

ФИЗИКА

 <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2024-47-2-95-105>

Научная статья

Полный текст на русском языке

УДК 551.524.7



Обобщение результатов лидарного мониторинга температуры средней атмосферы над Томском

В. Н. Маричев, Д. А. Бочковский, А. И. Елизаров*

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, 634055,
г. Томск, площадь Академика Зуева, 1, Россия

Аннотация. В работе выполнены обработка и анализ долговременных рядов вертикального распределения температуры в средней атмосфере (интервал высот 15-60 км) над Томском, полученных на базе регулярных измерений лидарной станции Института оптики атмосферы СО РАН за период 2010-2023 гг. За данный период было накоплено и обработано порядка 1000 суммарных сигналов обратного рассеяния на длине волны 532 нм. На основе полученных экспериментальных данных выявлены региональные особенности внутри- и межгодовой изменчивости термического состояния средней атмосферы над Западной Сибирью. Для теплого периода каждого года (с мая по сентябрь) установлено стабильное распределение температуры с отклонением до нескольких К по отдельным годам. Весной и осенью отличие среднемесячных профилей температуры возрастает до 5-10 К и в январе достигает максимума 15 К. Выявлено принципиальное отличие вертикального распределения температуры, построенного по лидарным данным, и предлагаемой моделью CIRA-86. С октября по апрель в интервале высот от 15 до 25 км лидарный профиль температуры сдвинут от модельного в отрицательную сторону, выше от 25 до 50 км в положительную. Максимальный отрицательный сдвиг профилей отмечается в декабре и составляет 16 К, а отрицательный до 15 К в январе. Приводится описание методов анализа ряда экспериментальных данных на наличие значений, которые значительно отличаются от остальной части данных и могут привести к искажению полученных результатов.

Ключевые слова: средняя атмосфера, температура, лидар.

Получение: 29.03.2024; Исправление: 15.05.2024; Принятие: 06.06.2024; Публикация онлайн: 26.08.2024

Для цитирования. Маричев В.Н., Бочковский Д.А., Елизаров А.И. Обобщение результатов лидарного мониторинга температуры средней атмосферы над Томском // *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки.* 2024. Т. 47. № 2. С. 95-105. EDN: QVZPFC. <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2024-47-2-95-105>.

Финансирование. НИР выполнена в рамках государственного задания ИОА СО РАН.

Конкурирующие интересы. Конфликтов интересов в отношении авторства и публикации нет.

Авторский вклад и ответственность. Авторы участвовали в написании статьи и полностью несут ответственность за предоставление окончательной версии статьи в печать.

*Корреспонденция: ✉ E-mail: marichev@iao.ru, moto@iao.ru, alex@iao.ru

Контент публикуется на условиях Creative Commons Attribution 4.0 International License



© Маричев В.Н., Бочковский Д.А., Елизаров А.И., 2024

© ИКИР ДВО РАН, 2024 (оригинал-макет, дизайн, составление)



Generalization of the Results of Lidar Monitoring of the Temperature of the Middle Atmosphere over Tomsk

V. N. Marichev, D. A. Bochkovsky, A. I. Elizarov*

V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS (IAO SB RAS), 634055, Tomsk, 1,
Academician Zuev square, Russia

Abstract. The work carried out processing and analysis of long-term series of vertical temperature distribution in the middle atmosphere (altitude interval 15-60 km) over Tomsk, obtained on the basis of regular measurements of the lidar station of the Institute of Atmospheric Optics SB RAS for the period 2010-2023. During this period, about 1,000 individual night measurements were carried out and the corresponding total backscatter signals at a wavelength of 532 nm were accumulated and processed. Based on the experimental data obtained, regional features of intra- and interannual variability of the thermal state of the middle atmosphere over Western Siberia were identified. For the warm period of each year (from May to September), a stable temperature distribution has been established with differences of up to several K in individual years. In spring and autumn, the difference between the average monthly temperature profiles increases to 5-10 K and in January reaches a maximum of 15 K. A fundamental difference between the vertical temperature distribution constructed from lidar data and the proposed CIRA-86 model has been revealed. From October to April, in the altitude range from 15 to 25 km, the lidar temperature profile is shifted from the model one in the negative direction, and above from 25 to 50 km, in the positive direction. The maximum negative shift in profiles is observed in December and is 16 K, and negative up to 15 K in January. A description is given of methods for analyzing a number of experimental data for the presence of values that differ significantly from the rest of the data and can lead to distortion of the results obtained.

Key words: middle atmosphere, temperature, lidar.

Received: 29.03.2024; Revised: 15.05.2024; Accepted: 06.06.2024; First online: 26.08.2024

For citation. Marichev V. N., Bochkovsky D. A., Elizarov A. I. Generalization of the results of lidar monitoring of the temperature of the middle atmosphere over Tomsk. *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki.* 2024, **47**: 2, 95-105. EDN: QVZPFC. <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2024-47-2-95-105>.

Funding. The research was carried out within the framework of the state assignment of the Institute of Atmospheric Optics SB RAS

Competing interests. There are no conflicts of interest regarding authorship and publication.

Contribution and Responsibility. All authors contributed to this article. Authors are solely responsible for providing the final version of the article in print. The final version of the manuscript was approved by all authors.

*Correspondence:  E-mail: marichev@iao.ru, moto@iao.ru, alex@iao.ru

The content is published under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

© Marichev V. N., Bochkovsky D. A., Elizarov A. I., 2024

© Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation, 2024 (original layout, design, compilation)



Введение

Актуальная проблема изменения климата требует контроля термодинамических характеристик атмосферы. Прежде всего это относится к термическому режиму атмосферы. Данные о температуре играют важную роль в таких областях, как динамика атмосферы, климатология, метеорология, химия и т.д. Температура является одним из ключевых параметров состояния атмосферы, и её измерение важно для понимания динамики атмосферы как в локальных, так и глобальных масштабах. Естественно, что получение такой информации возможно на основе проведения регулярных измерений температуры вертикального разреза слоев атмосферы и также анализа полученных рядов данных. Среди современных методов и средств для исследования термического режима средней атмосферы особо следует выделить лидарные технологии. С описанием этой технологии и результатами ее применения к исследованию средней атмосферы можно ознакомиться в обзорных [1], [2] и оригинальных работах [3]- [7].

В работе [8] была представлена термодинамическая модель средней атмосферы Западной Сибири по результатам многолетних наблюдений за период 2010-2020 гг. Было показано, что для теплого периода каждого года (с мая по сентябрь) установлено стабильное распределение температуры с отличием до нескольких К по отдельным годам. Для холодного периода года (с октября по апрель) в интервале высот от 15 до 25 км "лидарный" профиль температуры сдвинут от модельного в отрицательную сторону, выше от 25 до 50 км в положительную. Выявлено принципиальное отличие вертикального распределения температуры (BPT), построенного по лидарным данным, и международной моделью COSPAR CIRA-86 [12].

Данная работа расширяет ранее представленный диапазон еще тремя годами 2021-2023 гг. Массив данных первичной информации дополняется еще 230 суммарными сигналами обратного рассеяния на длине волны 532 нм, накопленных в отдельные ночи со следующим распределением по годам: 2021 – 65, 2022 – 90, 2023 – 75. Таким образом, термодинамическая модель средней атмосферы Западной Сибири состоит из более чем 1000 суммарных сигналов обратного рассеяния за последние 14 лет.

Профили температуры $T(H)$ рассчитывались по лидарным сигналам по формуле [9]:

$$T(H) = \frac{P_1(H)P_2(H)}{N(H)H^2} \left[\frac{N(H_m)}{P_1(H_m)P_2(H_m)} T(H_m) + \frac{1}{R^*} \int_{H_m}^H \frac{N(h)h^2g(h)dh}{P_1(h)P_2(h)} \right],$$

где $N(H)$ — лидарные сигналы, $P_1()$ и $P_2()$ пропускание атмосферы от лидара до текущей высоты на длине волны 532 нм R^* — универсальная газовая постоянная, $g(h)$ ускорение свободного падения, H_m — максимальная высота, с которой регистрируются достаточно надежные для обработки сигналы (так называемая высота калибровки, на которой задается значение температуры (H_m)).

В работе приводятся среднемесячные профили температуры за весь период наблюдений 2010-2023 гг. Так же описан использованный метод обработки и фильтрации первичного массива данных.

Фильтрация данных

При анализе ряда экспериментальных данных было необходимо принимать во внимание возможное наличие выбросов – значений, значительно отличающихся от остальной части данных. В общем случае, основными причинами выбросов являются ошибки при измерениях, не стационарность объекта исследования, особенность выборки и различные случайные факторы. При этом следует учитывать, что, не все выбросы могут быть ошибками. Поэтому необходимо тщательно анализировать каждый выброс, чтобы определить его причину, поскольку некорректное удаление выбросов может привести к искажению результатов. Для обеспечения точности результатов измерений было решено провести процесс обнаружения и устранения выбросов в наборе данных.

Самым простым методом обработки данных, с целью выявления выбросов является метод, основанный на визуализации анализируемого ряда. Например, на рис. 1 приведены два графика распределения температуры от высоты. Очевидно, что левый график указывает на наличие выбросов, разброс температуры для этих данных составил 407 К и 60 К.

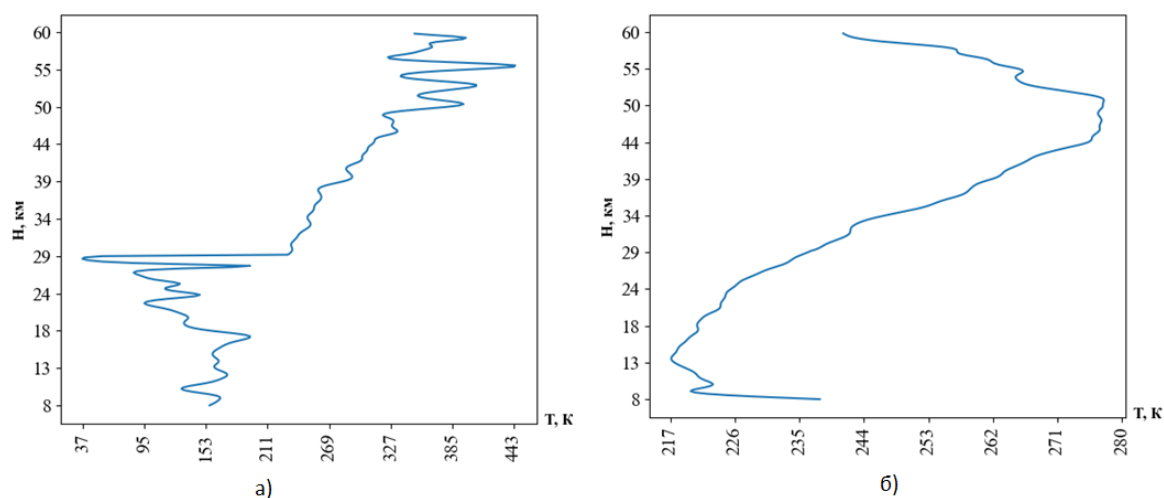


Рис. 1. Профили температуры, измеренные в разные дни: а — данные с наличием выбросов; б — данные без выбросов.

Figure 1. Temperature profiles measured on different days: a — data with the presence of outliers; b – data without outliers.

Не смотря на простоту метода, он обладает существенными недостатками, такими, как субъективность при интерпретации, трудоемкость, особенно на больших объемах данных и невозможность автоматизации. Визуализация может быть эффективным инструментом на начальном этапе обработки данных, но она

не должна быть единственным методом. Для достижения точной и объективной оценки необходимо использовать другие методы или несколько методов в совокупности. Например, возможно использование известных математических моделей для оценки допустимых значений. В данном исследовании такой подход является не реализуемым, в виду отсутствия моделей, поэтому для первичной обработки данных предпочтительнее использование статистических методов обработки.

Статистические методы обработки выбросов включают различные подходы для обнаружения и устранения аномалий в данных [10]. Некоторые из наиболее распространенных методов включают в себя: критерий «трёх сигм» или z-критерий Фишера, анализ коэффициента вариации, оценка межквартильного размаха. Критерий «трёх сигм», и подобные ему, определяют потенциальные выбросы как значения, которые отклоняются от среднего значения больше чем на три стандартных отклонения. Отметим, что для данных, представленных на рис. 1, указанный критерий не позволяет выявить выбросы, обнаруженные визуальным анализом. Метод является простым, наглядным, но не подходит для анализа малых выборок.

Коэффициент вариации является мерой относительной изменчивости данных и вычисляется как отношение стандартного отклонения к среднему значению. Его использование может быть полезным инструментом для обнаружения выбросов в наборе данных. Для обнаружения выбросов нужно определить пороговое значение для значения коэффициента вариации, которое будет считаться "нормальным" для анализируемого набора данных. Это может быть фиксированный порог или определенный на основе специфики исходных данных и экспертных знаний. Обычно значения коэффициента вариации могут варьироваться в зависимости от конкретной области исследования, но часто используется порог в диапазоне от 20% до 30%. Например, для данных, представленных на рис.1а, с пороговым значением равным 20%, выбросами можно считать 38% значений, от исходного ряда данных, что достаточно хорошо соотносится с визуальным анализом. Естественно, что в таком случае необходимо проводить более детальный анализ таких данных, либо полностью исключать такой ряд из дальнейшего анализа.

Другой подход, называемый метод квартильных функций, основан на изучении различных характеристик распределения данных, таких как квартили, интерквартильный размах и межквартильный диапазон. Выбросы могут быть определены как значения, находящиеся за пределами определенного диапазона, который основан на квартильных значениях [11]. Для применения данного критерия сначала выполняется процедура вычисления квартилей: квартили делят набор данных на четыре равные части, где первый квартиль представляет 25% данных, а третий квартиль представляет 75% данных. На основании этого определяют межквартильный размах (Interquartile Range, IQR), как разницу между третьим и первым квартилями данных. Далее, определяются верхняя и нижняя границы для обнаружения выбросов, которые обычно считаются как:

- нижняя граница: Первый квартиль минус $1,5 \cdot \text{IQR}$.

- верхняя граница: Третий квартиль плюс $1,5 \cdot IQR$.

После обнаружения выбросов следует проанализировать их природу и принять решение о том, как их обрабатывать. Если значение находится за пределами верхней или нижней границы, оно может считаться выбросом. При этом их можно удалить, или произвести замену их средними значениями или медианами, или выбрать другие методы коррекции данных. Преимущество использования метода межквартильного размаха заключается в его устойчивости к выбросам и нераспределенности данных. Однако следует отметить, что использование межквартильного размаха имеет свои ограничения. Этот метод определяет выбросы только на основе статистической изменчивости данных и не учитывает контекст или специфические особенности предметной области. Поэтому рекомендуется комбинировать его с другими методами и экспертными знаниями для более надежного обнаружения выбросов. Для данных, представленных на рис.1а, в соответствии с данным критерием, выбросами можно считать всего 6% значений, от исходного ряда данных. А для данных, представленных на рис.1б, данный метод и метод, основанный на вычислении коэффициента вариации, позволяют считать выбросами порядка 8% данных. Выбросами в этом случае признаются одни и те же значения из ряда данных.

В результате проведенного анализа можно сделать выводы что, ни один из методов не является безошибочным. Поэтому рекомендуется использовать несколько методов в совокупности, с учетом контекста данных. В рамках выполнения данной работы проверка исходных выполнялась последовательно с помощью методов оценки вариации и вычисления межквартильного размаха. В случае если коэффициент вариации превышает значение 20%, а количество данных, которые выходят за границы межквартильного размаха, составляет более 10%, то такие ряды данных считаются выбросами и исключаются из дальнейшего рассмотрения. Если выбросами, в результате автоматической двухкритериальной проверки, признаются данные только по одному из критериев, то такие данные проверяются в ручном режиме.

Результаты обработки температурных профилей средней атмосферы

На рис. 2 приведены семейства кривых среднемесячных профилей температуры (СПТ) и расчеты СПТ, усредненных за весь период измерений для холодного и теплого периода 2010-2023 гг., и сравнение их с международной эмпирической моделью атмосферы CIRA-86, рекомендуемой комитетом по космическим исследованиям.

Максимальный разброс кривых ВРТ отмечается для января месяца. Данный факт свидетельствует о том, что для этого месяца характерен более нестабильный термический режим средней атмосферы во всем слое от 15 до 60 км. На рисунке 2 с большим положительным отклонением выделяется профиль за январь 2010 г., который был вызван сильным (мажорным) стратосферным потеплением

этого года. С апреля начинается стабилизация термического режима, который становится устойчивым в мае - августе, охватывая интервал высот 20-60 км. Некоторый незначительный разброс температурных кривых отмечается в нижнем слое 15–25 км. С сентября начинается дестабилизация термического режима, которая происходит во всем слое от 15 до 60 км и достигает максимума в декабре. Наиболее сильные колебания температуры происходит в нижнем слое 15-30 км.

Как уже отмечалось ранее [8], наибольший среднеквадратичный разброс кривых с максимумом в январе (до ± 15 К на высоте 40-45 км) характерен для зимних месяцев. Ранней весной и поздней осенью разброс сокращается, а в теплый период года от мая по сентябрь становится минимальным (до единиц К). При сравнении среднемесячных профилей температуры с моделью CIRA-86 обращает на себя внимание точка их пересечения на высоте около 25 км. Так, в первой и последней декаде года выше этой точки среднемесячный температурный профиль отклоняется в отрицательную сторону от модельного, а ниже - в положительную. В теплый период года с мая по сентябрь СПТ, с некоторым отличием в сентябре на высотах от 15 до 25 км, практически совпадает с модельным.

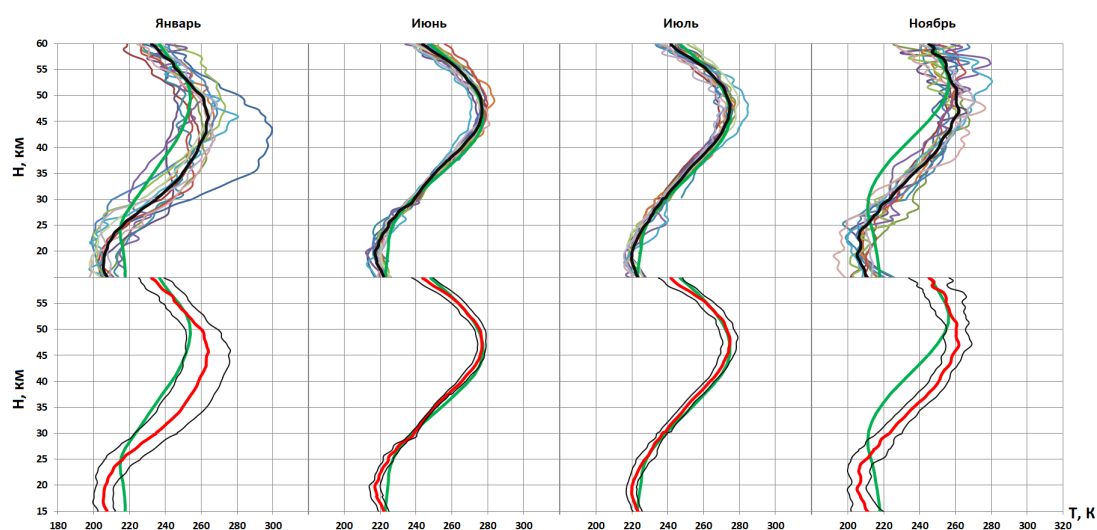


Рис. 2. Выборочные среднемесячные профили температуры за каждый год периода 2010 - 2023 гг. (разноцветные кривые, верхние профили). Среднемесячные профили температуры за весь период наблюдений 2010 -2023 гг. в сравнении с моделью CIRA-86 (кривые красного и зеленого цвета). Тонкими кривыми черного цвета обозначен коридор стандартного разброса годовых СПТ.

Figure 2. Selected average monthly temperature profiles for each year of the period 2010-2023. (multi-colored curves, top profiles). Average monthly temperature profiles for the entire observation period 2010-2023. compared to the CIRA-86 model (red and green curves). Thin black curves indicate the corridor of the standard spread of annual monthly average temperature profiles.

На рис. 3 показан вклад последних трех лет в общий расчет среднемесячных профилей температуры в средней атмосфере, выраженный в относительном отклонении СПТ за период 2010 – 2023 гг. от расчетов за 2010 – 2020 гг. Как можно видеть, исходное значение профилей температуры, при добавлении последних лет, за каждый анализируемый месяц, изменилось на ± 0.5 % для теплого периода времени и ± 1 % для холодного времени года во всем диапазоне высот 15 – 60 км при коридоре стандартного разброса годовых СПТ рассчитанных за 2010–2020 гг. в ± 2 % и ± 5 %, соответственно. Стоит отметить ноябрь месяц, в котором наблюдается повышение температуры на высотах 15–33 км на 1.2 % и снижение на 1.1 % в диапазоне 46–50 км от исходных значений за 2010–2020 гг.

Таким образом, показано, что вклад последних 3 лет в рассчитанные 11-летние среднемесячные профили температуры значительно не влияет на общее распределение ВРТ в диапазоне высот 15-60 км и не выходит за коридор стандартного разброса годовых СПТ.

На следующем рис. 4 представлено относительное отклонение среднемесячных профилей температуры, усредненных за весь период измерений 2010-2023 гг. от модельного распределения температуры CIRA-86.

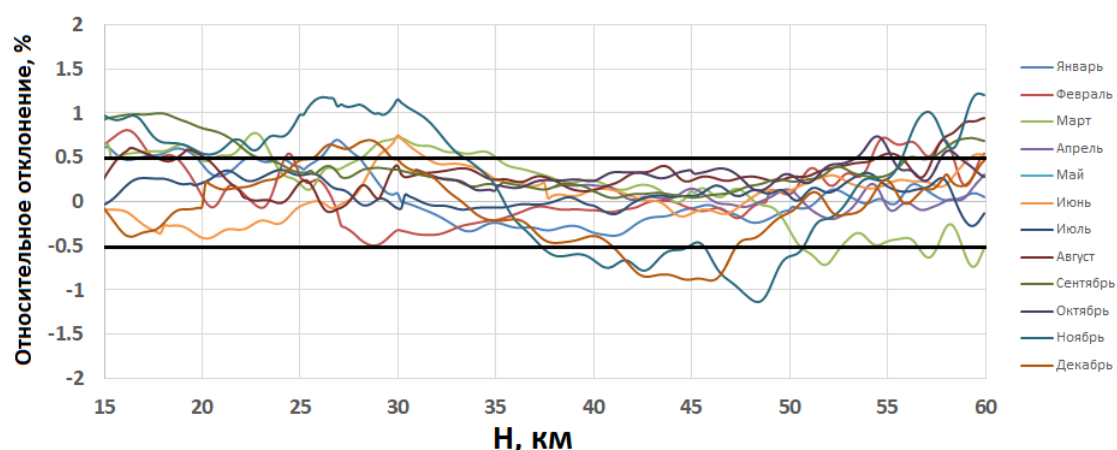


Рис. 3. Относительное отклонение среднемесячных профилей температуры за весь период наблюдений 2010-2023 гг. от аналогичных расчетов за период 2010-2020 гг.

Figure 3. Relative deviation of average monthly temperature profiles for the entire observation period 2010 - 2023. from similar calculations for the period 2010-2020.

Из рис. 4 видно, что реальная картина ВРТ в средней атмосфере значительно отличается от модели CIRA-86. Особенно, это заметно в холодный период времени, когда отклонение температуры на высотах 25-50 км может достигать до 10 % в положительную сторону, а в нижнем слое 15-25 км на 5 % в отрицательную. В теплый период года ВРТ незначительно отличается от модельного распределения.

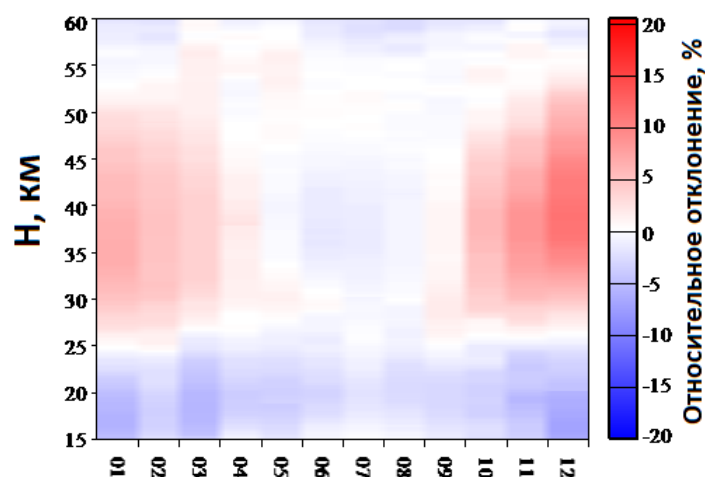


Рис. 4. Относительное отклонение среднемесячных профилей температуры, усредненных за весь период измерений 2010-2023 гг. от модельного распределения температуры CIRA-86, показанный в цветовой градации.

Figure 4. Relative deviation of monthly average temperature profiles averaged over the entire measurement period 2010-2023. from the CIRA-86 model temperature distribution, shown in color gradation.

Заклучение

По данным многолетних наблюдений за период 2010-2023 гг. построено усредненное вертикальное распределение температуры средней атмосферы. Для теплого периода каждого года (с мая по сентябрь) установлено стабильное распределение температуры с отличием до нескольких К по отдельным годам. Для этого же периода года полученный по лидарным данным усредненный профиль температуры практически совпадает с модельным CIRA-86. Весной и осенью отличие среднемесячных профилей температуры возрастает до 5-10 К и в январе достигает максимума 15 К. Выявлено принципиальное отличие ВРТ, построенного по лидарным данным, и предлагаемой моделью CIRA-86. С октября по апрель в интервале высот от 15 до 25 км "лидарный" профиль температуры сдвинут от модельного в отрицательную сторону, выше от 25 до 50 км в положительную. Максимальный отрицательный сдвиг профилей отмечается в декабре и составляет 16 К, а отрицательный до 15К в январе. Так же, показано, что при добавлении новых рядов данных ВРТ в ранее рассчитанные среднемесячные профили температуры значительно не влияет ($\pm 0.5\%$ - $\pm 1\%$) на общее распределение ВРТ в диапазоне высот 15-60 км и не выходит за коридор стандартного разброса годовых СПТ ($\pm 2\%$ и $\pm 5\%$, соответственно). Факт существенного расхождения между моделью и полученными экспериментальными данными и позволяет сделать вывод о том, что последние более реально отражают термодинамический режим средней атмосферы и могут быть рекомендованы к использованию как модели для региона Западной Сибири.

Список литературы

1. URL: <http://cedarweb.vsp.ucar.edu/wiki/images/7/7b/CLRV1.pdf> (Дата обращения: 25.04.2024).
2. URL: <http://cedarweb.vsp.ucar.edu/wiki/images/1/1c/CLRV2.pdf> (Дата обращения: 25.04.2024).
3. Angot G., Keckhut Ph., Hauchecorne A., Claud Ch. Contribution of stratospheric warmings to temperature trends in the middle atmosphere from the lidar series obtained at Haute-Provence Observatory (44°N), *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2012. vol. 117, pp. D21102.
4. Funatsu, B. M., C. Claud, P. Keckhut, W. Steinbrecht, and A. Hauchecorne Investigations of stratospheric temperature regional variability with lidar and AMSU, *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2011. vol. 116, pp. D08106.
5. Hoffmann, P., W. Singer, D. Keuer, W. K. Hocking, M. Kunze, and Y. Murayama Latitudinal and longitudinal variability of mesospheric winds and temperatures during stratospheric warming events, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 2007. vol. 69, pp. 2355-2356.
6. Keckhut P., et al. Review of ozone and temperature lidar validations performed within the framework of the network for the detection of stratospheric change, *J. Environ. Monit.*, 2004. vol. 6, pp. 721-733.
7. Keckhut, P., et al. An evaluation of uncertainties in monitoring middle atmosphere temperatures with the ground-based lidar network in support of space observations, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 2011. vol. 73, pp. 627-642.
8. Marichev V. N., Bochkovskii D. A., Elizarov A. I. Construction of a thermodynamical model of the middle atmosphere of Western Siberia from the results of lidar monitoring, *Proc. SPIE*, 2021. vol. 11916, pp. 119162W.
9. Маричев В. Н., Бочковский Д. А. *Лидарные исследования термического режима стратосферы над Томском за 2012–2015 гг.*, Т. 31: Оптика атмосферы и океана, 2018.
10. Pincus R.C., Barnett V., Lewis T. *Outliers in Statistical Data*, 3rd edition, vol. XVII: J. Wiley & Sons, 1994.
11. Tukey John W. *Exploratory Data Analysis*: Addison-Wesley, 1977. 712 pp.
12. Rees D., Barnett J.J., Labitske K. COSPAR International Reference Atmosphere: 1986. Part II, Middle Atmosphere Models, *Adv. Space Res.*, 1990. vol. 10, pp. 267-315.

Информация об авторах



Маричев Валерий Николаевич ✉ – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук (ИОА СО РАН), Томск, Россия
ORCID 0000-0002-7367-6605.



Бочковский Дмитрий Андреевич ✉ – кандидат технических наук, научный сотрудник, Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук (ИОА СО РАН), Томск, Россия,
ORCID 0000-0002-9127-2065.



Елизаров Алексей Игоревич ✉ – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук (ИОА СО РАН), Томск, Россия,
ORCID 0000-0001-5847-8793.

References

- [1] URL: <http://cedarweb.vsp.ucar.edu/wiki/images/7/7b/CLRV1.pdf> (date of access: 25.04.2024)
- [2] URL: <http://cedarweb.vsp.ucar.edu/wiki/images/1/1c/CLRV2.pdf> (date of access: 25.04.2024)
- [3] Angot G., Keckhut Ph., Hauchecorne A., Claud Ch. Contribution of stratospheric warmings to temperature trends in the middle atmosphere from the lidar series obtained at Haute-Provence Observatory (44°N). *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. 2012. vol. 117. D21102.
- [4] Funatsu B. M., Claud C., Keckhut P., Steinbrecht W., Hauchecorne A. Investigations of stratospheric temperature regional variability with lidar and AMSU. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. 2011. vol. 116. D08106.
- [5] Hoffmann P., Singer W., Keuer D., Hocking M. W. K., Kunze, Murayama Y. Latitudinal and longitudinal variability of mesospheric winds and temperatures during stratospheric warming events. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 2007. vol. 69. pp. 2355-2356.
- [6] Keckhut P., et al. Review of ozone and temperature lidar validations performed within the framework of the network for the detection of stratospheric change. *J. Environ. Monit.* 2004. vol. 6. pp. 721-733.
- [7] Keckhut, P., et al. An evaluation of uncertainties in monitoring middle atmosphere temperatures with the ground-based lidar network in support of space observations. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 2011. vol. 73. pp. 627-642.
- [8] Marichev V. N., Bochkovskii D. A., Elizarov A. I. Construction of a thermodynamical model of the middle atmosphere of Western Siberia from the results of lidar monitoring. *Proc. SPIE*. 2021. vol. 11916. 119162W.
- [9] Marichev V. N., Bochkovskii D. A. Lidar studies of the thermal regime of the stratosphere over Tomsk for 2012-2015. *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2018. vol. 31. pp. 28-37.
- [10] Pincus R. C., Barnett V., Lewis T. *Outliers in Statistical Data*. 3rd edition. J. Wiley & Sons. 1994. vol. XVII. pp. 256-256.
- [11] Tukey John W. *Exploratory Data Analysis*. Addison-Wesley. 1997. 712 p.
- [12] Rees D., Barnett J. J., Labitske K. *COSPAR International Reference Atmosphere: 1986. Part II, Middle Atmosphere Models*. *Adv. Space Res.* 1990. vol. 10. pp. 267-315.

Information about authors



Marichev Valeriy Nikolaevich ✉ – D. Sci. (Phys.& Math.), main staff scientist, V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS (IAO SB RAS), Tomsk, Russia
 ORCID 0000-0002-7367-6605.



Bochkovskiy Dmitriy Andreevich ✉ – PhD (Tech.), staff scientist, V. E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS (IAO SB RAS), Tomsk, Russia,
 ORCID 0000-0002-9127-2065.



Elizarov Alexey Igorevich ✉ – PhD (Tech.), senior researcher, V. E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS (IAO SB RAS), Tomsk, Russia,
 ORCID 0000-0001-5847-8793.