

УДК 551.510.413.3:551.583.1

МНОГОЛЕТНИЙ ТРЕНД ТЕМПЕРАТУРЫ В ОБЛАСТИ МЕЗОПАУЗЫ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ ГИДРОКСИЛЬНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ЗВЕНИГОРОДЕ

© 2024 г. В. И. Перминов^{1,*}, Н. Н. Перцев^{1,**}, П. А. Далин^{2,3,***}, В. А. Семенов^{1,****},
В. А. Суходоев^{1,*****}, Ю. А. Железнов^{4,*****}, М. Д. Орехов^{1,*****}

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (ИФА РАН), Москва, Россия

²Swedish Institute of Space Physics, Kiruna, Sweden

³Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН), Москва, Россия

⁴Институт электрофизики и электроэнергетики РАН (ИЭЭ РАН), Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: v.perminov@rambler.ru

**e-mail: n.pertsev@bk.ru

***e-mail: pdalin@yandex.ru

****e-mail: vasesmenov@mail.ru

*****e-mail: vladi13s@yandex.ru

*****e-mail: otdel18@bk.ru

*****e-mail: jlestersskull@gmail.com

Поступила в редакцию 05.05.2023 г.

После доработки 10.07.2023 г.

Принята к публикации 28.09.2023 г.

Представлен анализ многолетнего хода среднегодовой температуры ОН*, значения которой получены по ночным спектральным измерениям полос излучения гидроксила на Звенигородской научной станции (56° N, 37° E) с 1957 по 2022 г. В настоящее время данный ряд температур ОН*, отражающий тепловое состояние области мезопаузы, является самым длинным в мире. На его основе выполнена оценка линейного тренда и отклика температуры на изменения солнечной активности как в целом по всей совокупности данных, так и для отдельных интервалов времени. В первом случае тренд составил -0.23 ± 0.04 К/год. Во втором случае анализ показал сильное охлаждение в области мезопаузы (-0.53 ± 0.34 К/год) до 1970-х гг., которое впоследствии замедлилось до -0.14 ± 0.03 К/год. Сравнение результатов анализа с другими измерениями и модельными расчетами показывает, что последние имеют более низкие значения трендов. Предполагается, что причинами температурного тренда, помимо роста парниковых газов, основным из которых является CO₂, могут быть долговременные изменения в динамике верхней атмосферы.

DOI: 10.31857/S0016794024010107, EDN: GQDZNU

1. ВВЕДЕНИЕ

Многолетние наблюдения характеристик различных областей атмосферы имеют важное значение для понимания климатических изменений, имеющих характер как квазипериодических колебаний, так и многолетних трендов, вызванных естественными процессами или антропогенным воздействием. Данные наблюдений используются для количественных оценок возмущений различного временного масштаба (от минут до столетий и более), проверки различной сложности атмосферных моделей и ве-

рификации измерений, проводимых различными методами. Для средней и верхней атмосферы важными являются исследования многолетних изменений ее химического и радиационного баланса и термодинамического состояния. Одной из причин таких изменений могут быть антропогенные выбросы парниковых газов, в частности CO₂. Модельные исследования показывают, что чувствительность к изменениям парниковых газов в атмосфере изменяется с ростом высоты. В верхних слоях атмосферы она намного больше, чем в нижних слоях [Roble and

Dickinson, 1989; Rishbeth and Roble, 1992; Schmidt et al., 2006; Fomichev et al., 2007]. В этом плане область мезопаузы (80–100 км) является одним из наиболее чувствительных слоев атмосферы к изменениям концентраций малых газовых составляющих.

Спектрально-яркостные характеристики излучения колебательно-возбужденного гидроксидов (ОН*) являются информативным источником данных о температуре, газовом составе и физико-химических процессах в области мезопаузы [Шефов и др., 2006]. Излучение ОН* возникает в результате экзотермической реакции озона с водородом в слое с максимумом около 87 км и полушириной ~9 км [Baker and Stair, 1988]. Наблюдения полос излучения гидроксидов как метод измерения температуры в области мезопаузы начали применяться с 1950-х гг. [Прокудина, 1959; Шуйская, 1959; Гайнуллина и Карягина, 1960; Шефов, 1961; Ярин, 1961; Meinel, 1950; Kvitte, 1961]. Метод основан на предположении, что распределение населенностей низких вращательных уровней колебательно-возбужденного гидроксидов является термализованным, т. е. подчиняется распределению Больцмана, на основании которого определяется температура ОН* [Перминов и Семенов, 1992; Перминов и др., 2007; Dick, 1977; Krassovsky et al., 1977]. Получаемая температура является средневзвешенной в соответствии с высотным распределением молекул ОН*. Ее наземные измерения стали основным методом мониторинга состояния области мезопаузы международной сетью наблюдений NDMC (Network for the Detection of Mesopause Change) [Reisin et al., 2014]. Этот метод является наиболее удобным и распространенным для долгосрочных исследований теплового режима данной области атмосферы [Beig et al., 2003, 2011; Offermann et al., 2010; Perminov et al., 2018; French et al., 2020].

На Звенигородской научной станции (ЗНС) Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (56° N, 37° E) наблюдения температуры ОН* ведутся с 1957 г. [Прокудина, 1959; Шефов, 1961]. Многолетние измерения с самого начала были направлены на исследования влияния солнечного 11-летнего цикла, регулярных сезонных вариаций и влияния геомагнитных возмущений [Shefov, 1969]. Позднее, в 1990-х гг., были проведены первые исследования многолетнего тренда [Семенов, 1996; Семенов и др., 1996; Perminov et al., 1994; Golitsyn et al., 1996]. Было показано, что в период 1957–1994 гг. область мезопаузы испытывала значительное похолодание. В дальнейшем также были рассмотрены сезонные осо-

бенности многолетнего тренда и обнаружено, что температурный режим области мезопаузы наиболее сильно изменился в зимний период [Semenov, 2000; Semenov et al., 2002]. Наблюдения в первые два десятилетия 2000-х гг. стали свидетельствовать о значительном замедлении понижения температуры ОН*, которое, по-видимому, началось с 1980-х гг. [Семенов и Шефов, 2011; Мохов и др. 2017; Perminov et al., 2018]. В связи с этим становится важным рассмотрение тенденции в изменении многолетнего хода температуры в области мезопаузы.

В настоящей работе используется обновленный ряд температуры ОН*, измеренной на ЗНС в 1957–2022 гг. в целях исследования ее многолетнего хода.

2. НАБЛЮДЕНИЯ

Исторически начало многолетних наблюдений температуры ОН* на ЗНС было стимулировано проведением Международного геофизического года (МГГ, 1957–1958 гг.), в рамках которого была предусмотрена достаточно широкая программа спектрофотометрических исследований полярных сияний и свечения ночного неба на ряде отечественных и зарубежных обсерваторий [Семенов и Шефов, 2011]. Подготовка к МГГ включала развитие светосильной спектральной аппаратуры с хорошим спектральным разрешением и систем регистрации спектров слабого атмосферного излучения. Благодаря разработанному дифракционным спектрографам СП-48, СП-49 и СП-50 [Герасимова и Яковлева, 1956; Капорский и Николаева, 1969], а также применению высокочувствительных астрономических фотопленок, измерения спектров в области до 700 нм осуществлялись в ночное время с временами экспозиций до нескольких часов. Применение электронно-оптических преобразователей (ЭОП) в качестве усилителей яркости изображений позволило сократить экспозиции до десятков минут, а в дальнейшем — до нескольких минут. Кроме того, с помощью ЭОП стало возможным исследовать спектры в ближней инфракрасной (ИК) области вплоть до 1240 нм [Krassovsky et al., 1962]. Фотографическая регистрация спектров излучения ночной верхней атмосферы на ЗНС велась практически до середины 1990-х гг. К некоторым недостаткам фотографического метода можно отнести сложность и трудоемкость обработки фотоматериалов, а также необходимость нелинейных преобразований полученных почернений на фотопленке в значения интенсивности излучения, вызвавших эти почернения.

С середины 1990-х гг. в экспериментальную практику регистрации атмосферного излучения началось внедрение приемников излучения, изготовленных на основе приборов с зарядовой связью (ПЗС). Данный метод регистрации свободен от нелинейных преобразований, значительно сокращает время обработки спектров и дает возможность полностью цифровизировать процесс получения спектров. Применение охлаждения ПЗС значительно улучшало соотношение сигнала к шуму и тем самым повышало точность измерения интенсивности спектральных линий.

С 2000 г. наблюдения спектров на ЗНС ведутся спектрографами СП-50, оснащенными регистрирующими камерами с ПЗС, высокочувствительными в ближней ИК-области. Цифровой метод регистрации позволяет измерять спектры с экспозициями от 1 до 10 мин. Как правило, спектральные наблюдения ведутся в ясную и полуюсную погоду в северном направлении при зенитных углах $50\text{--}60^\circ$ (с 2000 г. центр поля зрения соответствует зенитному углу 53° и азимуту 23° , отсчитываемому от севера в сторону запада). Детальное описание современных условий наблюдения, характеристик применяемых спектральных приборов и обработки спектров излучения гидроксила опубликовано в работах [Семенов и др., 2002; Шефов и др., 2006; Pertsev and Perminov, 2008].

3. АНАЛИЗ И ОБСУЖДЕНИЕ

3.1. Характеристика данных

В настоящей работе для анализа были взяты температуры, определенные по полосам излучения OH^* , возникающим при квантовых переходах с пятого и шестого колебательного уровней (v). Это полосы $(5-2)$ 1083 нм (наблюдения в 1959–1969 гг.), $(6-1)$ 650 нм (1971–1976 гг. и 1984–1988 гг.), $(5-1)$ 791 нм (1984–1997 гг.) и $(6-2)$ 835 нм (1957–1958, 1995–1997 и 2000–2022 гг.). Часть этих данных опубликована в работах [Shefov, 1969; Golitsyn et al., 1996; Perminov et al., 2014; Dalin et al., 2020]. В настоящее время они позволяют рассматривать наиболее длинный временной ряд v -однородно полученных данных с 1957 по 2022 г. Из-за отсутствия измерений подобных полос из анализа выпали только 1970 г., 1977–1983 и 1998–1999 гг. Для временных интервалов, когда были одновременные наблюдения полос излучения с пятого и шестого колебательного уровня, рассматривалась вся совокупность температурных данных. Необходимость соблюдения v -однородности температур вызвана тем, что высотные максимумы излу-

чения OH^* с высоких и низких колебательных уровней разнесены по высоте, причиной чего является различие в деактивации колебательных уровней гидроксила атомарным кислородом [Перминов и др., 1993; Makhlouf et al., 1995; Grygalashvyly, 2015]. Вследствие этого может возникать различие температур, определяемых по полосам излучения с разных колебательных уровней OH^* [Bakanas et al., 2003]. В работе [Перминов и др., 2007] отмечено, что наименьшее расхождение наблюдается для температур, оценка которых проведена по полосам, возникающим с пятого и шестого колебательных уровней. При рассмотрении среднегодовых значений температуры данное различие составляет менее 1 К.

Температура OH^* вычислялась путем аппроксимации населенностей первых трех вращательных уровней верхнего колебательного состояния распределением Больцмана. Населенности определялись по интенсивности линий Р1-ветви полос гидроксила. Важным требованием к анализируемым данным являлась необходимость применения одних и тех же вероятностей колебательно-вращательных переходов при определении температуры [Перминов и др., 2007]. На протяжении многих лет они неоднократно менялись при анализе данных. Применение разных версий вероятностей на ранних и современных этапах 65-летнего периода измерений затрудняло сравнение температур. В настоящей работе все температурные данные рассчитывались или были пересчитаны на основе вероятностей колебательно-вращательных переходов, полученных в работе [Langhoff et al., 1986]. Данные вероятности наиболее близки к их экспериментальным оценкам для полосы $\text{OH}(6-2)$ [French et al., 2000], измерения которой на ЗНС дают наиболее длинный ряд в анализируемом интервале лет. Пересчет температур, полученных до 1990-х гг., производился по методике определения систематических поправок для них согласно работе [Перминов и др., 2007].

3.2. Многолетний линейный тренд

На рис. 1а представлен многолетний ход среднегодовой температуры OH^* (T). Чтобы получить ее наилучшую статистическую оценку, производился гармонический анализ годовых вариаций температуры (до второй гармоники включительно) для каждого года отдельно. В этом случае нулевая гармоника соответствовала среднегодовому значению температуры. Как видно на рис. 1а, ее многолетний ход испытывает значительные межгодовые вариации с отрицатель-

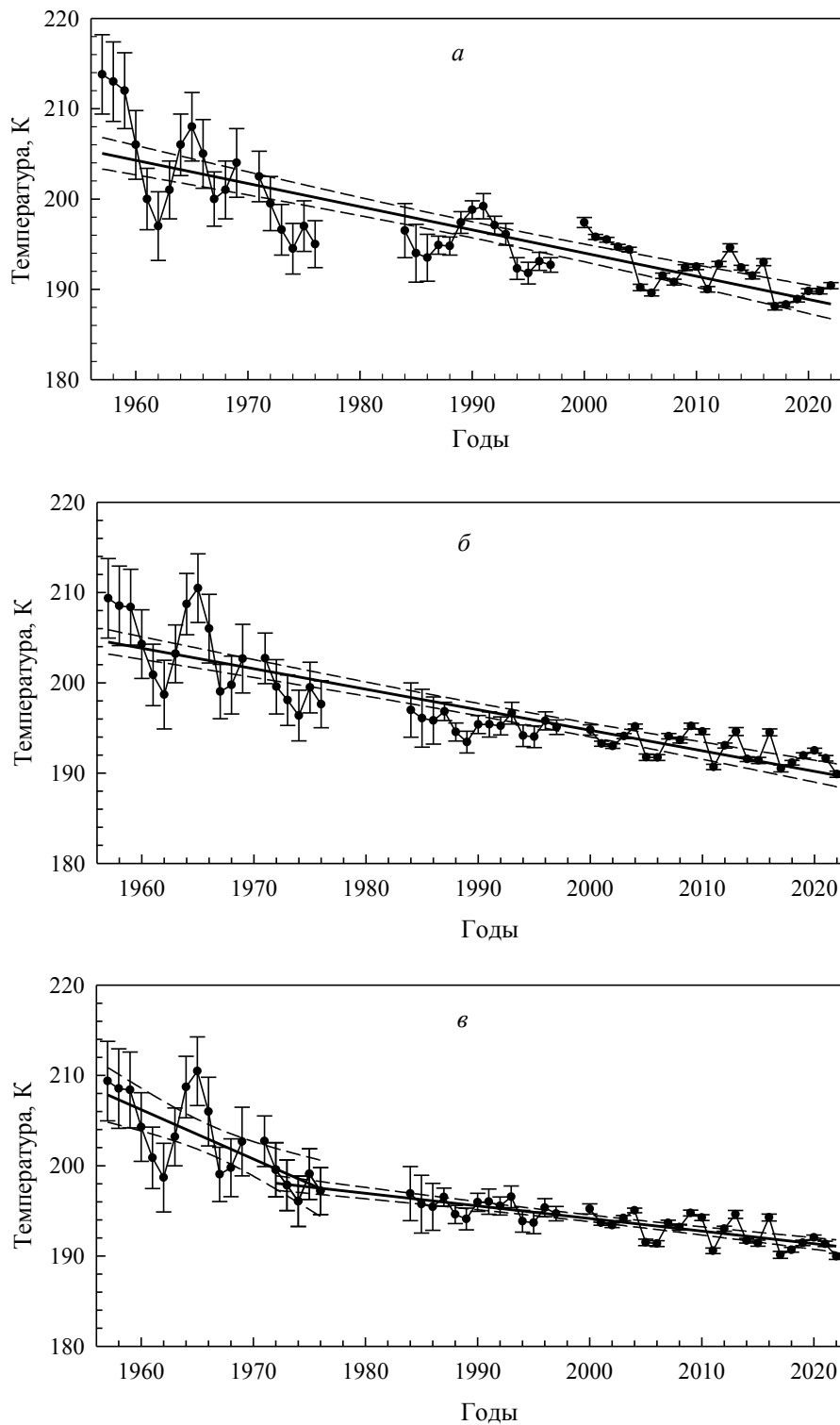


Рис. 1. Многолетний ход температуры ОН* по наблюдениям в Звенигороде: (а) — точки показывают среднегодовые значения температуры. Линия — многолетний тренд до исключения влияния солнечной активности. Штриховые линии — 95%-й статистический уровень достоверности; (б) — аналогично рис. 1а, но значения температуры приведены согласно (1) к фиксированному уровню солнечной активности $F_{Ly-\alpha} = 4.5$; (в) — аналогично рис. 1б, но линии тренда приведены отдельно для временных интервалов 1957–1976 и 1972–2022 гг.

ным линейным трендом -0.26 ± 0.04 К/год, статистическая оценка которого получена методом линейной регрессии. Здесь и далее указываемая ошибка соответствует двум стандартным отклонениям среднего (2σ). Данный линейный тренд обусловлен всеми гелиогеофизическими факторами влияния.

Одним из основных драйверов межгодовых вариаций является солнечная активность, и учет ее влияния на тренд необходим в первую очередь. В связи с этим новая оценка тренда была выполнена на основе следующей множественной регрессионной модели:

$$T(t, F_{Ly-\alpha}) = A_0 + A_{tr}(t - 1990) + A_{sol}(F_{Ly-\alpha} - 4.5), \quad (1)$$

где t — время в годах; $F_{Ly-\alpha}$ — поток солнечного излучения в линии Лайман-альфа 121.6 нм ($Ly-\alpha$) в единицах 10^{11} фотон $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$, принятых за 1 *sfu* (solar flux unit); A_0 — константа, К; A_{tr} — линейный тренд, К/год; A_{sol} — отклик на изменения солнечной активности, К/*sfu*. Данные по солнечному потоку в линии $Ly-\alpha$ взяты согласно LASP Interactive Solar Irradiance Data Center (доступны на веб-сайте: <https://lasp.colorado.edu/lisird>). Результаты анализа по модели (1) представлены в первой строке табл. 1. Следует заметить, что здесь и в других случаях регрессионного анализа с использованием формулы (1) значения A_{sol} получены при нулевом временном лаге. При других лагах они были статистически незначимыми. При исключении регрессионного влияния солнечной активности ($A_{sol} = 3.02 \pm 1.00$ К/*sfu* в (1) линейный тренд становится несколько меньше его первичной оценки: -0.23 ± 0.04 К/год.

Первые исследования многолетнего тренда температуры в области мезопаузы по гидроксильному излучению были выполнены по на-

блюдениям на ЗНС и астрономической обсерватории в Абастумани (41.8° N , 42.8° E) [Семенов, 1996; Семенов и др., 1996; Perminov et al., 1994; Golitsyn et al., 1996]. На их основе было показано, что с 1957 г. до начала 1990-х гг. среднегодовая температура ОН* после учета влияния солнечной активности падала со скоростью 0.65 К/год. По более поздним многолетним (свыше 20 лет) наблюдениям на ряде станций было выявлено (с учетом солнечной активности) более медленное понижение температуры в области излучающего гидроксила:

1) -0.23 К/год в 1988–2008 гг. [Offermann et al., 2010] и около -0.09 К/год в 1988–2015 гг. [Kalicinsky et al., 2016] на основе анализа среднегодовых температур, измеренных по полосе ОН(3–1) в Вуппертале (51° N ; 7° E);

2) -0.12 К/год согласно среднезимним температурам, полученным по наблюдениям полосы ОН(6–2) на ст. Дэвис (69° S , 78° E) с 1995 по 2018 гг. [French et al., 2020];

3) -0.02 К/год, показанное в работе [French et al., 2020] по измерениям температуры по полосе ОН(6–2) на ст. Лонгйир (78° N , 15° E) в зимние периоды с 1983 по 2012 г. [Holmen et al., 2014];

4) от 0.1 до -0.18 К/год на высотах от 85 до 100 км (-0.03 К/год вблизи 87 км) по лидарным наблюдениям в Форт Коллинс (41° N , 105° W) и Логан (42° N , 112° W) в 1990–2017 гг. [She et al., 2019].

Спутниковые измерения имеют менее длинные ряды данных по сравнению с наземными. Однако они дают как глобальную характеристику многолетним изменениям температуры, так и возможность рассмотреть их широтно-долготные особенности. Так, глобальное охлаждение области мезопаузы получено по данным наблюдений прибором SABER на борту спутника TIMED: $-(0.04-0.05)$ К/год на высотах 80–95 км между широтами 52° S и 52° N с 2002 по 2018 г. согласно работе [Garcia et al., 2019] и $-(0.05-0.1)$ К/год в области 80–100 км (около -0.08 К/год на высоте ~ 87 км) с 2002 по 2020 г.

Таблица 1. Результаты множественного регрессионного анализа

№	Период наблюдений, гг.	A_0 , К	A_{tr} , К/год	A_{sol} , К/ <i>sfu</i>
1	1957–2022	197.0 ± 0.7	-0.23 ± 0.04	3.02 ± 1.00
2	1957–1976.	190.3 ± 8.2	-0.53 ± 0.34	3.01 ± 2.56
3	1972–2022	195.6 ± 0.5	-0.14 ± 0.03	2.53 ± 0.56
4	1972–1998	195.5 ± 0.6	-0.15 ± 0.06	2.58 ± 0.68
5	2000–2022	196.0 ± 2.0	-0.16 ± 0.10	2.41 ± 1.10

Примечание. В качестве ошибки указано 2σ .

для широтного охвата $50^\circ \text{ S} - 50^\circ \text{ N}$ [Zhao et al., 2021]. Недавний анализ [Mlynczak et al., 2022] чуть более длинного ряда глобальных температур TIMED/SABER (2002–2021 гг.) дал аналогичный результат для области мезопаузы.

Представление о широтном ходе температурного тренда дают работы [French et al., 2020; Zhao et al., 2021]. Обе работы показывают его значительные изменения. Последняя из этих работ, основанная на данных TIMED/SABER, на высоте ~ 87 км (высота максимума излучения гидроксила) и широте 50° N дает значение тренда около -0.12 К/год. Работа [French et al., 2020] исследует тренд на уровне 0.0046 гПа (~ 85 км). Она основана на сезонных наблюдениях температуры прибором MLS со спутника EOS Aura за 14 лет с момента его запуска в июле 2004 г. По результатам этого исследования среднесезонное значение на широте Звенигородской станции составило около -0.04 К/год для летнего (апрель – сентябрь) и зимнего (октябрь – март) периодов года. Это же исследование свидетельствует о долготном изменении температурного тренда. Так, в европейской части России значения трендов как зимой, так и летом отмечаются как положительные. Однако статистическая значимость значений не показана, и возможно, она недостаточно высока.

Из вышесказанного следует отметить, что оценки температурного тренда в области мезопаузы, сделанные на основании наблюдений, проведенных различными методами за последние 35 лет, имеют меньшие, а в некоторых случаях многократно меньшие значения по сравнению с величиной тренда, полученной в настоящей работе. В этом случае стоит обратить внимание, что на рис. 1б значения температуры (после их приведения к фиксированной солнечной активности) с начала наблюдений (1957 г.) до начала 1970-х гг. преимущественно находятся выше линии тренда, в 1970-х и 1980-х гг. — ниже и с конца 2000-х гг. — опять выше этой линии. Поэтому имеет смысл рассмотреть изменение линейного тренда температуры на разных временных интервалах.

3.3. Перелом тренда

На рис. 1в показаны раздельно линейные тренды для временных периодов 1957–1976 и 1972–2022 гг. Среднегодовые значения температуры, показанные на этом рисунке (как и на рис. 1б), приведены к одному уровню солнечной активности ($F_{\text{Ly-}\alpha} = 4.5 \text{ sfu}$). Значения тренда и отклика температуры на изменения солнечной ак-

тивности, полученные методом множественного регрессионного анализа для каждого временного интервала, представлены во второй и третьей строке табл. 1. Как видно из результатов регрессионного анализа, тренд в середине 1970-х гг. испытал значительный перелом. Его значение изменилось с -0.53 ± 0.34 до -0.14 ± 0.03 К/год. Последняя величина сопоставима со значениями тренда, полученными на основании других рядов данных и по более коротким интервалам времени в последние несколько десятков лет.

Впервые непостоянство многолетнего тренда в области мезопаузы было отмечено в работе [Семенов и Шефов, 2011]. По данным многолетних наблюдений температуры излучающего гидроксила на ряде обсерваторий, как отечественных, так и зарубежных, было показано, что в зимний период года с 1959 по 1985 г. наблюдался тренд около -0.9 К/год, а в 1985–2010 гг. — около -0.2 К/год. Для летнего периода года сообщалось о его нулевой величине. Более детальный анализ кусочно-линейного поведения многолетнего тренда зимней температуры ОН* по наблюдениям на Звенигородской научной станции в период 1960–2015 гг. был проведен в работе [Мохов и др., 2017]. В ней показано, что при разбивке всего ряда наблюдений на четыре 14-летних интервала наиболее быстрое понижение температуры происходило в интервале 1974–1987 гг. (со скоростью около -1.3 К/год), а наименьшее (-0.09 К/год) — в период 2002–2015 гг. Современное низкое значение тренда для зимнего периода года подтверждается также результатами анализа звенигородских данных за 2000–2018 гг. (-0.04 К/год) [Dalin et al., 2020].

Внимание на возможную нелинейность тренда по более коротким температурным рядам в области мезопаузы обращалось в работе [Offermann et al., 2010]. В ней по наблюдениям температуры ОН* на средних широтах в 1988–2008 гг. показано, что после 1997 г. произошло усиление отрицательного тренда (с -0.08 К/год для 1988–1997 гг. до -0.34 К/год для 1997–2008 гг.). В дальнейшем на основании более длинного ряда (1988–2015 гг.) этих наблюдений [Kalicinsky et al., 2016] обнаружили перелом в многолетнем ходе температуры в 2008 г. (с -0.24 до 0.64 К/год). Объяснением данного факта стало их предположение о существовании либо влияния 22-летнего цикла Хейла, описывающего реверс магнитного поля Солнца, либо 25-летней атмосферной осцилляции с амплитудой около 2 К. Учет такой долговременной осцилляции позволил [Kalicinsky et al., 2016] пренебречь рассмотрением линейного тренда при их анализе. В настоящей работе был проанализиро-

ван спектр вариаций остаточных температурных данных (т.е. после вычитания из начального температурного ряда солнечного влияния), в результате которого не было обнаружено каких-либо гармонических колебаний в области периодов 22–25 лет. Кроме того, раздельно были проанализированы временные интервалы 1972–1998 и 2000–2022 гг. Результаты регрессионного анализа представлены в четвертой и пятой строках табл. 1. При сравнении результатов видно, что тренд среднегодовой температуры ОН* за последние 50 лет практически не изменялся. Также видно, что отклик на изменение солнечной активности за этот период оставался неизменным в пределах ошибки его определения.

3.4. Причины долговременных изменений

Тепловой режим в области мезопаузы обуславливается: (1) поглощением солнечного УФ-излучения; (2) химическими реакциями с выделением энергии; (3) радиационным охлаждением (в основном за счет CO_2); (4) динамическими процессами, приводящими к адиабатическому охлаждению летом и разогреву зимой; (5) турбулентным потоком тепла. Предполагается, что из них наиболее сильно влияющим на долговременные изменения температуры является углекислый газ. Его рост в атмосфере вызывает повышение температуры в тропосфере (через парниковый эффект) и понижение в мезосфере и нижней термосфере (через радиационное выхолаживание при нарушении локального термодинамического равновесия). До высот турбопаузы он перемешивается в атмосфере вследствие турбулентной диффузии (время его вертикального переноса до 80 км — около 10 лет [Mlynczak et al., 2022]). Скорость роста концентрации CO_2 в верхних слоях атмосферы близка к скорости его роста на поверхности Земли. В настоящее время по данным спутниковых наблюдений TIMED/SABER, она составляет 5–6% за 10 лет до высоты около 90 км и несколько выше (6–8% за 10 лет) на высотах от 90 до 100 км [Yue et al., 2015; Qian et al., 2017; Rezac et al., 2018]. Первые модельные расчеты влияния CO_2 (вместе с CH_4) на область мезопаузы показали охлаждение на 7–12 К при удвоении обоих малых газовых компонентов [Roble and Dickinson, 1989]. Современные исследования [Mlynczak et al., 2022] подтверждают ранее полученные результаты (охлаждение на 6.8–8.4 К). Однако за последние 65 лет концентрация CO_2 в атмосфере выросла не более чем на 30%, что могло бы дать охлаждение области мезопаузы только на 2.5 К, хотя в настоящей работе оно составляет около 15 К (см. рис. 1а). Даже если предполагать, что до начала

1970-х гг. изменения температуры были под влиянием какого-либо дополнительного фактора или факторов (неизвестных нам), а ее падение шло со скоростью -0.14 К/год (как с 1972 г.), то охлаждение составило бы все равно достаточно высокую величину (около 9 К). По-видимому, в данном случае необходимо обратить внимание на изменения в динамике в средних и верхних слоях атмосферы, а именно: в активности волн различных периодов, создающих волновое сопротивление разного знака и тем самым влияющих на ветровую динамику (включая вертикальную, вызывающую адиабатическое охлаждение мезосферы и мезопаузы летом и разогрев зимой). Так, довольно заметные тренды преобладающего ветра и амплитуд некоторых приливных осцилляций наблюдаются на высотах 90–100 км [Мерзляков и Портнягин, 1999]. Согласно исследованию [Jacobi, 2014] в Collm (52° N, 13° E) на высоте 83–93 км в течение 1983–2007 гг. наблюдался тренд дисперсии скорости ветра, взятой как индикатор активности внутренних гравитационных волн. Для зимнего периода года он был положительным, для летнего — отрицательным. В связи с этим для объяснения наблюдаемого температурного тренда в области мезопаузы, несомненно, необходимо моделирование, включающее как долговременные изменения газового состава в ней, так и тренды параметров ее динамики. Современное моделирование теплового режима средней и верхней атмосферы главным образом основано на исследованиях с помощью климатической модели WACCM (Whole Atmosphere Community Climate Model), в которую включены доступные данные по долговременным изменениям только парниковых газов [Garcia et al., 2007, 2019; Marsh et al., 2013; Solomon et al., 2018]. Согласно этой модели оценки значения температурного тренда в области мезопаузы в основном варьируются от незначительно отрицательных до -0.09 К/год [Qian et al., 2017; Solomon et al., 2018; Garcia et al., 2019].

Высокое значение тренда (-0.53 К/год) для периода 1957–1976 гг. с последующим его ослаблением до современных значений довольно затруднительно объяснить без модельных исследований, которые включали бы наиболее полный спектр геофизических факторов влияния на тепловой режим области мезопаузы. Как правило, климатические модели нацелены на учет в них многолетних изменений парниковых газов (прежде всего CO_2 и CH_4) и хлорфторуглеродов, инжектируемых в нижнюю атмосферу и далее распространяющихся вверх, и в недостаточной степени учитывают многолетние изменения малых газовых составляющих, которые возникают не-

посредственно в верхних слоях атмосферы и активно участвуют в химических реакциях. Так, скорость радиационного охлаждения за счет CO_2 прямо пропорциональна концентрации атомарного кислорода [Roble and Dickinson, 1989; Feofilov and Kutepov, 2012]. В справочных атмосферных моделях, например в последней версии NRLMSIS (v. 2.0) [Emmert et al., 2021], межгодовые изменения концентрации атомарного кислорода в основном синхронны с соответствующими изменениями солнечной активности. Однако многолетние измерения излучения гидроксидов, интенсивность которого в первом приближении пропорциональна атомарному кислороду, показали его рост с начала 1950-х гг. до конца 1970-х гг. [Фишкова, 1983]. Приток атомарного кислорода в область мезопаузы, скорее всего, осуществлявшийся за счет усиления вертикального переноса из термосферы, мог вызвать также изменения высотного профиля излучения гидроксидов и тем самым повлиять на измеряемую средневзвешенную по этому профилю температуру OH^* . Таким образом, для объяснения сильного тренда в период 1957–1976 гг. и последующего, который также выше современных модельных представлений, необходимы модельные исследования с рассмотрением более широкой совокупности факторов, влияющих на температуру OH^* , т.е. как с учетом многолетнего хода содержания атомарного кислорода в области мезопаузы, так и с учетом многолетнего поведения высотного профиля гидроксильного излучения, то есть с привлечением многолетних изменений в динамике верхних слоев атмосферы и факторов, влияющих на нее (активность внутренних гравитационных волн, турбулентная диффузия и т.д.).

3.5. Отклик на изменения солнечной активности в 11-летнем цикле

В настоящей работе при исследовании тренда были сделаны также оценки отклика температуры OH^* на изменения солнечной активности в ходе 11-летнего цикла, в качестве индикатора которой был взят поток солнечного излучения в линии Лайман-альфа. При рассмотрении всего ряда температурных данных и отдельно по данным для 1957–1976 гг. отклик составил чуть более 3 K/sfu. По данным для 1972–2022 гг., а также для двух его внутренних интервалов времени (см. табл. 1) анализ показал меньшие значения отклика (в среднем около 2.5 K/sfu). Последняя оценка достаточно хорошо согласуется с ранее опубликованным ее исследованием по наблюдениям на ЗНС [Perminov et al., 2018]: 4.1 K на

100 ед. солнечного $F_{10.7}$ -потока (1 ед. $F_{10.7}$ равна 10^{-22} Вт/м² Гц). В данном случае имеем в виду, что соотношение между температурными откликами на изменения 100 ед. $F_{10.7}$ и 1 sfu $Ly-\alpha$ составляет ~ 1.6 (получено на основе регрессионного анализа потоков $F_{10.7}$ и $F_{Ly-\alpha}$). В работе [Dalín et al., 2020] получены сопоставимые значения отклика температуры OH^* на поток в линии Лайман-альфа для зимних месяцев (3.35 K/sfu) и летних месяцев (1.84 K/sfu) за период с 2000 по 2018 г. Также сопоставимые с настоящим результатом отклики получены в исследованиях [Kalicinsky et al., 2016] по измерениям гидроксильного излучения для широты 51° N и [Zhao et al., 2021] по спутниковым среднезональным наблюдениям TIMED/SABER на широте 50° N. Обе работы дают его значение 4.2 K на 100 ед. $F_{10.7}$ -потока.

Следует заметить, что при рассмотрении температурного ряда (см. рис. 1) на временном интервале 1963–1966 гг. выделяется пик, приходящийся на минимум солнечной активности и не характерный для других его последующих минимумов. Меньший по амплитуде пик на данном интервале времени также присутствует в температурном ряде, полученном на Абастуманской обсерватории (41° N, 42° E) [Фишкова, 1983]. Одной из причин его возникновения могло быть извержение вулкана Агунг, произошедшее в 1963–1964 гг. Выброшенный им аэрозоль в стратосферу мог способствовать дополнительному нагреву мезосферы, включая область мезопаузы [She et al., 1998]. Однако подобного по силе эффекта не видно на графиках рис. 1 после более мощного извержения вулкана Пинатубо в 1991 г. Для поиска причин температурного эффекта 1963–1966 гг. требуются дополнительные исследования.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По данным многолетних ночных спектральных измерений гидроксильного излучения на Звенигородской научной станции с 1957 г. по настоящее время получен самый длинный в мире ряд температуры OH^* . На его основе методом множественной регрессии выполнена оценка линейного тренда среднегодовой температуры в области мезопаузы и отклика на изменения солнечной активности как в целом по всей совокупности данных, так и по данным для отдельных интервалов времени. В работе получены следующие результаты.

1. В 1957–2022 гг. наблюдается линейный тренд среднегодовой температуры -0.26 ± 0.04 K/год

(без выделения его составляющих). После исключения зависимости от солнечной активности тренд температуры ОН* несколько изменяется до -0.23 ± 0.04 К/год, при этом отклик на изменение потока солнечного излучения в линии Лайман-альфа составляет 3.0 ± 1.0 К/sfu. Таким образом, небольшой тренд, наблюдаемый в потоке Лайман-альфа, не является основной причиной наблюдаемого температурного тренда.

2. Тенденция изменения температуры описывается наилучшим образом, если рассматривать тренд с переломом, показывающий быстрое охлаждение до 1970-х годов со скоростью -0.53 ± 0.34 К/год, а впоследствии — более медленное, до -0.14 ± 0.03 К/год, остающееся таким по настоящее время. Полученные количественные значения современного тренда (после перелома) оказываются выше (по абсолютной величине) других экспериментальных измерений и результатов модельных исследований.

3. Отклик температуры ОН* на изменения солнечной активности при коррелировании с потоком излучения в линии Лайман-альфа при его современном временном тренде составляет 2.53 ± 0.56 К/sfu. Данный результат хорошо согласуется с другими измерениями в широтной области, близкой к Звенигородской научной станции.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гайнуллина Р.Х., Карягина З.В. Определение температуры верхней атмосферы по вращательным полосам спектра гидроксила // Спектральные, спектрофотометрические и радиолокационные исследования полярных сияний и свечения ночного неба. № 2–3. С. 63–65. 1960.
- Герасимова Н.Г., Яковлева А.В. Комплект светосильных спектрографов с дифракционными решетками // Приборы и техника эксперимента. № 1. С. 83–86. 1956.
- Капорский Л.Н., Николаева И.И. Оптические приборы. Каталог / Под ред. В.А. Никитина. М.: Машиностроение. 305 с. 1969.
- Мерзляков Е.Г., Портнягин Ю.И. Многолетние изменения параметров ветрового режима нижней термосферы умеренных широт (90–100 км) // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 35. С. 531–542. 1999.
- Мохов И.И., Семенов А.И., Володин Е.М., Дембицкая М.А. Выхолаживание в области мезопаузы при глобальном потеплении по данным измерений и модельным расчетам // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 53. № 4. С. 435–444. 2017.
- Перминов В.И., Семенов А.И. Неравновесность вращательной температуры полос ОН с высоким колебательным возбуждением // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 32. № 2. С. 175–178. 1992.
- Перминов В.И., Семенов А.И., Шефов Н.Н., Тихонова В.В. Оценка сезонных вариаций высоты излучающего слоя гидроксила // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 33. № 3. С. 113–120. 1993.
- Перминов В.И., Семенов А.И., Шефов Н.Н. О вращательной температуре гидроксильной эмиссии // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 47. № 6. С. 798–805. 2007.
- Прокудина В.С. Определение вращательной температуры гидроксила в верхней атмосфере // Изв. АН СССР. Серия геофиз. № 125. С. 629–631. 1959.
- Семенов А.И., Шефов Н.Н., Фишкова Л.М., Лысенко Е.В., Перов С.П., Гивишвили Г.В., Лещенко Л.Н., Сергеев Н.П. Об изменении климата верхней и средней атмосферы // Доклады АН СССР. Т. 349. № 1. С. 108–110. 1996.
- Семенов А.И. Температурный режим нижней термосферы по эмиссионным измерениям в течение последних десятилетий // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 36. № 5. С. 90–97. 1996.
- Семенов А.И., Баканас В.В., Перминов В.И., Железнов Ю.А., Хомич В.Ю. Спектр излучения ночной верхней атмосферы Земли в ближней инфракрасной области // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 42. № 3. С. 407–414. 2002.
- Семенов А.И., Шефов Н.Н. Излучение верхней атмосферы — чувствительный индикатор солнечно-земных процессов. Итоги за 60 лет (обзор) // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 51. № 4. С. 435–449. 2011.
- Шефов Н.Н. Об определении вращательной температуры полос ОН* // Спектральные, спектрофотометрические и радиолокационные исследования полярных сияний и свечения ночного неба. № 5. С. 5–9. 1961.
- Шефов Н.Н., Семенов А.И., Хомич В.Ю. Излучение верхней атмосферы — индикатор ее структуры и динамики. М.: ГЕОС. 740 с. 2006.
- Шуйская Ф.К. Некоторые результаты спектроскопических исследований полярных сияний и излучения ночного неба // Спектральные, спектрофотометрические и радиолокационные исследования полярных сияний и свечения ночного неба. № 1. С. 45–47. 1959.
- Фишкова Л.М. Ночное излучение среднеширотной верхней атмосферы Земли. Тбилиси: Мецниереба. 271 с. 1983.
- Ярин В.И. Эмиссия ОН по наблюдениям в Якутске // Спектральные, спектрофотометрические и радиолокационные исследования полярных сияний и свечения ночного неба. № 5. С. 10–17. 1961.
- Bakanas V.V., Perminov V.I., Semenov A.I. Seasonal variations of emission characteristics of the mesopause hydroxyl with different vibrational excitation // Adv. Space Res. V. 32. № 5. P. 765–770. 2003.

- *Baker D.J., Stair A.T.* Rocket measurements of the altitude distributions of the hydroxyl airglow // *Physica Scripta*. № 37. P. 611–622. 1988.
- *Beig G., Keckhut P., Lowe R.P. et al.* Review of mesospheric temperature trends // *Rev. Geophys.* V. 41. 1015. 2003.
<https://doi.org/10.1029/2002RG000121>
- *Beig G.* Long-term trends in the temperature of the mesosphere/lower thermosphere region: 1. Anthropogenic influences // *J. Geophys. Res.* V. 116. A00H11. 2011.
<https://doi.org/10.1029/2011JA016646>
- *Dalin P., Perminov V., Pertsev N., Romejko V.* Updated long-term trends in mesopause temperature, airglow emissions, and noctilucent clouds // *J. Geophys. Res. — Atmos.* V. 125. e2019JD030814. 2020.
<https://doi.org/10.1029/2019JD030814>
- *Dick K.A.* On the rotational temperature of the airglow hydroxyl emissions // *Planet. Space Sci.* V. 25. № 6. P. 595–596. 1977.
- *Emmert J.T., Drob D.P., Picone J.M., et al.* NRLMSIS 2.0: A whole-atmosphere empirical model of temperature and neutral species densities // *Earth and Space Science*. V. 8. № 3. e2020EA001321. 2021.
<https://doi.org/10.1029/2020EA001321>
- *Feofilov A.G., Kutepov A.A.* Infrared radiation in the mesosphere and lower thermosphere: energetic effects and remote sensing // *Surveys in Geophysics*. V. 33. 1231–1280. 2012.
- *Fomichev V.I., Jonsson A.I., de Grandpré J., Beagley S.R., McLandress C., Semeniuk K., Shepherd T.G.* Response of the middle atmosphere to CO₂ doubling: results from the Canadian middle atmosphere model // *J. Clim.* V. 20. P. 1121–1144. 2007.
- *French W.J.R., Burns G.B., Finlayson K., Greet P.A., Lowe R.P., Williams P.F.B.* Hydroxyl (6–2) airglow emission intensity ratios for rotational temperature determination // *Ann. Geophysicae*. V. 18. P. 1293–1303. 2000.
- *French W.J.R., Mulligan F.J., Klekociuk A.R.* Analysis of 24 years of mesopause region OH rotational temperature observations at Davis, Antarctica — Part 1: long-term trends // *Atmos. Chem. Phys.* V. 20. P. 6379–6394. 2020.
- *Garcia R.R., Marsh D.R., Kinnison D.E., Boville B.A., Sassi F.* Simulation of secular trends in the middle atmosphere, 1950–2003 // *J. Geophys. Res.* V. 112. D09301. 2007.
<https://doi.org/10.1029/2006JD007485>
- *Garcia R.R., Yue J., Russell J.M.* Middle atmosphere temperature trends in the twentieth and twenty-first centuries simulated with the Whole Atmosphere Community Climate Model (WACCM) // *J. Geophys. Res. — Space Physics*. V. 124. P. 7984–7993. 2019.
- *Golitsyn G.S., Semenov A.I., Shefov N.N., Fishkova L.M., Lysenko E.V., Perov S.P.* Long-term temperature trends in atmosphere // *Geophys. Res. Lett.* V. 23. № 14. P. 1741–1744. 1996.
- *Grygalashvily M.* Several notes on the OH* layer // *Ann. Geophysicae*. V. 33. P. 923–930. 2015.
- *Holmen S.E., Dyrland M.E., Sigernes F.* Mesospheric temperatures derived from three decades of hydroxyl airglow measurements from Longyearbyen, Svalbard (78° N) // *Acta Geophys.* V. 62. P. 302–315. 2014.
- *Jacobi Ch.* Long-term trends and decadal variability of upper mesosphere/lower thermosphere gravity waves at midlatitudes // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* V. 118. P. 90–95. 2014.
- *Kalicinsky C., Knieling P., Koppmann R., Offermann D., Steinbrecht W., Wintel J.* Long-term dynamics of OH* temperatures over central Europe: trends and solar correlations // *Atmos. Chem. Phys.* V. 16. P. 15033–15047. 2016.
- *Krassovsky V.I., Shefov N.N., Yarin V.I.* Atlas of the airglow spectrum $\lambda\lambda$ 3000–12400 Å // *Planet. Space Sci.* V. 9. № 12. P. 883–915. 1962.
- *Krassovsky V.I., Potapov B.P., Semenov A.I., Shagaev M.V., Shefov N.N., Sobolev V.G.* On the equilibrium nature of the rotational temperature of hydroxyl airglow // *Planet. Space Sci.* V. 25. № 6. P. 596–597. 1977.
- *Kvifte G.* Temperature measurements from OH bands // *Planet. Space Sci.* V. 5. P. 153–157. 1961.
- *Langhoff S.R., Werner H.J., Rosmus P.* Theoretical transition probabilities for the OH Meinel system // *J. Molecular Spectrosc.* V. 118. № 4. P. 507–529. 1986.
- *Makhlouf U.B., Picard R.H., Winick J.R.* Photochemical-dynamical modeling of the measured response of airglow to gravity waves. 1. Basic model for OH airglow // *J. Geophys. Res.* V. 100. № D6. P. 11289–11311. 1995.
- *Marsh D.R., Mills M.J., Kinnison D.E., Lamarque J.-F., Calvo N., Polvani L.M.* Climate change from 1850 to 2005 simulated in CESM1 (WACCM). *J. Clim.* V. 26. № 19. P. 7372–7391. 2013.
- *Meinel A.B.* OH emission bands in the spectrum of the night sky // *Astrophys. J.* V. 112. № 1. P. 120–130. 1950.
- *Mlynczak M.G., Hunt L.A., Garcia R.R., Harvey V.L., Marshall B.T., Yue J., Mertens C.J., Russell J.M.* Cooling and contraction of the mesosphere and lower thermosphere from 2002 to 2021 // *J. Geophys. Res. — Atmos.* V. 127. e2022JD036767. 2022.
<https://doi.org/10.1029/2022JD036767>
- *Offermann D., Hoffmann P., Knieling P., Koppmann R., Oberheide J., Steinbrecht W.* Long-term trends and solar cycle variations of mesospheric temperature and dynamics // *J. Geophys. Res.* V. 115. D18127. 2010.
<https://doi.org/10.1029/2009JD013363>
- *Perminov V.I., Semenov A.I., Shefov N.N.* Long-term variations in mesopause temperature // *Abstracts of Eighth International Symposium on Solar Terrestrial Physics*. Sendai, Japan, June 5–10, 1994. P. 199. 1994.
- *Perminov V.I., Semenov A.I., Medvedeva I.V., Zheleznov Yu.A.* Variability of mesopause temperature from the hydroxyl airglow observations over mid-latitude sites, Zvenigorod and Tory, Russia // *Adv. Space Res.* V. 54. № 12. P. 2511–2517. 2014.

- *Perminov V.I., Semenov A.I., Pertsev N.N., Medvedeva I.V., Dalin P.A., Sukhodoev V.A.* Multi-year behaviour of the midnight OH* temperature according to observations at Zvenigorod over 2000–2016 // *Adv. Space Res.* V. 61. № 7. P. 1901–1908. 2018.
- *Pertsev N., Perminov V.* Response of the mesopause airglow to solar activity inferred from measurements at Zvenigorod, Russia // *Ann. Geophysicae.* V. 26. № 5. P. 1049–1056. 2008.
- *Qian L., Burns A.G., Solomon S.C., Wang W.* Carbon dioxide trends in the mesosphere and lower thermosphere // *J. Geophys. Res. – Space Phys.* V. 122. P. 4474–4488. 2017.
- *Reisin E.R., Scheer J., Dyrland M.E., et al.* Traveling planetary wave activity from mesopause region airglow temperatures determined by the Network for the Detection of Mesospheric Change (NDMC) // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* V. 119. P. 71–82. 2014.
- *Rezac L., Yue J., Yongxiao J., Russell J. M., Garcia R., Lopez-Puertas M., Mlynchzak M.G.* On long-term SABER CO₂ trends and effects due to nonuniform space and time sampling // *J. Geophys. Res. – Space Phys.* V. 123. 7958–7967. 2018.
- *Rishbeth H., Roble R.G.* Cooling of the upper atmosphere by enhanced greenhouse gases – Modeling of thermospheric and ionospheric effects // *Planet. Space Sci.* V. 40. P. 1011–1026. 1992.
- *Roble R.G., Dickinson R.E.* How will changes in carbon dioxide and methane modify the mean structure of the mesosphere and thermosphere? // *Geophys. Res. Lett.* V. 16. P. 1441–1444. 1989.
- *Schmidt H., Brasseur G.P., Charron M., Manzini E., Giorgetta M.A., Diehl T., Fomichev V.I., Kinnison D., Marsh D., Walters S.* The HAMMONIA chemistry climate model: Sensitivity of the mesopause region to the 11-year solar cycle and CO₂ doubling // *J. Clim.* V. 19. P. 3903–3931. 2006.
- *Shefov N.N.* Hydroxyl emission of the upper atmosphere – I. The behaviour during a solar cycle, seasons and geomagnetic disturbances // *Planet. Space Sci.* V. 17. P. 797–813. 1969.
- *She C.Y., Thiel S.W., Krueger D.A.* Observed episodic warming at 86 and 100 km between 1991 and 1997: effects of Mount Pinatibo eruption // *Geophys. Res. Lett.* V. 25. № 4. P. 497–500. 1998.
- *She C.Y., Berge U., Yan Z.A., Yuan T., Lübken F.J., Krueger D.A., Hu X.* Solar response and long-term trend of midlatitude mesopause region temperature based on 28 years (1990–2017) of Na lidar observations // *J. Geophys. Res. – Space Phys.* V. 124. P. 7140–7156. 2019.
- *Semenov A.I.* Long term temperature trends for different seasons by hydroxyl emission // *Phys. Chem. Earth (B).* V. 25. № 5–6. P. 525–529. 2000.
- *Semenov A.I., Shefov N.N., Lysenko E.V., Givishvili G.V., Tikhonov A.V.* The season peculiarities of behaviour of the long-term temperature trends in the middle atmosphere on the mid-latitudes // *Phys. Chem. Earth.* V. 27. P. 529–534. 2002.
- *Solomon S.C., Liu H.-L., Marsh D.R., McInerney J.M., Qian L., Vit F.M.* Whole atmosphere simulation of anthropogenic climate change // *Geophys. Res. Lett.* V. 45. P. 1567–1576. 2018.
- *Yue J., Russell J., Jian Y., Rezac L., Garcia R., López-Puertas M., Mlynchzak M.G.* Increasing carbon dioxide concentration in the upper atmosphere observed by SABER // *Geophys. Res. Lett.* V. 42. P. 7194–7199. 2015.
- *Zhao X.R., Sheng Z., Shi H.Q., Weng L.B., He Y.* Middle atmosphere temperature changes derived from SABER observations during 2002–20 // *J. Clim.* V. 34. P. 7995–8012. 2021.

Long-term temperature trend in the mesopause region according to observations of hydroxyl airglow in Zvenigorod

V. I. Perminov^{1,*}, N. N. Pertsev^{1,**}, P. A. Dalin^{2,3,***}, V. A. Semenov^{1,****},
V. A. Sukhodoev^{1,*****}, Yu. A. Zhelezov^{4,*****}, M. D. Orekhov^{1,*****}

¹A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²Swedish Institute of Space Physics, Kiruna, Sweden

³Institute of Space Research, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

⁴Institute of Electrophysics and Electric Power, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

*e-mail: v.perminov@rambler.ru

**e-mail: n.pertsev@bk.ru

***e-mail: pdalin@yandex.ru

****e-mail: vasemenov@mail.ru

*****e-mail: vladi13s@yandex.ru

*****e-mail: otel18@bk.ru

*****e-mail: jlestersskull@gmail.com

An analysis of the long-term change of the average annual OH* temperature, the values of which were obtained from nighttime spectral observations of the hydroxyl emission bands at the Zvenigorod scientific station (56° N, 37° E) from 1957 to 2022, is presented. This series of OH* temperatures, reflecting the thermal state of the mesopause region, is the longest among all known observations. On its basis, estimates of the linear trend and response of temperature to changes in solar activity was made both in general over the entire set of data and for different time intervals. In the first case, the trend was -0.23 ± 0.04 K/yr. In the second case, the analysis showed strong cooling (-0.53 ± 0.34 K/yr) until the 1970s and its slowdown to -0.14 ± 0.03 K/yr thereafter. A comparison of the results of the analysis with other measurements and model calculations shows that the latter have lower trend values. It is assumed that the reasons for the temperature trend, in addition to the growth of greenhouse gases, the main of which is CO₂, may be long-term changes in the dynamics of the upper atmosphere.