ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕРМИЧЕСКОГО РЕЖИМА СТРАТОСФЕРЫ НАД ТОМСКОМ В 2025 Г. НА ОСНОВЕ ЛИДАРНОГО МОНИТОРИНГА.

Маричев В.Н., Бочковский Д.А.
Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск
marichev@iao.ru, moto@iao.ru

Ключевые слова: стратосфера, вертикальное распределение температуры, стратосферное потепление, лидар.

Лидарные технологии нашли широкое применение в исследовании термического режима атмосферы. Такие исследования в мониторинговом режиме в институте оптики атмосферы СО РАН были начаты с 1994 года и продолжаются в настоящее время. Особое внимание уделяется изучению проявления внезапных возмущений в средней стратосфере, вызываемых зимними стратосферными потеплениями (СП). С полученными по данной тематике результатами можно ознакомиться в работах [1-4]. В настоящей статье представлены исследования вертикального распределения температуры над Томском в возмущенный и спокойный периоды 2025г.

Введение

В качестве первичной информации для анализа результатов наблюдений за 2025 г. использовался массив данных из 70 суммарных сигналов, накопленных в отдельные ночи. Интервал зондируемых высот простирался от 10 до 70км., пространственное разрешение составляло 192м. Прием лидарных сигналов велся в режиме счета фотоимпульсов с накоплением по 12×10^4 запускам лазерных импульсов (время накопления - около двух часов за ночь). Наблюдения проводились в ночное время суток в условиях безоблачного неба.

Измерения вертикального распределения температуры были получены лидарными методами молекулярного упругого и спонтанного комбинационного рассеяния света (в иностранной литературе принято называть рэлеевского и рамановского рассеяния света).

Зондирование проводилось лазерным излучением на длине волны 532 нм, а прием сигналов на длинах волн 532 и 607 нм (упругое и комбинационное рассеяние). Профили температуры в интервале высот 10-25 км рассчитывались по рамановским сигналам, а в интервале высот 25 - 60(70) км - по рэлеевским сигналам согласно формуле:

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

Здесь N(H) - лидарные сигналы, *P1(H)* и *P2(H)*- пропускание атмосферы от лидара до высоты *H* на длинах волн 532 нм (рэлеевские сигналы) и 532 and 607 нм (рамановские сигналы), соответственно; *R** - универсальная газовая постоянная, *g*(*h*) - ускорение свободного падения,

Hm - максимальная высота, с которой регистрируются достаточно надежные для обработки сигналы (так называемая высота калибровки, на которой задается значение температуры *T*(*Hm*)).

Результаты наблюдений.

По данным лидарного мониторинга, с октября 2024 г. начинается дестабилизация температурного режима стратосферы, которая усиливается в ноябре и переходит в стадию образования очередного стратосферного потепления в декабре (рис.1). СП проявляется в обширной области высот от 30 до 55 км с положительной амплитудой отклонения до 50 К. во второй половине месяца.

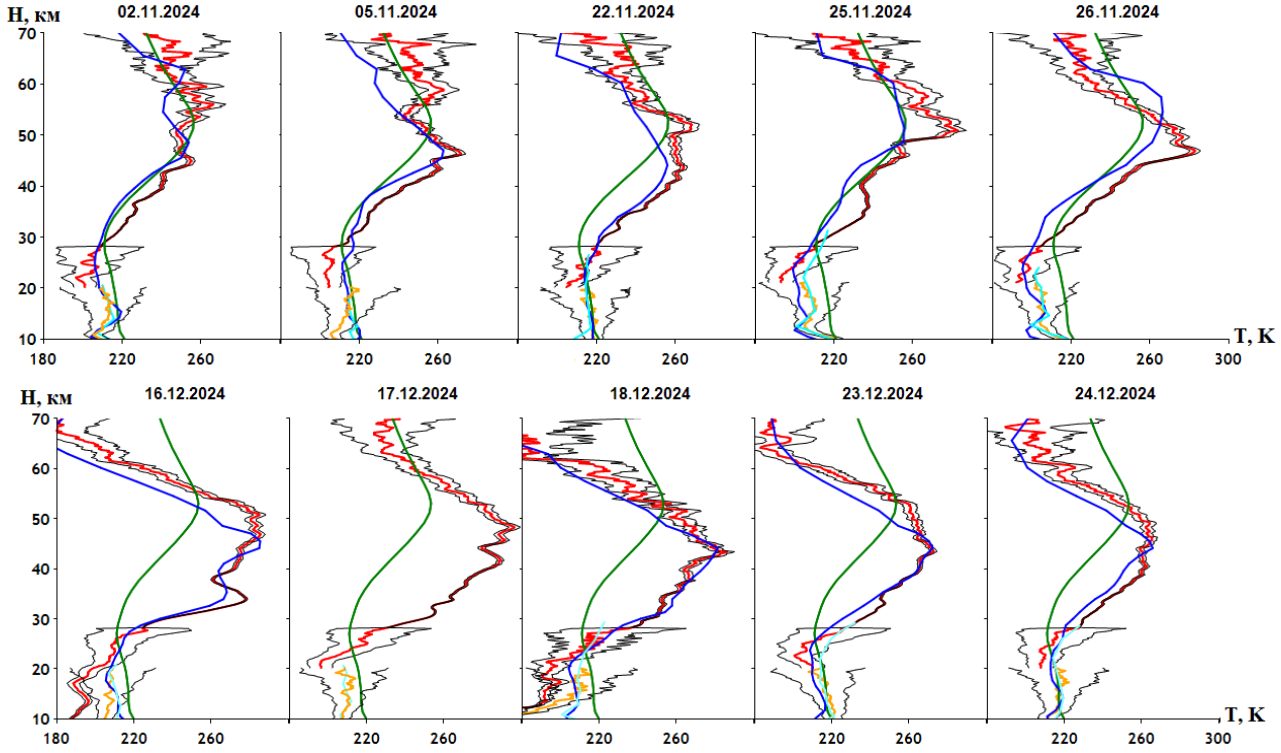

Рисунок 1 – Динамика образования стратосферного потепления зимы 2024/25 гг.(ноябрь - декабрь) по данным лидарных наблюдений. Кривые – красный, синий, зеленый, оранжевый и голубой цвет – профили температуры: лидар , спутник Аура[6], модель CIRA-86[5], лидар, радиозонд[7]

На рис.2. в цветовой гамме для отслеживания динамики СП приведено отклонение измеренных спутником Аура профилей температуры от модельных значений, полученных в зиму 2024/25 гг. Первая волна СП проявляется в период 10-26 декабря в диапазоне высот от 25 до 50 км. с положительным отклонением 30-40 К. Затем в период 2-15 января регистрируется вторая, более слабая, волна. Для нее максимальные положительные отклонения температуры

происходит на более низкой высоте (около 30 км) по сравнения с первой волной. Далее, со второй половины января происходит финальная стадия затухания СП в виде отдельных разрывных всплесков как по времени. так и по высоте, в высотном диапазоне от 25 до 60 км.

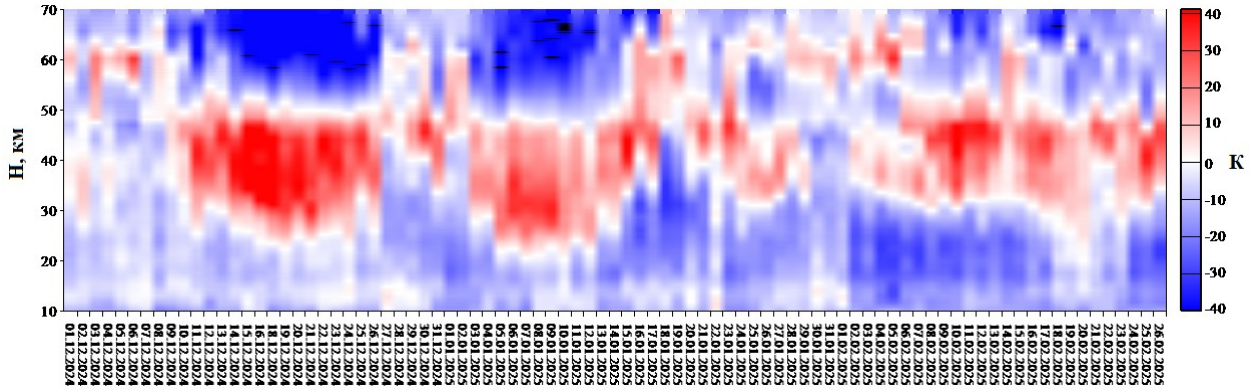

Рисунок 2 – Динамика стратосферного потепления зимы 2024/25 гг. (декабрь - февраль) по данным спутниковых наблюдений.

На рис.3 приведена динамика образования, развития и затухания циркумполярного вихря зимы СП 2024/25 гг., синхронизированных с датами лидарных и спутниковых наблюдений:[8]

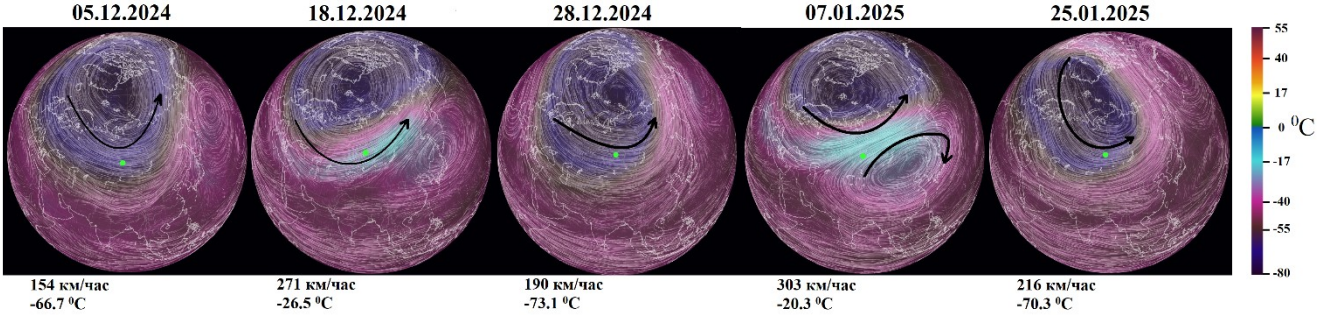

Рисунок 3 – Циркумполярный вихрь 2024/25 гг.

На высоте 10 гПа указаны поля направления скорости ветра (стрелки), температуры (температурная гамма), обозначена точка наблюдений Из приведенных рисунков 1 -3 по полям интенсивности струйных течений и температур на уровне 30 км вихря наглядно видна корреляция его динамики с динамикой СП. Так, до начала СП (5 декабря) скорость ветра составляла 154 км/час при температуре -67 ^{0}C. а при максимуме его проявления (16 декабря) скорость и температура возросли до значений 265 км/час и -44 ^{0}C. Далее под воздействием СП происходит ослабление полярного вихря. В последующий период 7 января происходит

образование второго СП с резким повышением скорости и температуры, которое приводит к расщеплению и дальнейшему ослаблению вихря.

Вертикальное распределение температуры (ВРТ) в феврале в феврале приведена на рис.4. Здесь в течении всего месяца видны следы небольших остаточных «потеплений » в области высот от 30 до 60 км, а также пониженных значений температур в первой декаде месяца в нижней стратосфере (10 – 30 км)

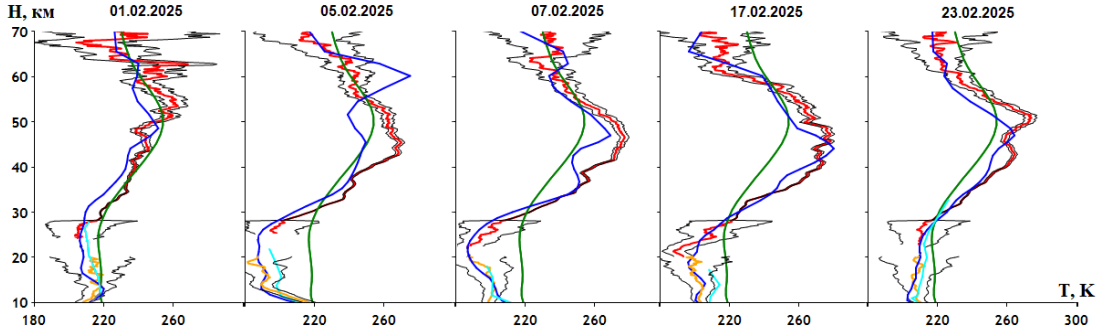

Рисунок 4 - Динамика вертикального распределения температуры в феврале 2025 г.

С марта начинается процесс перехода вертикального распределения температуры (ВРТ)от нестабильного состояния в стабильное (рис.5). А с апреля по сентябрь устанавливается устойчивый термический режим средней атмосферы. ВРТ, полученные из лидарных и спутниковых измерений, практически совпадают с модельными (рис.6).

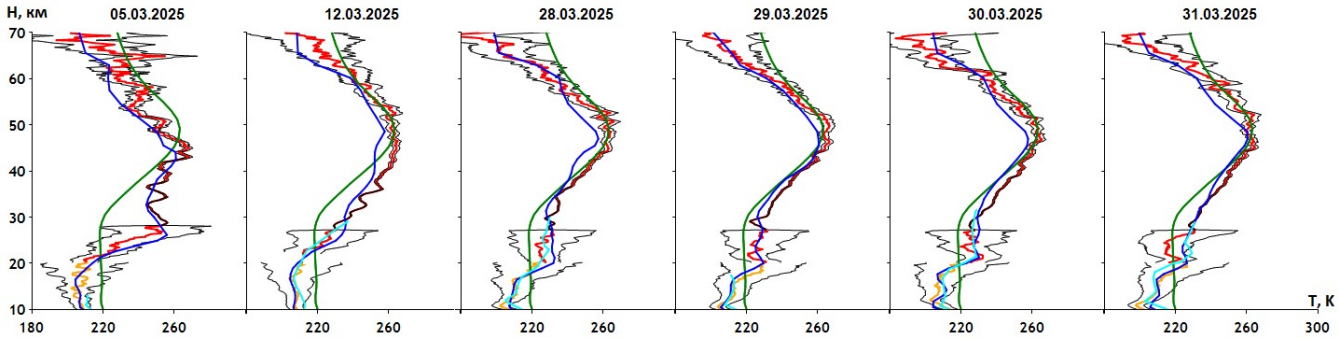

Рисунок 5 - Динамика вертикального распределения температуры в марте 2025 г.

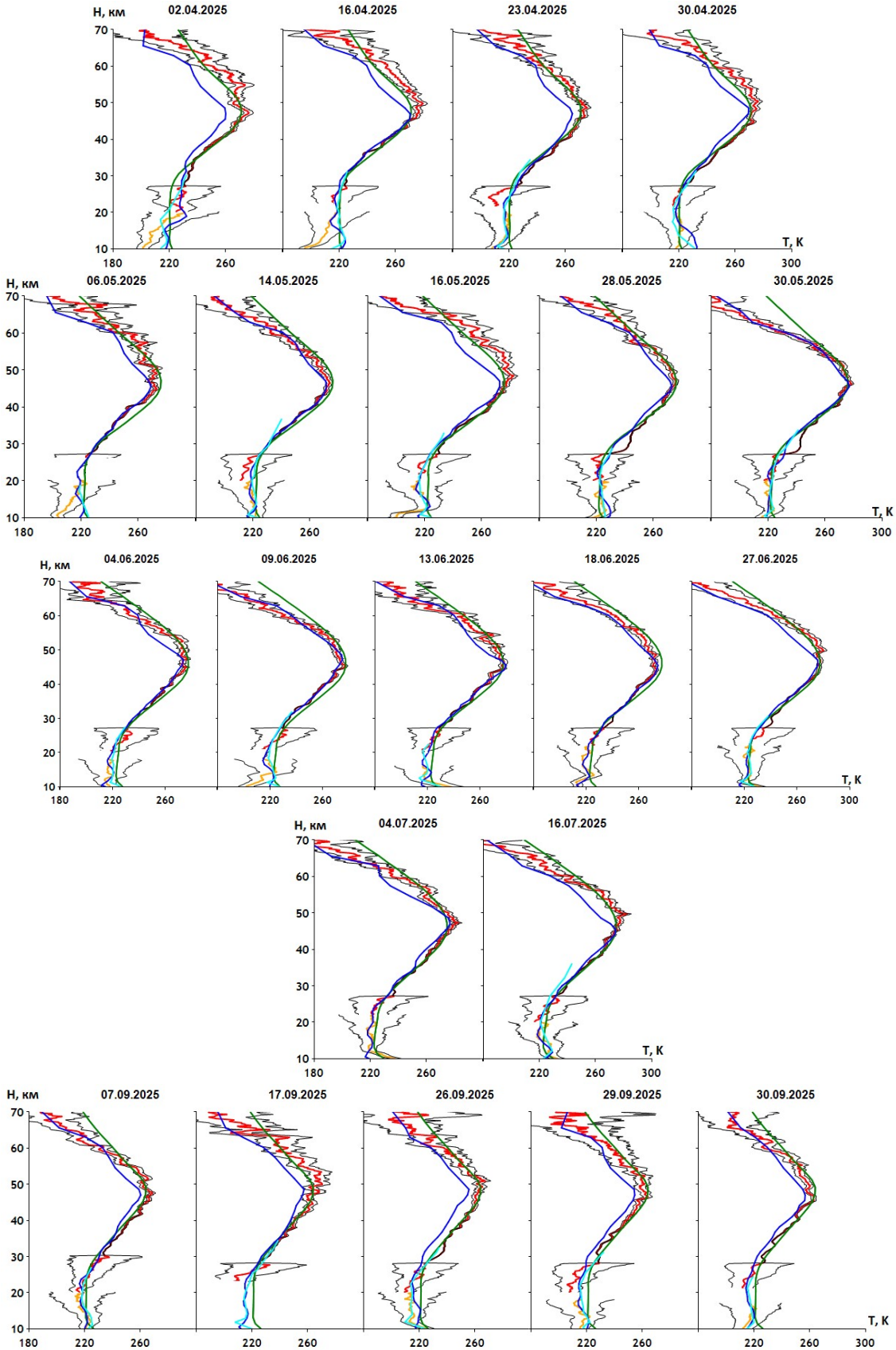

Рисунок 6 – Динамика вертикального распределения температуры в апреле - сентябре 2025 г

С октября начинается дестабилизация температурного режима стратосферы, которая усиливается в ноябре (рис.7)

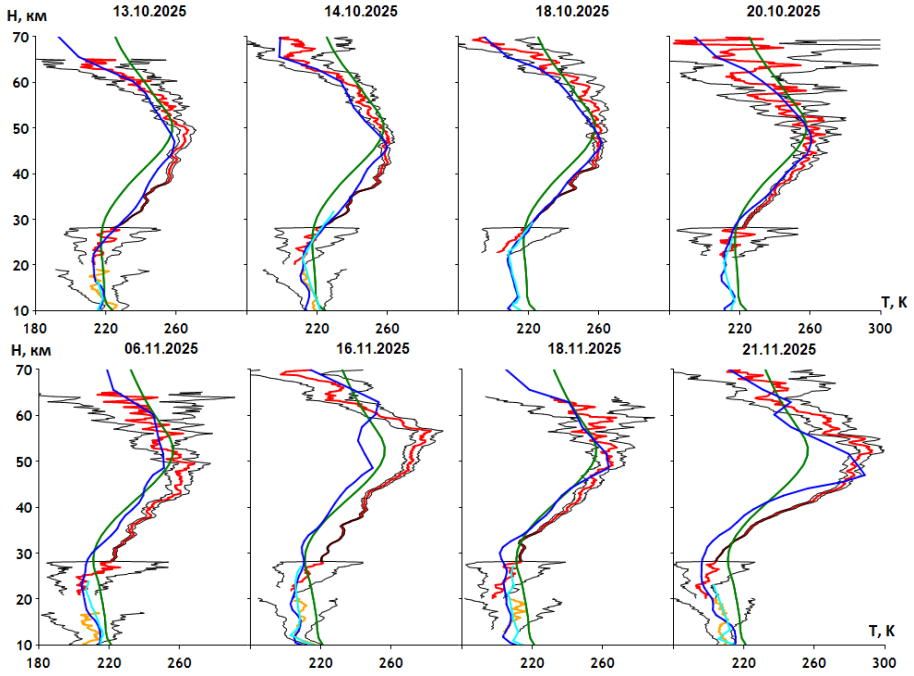

Рисунок 7 – Динамика ВРТ в период дестабилизации температурного режима средней атмосферы (октябрь – ноябрь 2025 г)

Заключение

Динамика вертикального распределения температуры в стратосфере над Томском, наблюдаемого в 2025 г., аналогична динамики, наблюдаемой в предыдущие годы. Характерными признаки годовой динамики ВРТ является возникновение ежегодного стратосферного потепления зимой, его разрушением весной, стабилизации ВРТ в теплый период года, и дестабилизацией осенью с переходом в фазу зимнего стратосферного потепления. Для длительного периода года апрель -октябрь в подавляющем большинстве случаев вертикальное распределение температуры хорошо согласуется с модельным распределением CIRA-86.

НИР выполнена в рамках государственного задания ИОА СО РАН с использованием оборудования ЦКП «Атмосфера».

ЛИТЕРАТУРА.

1. *Маричев В.Н.* Лидарные исследования проявления стратосферных потеплений над Томском в 2008-2010 гг. // Оптика атмосферы и океана. 2011. Т. 24. № 05. С. 386-391.

2. *Маричев В.Н.* Исследование особенностей проявления зимних стратосферных потеплений над Томском по данным лидарных измерений температуры в 2010-2011 гг.. // Оптика атмосферы и океана. 2011. Т. 24. № 12. С. 1041-1046.
3. *Маричев В.Н.* Анализ поведения плотности воздуха и температуры в стратосфере над Томском в периоды ее возмущенного и спокойного состояний, выполненный по результатам лидарных измерений. // Оптика атмосферы и океана. 2013. Т. 26. № 09. С. 783-792.
4. *Маричев В.Н., Бочковский Д. А.* Исследования термического режима стратосферы над Томском в 2024г. на основе лидарного мониторинга. 2025. С.1-8. DOI https://doi.org/10.56820/conferencearticle_685be467113c83.63286703
5. *Rees D., Barnett J.J., Labitske K.* COSPAR International Reference Atmosphere: 1986. Part II, Middle Atmosphere Models // Adv. Space Res. 1990. V. 10, N 12. 525 p.
6. Nasa gesdisc data archive: сайт – URL: http://mirador.gsfc.nasa.gov (Дата обращения: 12.03.2025). – Текст: электронный.
7. Университет Вайоминга, Колледж инженерии и прикладных наук: сайт – URL: http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html (Дата обращения: 12.03.2025). - Текст: электронный.
8. US National Weather Service: сайт – URL: https://earth.nullschool.net (Дата обращения: 12.03.2025). - Текст: электронный.
9. Institute of Meteorology: сайт – URL: http://users.met.fu-berlin.de/~Aktuell/strat-www/wdiag (Дата обращения: 12.03.2025). – Текст: электронный
10. *Pal S.R., Carswell A.I., Bird J., Donovan D.P., Duck T.J.,Whiteway J.A.* Lidar measurements of the stratosphereat the Eureka and Toronto NDSC stations // Proc. SPIE.1990. V. 2833. P. 28–39.
11. *Whiteway J.A., Duck T.J., Carswell A.I.* Measurementsof gravity wave activity within and around the Arcticstratospheric vortex // Geophys. Res. Lett. 1997. V. 24, N 11. P. 1387–139
12. *Matsuno T.* A dynamical model of stratospheric suddenwarming // J. Atmos. Sci. 1971. V. 28. P. 1479–1494.
13. *Mohanakumar K.* Stratosphere-Troposphere Interactions. An Introduction. New York: Springer-Verlag, 2008. 436 p.
14. *Nishii K., Nakamura H.* Tropospheric influence on Antarcticozone hole split 2002 // Geophys. Res. Letters. 2004. V. 31. L16103. doi:10.1029/2004GL019532.
15. *Peters D., Vargin P., Körnich H.* A study of the zonally asymmetric tropospheric forcing of the austral vortex splitting during September 2002 // Tellus A. 2007. V. 59, N 3. P. 384–394.
16. *Peters D., Vargin P., Gabriel A., et al.* Tropospheric forcingof the boreal polar vortex splitting in January 2003 // Ann.Geophys. 2010. V. 28. P. 2133–2148.