УДК 537.86 DOI: 10.62955/0135-3748-2024-204

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВНЕЗАПНЫХ СТРАТОСФЕРНЫХ ПОТЕПЛЕНИЙ НА ВАРИАЦИИ ЭМИССИОННОГО СЛОЯ 557.7 НМ НАД ОБСЕРВАТОРИЯМИ МАЙМАГА И ТОРЫ

А.В. Саункин[1], О.С. Зоркальцева[1], Р.В. Васильев[1], Г.А. Гаврильева[2]

[1]Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия, saunkin@iszf.irk.ru
[2]Институт космофизических исследований и аэрономии Сибирского отделения Российской академии наук, Якутск, Россия

STUDY OF THE INFLUENCE OF SUDDEN STRATOSPHERIC WARMINGS ON VARIATIONS OF THE 557.7 NM EMISSION LAYER OVER THE MAIMAGA AND TORY OBSERVATORIES

A.V. Saunkin[1], O.S. Zorkaltseva[1], R.V. Vasilyev[1], G.A. Gavrilyeva[2]

[1]Institute of Solar-Terrestrial Shysics SB RAS, Irkutsk, Russia, saunkin@iszf.irk.ru
[2]Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia

Аннотация. В данной работе представлены результаты исследования влияния эффектов внезапных стратосферных потеплений (ВСП) на интенсивность атмосферной эмиссии 557.7нм (I557.7) и температуру в области мезосферы и нижней термосферы по наземным и спутниковым данным. В качестве наземных инструментов используются данные, полученные инфракрасным спектрографом на оптической станции Маймага (63° с.ш., 129.5° в.д.) с 2003 по 2021 гг. и интерферометром Фабри-Перо, расположенным в геофизической обсерватории п. Торы (52° с.ш., 103° в.д.) с 2017 по 2023 гг. В качестве спутниковых данных использовались наблюдения радиометром SABER на платформе TIMED. По наземным данным были построены композитные графики вариаций температуры, усредненные относительно реперной даты в момент максимума ВСП в диапазоне +/-15 дней. Однако эффект ВСП на данных графиках оказался незначительным. Далее по данным SABER аналогичным способом были исследованы вариации I557.7 и температуры над выбранными обсерваториями в диапазоне высот от 40 до 110 км. Развертка по высоте позволила выявить значимый эффект влияния ВСП на среднюю и верхнюю атмосферу над станциями Маймага и Торы. В работе обсуждаются эффекты ВСП и возможные механизмы вертикальных связей в атмосфере.

Ключевые слова: SABER, I557.7, ВСП, температура атмосферы.

Abstract. This paper presents the results of a study of the influence of sudden stratospheric warming (SSW) effects on the intensity of the atmospheric 557.7 nm (I557.7) emission and temperature in the mesosphere and lower thermosphere according to ground-based and satellite data. Data obtained by an infrared spectrograph at the Maimaga optical station (63°N, 129.5 °E) from 2003 to 2021 are used as ground-based instruments and the Fabry-Pérot interferometer located at the Geophysical observatory of Tory (52° N, 103° E) from 2017 to 2023. Observations by the SABER radiometer on the TIMED platform were used as satellite data. Based on ground-based data, composite graphs of temperature variations were constructed, averaged relative to the reference date at the time of the SSW maximum in the range of +/-15 days. However, the effect of SSW on these graphs turned out to be insignificant. Next, using SABER data, variations in I557.7 and temperature over selected observatories in the altitude range from 40 to 110 km were studied in a similar way. The vertical sweep made it possible to identify a significant effect of the influence of SSW on the middle and upper atmosphere above the station Maimaga and Tory. The work discusses the effects of SSWs and possible mechanisms of vertical connections in the atmosphere.

Keywords: SABER, I557.7, SSW, atmospheric temperature.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время накоплено немало свидетельств тому, что динамические процессы в различных слоях атмосферы связаны друг с другом. Основным механизмом связи является вертикальное распространение атмосферных волн различных временных и пространственных масштабов. Основная роль атмосферных волн — перенос энергии и импульса от нижних слоев атмосферы к вышележащим слоям. Во время диссипации в средней и верхней атмосфере волны передают свою энергию и импульс, тем самым влияя на тепловой баланс и циркуляцию средней и верхней атмосферы. Следовательно, распространение и диссипация атмосферных волн является одним из основных механизмов, ответственных за энергетическое и динамическое взаимодействие между нижней, средней и верхней атмосферой [Andrews et al., 1987]. Мезосфера-нижняя термосфера (МНТ) определяется как область атмосферы на высоте от 60 до 110 км. МНТ составляет верхнюю часть того, что часто называют средней атмосферой (от 10 до 110 км) [Yiğit, Medvedev, 2015]. Наблюдения показывают, что наиболее тесная взаимосвязь между нижними и верхними слоями атмосферы существует зимой и ранней весной [Vincent, 2015]. Вертикальное взаимодействие между слоями атмосферы особенно очевидно во время внезапных стратосферных потеплений (ВСП) [Dowdy et al., 2007] [Jacobi et al., 2009]. Основным признаком всех зимних нарушений циркуляции МНТ, связанных с динамикой стратосферы, является значительное ослабление, а часто и инверсия зонального ветра на несколько дней. Эта особенность особенно хорошо наблюдается на обсерваториях средних широт [Limpasuvan et al., 2016]. В полярных широтах зональная циркуляция менее устойчива, поэтому в отдельные годы отклик на ВСП в

динамике МНТ может выражаться по-разному. Чаще всего зональный ветер меняет направление на восточное, а во время ВСП приливы в МНТ усиливаются [Bhattacharya et al., 2004] [Zorkaltseva, Vasilyev, 2021]. Несмотря на то, что ВСП наблюдаются в полярной стратосфере, реакция фоновых ветров МНТ регистрируется в экваториальных и тропических обсерваториях [Sridharan, 2012]. В [Laskar, Pallamraju, 2014] авторы предлагают убедительную идею о существовании ячейки меридиональной циркуляции в ветрах МНТ во время событий ВСП, которая обеспечивает перенос атомарного кислорода из высоких широт в низкие.

В последнее время в связи с развитием методов исследования верхней атмосферы со спутников, появилась возможность сравнить наземные измерения основных параметров МНТ со спутниковыми измерениями [Lednyts'kyy, 2015] [Saunkin et al., 2022]. В работе [Panka et al., 2018] было показано, что сравнение данных наземных средств измерений в разных точках Земного Шара с данными одного прибора, расположенного на спутнике, может способствовать взаимной калибровке всей мировой сети приборов. С января 2002 г. успешно эксплуатируется спутник с полярной орбитой TIMED, оснащенный комплексом приборов для исследования состояния атмосферы, одним из которых является радиометр SABER. SABER ведет глобальные измерения параметров атмосферы с помощью 10-канального широкополосного инфракрасного радиометра методом сканирования лимба Земли, охватывающего спектральный диапазон от 1.27 до 17 мкм. Эти измерения используются для получения вертикальных профилей кинетической температуры, давления, геопотенциальной высоты, плотности объемных соотношений и интенсивности собственного свечения атмосферы. На примере нескольких лет нами было проведено сравнение данных, полученных по радиометру SABER и данных измерений наземного инструмента — интерферометра Фабри-Перо [Vasilyev et al., 2023]. В работе [Vasilyev et al., 2023] мы показали, что годовой ход интенсивности эмиссии и температуры по спутниковым и наземным данным хорошо согласован, а быстрые (не сезонные) вариации температуры, полученные двумя инструментами, ведут себя в противофазе. Скорее всего, это обусловлено изменением высоты эмиссионного слоя.

В данном исследовании мы фокусируемся на исследовании эффектов ВСП в области МНТ по данным наземных и спутниковых наблюдений.

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

В качестве наземных инструментов были использованы данные, полученные инфракрасным спектрографом (ИС) на оптической станции Маймага (63° с.ш., 129.5° в.д.) с 2003 по 2021 гг. и интерферометром Фабри-Перо (ИФП), расположенным в геофизической обсерватории п. Торы (52° с.ш., 103° в.д.) с 2017 по 2023 гг. В качестве спутниковых данных использовались наблюдения радиометром SABER на платформе TIMED. По наземным данным были построены композитные графики вариаций температуры, усредненные относительно реперной даты в момент максимума ВСП в диапазоне +/-15 дней (т.н. метод наложенных эпох). Случаи ВСП были выбраны на основе таблицы, представленной в работе [Зоркальцева и др., 2023]. По данным SABER аналогичным способом были исследованы вариации I557.7 и температуры над выбранными обсерваториями в диапазоне высот от 40 до 110 км. Спутниковые данные выбирались для ночного времени и в области с радиусом 700 км с центром над местоположением наземных инструментов.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рисунках представлены температуры, полученные по данным ИФП и спектрографа во время ВСП. По оси абсцисс отложены дни до и после ВСП, нулевому дню соответствует день максимума ВСП. Цветные тонкие кривые показывают вариации температуры за отдельные годы. Штриховая кривая представляет собой усредненную температуру по всем событиям ВСП.

Из рис. 1 можно заметить, что усредненные эффекты ВСП по данным наземных инструментов незначительны. Над станцией Маймага наблюдается высокая межгодовая дисперсия. Повышенные вариации средней температуры по ИФП обусловлены малой статистикой (с 2017 по 2023 гг., 5 ВСП). Предыдущие исследования эффектов для отдельных событий ВСП над п. Торы показали, что во время мажорных ВСП происходит уменьшение I557.7 по данным ИФП. На рис. 2 построен график аналогичный графикам на рис.1 и содержит усредненную I557.7 по данным ИФП.

Поскольку оптические инструменты позволяют оценивать интегральные параметры эмиссионного слоя, то от вариаций высоты слоя будет существенно зависеть получаемые интегральные температуры, поскольку вертикальные градиенты температуры в области МНТ высокие. Поэтому для корректной оценки вариаций параметров МНТ над обсерваториями необходимо оценивать не только интегральные значения, но и вариации параметров в зависимости от высоты. Для этого были использованы спутниковые данные лимбовых наблюдений, позволяющие оценивать параметры атмосферы, в т.ч. эмиссионного слоя, по высотам. На рис. 3 представлены аномалии температуры над станцией Маймага и ГФО Торы за 2002–2023 гг. во время ВСП по данным SABER/TIMED.

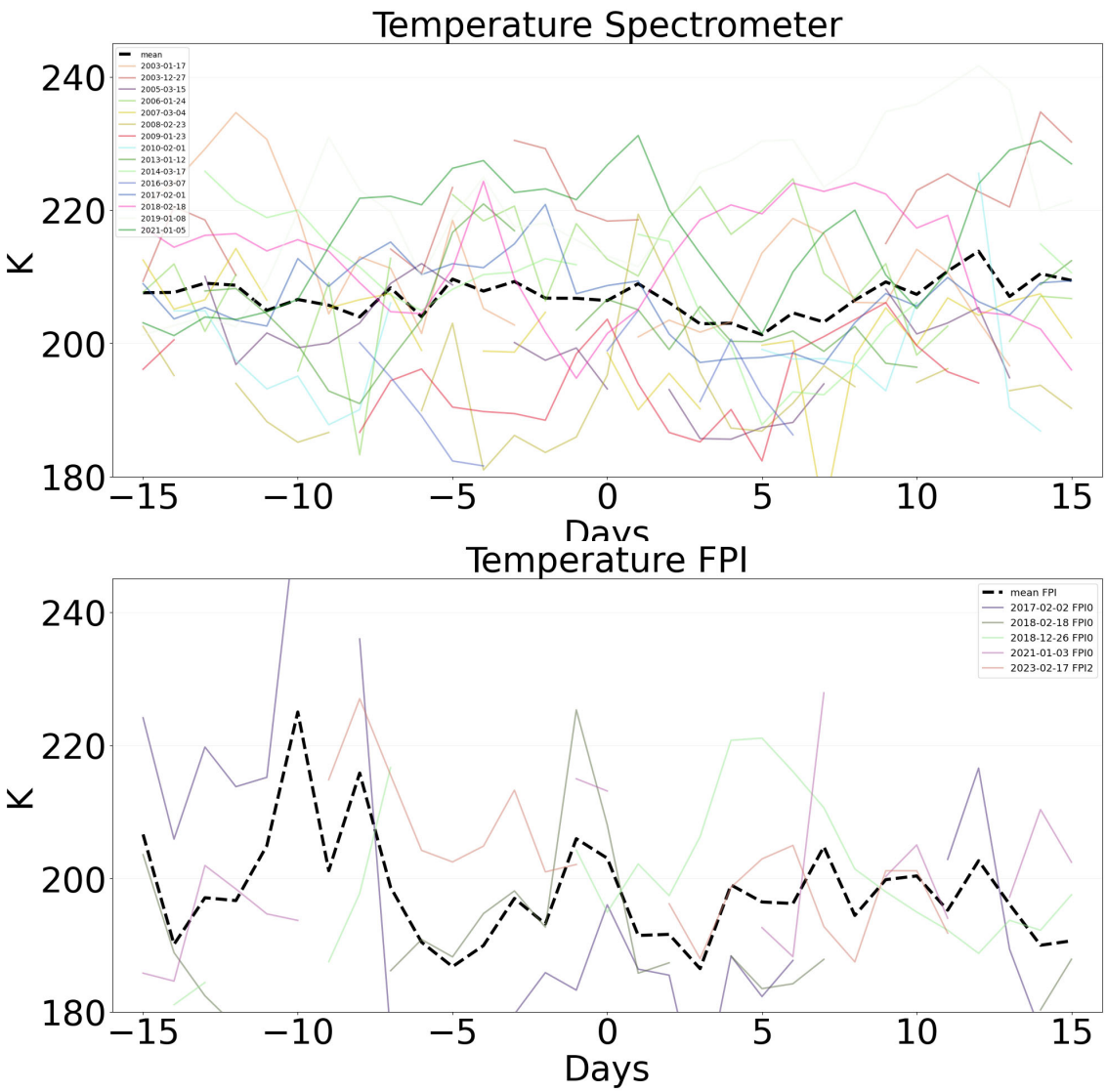

Рис. 1. Графики температуры, полученной по ИС (сверху) с 2003 по 2021 гг. и ИФП (снизу) с 2017 по 2023 гг. Штриховая черная кривая — усредненная температура по годам

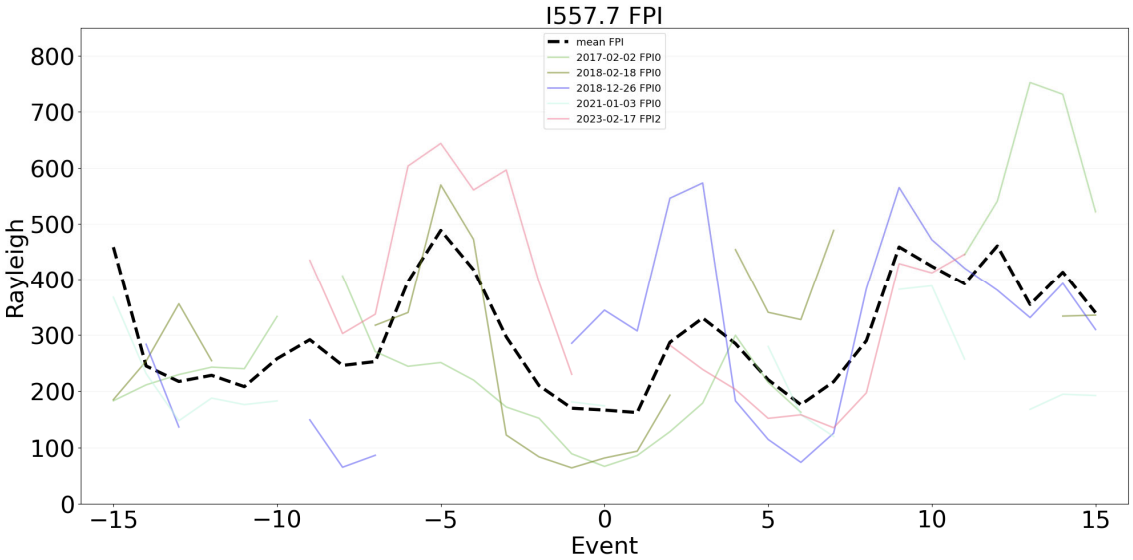

Рис. 2. График I557.7 по данным ИФП с 2017 по 2023 гг. Штриховая черная кривая — усредненная интенсивность по годам

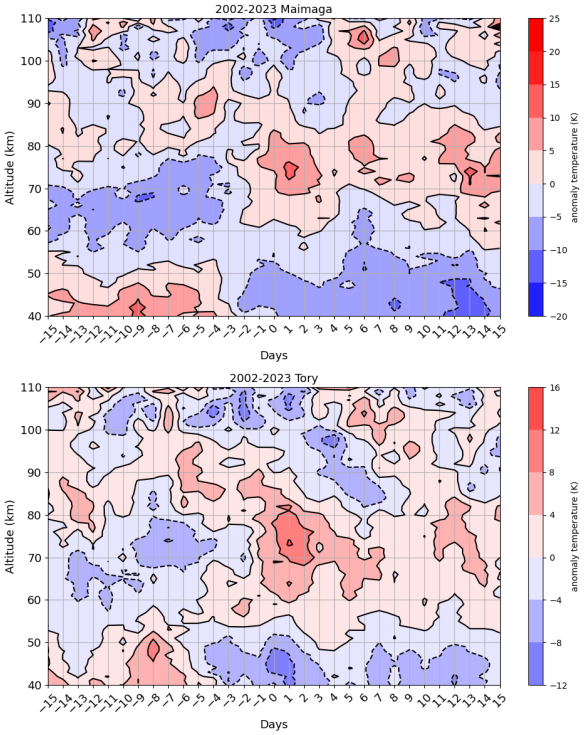

Рис. 3. Средние аномалии температуры над станцией Маймага (сверху), и над ГФО Торы (снизу) за 2002–2023 гг. по данным SABER

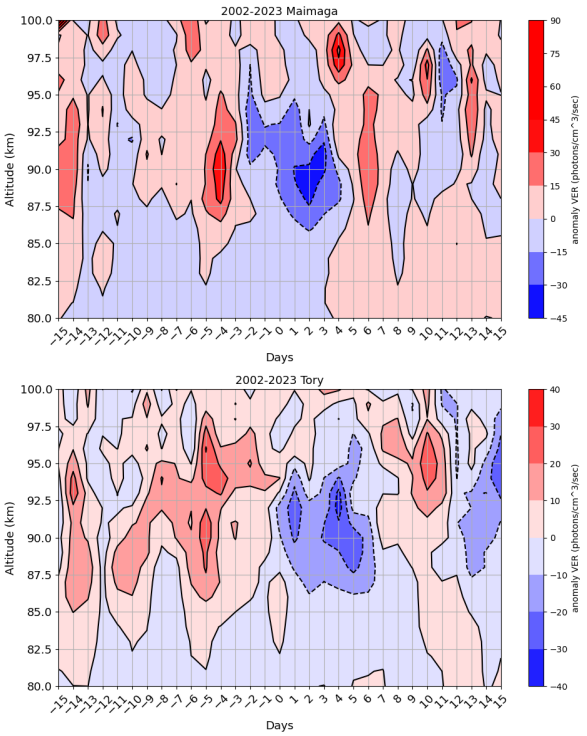

Рис. 4. Аномалия I557.7 над ст. Маймага (сверху), и над ГФО Торы (снизу) за 2002–2023 гг. по данным SABER

На рис. 3 наблюдается схожее поведение аномалий температур над двумя станциями. Видно, что до ВСП на высотах ~40–50 наблюдается повышение температуры, а от ~60–70 км происходит снижение и далее после ВСП на высотах ~40–60 заметно понижается температура (~40–50 над Торы) в то время как на высотах ~60–80 она повышается. Как было отмечено ранее [8], стратосферные потепления часто начинаются над Сибирью, а затем смещаются в северо-восточном направлении к полюсу и вызывают деформацию полярного вихря, которая и фиксируется как ВСП. На рис. 3 видна положительная аномалия температуры в стратосфере над обсерваториями от -15 до -3 дня до мажорного ВСП, при этом в области мезосферы наблюдаются отрицательные аномалии температуры. За 3–5 дней до момента максимального развития ВСП над сибирскими обсерваториям на стратосферных высотах знак температурной аномалии изменяется, что связано с перемещением стратосферного антициклона в более высокие широты. При этом на мезосферных уровнях наблюдаются максимальные температуры. Высоты эмиссионного слоя I557.7 (85-100 км) попадают на границу мезосферы и термосферы, для которых аномалии температуры противоположны по знаку, поэтому наземные наблюдения интегральной температуры слоя I557.7 (рис. 1–2) показывают незначимые эффекты от ВСП. Однако рис.4 показывает значительные вариации высоты слоя I557.7. Отчетливо видно, что до начала ВСП более высокие значения эмиссии наблюдаются на высотах от 85 до 95 км. За 1–2 дня до максимума ВСП происходит существенное снижение I557.7 на этих высотах, а положительные аномалии наблюдаются выше 95 км. Восстановление эмиссионного слоя происходит примерно в течение недели после ВСП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном исследовании методом наложенных эпох были оценены эффекты внезапных стратосферных потеплений в вариациях интенсивности свечения атомарного кислорода линии 557.7 нм и температуры эмиссионного слоя по данным наземных и спутниковых инструментов над ст. Маймага (63° с.ш., 129.5° в.д.) и п. Торы (52° с.ш., 103° в.д.). Вариации интегральной температуры эмиссионного слоя 557.7 нм по данным наземных инструментов демонстрируют малозаметный эффект от ВСП. Вертикальная развертка от 40 до 110 км температуры и I557.7, полученная по спутниковым данным, позволила более подробно диагностировать эффекты ВСП. Оказалось, что вариации температуры и I557.7 до/во время/после ВСП над двумя пунктами схожи. Тепло в стратосфере над обсерваториями наблюдаются до максимума ВСП. В максимум ВСП над выбранными пунктами наибольший нагрев происходит в мезосфере, что сопровождается уменьшением интенсивности эмиссии I557.7. Оценивая временной масштаб аномалий (примерно 10 дней) можно предположить, что данные вариации связаны с влиянием планетарных волн, распространяющихся с нижележащих уровней. Вероятно, температурные вариации в мезосфере-термосфере обусловлены адиабатическим охлаждением/нагревом в зависимости от стратосферной динамики.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ №22-77-10008 «Исследования крупномасштабных явлений в нижней и средней атмосфере и оценка их локального проявления на высотах мезосферы-нижней термосферы».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Зоркальцева О.С., Антохина О.Ю., Антохин П.Н. Долговременная изменчивость параметров внезапных стратосферных потеплений по данным реанализа ERA5 // Оптика атмосферы и океана. 2023. Т. 36, № 3. С. 200–208. DOI: 10.15372/AOO20230306.

Andrews D.G., Holton J.R., Leovy C.B. Middle atmosphere dynamics // Academic Press, San Diego. 1987. 489 p.

Barth C.A. The 5577 Angstrom airglow // Science. 1961. V. 134. ISS. 1426.

Bhattacharya Y., Shepherd G.G., Brown S. Variability of atmospheric winds and waves in the Arctic polar mesosphere during stratospheric sudden warming // Geophys. Res. Lett. 2004. 31(L23101). doi:10.1029/2004GL020389.

Dowdy A.J., Vincent R.A., Tsutsumi M. et al. Polar mesosphere and lower thermosphere dynamics: 2. Response to sudden stratospheric warmings // J. Geophys. Res. 2007. V. 112(D17105). doi:10.1029/2006JD008127.

Jacobi Ch., Hoffmann P., Liu R.Q. et al. Midlatitude mesopause region winds and waves and comparison with stratospheric variability // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2009. V. 71. P. 1540–1546. Doi 10.1016/j.jastp.2009.05.004.

Laskar F.I., Pallamraju D. Does sudden stratospheric warming induce meridional circulation in thermosphere system? // J. Geophys. Res. Space Phys. 2014. V. 10, iss. 143. doi:10.1002/2014JA020086/

Lednyts'kyy O., von Savigny C., Eichmann K.-U., Mlynczak M.G. Atomic oxygen retrievals in the MLT region from SCIAMACHY nightglow limb measurements // Atmos. Meas. Tech. 2015. V. 8. P. 1021–1041. doi: 10.5194 / amt-8-1021-2015

Limpasuvan V., Orsolini Y.J., Chandran, A. et al. On the composite response of the MLT to major sudden stratospheric warming events with elevated stratopause // J. Geophys. Res. Atmos. 2016. V. 121. P. 4518–4537. doi:10.1002/2015JD024401.

Panka P.A., Kutepov A.A., Rezac L. et al. Atomic Oxygen Retrieved From the SABER 2.0- and 1.6-μm Radiances Using New First-Principles Nighttime OH (v) Model // Geophys. Res. Lett. 2018. V. 45, iss.11. P. 5798–5803. doi: 10.1029 / 2018gl077677.

Saunkin A., Vasilyev R., Zorkaltseva O. Study of Atomic Oxygen Airglow Intensities and Air Temperature near Mesopause Obtained by Ground-Based and Satellite Instruments above Baikal Natural Territory // Remote Sens. 2022. V. 14, iss. 112. https://doi.org/10.3390/rs14010112

Sridharan S., Sathishkumar S., Gurubaran S. Variabilities of mesospheric tides during sudden stratospheric warming events of 2006 and 2009 and their relationship with ozone and water vapour // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2012. V. 78. P. 108–115.

Vasilyev R., Saunkin A., Zorkaltseva O. et al. Climatology of 557.7 nm Emission Layer Parameters over South-East Siberia, Observations and Model Data // Appl. Sci. 2023. V. 13. P. 5157. https://doi.org/10.3390/app13085157

Vincent R.A. The dynamics of the mesosphere and lower thermosphere: a brief review // Progress in Earth and Planetary Science. 2015. V. 2(4). P. 1–13. doi:10.1186/s40645-015-0035-8

Yiğit E., Medvedev A.S. Internal wave coupling processes in Earth's atmosphere // Adv. Space Res. 2015. V. 55. P. 983–1003. http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2014.11.020

Zorkaltseva O.S., Vasilyev R.V. Stratospheric influence on MLT over mid-latitudes in winter by Fabry-Perot interferometer data // Ann. Geophys. 2012. V. 39. P. 267–276. https://doi.org/10.5194/angeo-39-267-2021