corresponding periods with the 5-year step: 1964-2018, 1969-2018, ... 2009-2018; red points (b) are the time series of the first order trends for the corresponding periods with the one-year step, blue lines are the relevant smoothed time series, green lines (b) are the second-order trends



Рисунок 2. Тренды первого (C^o за десятилетие) и второго (б, C^o за десятилетие²) порядка среднеквадратических отклонений σ_T температуры воздуха T (C^o) на уровне земли для земного шара, определенные по данным наблюдений за 1964-2018 гг.

Черные точки (a) – временные ряды среднеквадратических отклонений σ_T температуры воздуха на уровне земли; красные линии (a) – тренды первого порядка среднеквадратических отклонений σ_T температуры T (C^o) на уровне земли для периодов с 5-летним шагом: 1964-2018, 1969-2018, ... 2009-2018 гг.; красные точки (б) – временные ряды трендов первого порядка для соответствующих периодов с шагом в 1 год; голубые линии – соответствующие сглаженные временные ряды; зеленые линии – соответствующие тренды второго порядка

Figure 2. First (C° per decade) and second-order (C° per decade²) trends in standard deviations σ_T for air temperature T at the surface level over the Globe for the observational period of 1964-2018 Black points (a) are time series of standard deviations σ_T for air temperatures T(C°) at the surface level; red lines (a) are the first order trends in standard deviations σ_T for annual temperatures T at the surface level for the corresponding periods with the 5-year step: 1964-2018, 1969-2018, ... 2009-2018; red points (b) are the time series of the first order trends for the corresponding periods with the one-year step, blue lines are the relevant smoothed time series, green lines (b) are the second-order trends

Рис. 1а и 2а демонстрируют, что глобальное потепление на уровне земли было определено вместе с уменьшением среднеквадратических отклонений температуры, соответствующие тренды первого порядка положительные и отрицательные соответственно. Согласно рис. 16 (см. голубые линии) наиболее значительное увеличение скорости потепления определено начиная с 2002 г. Согласно рис. 2б (см. голубые линии) тренды первого порядка среднеквадратических отклонений температуры будучи отрицательными делают поворот к положительным значениям начиная приблизительно с 1991 г. В результате этого тренды второго порядка среднеквадратических отклонений температуры (см. зеленые линии) становятся слабо положительными.

Результаты

Изменения средних значений Т и трендов их аномалий

В табл. 1 представлены диапазоны внутригодовых изменений многолетних средних месячных значений Т, трендов первого и второго порядка их аномалий в слое атмосферы 0-30 км для земного шара, Северного и Южного полушарий за период 1964-2018 гг., а также месяцы, в которые были определены соответствующие максимальные и минимальные значения и высоты, на которых они были зафиксированы.

На рис. 3-5 представлена вертикальная структура многолетних средних, трендов первого и второго порядка аномалий температуры в изучаемом слое для разных месяцев, сезонов и года в целом для земного шара (а), Северного (б) и Южного (в) полушарий. Табл. 1 и рис. 3-5 показывают, что вертикальная структура как многолетних средних, так и линейных трендов первого и второго порядка аномалий температуры воздуха неоднородна в пространстве и во времени.

Таблица 1. Диапазоны (Δ) внутригодовых изменений многолетних средних месячных значений *T*, (*C*°), трендов первого (*C*° за десятилетие) и второго (*C*° за десятилетие²) порядка их аномалий в слое атмосферы 0-30 км для земного шара, Северного и Южного полушарий за период 1964-2018 гг.

N – число наблюдений. В числителе в скобках приведен месяц (мм), в который был определен максимум/ минимум и в знаменателе – высота (h), на которой он был определен

Table 1. Ranges (Δ) of intra-annual variations of monthly averaged values for *T* (*C*^o), and the first-(*C*^o per decade) and second-order (*C*^o per decade²) decadal trends in their anomalies in the 0-30-km atmospheric layer for the globe and for the Northern and Southern Hemispheres over the period of 1964-2018

N- is the number of soundings. The numerator shows in brackets the month (mm) in which maximum/minimum values were determined. The height (h) at which maximum/minimum values were determined is given in the denominator

∆ _{средние} ,	∆ _{тренды} 1 порядка,	Δ _{тренды 2 порядка} ,	N,	
С° (мм) / h	С° за десятилетие (мм) / h	С° за десятилетие ² (мм) / h	млн	
Земной шар				
<u>-66.56(01)</u> – <u>18.69(07)</u>	<u>-0.382 (11)</u> – <u>0.174 (08)</u>	<u>-0.038 (06)</u> – <u>0.171 (11)</u>	23.9	
17 км 00 км	18 км 2 км	25 км 15 км		
Северное полушарие				
<u>-67.17 (12)</u> – <u>20.98 (08)</u>	<u>-0.375 (06)</u> – <u>0.202 (04)</u>	<u>-0.060 (06)</u> – <u>0.223 (05)</u>	20.7	
17 км 00 км	20 км 1 км	25 км 10 км		
Южное полушарие				
<u>-68.79 (07)</u> – <u>18.47 (02)</u>	<u>-0.526 (11)</u> – <u>0.164 (09)</u>	<u>-0.057 (02)</u> – <u>0.159 (12)</u>	3.2	
17 км 00 км	18 км 2 км	25 км 15 км		



Рисунок 3. Многолетние средние *T* (*C*^o) в слое атмосферы 0-30 км за год в целом, для каждого месяца, сезона. 1964-2018 гг.

На рисунках 1-6: (а) – для земного шара, (б) – для Северного и (в) – для Южного полушарий. Сезоны: I (зима) – ДЯФ, II (весна) – МАМ, III (лето) – ИИА, IV (осень) – СОН. Синие и розовые отрезки соответствуют максимальным и минимальным значениям. Статистики для месяцев и сезонов были двукратно сглажены. Было использовано сглаживание по трем точкам

Figure 3. Long-term means for $T(C^{\circ})$ in the 0-30-km layer for the year as a whole, for each month and season. 1964-2018

In figures 1-6: (a) – for the Globe, (b) – for the Northern and (c) – for the Southern hemispheres. Seasons: Winter – DJF, spring – MMA, summer – JJA, autumn – SON. Blue and pink segments correspond to maximum and minimum values. The statistics for months and seasons were subject to twofold smoothing. The three-points smoothing was used



Рисунок 4. Тренды первого порядка аномалий средних значений *T* (*C*° за десятилетие) в слое атмосферы 0-30 км за год в целом, для каждого месяца, сезона. 1964-2018 гг. На рисунках 2, 3, 5, 6 тренды с доверительной вероятностью не менее 95% отмечены сеткой

Figure 4. First-order trends in anomalies of means for $T(C^{\circ} per decade)$ in the 0-30-km layer for the year as a whole, for each month and season. 1964-2018

In Figures 2, 3, 5, 6 trends with confidence level of not less than 95% are marked by lattice



Рисунок 5. Тренды второго порядка аномалий средних значений *T* (*C*^o за десятилетие²) в слое атмосферы 0-30 км за год в целом, для каждого месяца, сезона. 1964-2018 гг.

Figure 5. Second-order trends in anomalies of means for $T(C^o per decade^2)$ in the 0-30-km layer for the year as a whole, for each month and season. 1964-2018

Для земного шара диапазон внутригодовых изменений многолетних средних месячных T в изучаемом слое составляет от -66.56 до 18.69С°, минимальное значение определено в январе на высоте 17 км, а максимальное значение – на высоте 0 км в июле. Диапазон внутригодовых изменений трендов

первого порядка аномалий многолетних средних месячных для T в слое 0-30 км составляет от -0.382 до 0.174С° за десятилетие. Минимальное значение трендов первого порядка видно на высоте 18 км в ноябре, а максимальное значение – на высоте 2 км в августе. Потепление в слое 0-10 км и похолодание в слое 14-30 км было определено с доверительной вероятностью более 95% для всех месяцев. Наиболее интенсивное потепление зафиксировано для всех месяцев в основном во всем слое 1-7 км, а также в слое 0-1 км – с сентября по апрель, на высотах 7-9 км – с июля по август. Наибольшее похолодание определено в слое 17-25 км для всех месяцев и дополнительно в слоях 25-26 км, 25-27 км и 25-28-км – для весны, лета и осени соответственно. Тренды первого порядка были определены с доверительной вероятностью менее 95% только в слое 10-13 км – для всех месяцев.

Для земного шара интервал внутригодовых изменений трендов второго порядка аномалий многолетних средних месячных для температуры в слое 0-30 км составляет от -0.038 до 0.171C° за десятилетие². Минимальное и максимальное значения трендов второго порядка были определены в июне на высоте 25 км и в ноябре на высоте 15 км соответственно. Тренды второго порядка аномалий многолетних средних месячных значений Т положительны в слое 0-17 км в основном с доверительной вероятностью более 95% для всех месяцев. Это означает в случае положительных трендов первого порядка (в слое 0-10 км) усиление потепления, а в случае отрицательных трендов первого порядка (в слое 13-17 км) это означает ослабление похолодания по мере приближения к 2018 г. Тренды второго порядка в слое 17-30 км определены в основном с доверительной вероятностью менее 95% для всех месяцев. Мы видим для Т как положительные значения трендов второго порядка в слое 17-30 км зимой, весной и осенью, так и отрицательные значения в слое 23-30 км с мая по август. Это означает ослабление похолодания в слое 17-30 км зимой, весной и осенью и его усиление с мая по август в слое 23-30 км по мере приближения к 2018 г.

Как для Северного, так и для Южного полушария потепление в слое 0-8 км и похолодание в слое 16-30 км видно для всех месяцев (рис. 46, 4в); по мере приближения к 2018 г. наибольшие изменения Т определены для зимы в слое 5-17 км, для весны – в слоях 0-1 и 4-13 км, для осени – в слоях 7-9 и 14-16 км, при рассмотрении года в целом – в слоях 6-10 и 14-16 км (рис. 56, 5в). В результате исследований были выявлены некоторые различия для Северного и Южного полушарий. Перечислим основные из них. По мере приближения к 2018 г. в Северном полушарии для всех зимних месяцев и при рассмотрении года в целом видно усиление потепления в слое 0-0.5 км. Минимальное значение трендов первого порядка (-0.526C° за десятилетие) было определено на высоте 18 км в Южном полушарии в ноябре, в то время как максимальное значение (0.202С° за десятилетие) было найдено на высоте 1 км в Северном полушарии в апреле. Амплитуда внутригодовых изменений для трендов первого порядка аномалий средних месячных значений Т в слое 0-30-км для Северного полушария (0.577С° за десятилетие) меньше, чем для Южного полушария (0.690 С° за десятилетие). При этом амплитуда внутригодовых изменений для трендов второго порядка аномалий средних месячных

значений T в слое 0-30-км для Северного полушария (0.283С° за десятилетие²) больше, чем для Южного полушария (0.216С° за десятилетие²).

Изменения среднеквадратических отклонений и их трендов

В табл. 2 представлены диапазоны внутригодовых изменений среднеквадратических отклонений σ_T , трендов первого и второго порядка σ_T , в слое атмосферы 0-30 км для земного шара, для Северного и Южного полушарий за период 1964-2018 гг., а также месяцы, в которые были определены соответствующие максимальные и минимальные значения и высоты, на которых они были зафиксированы.

Таблица 2. Диапазоны (Δσ_T) внутригодовых изменений многолетних месячных среднеквадратических отклонений σ_T, (C^o), трендов первого (C^o за десятилетие) и второго (C^o за десятилетие²) порядка среднеквадратических отклонений σ_T в слое атмосферы 0-30 км для земного шара, для Северного и Южного полушарий за период 1964-2018 гг. N – число наблюдений. В числителе в скобках приведен месяц (мм), в который был определен максимум/ минимум и в знаменателе – высота (h), на которой он был определен

Table 2. Ranges $(\Delta \sigma_T)$ of intra-annual variations of long-term monthly standard deviations σ_T , (*C*°), and the first- (*C° per decade*) and second-order (*C° per decade*²) decadal trends in long-term monthly standard deviations σ_T in the 0–30 km atmospheric layer for the Globe and for the Northern and Southern Hemispheres over the period of 1964-2018

N- is the number of soundings. The numerator shows in brackets the month (mm) in which maximum/ minimum values were determined. The height (h) at which maximum/minimum values were determined is given in the denominator

<u>Δσ_T,</u>	Δσ _{Ттренды 1 порядка} ,	Δσ _{7 тренды 2 порядка} ,	N,	
<u>C° (мм)/ h</u>	<u>С° за десятилетие (мм)</u> / h	<u>С° за десятилетие²(мм)</u> / h	млн	
Земной шар				
<u>4. 27(08)</u> – <u>16.08(02)</u>	<u>-0.128 (01)</u> – <u>0.193 (09)</u>	<u>-0.114 (10)</u> – <u>0.050 (01)</u>	23.9	
30 км – <u>00</u> км	1 км 23 км	21 км <u>30 км</u>		
Северное полушарие				
<u>3.15 (06)</u> – <u>17.48 (02)</u>	<u>-0.089 (01)</u> – <u>0.113 (01)</u>	<u>-0.108 (04)</u> – <u>0.076 (09)</u>	20.7	
27 км 00 км	1 км 29 км	27км 25 км		
Южное полушарие				
<u>3.93 (03)</u> – <u>15.93 (08)</u>	<u>-0.093 (02)</u> – <u>0.262 (09)</u>	<u>-0.220 (10)</u> – <u>0.082 (08)</u>	3.2	
30 км 00 км	00 км 23 км	21 км 13 км		

На рис. 6-8 для земного шара (а), для Северного (б) и Южного (в) полушарий представлена вертикальная макроструктура среднеквадратических отклонений σ_T , трендов первого и второго порядка σ_T в изучаемом слое для месяцев, сезонов и года в целом.

Для земного шара интервал внутригодовых изменений среднеквадратических отклонений составляет от 4.27 до 16.08С°, амплитуда изменений – 11.81С°. Минимальное значение σ_T было определено в августе на высоте 30 км и максимальное – в феврале на высоте 0 км. Диапазон внутригодовых изменений трендов первого порядка σ_T составляет от -0.128 до 0.193С° за десятилетие, амплитуда изменений – 0.321С° за десятилетие. Среднеквадратическое отклонение убывает в слое 0-10 км для всех месяцев, в то время как в слое 18-30 км оно возрастает с мая по октябрь с доверительной вероятностью более 95%. Минимальное значение трендов первого порядка σ_T видно в январе на высоте 1 км и максимальное – в сентябре на высоте 23 км. Интервал внутригодовых изменений трендов второго порядка среднеквадратических отклонений в слое 0-30 км составляет от -0.114 до 0.050C° за десятилетие², амплитуда изменений – 0.164C° за десятилетие². Отрицательные значения трендов второго порядка σ_T в этом слое, а их положительные значения в слое 0-10 км с июня по октябрь – ослабление уменьшения σ_T в этом слое по мере приближения к 2018 г.





Figure 6. Long-term standard deviations σ_T , (C^o) in the 0-30-km layer for the year as a whole, for each month and season. 1964-2018



Рисунок 7. Тренды первого порядка среднеквадратических отклонений σ_T (С° за десятилетие) в слое атмосферы 0-30 км за год в целом, для каждого месяца, сезона. 1964-2018 гг.

Figure 7. First-order trends in standard deviations $\sigma_T(C^o per \, decade)$ in the 0-30 km layer for the year as a whole, for each month and season. 1964-2018

Для Северного и Южного полушарий максимальные многолетние значения среднеквадратических отклонений, 17.48 и 15.93С°, зафиксированы в последний месяц соответствующего холодного сезона, в феврале и августе, на высоте 00 км. Минимальные многолетние значения σ_T , 3.15 и 3.93С°, определены для Северного и Южного полушария в июне и марте на высотах 27 и 30 км соответственно.





Figure 8. Second-order trends in standard deviations $\sigma_T (C^o per decade^2)$ in the 0-30 km layer for the year as a whole, for each month and season. 1964-2018

Для обоих полушарий во все месяцы видны отрицательные тренды первого порядка в слое 0-10 км и положительные – в слое 18-30 км, при этом во все месяцы доверительная вероятность трендов более 95% в слое 0-10 км для Северного полушария, а в слое 18-30 км – для Южного полушария. В слое 10-18 км видны как положительные, так и отрицательные тренды первого порядка; их доверительная вероятность зависит от месяца, высоты над уровнем моря и полушария, в основном она менее 95%. Анализ данных табл. 2 показал, что для Северного и Южного полушарий амплитуда внутригодовых изменений среднеквадратических отклонений составляет 14.33 *C°* и 12.00 *C°*, трендов первого порядка $\sigma_{\rm T}$ – 0.202 и 0.355 *C°* за десятилетие, трендов вгорого порядка $\sigma_{\rm T}$ – 0.184 и 0.302 *C°* за десятилетие² соответственно.

Дискуссия

Анализ расчетов, выполненных на основе глобальных аэрологических массивов за 1964-2018 гг. показал, что вертикальная макроструктура средних значений температуры воздуха, линейных трендов первого и второго порядка их аномалий неоднородна в атмосферном слое 0-30 км над уровнем моря для земного шара, для Северного и Южного полушарий. Аналогичное утверждение справедливо и для среднеквадратических отклонений, их трендов первого и второго порядка.

Для земного шара потепление в слое 0-10 км и похолодание в слое 14-30 км определено для всех месяцев. По мере приближения к 2018 г. наибольшие изменения T определены в слоях: для зимы – 0-2 и 4-17 км, для весны – 0-1 и 4-14 км, для лета – 6-12 км, для осени – 6-17 км, при рассмотрении года в целом – 5-16 км.

Для обоих полушарий потепление в слое 0-8 км и похолодание в слое 16-30 км зафиксировано для всех месяцев. По мере приближения к 2018 г. наибольшие изменения *T* определены в слоях: для зимы – 5-17 км, для весны – 0-1 и 4-13 км, для осени – 7-9 и 14-16 км, при рассмотрении года в целом – 6-10 и 14-16 км.

Соответствующие тренды были определены с доверительной вероятностью более 95 %.

На примере Северного полушария было проведено сравнение результатов, представленных в данной работе и в (Доклад, 2020, 2021). Оно показало согласование в определении современных тенденций изменения температуры в свободной атмосфере, суть которых сводится к потеплению в тропосфере (850-300 гПа) и похолоданию в нижней стратосфере (100-50 гПа). Наиболее интересен вопрос о согласованности оценок изменения температуры в свободной атмосфере, рассчитанных за период по 2018 г. и полученных независимыми экспертами с использованием данных по 2019 и 2020 годы. Согласно рис. 46 и 56, в тропосфере определены положительные тренды первого и второго порядка аномалий средних годовых значений температуры; согласно (Доклад, 2020, 2021), среднегодовой тренд температуры в тропосфере в 2019 и 2020 г. увеличился по сравнению с прошлым годом, 2018 и 2019 соответственно.

На рис. 46 и 56 в слое 15-30 км видны значимые отрицательные тренды первого порядка аномалий средних годовых значений температуры и положи-

тельные тренды второго порядка в слое 16-30 км с доверительной вероятностью менее 95%. Согласно (Доклад, 2020, 2021) для нижней стратосферы, абсолютное значение среднегодового тренда температуры в нижней стратосфере в 2019 г. не изменилось по сравнению с предыдущим (2018) годом и в 2020 г. оно уменьшилось, по сравнению с предыдущим (2019) годом.

Благодарности

Работа выполнена в рамках темы НИТР 3.2. Мониторинг глобального климата и климата Российской Федерации и ее регионов, включая Арктику. Развитие и модернизация технологий мониторинга. Авторы благодарны доктору физ.-мат. наук А.М. Стерину за поддержку исследований и обсуждение статьи, что позволило улучшить ее текст.

Список литературы

Алдухов, О.А., Черных, И.В. (2013) Методы анализа и интерпретации данных радиозондирования атмосферы. Т. 1. Контроль качества и обработка данных, Обнинск, ВНИИГМИ-МЦД, 306 с.

Алдухов, О.А., Черных, И.В. (2015) Методы анализа и интерпретации данных радиозондирования атмосферы. Т. 3. Влажность и температура в атмосфере, статистические характеристики, Обнинск, ВНИИГМИ-МЦД, 494 с.

Алдухов, О.А., Черных, И.В. (2018) Долгопериодные изменения скорости ветра в слое атмосферы 0-2 км над российской Арктикой по данным радиозондирования за 1964-2016 гг., *Метеорология и гидрология*, № 6, с. 52-66.

Алдухов, О.А., Черных, И.В. (2021) Географическое распределение трендов первого и второго порядка аномалий среднегодовой температуры воздуха на разных высотах в атмосферном слое 0-2 км над Арктикой по результатам радиозондовых наблюдений за 1964-2018 гг., в сб.: *Труды ВНИ-ИГМИ-МЦД*, вып. 188, Обнинск, ВНИИГМИ-МЦД, с. 93-114.

Бекряев, Р.В. (2022) Статистические аспекты количественной оценки полярного усиления. І. Отношение трендов, *Метеорология и гидрология*, № 6, с. 5-17.

Груза, Г.В., Ранькова, Э.Я, Рочева, Э.В. (1992) Структура долгопериодных трендов глобальной температуры воздуха, в сб.: *Мониторинг и вероят*ностный прогноз климата, СПб, Гидрометеоиздат, с. 3-20.

Де Бор, К. (1985) *Практическое руководство по сплайнам*, М., Радио и связь, 304 с.

Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2019 г. (2020) М., Росгидромет, 97 с, электронный ресурс. URL: http:// www.igce.ru/performance/publishing/reports/ (дата обращения 05 июля 2023). Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020 г. (2021). М., Росгидромет, 104 с., электронный ресурс. URL: http:// /www.igce.ru/performance/publishing/reports/ (дата обращения 05 июля 2023).

Зайцева, Н.А. (1990) Аэрология, Л., Гидрометеоиздат, 325 с.

Ранькова, Э.Я. (2005) Климатическая изменчивость и изменения климата за период инструментальных наблюдений, дис. ...док. физико-математических наук, М., 67 с.

Руденкова, Т.В. (2010) Формат архивации текущих аэрологических данных, поступающих по каналам связи для ПЭВМ, В сб.: *Труды ВНИИГМИ-МЦД*, вып. 174, Обнинск, ВНИИГМИ-МЦД, с. 41-63.

Стерин, А.М. (1999) Анализ линейных трендов в рядах температуры свободной атмосферы за 1958-1997 гг., *Метеорология и гидрология*, № 5, с. 52-68.

Стерин, А.М. (2004) О чувствительности оценок трендов температуры тропосферы и нижней стратосферы по данным радиозондирования. 1. Выбор массива данных, длины ряда и методов анализа, *Метеорология и гидрология*, № 5, с. 21-36.

Черных, И.В., Алдухов, О.А. (2020) Тренды температуры и влажности в нижнем двухкилометровом слое атмосферы над российской Арктикой по данным радиозондирования, *Метеорология и гидрология*, № 9, с. 17-26.

Aldukhov, O.A., Chernykh, I.V. (2019) Trends of wind speed in low troposphere from global radiosonde data, *Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling*, WGNE Blue Book, WMO, Geneva, p. 2-03-2-04, электронный ресурс. URL: http://bluebook.meteoinfo.ru/, 2019, p. 2-03-2-04 (дата обращения 05 июля 2023).

Aldukhov, O.A., Chernykh, I.V. (2020) First and second-order trends of air temperature at the surface level from global radiosonde data, *Research activities in Earth system modelling. Working Group on Numerical Experimentation*. Report No. 50. WCRP Report No.12/2020. Ed. E. Astakhova, July 2020, WMO, Geneva, p. 2-03-2-04, электронный ресурс. URL: http://bluebook.meteoinfo.ru/, 2020. p. 2-03-2-04 (дата обращения 05 июля 2023).

Chernykh, I.V., Aldukhov, O.A. (2020) Spatiotemporal distributions of global trends of humidity and temperature in the low troposphere, *Research activities in Earth system modelling*. Working Group on Numerical Experimentation. Report No. 50. WCRP Report No.12/2020. Ed. E. Astakhova, July 2020, WMO, Geneva, p. 2-07-2-08, электронный ресурс. URL: http://bluebook.meteoinfo.ru/, 2020, p. 2-07-2-08 (дата обращения 05 июля 2023).

Chernykh, I.V., Aldukhov, O.A. (2022) Vertical Distribution of Trends of Relative Humidity in the 0-30 km Atmospheric Layer over the Northern and Southern Hemispheres from Radiosounding Data, *Research activities in Earth system modelling. Working Group on Numerical Experimentation.* Report No. 52. WCRP Report No. 4/2022. Ed. E. Astakhova, July 20226, WMO, Geneva, p. 2-07-2-08, электронный ресурс. URL: http://bluebook.meteoinfo.ru/, 2022, p. 2-07-2-08 (дата обращения 05 июля 2023).

Eskridge, R.E., Alduchov, O.A., Chernykh, I.V., Zhai, P., Polansky, A.C., Doty, S.R. (1995) A comprehensive aerological reference dataset (CARDS): rough and systematic errors, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, vol. 76, no. 10, pp. 1759-1775.

Gaffen, D.J. (1993) Historical Changes in Radiosonde Instruments and Practices, *Instruments and Observing Methods*. Rep. N. 50, Geneva, WMO, 123 p.

Hartmann, D.L., Klein, Tank, A.M. G., Rusticucci, M., Alexander, L.V., Brönnimann, S., Charabi, Y., Dentener, F.J., Dlugokencky, E.J., Easterling, D.R., Kaplan, A., Soden, B.J., Thorne, P.W., Wild, M., & Zhai, P.M. (2013) *Observations: Atmosphere and Surface, in Stocker T.F.*, Qin D., Plattner G.K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V. & Midgley P.M. (eds.), *Climate Change 2013*: The Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, pp. 15-24.

IPCC (2014) Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change in Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.), IPCC, Geneva, Switzerland, 151 p.

References

Alduhov, O.A., Chernyh, I.V. (2013) *Metody analiza i interpretacii dannyh radiozondirovaniya atmosfery. T. 1. Kontrol' kachestva i obrabotka dannyh.* [Methods of analysis and interpretation of the atmosphere radiosonde observations data. Vol 1. Quality control and data processing], Obninsk, Russia, 306 p.

Alduhov, O.A., Chernyh, I.V. (2015) *Metody analiza i interpretacii dannyh radiozondirovaniya atmosfery. T. 3. Vlazhnost' i temperatura v atmosfere: statisticheskie harakteristiki* [Methods of analysis and interpretation of the atmosphere radiosonde observations data. Vol. 3. Humidity and temperature in the atmosphere: Statistics], Obninsk, Russia, 494 p.

Alduhov, O.A., Chernyh, I.V. (2018) Dolgoperiodnye izmeneniya skorosti vetra v sloe atmosfery 0-2 km nad rossijskoj Arktikoj po dannym radiozondirovaniya za 1964-2016 gg. [Long-term Variations in Wind Speed in the Atmospheric Layer of 0-2 km over the Russian Arctic from Radiosonde Data for 1964-2016], *Meteorologiya i gidrologiya*, no 6, pp. 52-66.

Alduhov, O.A., Chernyh, I.V. (2021) Geograficheskoe raspredelenie trendov pervogo i vtorogo poryadka anomalij srednegodovoj temperatury vozduha na raznyh vysotah v atmosfernom sloe 0-2 km nad Arktikoj po rezul'tatam radiozondovyh nablyudenij za 1964-2018 gg. [Geographical distribution of first and second-order trends in average annual air temperature anomalies on different heights in 0-2 km atmospheric layer over Arctic from results of radiosounding for 1964-2018], *V sb. Trudy VNIIGMI-MCD – Proc. RIHMI-WDC*, no. 188, pp. 93-114.

Bekryaev, R.V. (2022) Statisticheskie aspekty kolichestvennoj ocenki polyarnogo usileniya. I. Otnoshenie trendov. [Statistical Aspects of Quantitative Estimation of Polar Amplification. Part 1: The Ratio of Trends], Meteorologiya i gidrologiya, N° 6, s. 5-17. *Russian Meteorology and Hydrology*, vol. 47, no. 6, pp. 419-427.

Gruza, G.V., Ran'kova, E.Ya, Rocheva, E.V. (1992) Struktura dolgoperiodnyh trendov global'noj temperatury vozduha [Structure of long-term trends in global air temperature], V sb. *«Monitoring i veroyatnostnyj prognoz klimata»*, St. Petersburg, Russia, pp. 3-20.

De Bor, K. (1985) *Prakticheskoe rukovodstvo po splajnam* [A Practical guide to splines], Moscow, Russian, 304 p.

Doklad ob osobennostyah klimata na territorii Rossijskoj Federacii za 2019 g. (2020) [A report on climate features on the territory of the Russian Federation in 2019], Moscow, Russian, 97 p., available at: http://www.igce.ru/performance/ publishing/reports/ (accessed 05 июля 2023).

Doklad ob osobennostyah klimata na territorii Rossijskoj Federacii za 2020 g. (2021) [A report on climate features on the territory of the Russian Federation in 2020], Moscow, Russian, 104 p., available at: http://www.igce.ru/performance/ publishing/reports/ (accessed 05 июля 2023).

Zajceva, N.A. (1990) Aerologiya [Aerology], Leningrad, Russia, 325 p.

Ran'kova, E.Ya. (2005) Klimaticheskaya izmenchivost' i izmeneniya klimata za period instrumental'nyh nablyudenij [Climatic variability and climate changes during the period of instrumental observations], extended abstract of Doctor's thesis, Moscow, Russian, 67 p.

Rudenkova, T.V. (2010) Format arhivacii tekushchih aerologicheskih dannyh, postupayushchih po kanalam svyazi dlya PEVM [Format for archiving of the current aerological data, received from GTS for PC], *v sb. Trudy VNIIGMI-MCD, Proc. RIHMI-WDC*, no. 174, pp. 41-63.

Sterin, A.M. (1999) Analiz linejnyh trendov v ryadah temperatury svobodnoj atmosfery za 1958-1997 gg. [Analysis of linear trends in the free atmosphere temperature series for 1958-1997], *Meteorologiya i Gidrologiya*, *Russian Meteorology and Hydrology*, no. 5, pp. 52-68.

Sterin, A.M. (2004) O chuvstvitel'nosti ocenok trendov temperatury troposfery i nizhnej stratosfery po dannym radiozondirovaniya. 1: Vybor massiva dannyh, dliny ryada i metodov analiza [Sensitivity of Estimated Trends of Tropospheric and Lower Stratospheric Temperature from Radiosonde Data. Part 1. Choice of Data Set, Length of Series, and Analysis Methods], *Meteorologiya i Gidrologiya, Russian Meteorology and Hydrology*, no. 5, pp. 21-36.

Chernyh, I.V., Alduhov, O.A. (2020) Trendy temperatury i vlazhnosti v nizhnem dvuhkilometrovom sloe atmosfery nad rossijskoj Arktikoj po dannym radiozondirovaniya [Temperature and Humidity Trends in the Lower Atmospheric 2-km Layer over the Russian Arctic According to Radiosonde Data], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 9, p. 17-26, *Russian Meteorology and Hydrology*, vol. 45, no. 9, pp. 615-622.

Aldukhov, O.A., Chernykh, I.V. (2019) Trends of wind speed in low troposphere from global radiosonde data, *Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling*, WGNE Blue Book, WMO, Geneva, p. 2-03-2-04, электронный ресурс. URL: http://bluebook.meteoinfo.ru/, 2019, p. 2-03-2-04 (дата обращения 05 июля 2023).

Aldukhov, O.A., Chernykh, I.V. (2020) First and second-order trends of air temperature at the surface level from global radiosonde data, *Research activities in Earth system modelling. Working Group on Numerical Experimentation*. Report No. 50. WCRP Report No.12/2020. Ed. E. Astakhova, July 2020, WMO, Geneva, p. 2-03-2-04, электронный ресурс. URL: http://bluebook.meteoinfo.ru/, 2020. p. 2-03-2-04 (дата обращения 05 июля 2023).

Chernykh, I.V., Aldukhov, O.A. (2020) Spatiotemporal distributions of global trends of humidity and temperature in the low troposphere, *Research activities in Earth system modelling*. Working Group on Numerical Experimentation. Report No. 50. WCRP Report No.12/2020. Ed. E. Astakhova, July 2020, WMO, Geneva, p. 2-07-2-08, электронный ресурс. URL: http://bluebook.meteoinfo.ru/, 2020, p. 2-07-2-08 (дата обращения 05 июля 2023).

Chernykh, I.V., Aldukhov, O.A. (2022) Vertical Distribution of Trends of Relative Humidity in the 0-30 km Atmospheric Layer over the Northern and Southern Hemispheres from Radiosounding Data, *Research activities in Earth system modelling. Working Group on Numerical Experimentation*. Report No. 52. WCRP Report No. 4/2022. Ed. E. Astakhova, July 20226, WMO, Geneva, p. 2-07-2-08, электронный ресурс. URL: http://bluebook.meteoinfo.ru/, 2022, p. 2-07-2-08 (дата обращения 05 июля 2023).

Eskridge, R.E., Alduchov, O.A., Chernykh, I.V., Zhai, P., Polansky, A.C., Doty, S.R. (1995) A comprehensive aerological reference dataset (CARDS): rough and systematic errors, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, vol. 76, no. 10, pp. 1759-1775.

Gaffen, D.J. (1993) Historical Changes in Radiosonde Instruments and Practices, *Instruments and Observing Methods*. Rep. N. 50, Geneva, WMO, 123 p.

Hartmann, D.L., Klein, Tank, A. M. G., Rusticucci, M., Alexander, L.V., Brönnimann, S., Charabi, Y., Dentener, F.J., Dlugokencky, E.J., Easterling, D.R., Kaplan, A., Soden, B.J., Thorne, P.W., Wild, M., & Zhai, P.M. (2013) *Observations: Atmosphere and Surface,* in Stocker T.F., Qin D., Plattner G.K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V. & Midgley P.M. (eds.), *Climate Change 2013*: The Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, pp. 15-24. IPCC (2014) Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change in Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.), IPCC, Geneva, Switzerland, 151 p.

Поступила в редакцию: 23.08.2023. Доработана после рецензирования: 18.09.2023. Принята к публикации: 06.11.2023 г.

Для цитирования / For citation:

Алдухов, О.А., Черных, И.В. (2023) Сезонные и географические особенности вертикальной структуры трендов температуры в атмосфере Земли (в слое 0-30 км), оцененные по данным радиозондирования, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 9, № 4, с. 482-505, doi:10.21513/2410-8758-2023-4-482-505.

Aldukhov, O.A, Chernykh, I.V. (2023) Seasonal and geographical features of the vertical structure of temperature trends in the Earth's atmosphere (in the 0-30 km layer) assessed using radiosonde data, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 9, no. 4, pp. 482-505, doi:10.21513/2410-8758-2023-4-482-505.