

УДК 550.388.8:551.510.535.2

СЕЗОННЫЕ И МНОГОЛЕТНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ АТМОСФЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ $O_2(b^1\Sigma)$ И $OH(X^2\Pi)$ ОБЛАСТИ МЕЗОПАУЗЫ

© 2021 г. В. И. Перминов¹, *, Н. Н. Перцев¹, **, П. А. Далин^{2,3},
Ю. А. Железнов⁴, В. А. Суходоев¹, М. Д. Орехов¹

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, г. Москва, Россия

²Шведский институт космической физики, г. Кируна, Швеция

³Институт космических исследований РАН, г. Москва, Россия

⁴Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

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

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

Поступила в редакцию 15.01.2021 г.

После доработки 20.01.2021 г.

Принята к публикации 28.01.2021 г.

На основе спектральных наблюдений излучения мезопаузы на Звенигородской научной станции получены полуночные интенсивности эмиссий молекулярного кислорода (полоса $O_2A(0-1)$) и гидроксила (полоса $OH(6-2)$) для 2000–2019 гг. Спектральный анализ вариаций позволил определить годовой ход для каждой эмиссии, который описывается четырьмя гармониками. Запаздывание сезонных вариаций гидроксильной эмиссии относительно вариаций эмиссии молекулярного кислорода составляет 5–18 сут. Исследованы многолетние изменения среднегодовых интенсивностей эмиссий. Установлены значения линейного тренда ($-3.3 \pm 0.3\%$ в год для $O_2A(0-1)$ и $-2.6 \pm 0.2\%$ в год для $OH(6-2)$), зависимости от 11-летнего солнечного цикла (отклик на изменения солнечного излучения Лайман-альфа — $18.5 \pm 3.3\%$ на 10^{11} фотон $см^{-2} с^{-1}$ для $O_2A(0-1)$ и $10.5 \pm 2.5\%$ на 10^{11} фотон $см^{-2} с^{-1}$ для $OH(6-2)$) и 22-летнего солнечного цикла (отклик на изменения индукции солнечного магнитного поля — $23.2 \pm 4.5\%$ на $100 \mu T$ для $O_2A(0-1)$ и $12.1 \pm 3.5\%$ на $100 \mu T$ для $OH(6-2)$), а также квазивосьмилетние колебания.

DOI: 10.31857/S0016794021040118

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время изменения характеристик области мезопаузы (80–100 км) являются предметом многих исследований верхней атмосферы Земли. Причинами изменений могут быть как геологофизические факторы — солнечное электромагнитное и корпускулярное излучение и динамические процессы в атмосфере, так и эффект от антропогенного воздействия на окружающую среду. Наблюдения излучения атмосферных газов являются одним из наиболее эффективных методов изучения области мезопаузы. Измерения интенсивности и спектральной структуры полос излучения позволяют оценивать концентрации газовых компонентов и температуру. Исследования показывают, что характеристики излучения мезопаузы испытывают значительные пространственные и временные вариации. Последние представляют собой колебания от нескольких минут, носящие, как правило, нерегулярный характер, до нескольких десятков лет. Среди них

менее изученными являются многолетние вариации из-за ограниченности временных рядов наблюдений. Кроме того, широтно-долготные неоднородности и особенности высотного распределения излучающих газов создают локальные особенности сезонных (и меньших временных масштабов) изменений характеристик излучения мезопаузы.

В настоящей работе уделяется внимание двум эмиссиям, относящимся к собственному излучению мезопаузы: молекулярного кислорода (полоса $A(0-1)$ Атмосферной системы $O_2(b^1\Sigma)$, 865 нм) и гидроксила (полоса (6-2) $OH(X^2\Pi)$, 835 нм). В дневное время излучение $O_2(b^1\Sigma)$ возникает в области 40–110 км в результате действия флуоресценции, ионизации и химических реакций рекомбинации атомарного кислорода. Однако только последние являются основным процессом образования излучающего слоя в ночное время, который локализуется в области 85–105 км с пи-

ком ~94 км [Шефов и др., 2006]. Излучение ОН($X^2\Pi$), возникающее также в результате химических процессов рекомбинации атомов кислорода, образует слой в области 75–100 км с максимумом ~87 км [Шефов и др., 2006].

Целью данной работы является определение сезонного хода и многолетних изменений интенсивности вышеупомянутых полос излучения молекулярного кислорода и гидроксила мезопаузы. Для этого проанализированы ряды их многолетних наблюдений на Звенигородской научной станции (56° N, 37° E) Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (Москва).

2. НАБЛЮДЕНИЯ

Спектральные наблюдения собственного излучения мезопаузы в ближней инфракрасной области (0.77–1.05 мкм) на Звенигородской станции ведутся с помощью светосильного спектрографа СП-50 [Герасимова и Яковлева, 1956]. Прибор оснащен регистрирующей камерой с высокочувствительной ПЗС-матрицей, охлаждаемой до –50°С. Детальное описание аппаратуры, методики наблюдений, обработки спектров и определения характеристик эмиссий молекулярного кислорода и гидроксила дано в работах [Семенов и др., 2002; Шефов и др., 2006; Pertsev and Perminov, 2008].

Наблюдения ведутся на постоянной основе в безоблачную погоду при зенитном угле 53° в северо-западном направлении (азимут 23°, отсчитывается от севера на запад). Время экспозиции спектра составляло 10 мин. Условия наблюдений и характеристики прибора позволяли определять интенсивности полос $O_2A(0-1)$ и $OH(6-2)$ с ошибкой измерения 5–6 рэлей (1 рэлей (Рл) = 10^6 фотон $cm^{-2} s^{-1}$). Полученные интенсивности эмиссий приводились к зенитным условиям.

3. АНАЛИЗ ДАННЫХ

В настоящем анализе исследуются интенсивности (I), измеренные в 2000–2019 гг. Каждый ряд интенсивности состоит из 1663 значений, являющихся средними с 21 до 22 ч по всемирному времени, т.е. около местной полуночи. Такой суточный интервал времени позволял измерять интенсивности эмиссий как зимой, так и летом, когда только сумеречные условия сохранялись на широте наблюдения (56° N). На рисунке 1 представлены данные ряды. Как видно, интенсивности эмиссий испытывают значительные изменения на протяжении всего многолетнего периода наблюдений – от трех десятков до тысячи рэлей в случае $O_2A(0-1)$ и от двух сотен до двух тысяч рэлей в случае $OH(6-2)$. Среди них выделяются регулярные сезонные вариации. Их спектр был

определен с помощью LS -периодограмм [Lomb, 1976; Scargle, 1982], которые показаны на рис. 2. Высоко значимыми являются первые четыре гармоники. Их нормализованная мощность (S_n) на периодограммах выше уровня статистической значимости $\alpha = 0.05$. Характеристики гармоник были оценены методом множественной регрессии. При вычислении ряды эмиссионных данных аппроксимировались выражением

$$I = A_0 + \sum_{i=1}^4 A_i \cos\left(\frac{2\pi i}{365.25} (t - f_i)\right), \quad (1)$$

где A_0 – нулевая гармоника; A_i и f_i – амплитуда и фаза максимума i -ой гармоники; t – порядковый номер суток, отсчитываемый с 1 января 2000 г. Результаты аппроксимации представлены в табл. 1. Согласно полученным значениям A_0 можно полагать, что средние интенсивности $O_2A(0-1)$ и $OH(6-2)$ для периода 2000–2019 гг. составляют соответственно 265.2 ± 3.3 Рл и 710.7 ± 6.2 Рл. Амплитуды сезонных гармоник для первой эмиссии – от ~21 до ~66 Рл, для второй – от ~45 до ~58 Рл.

Межгодовые изменения интенсивностей эмиссий более наглядно рассматривать используя их средние значения для временных интервалов длиной 1 год (I_{am}). Поскольку данные наблюдений в течение большинства лет распределены неравномерно, то для более точной оценки значений I_{am} имело смысл находить A_0 , аппроксимируя эмиссионные данные на годовом интервале суммой гармоник (1). Для лучшей детализации межгодового поведения интенсивности эмиссий значения I_{am} были определены для временных промежутков с 1 января по 31 декабря и с 1 июля одного года по 30 июня последующего года. Полученные ряды представлены на рис. 3а, 3в. Как видно, они показывают значительное понижение, которое можно выразить в линейном виде как

$$I_{am} = (376.0 \pm 16.7) - (10.7 \pm 1.5)(t - 2000) \quad (2)$$

для $O_2A(0-1)$,

$$I_{am} = (920.2 \pm 27.2) - (21.4 \pm 2.5)(t - 2000) \quad (3)$$

для $OH(6-2)$,

где t – календарный год. Размерность линейного коэффициента – Рл/год. Выражения (2) и (3) получены методом наименьших квадратов. На рисунке 3а, 3в они показаны прямыми сплошными линиями. Однако вычисленные LS -периодограммы вариаций для данных рядов показывают (рис. 3б, 3г), что наряду с долговременными изменениями (трендом) значимой является 11-летняя осцилляция, которая скорее всего обусловлена 11-летним циклом солнечной активности [Шефов и др., 2006]. На периодограммах область периодов более 20 лет показана прерывистой линией, поскольку в ней значения

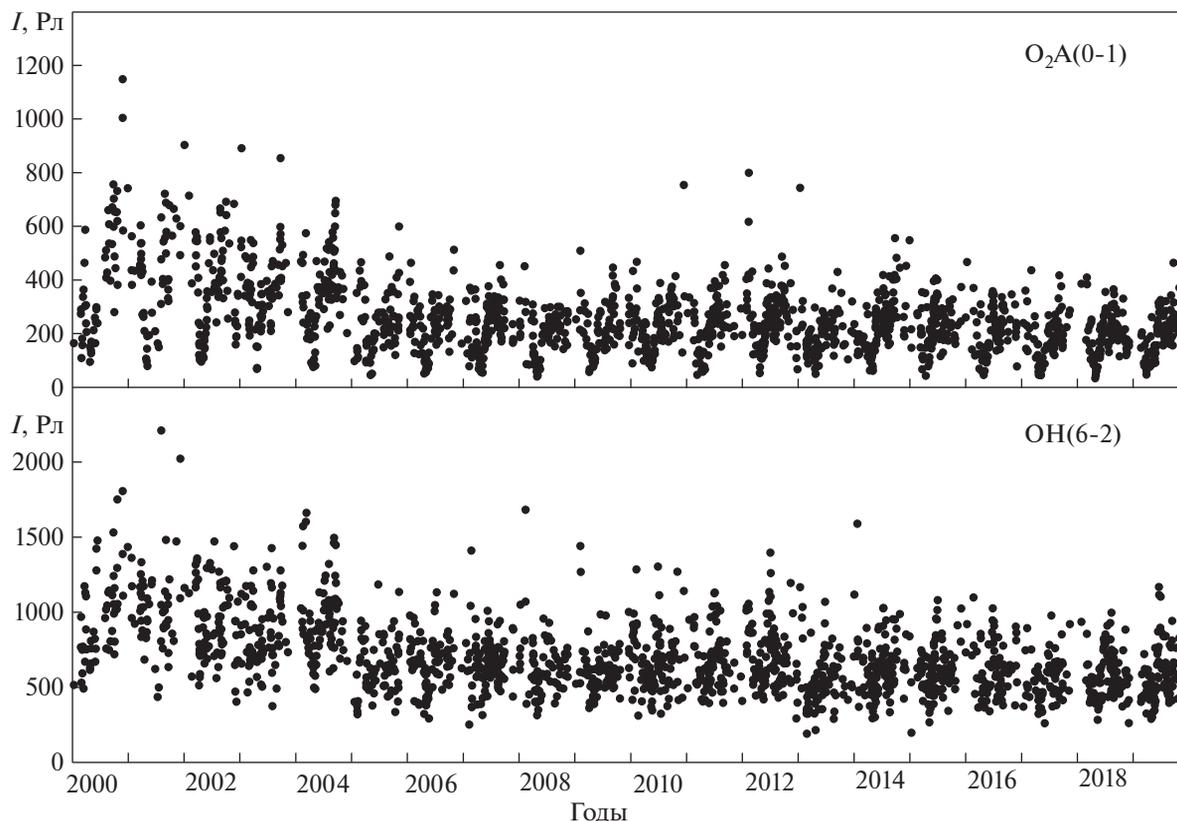


Рис. 1. Интенсивности (I) эмиссий $O_2A(0-1)$ (верхний график) и $OH(6-2)$ (нижний график) по наблюдениям на Звенигородской станции в 2000–2019 гг. Точки – средние значения для 21–22 ч всемирного времени.

мощности периодического сигнала могут быть недостоверными из-за более короткой длины ряда данных, чем определяемые периоды. Связь интенсивностей эмиссий с солнечной активностью была определена методом множественной регрессии:

$$I_{\text{am}} = (357.2 \pm 12.3) - (6.6 \pm 1.3)(t - 2000) + (73.5 \pm 11.8)(F_{L\alpha} - 4.5 \times 10^{11}) \text{ для } O_2A(0-1), \quad (4)$$

$$I_{\text{am}} = (893.0 \pm 21.7) - (15.4 \pm 2.2)(t - 2000) + (106.4 \pm 20.9)(F_{L\alpha} - 4.5 \times 10^{11}) \text{ для } OH(6-2), \quad (5)$$

где $F_{L\alpha}$ – среднегодовой поток излучения Лайман-альфа ($L\alpha$) в единицах 10^{11} фотон $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$, взятый в качестве индикатора солнечной активности. Размерность линейного коэффициента для связи с $F_{L\alpha}$ – $\text{Рл}/10^{11}$ фотон $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$. Значения по

Таблица 1. Амплитуды и фазы гармоник годового хода интенсивностей эмиссий $O_2A(0-1)$ и $OH(6-2)$

Номер гармоники	Эмиссия $O_2A(0-1)$		Эмиссия $OH(6-2)$	
	A_i , Рл	f_i , сут	A_i , Рл	f_i , сут
0	265.2 ± 3.3	–	710.7 ± 6.2	–
1	65.6 ± 4.6 (24.7 ± 1.7%)	302.4 ± 4.1	53.3 ± 9.8 (7.5 ± 1.4%)	321.8 ± 9.4
2	35.1 ± 4.4 (13.2 ± 1.7%)	31.8 ± 3.9	52.6 ± 9.2 (7.4 ± 1.3%)	17.2 ± 5.1
3	20.8 ± 4.6 (7.7 ± 1.7%)	40.5 ± 4.1	44.8 ± 9.4 (6.3 ± 1.3%)	52.3 ± 3.7
4	36.9 ± 4.2 (13.9 ± 1.6%)	76.4 ± 1.7	58.1 ± 8.5 (8.2 ± 1.2%)	85.8 ± 2.1

Примечание. Здесь и далее в качестве ошибки определения значения характеристики указано одно стандартное отклонение. Фазы даны для первого максимума. Проценты указаны относительно значений нулевой гармоники.

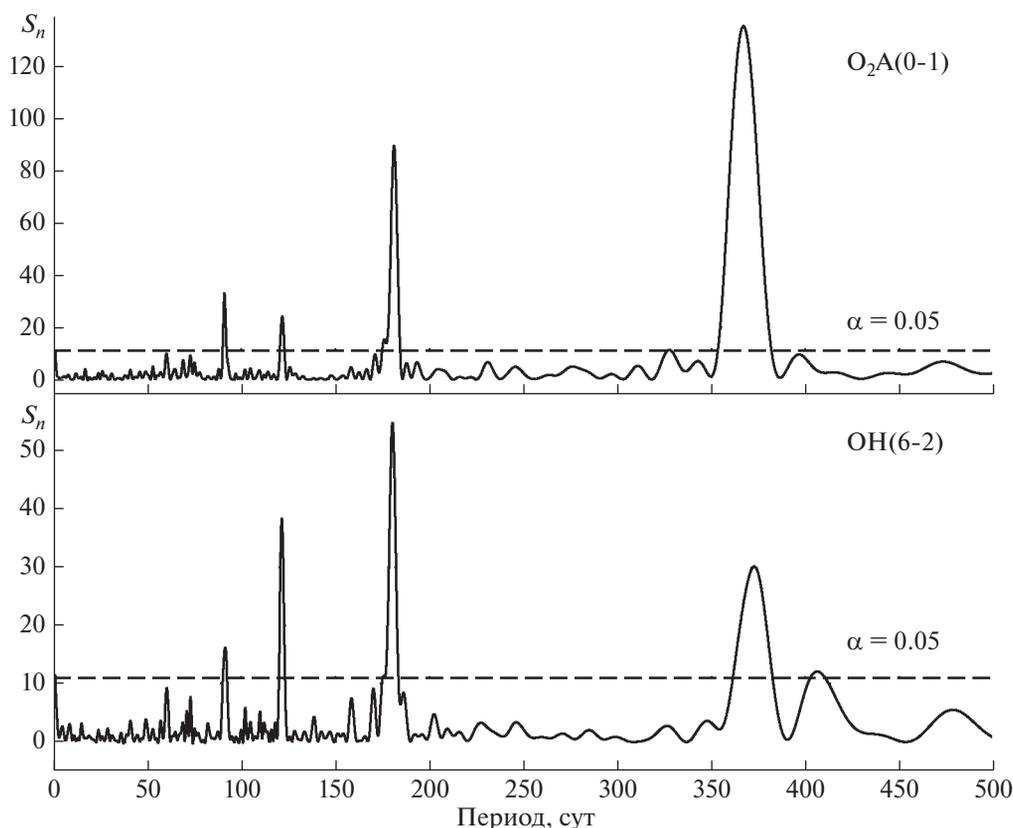


Рис. 2. LS -периодограммы вариаций интенсивности эмиссий в диапазоне 1–500 сут. S_n – мощность вариаций, нормализованная на дисперсию значений интенсивности I . Штриховая линия – уровень статистической значимости (α).

потоку $F_{L\alpha}$ взяты согласно данным LASP Interactive Solar Irradiance Data Center (<https://lasp.colorado.edu/lisird>). Обе эмиссии характеризуются меньшими значениями отрицательного линейного тренда по сравнению с величинами в (2) и (3), а также положительным откликом на 11-летние изменения солнечной активности. В случае зависимостей (4) и (5) коэффициент детерминации составил ~ 0.8 , что показывает значительную долю выявленных вариаций в общей дисперсии значений I_{am} . Однако оставшаяся доля (~ 0.2) дисперсии может быть также обусловлена значительными вариациями. Поэтому имело смысл провести их исследование в рядах остаточных интенсивностей (ΔI_{am}) эмиссий (рис. 4а, 4в). Значения ΔI_{am} являются разностью между начальными рядами данных (рис. 3а, 3в) и их аппроксимациями (4) и (5). На рисунке 4б, 4г показаны LS -периодограммы соответствующих вариаций. Как видно, для обеих эмиссий статистически значимой является осцилляция с периодами ~ 8 лет. Проверка показала, что квазивосьмилетняя периодичность содержится именно в остаточных интенсивностях ΔI_{am} , а не является следствием вычитания из первоначального ряда I_{am} солнечно-обусловленной компоненты из (4) и (5). Значи-

мый пик ~ 21 года находится в области периодов больше длины анализируемых рядов, поэтому он может служить только ориентиром для поиска возможной физической основы для связи интенсивности эмиссий с процессами в атмосфере предполагаемой периодичности. В работах [Hörner and Bittner, 2007; Kalicinsky et al., 2016] авторы связали многолетние изменения характеристик термодинамического режима области мезопаузы с 22-летней цикличностью изменений магнитного поля Солнца (цикл Хейла). На рисунке 5 можно визуально сравнить межгодовые изменения ΔI_{am} с соответствующими изменениями солнечного магнитного поля. В качестве индикатора последнего принята средняя индукция (B) магнитного поля в области широт выше 55° N и S. Значения B взяты в микротеслах (μT) согласно наблюдениям на Солнечной обсерватории Уилкокса Стэнфордского университета (<http://wso.stanford.edu/Polar.html>). Как видно при сравнении необходимо учитывать некоторый временной лаг между изменениями солнечного магнитного поля и эмиссий мезопаузы.

Параметры всех зависимостей интенсивности эмиссий были оценены методом множественной регрессии при аппроксимации рядов I_{am} выражением

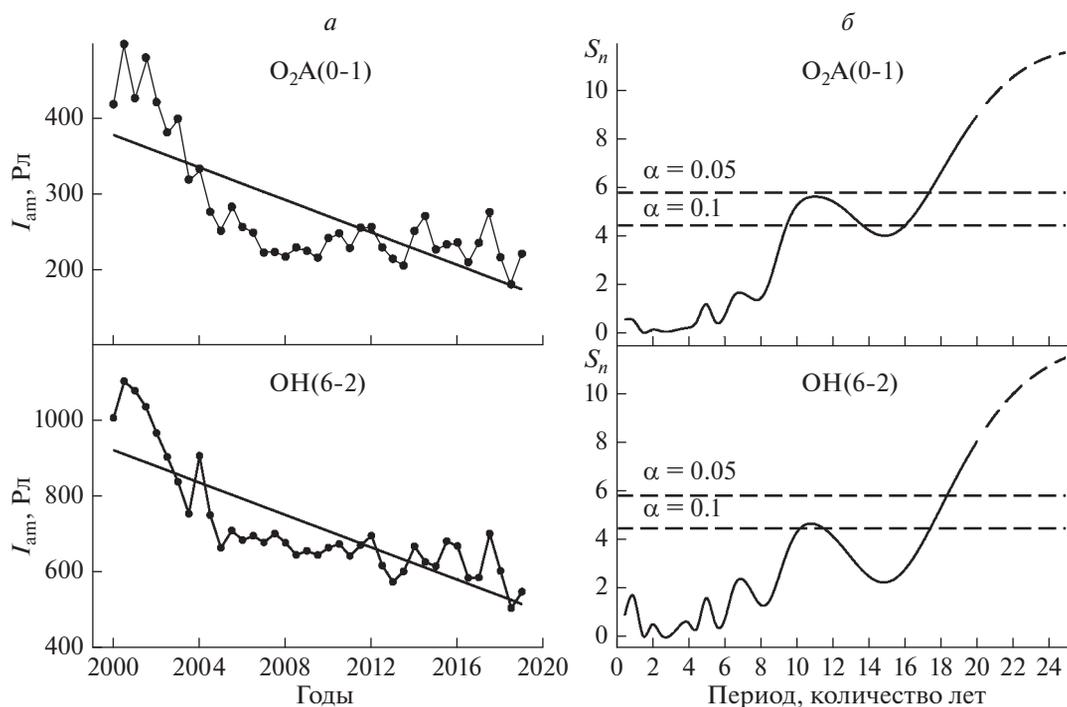


Рис. 3. (а) – многолетние изменения интенсивности (I_{am}) эмиссий. Точки – среднегодовые значения. Сплошная линия – тренд согласно выражениям (2) и (3). (б) – LS -периодограммы вариаций. S_n – мощность вариаций, нормализованная на дисперсию значений I_{am} . Область значений S_n в диапазоне периодов 20–25 лет показана прерывистой кривой линией, поскольку значения мощности периодического сигнала могут быть недостоверными из-за более короткой длины ряда данных, чем определяемые периоды. Прерывистые прямые линии – уровни статистической значимости (α).

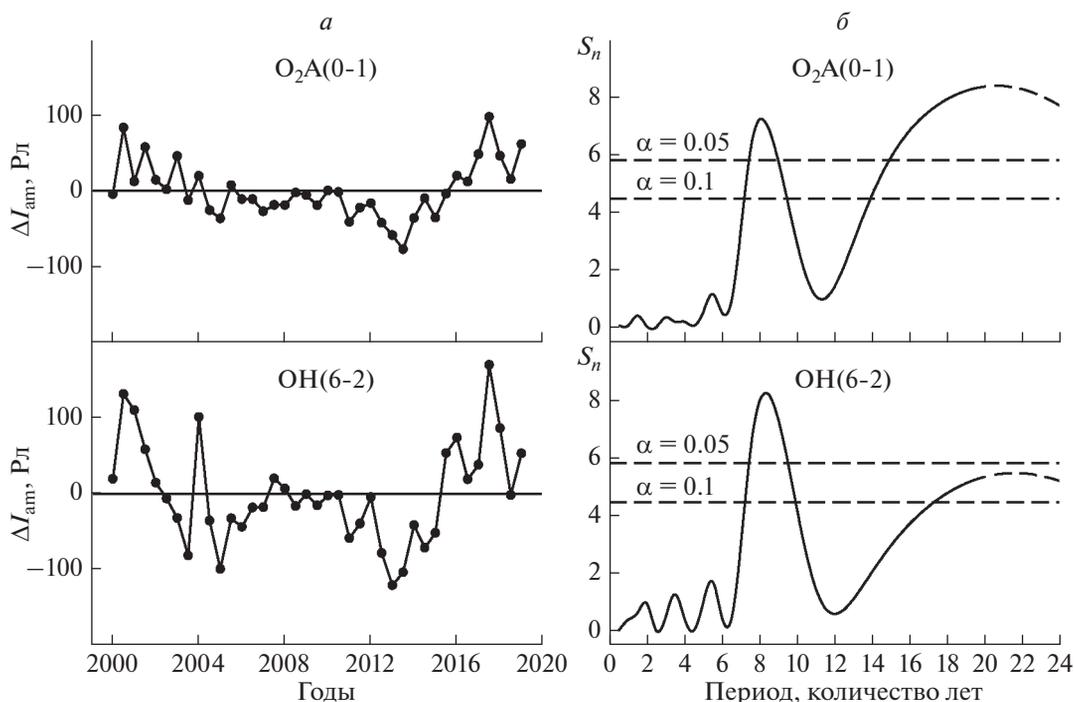


Рис. 4. (а) – межгодовые вариации остаточной интенсивности эмиссий (ΔI_{am}). (б) – LS -периодограммы вариаций. Обозначения как на рис. 3.

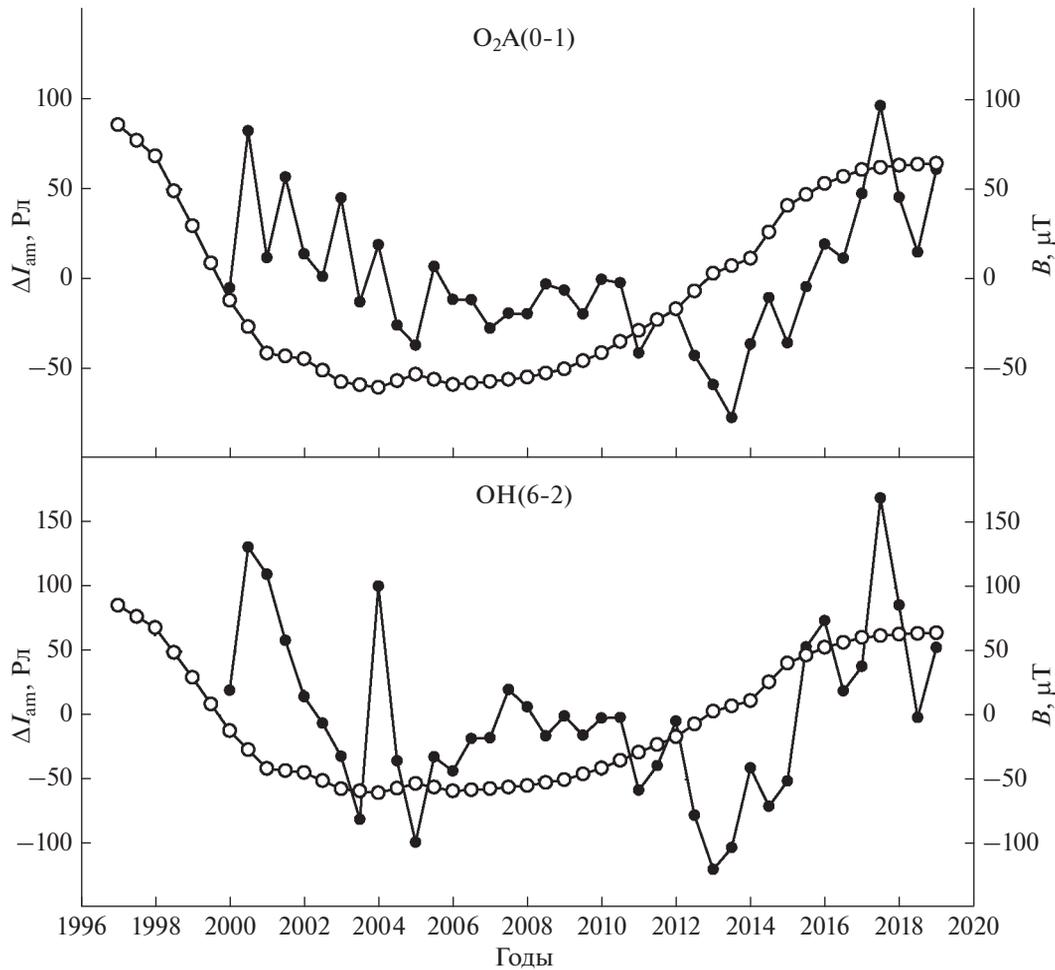


Рис. 5. Межгодовые изменения остаточной интенсивности (ΔI_{am}) эмиссий $O_2A(0-1)$ (верхняя панель рисунка), $OH(6-2)$ (нижняя панель рисунка) и магнитного поля Солнца. Черные кружки – значения интенсивности эмиссий. Белые кружки – среднегодовые значения индукции (B) полярного магнитного поля Солнца.

$$I_{am} = A_0 + A_{tr}(t - 2000) + A_{L\alpha}(F_{L\alpha} - 4.5 \times 10^{11}) + A_{MFS} \frac{B_{(t-\Delta t)}}{100} + A_{QOO} \cos\left(\frac{2\pi}{T_{QOO}}(t - f_{QOO})\right), \quad (6)$$

где A_0 – константа; A_{tr} – коэффициент линейного тренда (Рл/год); $A_{L\alpha}$ – отклик эмиссий на изменения потока $F_{L\alpha}$ (Рл/ 10^{11} фотон $cm^{-2} s^{-1}$); $B_{(t-\Delta t)}$ – среднегодовое значение индукции полярного магнитного поля Солнца для года, соответствующего $t - \Delta t$ (Δt – временной лаг между изменениями солнечного магнитного поля и интенсивности эмиссий излучения мезопаузы); A_{MFS} – отклик эмиссий на изменения индукции полярного магнитного поля Солнца (Рл/ μT); T_{QOO} , A_{QOO} , f_{QOO} – период, амплитуда и фаза максимума квазисовсемилетней осцилляции (QOO). Результаты оценки параметров регрессионной модели (6) представлены в табл. 2. Наилучшая корреляция между ее зависимыми переменными обнаруживается при лаге 2.5 г. Положительное значение лага показы-

вает, что вариации интенсивности эмиссий запаздывают от вариаций магнитного поля Солнца. В ходе регрессионного анализа был уточнен период квазисовсемилетней осцилляции по условию наибольшего коэффициента множественной корреляции. Он составил 7.7 г. для $O_2A(0-1)$ и 8.2 г. для $OH(6-2)$. Судя по коэффициенту детерминации (см. R^2 в табл. 2), более 92% дисперсии значений интенсивности I_{am} в 2000–2019 гг. обусловлено связями и вариациями, учтенными в (6).

4. ОБСУЖДЕНИЕ

4.1. Сезонные вариации

Согласно рис. 1 интенсивность эмиссий может значительно изменяться между ночами. Однако внутри каждого года сохраняется определенный регулярный ход, который можно представить в виде суперпозиции четырех относительных гармоник как на рис. 6а (графики созданы по резуль-

Таблица 2. Результаты определения параметров множественной регрессии (6)

Эмиссии	A_0 , Рл	A_{tr} , Рл/год	$A_{L\alpha}$, Рл/ 10^{11} фотон $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$	A_{MFS} , Рл/ $100 \mu\text{T}$	A_{QOO} , Рл	F_{QOO} , год	R^2
$O_2A(0-1)$	378.3 ± 9.0	-8.7 ± 0.9	49.1 ± 8.8	61.5 ± 11.8	17.7 ± 5.9	2002.3 ± 0.4	0.93
$OH(6-2)$	921.0 ± 17.8	-18.2 ± 1.7	75.0 ± 18.0	85.7 ± 25.1	33.3 ± 12.9	2000.8 ± 0.4	0.92

Примечание. R^2 – квадрат множественной корреляции (коэффициент детерминации).

татам табл. 1). Видно, что наряду со сходством обе эмиссии имеют некоторые особенности, которые можно описать следующим образом:

1. Эмиссии имеют похожий 4-пиковый сезонный ход. Однако вариации интенсивности $O_2A(0-1)$ опережают соответствующие вариации интенсивности $OH(6-2)$ на 5–18 сут.

2. Наибольшие относительные сезонные вариации наблюдаются в интенсивности $O_2A(0-1)$. Амплитуды ее гармоник составляют 8–25% от среднегодового значения интенсивности. В пери-

од весеннего минимума (конец апреля–начало мая) ее значения понижаются до 40% от среднегодовой величины. Наибольшие значения – вблизи осеннего равноденствия (превышение среднегодовой величины на 35%). Амплитуды гармоник сезонных вариаций $OH(6-2)$ менее ярко выраженные – 6–8% от средней величины интенсивности.

В литературе опубликовано достаточно большое количество работ, посвященных экспериментальным исследованиям сезонных вариаций излучения молекулярного кислорода и гидроксид-

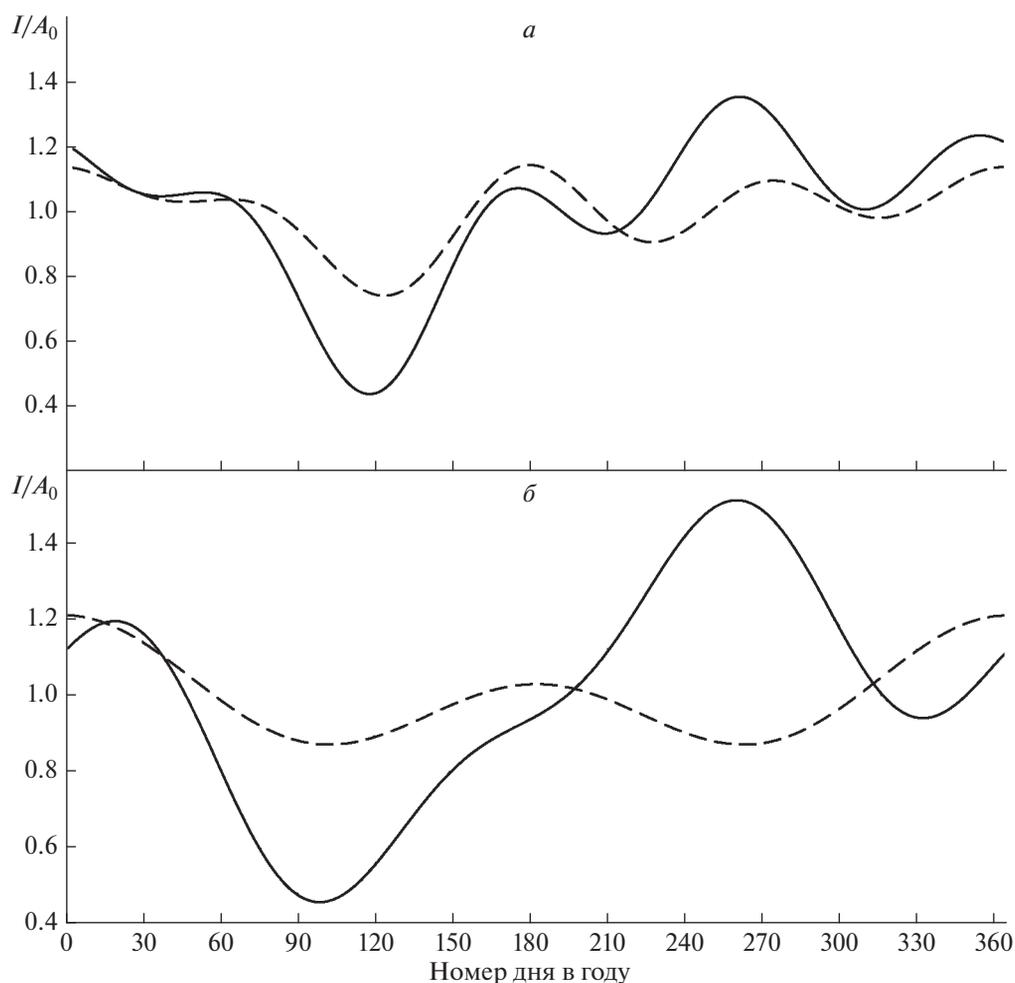


Рис. 6. Сезонный ход интенсивности эмиссий $O_2A(0-1)$ (сплошная кривая) и $OH(6-2)$ (штриховая кривая): (а) – по данным табл. 1 и (б) – согласно работе [Шефов и др., 2006] для широты 56°N . Значения интенсивностей взяты как их отношения к нулевой гармонике A_0 .

ла [см., например, Шефов и др., 2006; Фишкова, 1983; Перминов и др., 2007; Перминов и Перцев, 2010; Wiens and Weill, 1973; Lopez-Gonzalez et al., 2004; Scheer et al., 2005; Liu et al., 2008; Pertsev and Perminov, 2008; Gao et al., 2010; Reid et al., 2014; Teiser and von Savigny, 2017]. Наблюдения до середины 2000-х годов были проанализированы в работе [Шефов и др., 2006]. На их основе получены параметры первых трех сезонных гармоник излучения O_2 и двух гармоник излучения ОН. Для гармоник первого излучения также установлены широтные зависимости. На рисунке 6б показан сезонный ход эмиссионных интенсивностей для широты $56^\circ N$ согласно [Шефов и др., 2006]. Как видно, в данном случае вариации двух эмиссий не имеют такого сходства между собой, как в нашем исследовании, и, следовательно, нельзя судить о каком-либо запаздывании между ними.

Внимание обращают результаты работ [Lopez-Gonzalez et al., 2004; Scheer et al., 2005]. В них представлены сезонные изменения настоящих эмиссий для широт $37^\circ N$ и $32^\circ S$, полученных усреднением данных с окном 1 мес. На каждой широте интенсивности эмиссий имеют сходный годовой ход с запаздыванием вариаций гидроксильной эмиссии на 1–1.5 мес. Очевидно, что сильное сглаживание измерений не позволяет дать более точную оценку запаздывания в данном случае.

Особенности годового хода гидроксильного излучения с изменением широты (от $50^\circ S$ до $50^\circ N$) показаны на основе глобальных измерений радиометром TIMED со спутника SABER в [Gao et al., 2010]. Это исследование свидетельствует о доминировании полугодовой гармоники на экваторе и постепенном усилении годовой гармоники с ростом широты. Хотя в исследованиях [Gao et al., 2010] не было обнаружено четвертой гармоники годового хода (только первые три гармоники), в [Teiser and von Savigny, 2017] по данным других спутниковых наблюдений гидроксильного излучения (SCIAMACHY/Envisat) отмечается присутствие четвертой и пятой гармоник в спектре сезонных вариаций в низких широтах. Однако Teiser and von Savigny [2017] не анализируют данные гармоники и применяют их только для улучшения оценки годовой и полугодовой осцилляций. В настоящей работе годовой ход интенсивности излучения гидроксила выглядит более сложным: описывается четырьмя равнозначными гармониками (без доминирования первой гармоники).

В работе [Перминов и Перцев, 2010] было показано, что сезонные вариации интенсивности настоящих эмиссий являются отражением комбинации сезонных вариаций температуры, концентраций основных газовых компонентов атмосферы (O_2 и N_2) и атомарного кислорода, причем положительные изменения концентраций газо-

вых компонентов вызывают рост интенсивности эмиссий, а соответствующие изменения температуры – их уменьшение (вследствие замедления химических реакций, ведущих к возбуждению молекул кислорода и гидроксила). В ряде работ определяющая роль в сезонном поведении эмиссий мезопаузы отводится температурным изменениям и динамике атомарного кислорода, либо подчеркивается роль только последнего процесса [Liu et al., 2008; Grygalashvyly et al., 2014; Grygalashvyly, 2015; Sonnemann et al., 2015].

4.2. Многолетние изменения

4.2.1. Тренд

Анализ позволил выявить отрицательный линейный тренд интенсивности эмиссий в период 2000–2019 гг. Его значения, обусловленные всеми долговременными процессами в области мезопаузы, составляют -10.7 ± 1.5 Рл/год ($-4.0 \pm 0.6\%$ в год) для $O_2A(0-1)$ и -21.4 ± 2.5 Рл/год ($-3.0 \pm 0.4\%$ в год) для ОН(6-2). При учете влияния многолетних циклов солнечной активности и квазисолнечной осцилляции значения тренда понижаются до -8.7 ± 0.9 Рл/год ($-3.3 \pm 0.3\%$ в год) для $O_2A(0-1)$ и -18.2 ± 1.7 Рл/год ($-2.6 \pm 0.2\%$ в год) для ОН(6-2). Значения в процентах взяты относительно средних интенсивностей за весь период наблюдений (соответствуют величинам A_0 в табл. 1). Настоящий результат хорошо согласуется с предыдущим недавним исследованием многолетних наблюдений на Звенигородской станции, в которых анализировались тренды интенсивности эмиссий с учетом сезонов года для 2000–2018 гг. [Dalin et al., 2020].

В литературе исследования многолетнего тренда ограничены крайне малым числом работ, и большинство из них относятся к анализу интенсивности эмиссий гидроксильного излучения [Фишкова, 1983; Шефов и др., 2006; Sonnemann et al., 2015; Teiser and von Savigny, 2017; Dalin et al., 2020]. Наиболее ранние и продолжительные наблюдения (1948–1980 гг.) гидроксильного излучения выполнены Фишковой [1983]. Анализ этих данных, а также измерений на Звенигородской станции и в Верхнем Провансе в 50–60-х годах [Shefov, 1969; Wiens and Weill, 1973], позволил Шефову и др. [2006] сделать вывод о нелинейном росте интенсивности эмиссий гидроксила на средних широтах вплоть до 1980-х годов. В результате суммарная интенсивность всех полос излучения гидроксила увеличилась на $\sim 80\%$ (с ~ 550 кРл (1948 г.) до ~ 1 МРл (1980 г.)). Современные данные 2000–2019 гг. свидетельствуют, что сейчас в многолетнем ходе излучения гидроксила наблюдается фаза падения интенсивности. При этом можно отметить, что падение по величине идет с

той же скоростью, какая наблюдалась при росте в 1950-х годах.

В работе [Sonnemann et al., 2015] на основе многолетнего мониторинга антропогенных парниковых газов (1961–2009 гг.) и их применения в модели LIMA были вычислены межгодовые изменения и определен тренд концентрации колебательно-возбужденного гидроксидла (OH^*) в области максимума его излучения. Как оказалось, на средних широтах модель показывает небольшой положительный линейный тренд на протяжении всего анализируемого временного интервала (1961–2009 гг.). Однако на десятилетнем интервале 2000–2009 гг. межгодовые изменения имеют тенденцию к понижению концентрации OH^* , что согласуется с результатами настоящей работы. Также отрицательный тренд в изменениях интенсивности эмиссий гидроксидла для средних широт получен в [Teiser and von Savigny, 2017] на основе спутниковых наблюдений SCIAMACHY/Envisat в 2002–2012 гг.

Результаты работы Sonnemann et al. [2015] показывают, что основная причина возникновения тренда не в многолетних изменениях содержания парниковых газов в атмосфере, а в соответствующих изменениях активности планетарных волн, приливов и внутренних гравитационных волн. По-видимому, за счет изменений в динамике в области мезосферы и нижней термосферы происходят существенные изменения в содержании атомарного кислорода в излучающих слоях гидроксидла и молекулярного кислорода.

4.2.2. Связь с 11-летним циклом солнечной активности

Отклик эмиссий на изменения потока солнечного излучения в линии Лайман-альфа, взятого как индикатор солнечной активности, в период 11-летнего цикла является положительным и по величине одним из наиболее существенных среди межгодовых вариаций. Его значения составляют 49.1 ± 8.8 Рл/ 10^{11} фотон $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$ ($18.5 \pm 3.3\%$ на 10^{11} фотон $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$) для $\text{O}_2\text{A}(0-1)$ и 75.0 ± 18.0 Рл/ 10^{11} фотон $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$ ($10.5 \pm 2.5\%$ на 10^{11} фотон $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$) для $\text{OH}(6-2)$.

Ранее данные эмиссионных наблюдений на Звенигородской научной станции анализировались в работах [Pertsev and Perminov, 2008; Dalin et al., 2020]. Пересчет отклика эмиссий на изменения потока солнечного радиоизлучения (10.7 см), определенный в [Pertsev and Perminov, 2008], в единицы отклика на излучение Лайман-альфа дает их завышенные значения по сравнению с настоящими в 1.4–1.7 раза (68.1 ± 12.4 Рл/ 10^{11} фотон $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$ для $\text{O}_2\text{A}(0-1)$ и 130.0 ± 19.6 Рл/ 10^{11} фотон $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$ для $\text{OH}(6-2)$), но они находятся в хорошем согласии со значениями отклика при рас-

смотрении регрессий (4) и (5). Отклик, показанный в [Dalin et al., 2020], был установлен отдельно для зимнего и летнего периода. Их средние значения (67.5 Рл/ 10^{11} фотон $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$ для $\text{O}_2\text{A}(0-1)$ и 103.5 Рл/ 10^{11} фотон $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$ для $\text{OH}(6-2)$) также хорошо согласуются с полученными значениями отклика в выражениях (4) и (5).

Одно из наиболее детальных исследований отклика эмиссий области мезопаузы на изменения солнечной активности выполнено Gao et al. [2016]. На основе спутниковых данных TIMED/SABER для излучения гидроксидла они показали зависимость солнечного отклика от широты с сильной полушарной асимметрией: наибольшие значения отклика – в южном полушарии. Характерным для обоих полушарий является то, что наибольшие значения отклика наблюдаются на границах исследованной широтной зоны: 50°S ($10\text{--}11\%$ на 10^{11} Л α -фотон $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$) и 50°N ($8\text{--}9\%$ на 10^{11} Л α -фотон $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$). Указанные значения отклика являются результатом пересчета коэффициентов линейной регрессии зависимости от солнечного радиоизлучения (10.7 см). Полученный в нашей работе отклик гидроксидного излучения на солнечную активность (10.5% на 10^{11} фотон $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$) свидетельствует о его некотором дальнейшем увеличении с ростом широты. Однако этот рост, по-видимому, неодинаков по сезонам и может иметь обратный знак. Так, исследования с помощью модели LIMA, выполненные для низких, средних и высоких широт, показывают уменьшение солнечного отклика излучения гидроксидла с ростом широты для зимних условий и увеличение для весенних и летних условий [Sonnemann et al., 2015]. Причем на широте $\sim 51^\circ \text{N}$ наибольший отклик прогнозируется для лета и наименьший – для зимы. Объяснить это можно было бы тем, что одной из основных причин изменения интенсивности эмиссий являются изменения содержания атомарного кислорода в области мезопаузы. Летние условия способствуют образованию атомов кислорода за счет более длительного процесса фотолиза молекулярного кислорода под воздействием солнечного УФ-излучения. Однако результатам работы [Sonnemann et al., 2015] противоречат наблюдения на Звенигородской станции, из которых следует, что зимний отклик больше летнего на 40% [Dalin et al., 2020]. По-видимому, первичным среди причин сезонности солнечного отклика эмиссий мезопаузы является не прямое воздействие УФ-излучения Солнца, а возможные изменения в процессах, обуславливающих динамику атмосферы, которые в свою очередь связаны с уровнем солнечной активности. В этой связи становятся актуальными исследования многолетнего хода активности волн различных временных и пространственных масштабов (см., например,

[Перминов и др., 2014; Perminov et al., 2014; Reisin et al., 2014; Popov et al., 2020]).

4.2.3. Зависимость от магнитного поля Солнца

В настоящей работе помимо отклика излучения области мезопаузы на 11-летний цикл солнечной активности получена его зависимость от магнитного поля Солнца, имеющего 22-летнюю периодичность (цикл Хейла). В качестве параметра магнитного поля Солнца взята его силовая характеристика – индукция полярного магнитного поля. Коэффициенты такой линейной зависимости составляют 61.5 ± 11.8 Рл/100 μ T ($23.2 \pm 4.5\%$ на 100 μ T) для $O_2A(0-1)$ и 85.7 ± 25.1 Рл/100 μ T ($12.1 \pm 3.5\%$ на 100 μ T) для $OH(6-2)$. Причем данные коэффициенты становятся статистически значимыми только при запаздывании изменений интенсивности эмиссий мезопаузы от изменений магнитного поля Солнца на 2.5 г. Следует отметить, что введение в регрессионную модель (6) зависимости от магнитного поля Солнца оказывает значительную коррекцию отклика эмиссий на изменения солнечного Лайман-альфа излучения. Вследствие этого становится затруднительно сравнивать результаты, полученные здесь и ранее в других исследованиях, в которых, как правило, рассматривалась только зависимость от 11-летнего цикла солнечной активности.

Ранее зависимость характеристик области мезопаузы от уровня магнитного поля Солнца рассматривалась в работах [Höppner and Bittner, 2007; Kalicinsky et al., 2016]. В [Höppner and Bittner, 2007] была проанализирована активность планетарных с 1981 по 2005 год по спектральным наблюдениям температуры гидроксильного излучения в Вуппертале (Германия). В результате было показано ее хорошее согласие с многолетними изменениями солнечного магнитного поля. Позднее Kalicinsky et al. [2016], анализируя более длинный ряд этих же измерений температуры в Вуппертале, показали, что многолетний температурный тренд в области мезопаузы испытывает эволюцию, которая возможно вызвана 22-летней цикличностью солнечного магнитного поля. Возможный механизм воздействия магнитного поля Солнца на область мезопаузы через его влияние на вращение Земли был предложен в [Höppner and Bittner, 2007], однако он нуждается в экспериментальной проверке и модельном обосновании.

4.2.4. Квазивосьмилетняя осцилляция

Амплитуда обнаруженной квазивосьмилетней осцилляции составляет 17.7 ± 5.9 Рл ($6.7 \pm 2.2\%$) для $O_2A(0-1)$ и 33.3 ± 12.9 Рл ($4.7 \pm 1.8\%$) для $OH(6-2)$. Подобная вариация была отмечена в работе [Reid et al., 2014]. Авторы данной работы провели анализ 15-летних наблюдений интенсивности эмиссий атомарного кислорода (линия 557.7 нм) и гидроксила (полоса $OH(8-3)$, 730 нм) вблизи Аделаиды (Австралия). На спектрах вариаций эмиссии гидроксила они обнаружили статистически значимой осцилляцию с периодом ~ 3000 сут (~ 8.2 г.). На подобных спектрах для эмиссии атомарного кислорода данная осцилляция не была выделена, по-видимому, из-за мощного сигнала, вызванного откликом эмиссии на 11-летнее колебание солнечной активности. Reid et al. [2014] не найдя физической основы для возникновения осцилляции с таким периодом в области мезопаузы, не стали уделять внимание ее анализу. Однако вариации с периодами, близкими к 8 годам, были выделены в различных климатических данных, связанных с наблюдениями температуры и давления вблизи земной поверхности. Так, Plaut et al. [1995], проанализировав 335-летний температурный ряд для центральной части Англии, идентифицировали колебания с периодом 7–8 лет. В дальнейшем вариации с подобным периодом были выделены в различных климатических данных для регионов Европы, Северной Атлантики и Средиземноморья [Paluš and Novotna, 1998, 2004; Gamiz-Fortis et al., 2002; Kondrashov et al., 2005; Feliks et al., 2010]. Недавно Jajcaj et al. [2016] показали, что колебания с периодом 7–8 лет могут оказывать модулирующий эффект на амплитуды более высокочастотных вариаций. Возможно данный эффект на приливы стал причиной наблюдаемых в настоящей работе 8-летних осцилляций интенсивности эмиссий верхней атмосферы.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По спектральным наблюдениям собственного излучения области мезопаузы на Звенигородской научной станции получены интенсивности полос $O_2A(0-1)$ и $OH(6-2)$ для полуночных условий в период 2000–2019 гг. На их основе установлено следующее.

1. Сезонный ход эмиссий характеризуется четырьмя гармониками, амплитуды которых наибольшие для эмиссии молекулярного кислорода. Вариации интенсивности полосы излучения молекулярного кислорода опережают соответствующие вариации интенсивности полосы гидроксила на 5–18 сут. Амплитуды гармоник составляют 8–25% для $O_2A(0-1)$ и 6–8% для $OH(6-2)$ от средних значений интенсивности эмиссий за наблюдаемый период.

2. Линейный тренд интенсивности эмиссий в течение 2000–2019 гг. имеет отрицательные значения и составляет $-3.3 \pm 0.3\%$ в год для молекулярного кислорода и $-2.6 \pm 0.2\%$ в год для гидроксила, что свидетельствует о противоположных процессах в динамике и энергетике в области мезопаузы.

зопазузы по сравнению с 1948–1980 гг., когда наблюдался положительный тренд в излучении гидроксидов.

3. Наряду со связью с 11-летним циклом солнечной активности (индикатор – поток солнечного излучения в линии Лайман-альфа) эмиссии излучения мезопазузы имеют зависимость от солнечной полярной магнитной индукции (22-летний цикл изменения магнитного поля Солнца). В первом случае отклик составляет $18.5 \pm 3.3\%$ на 10^{11} $L\alpha$ -фотон $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$ для $O_2A(0-1)$ и $10.5 \pm 2.5\%$ на 10^{11} $L\alpha$ -фотон $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$ для $OH(6-2)$. Во втором случае – соответственно $23.2 \pm 4.5\%$ на $100 \mu\text{T}$ и $12.1 \pm 3.5\%$ на $100 \mu\text{T}$.

4. Интенсивность излучения мезопазузы испытывает статистически значимые колебания с периодами ~ 8 лет. Их амплитуда составляет $6.7 \pm 2.2\%$ для $O_2A(0-1)$ и $4.7 \pm 1.8\%$ для $OH(6-2)$. Возможной причиной данных колебаний в области мезопазузы являются соответствующие климатические осцилляции в состоянии приземного слоя атмосферы.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 19-05-00358а.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Герасимова Н.Г., Яковлева А.В. Комплекс светосильных спектрографов с дифракционными решетками // Приборы и техника эксперимента. № 1. С. 86–95. 1956.
- Перминов В.И., Шефов Н.Н., Семенов А.И. Эмпирическая модель вариаций эмиссии Атмосферной системы молекулярного кислорода. 1. Интенсивность // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 47. № 1. С. 111–115. 2007.
- Перминов В.И., Перцев Н.Н. Сезонный и ночной ход эмиссий гидроксидов и Атмосферной системы молекулярного кислорода среднеширотной мезопазузы // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 50. № 4. С. 544–550. 2010.
- Перминов В.И., Семенов А.И., Медведева И.В., Перцев Н.Н. Изменчивость температуры в области мезопазузы по наблюдениям гидроксильного излучения на средних широтах // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 54. № 2. С. 246–256. 2014.
- Семенов А.И., Баканас В.В., Перминов В.И., Железнов Ю.А., Хомич В.Ю. Спектр излучения ночной верхней атмосферы Земли и ближней инфракрасной области // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 42. № 3. С. 407–414. 2002.
- Шефов Н.Н., Семенов А.И., Хомич В.Ю. Излучение верхней атмосферы – индикатор ее структуры и динамики. М.: ГЕОС, 740 с. 2006.
- Фишкова Л.М. Ночное излучение среднеширотной верхней атмосферы Земли. Тбилиси: Мецниереба, 272 с. 1983.
- 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>
- Feliks Y., Ghil M., Robertson A.W. Oscillatory climate modes in the Eastern Mediterranean and their synchronization with the North Atlantic Oscillation // J. Climate. V. 23. № 15. P. 4060–4079. 2010.
- Gao H., Xu J., Wu Q. Seasonal and QBO variations in the OH nightglow emission observed by TIMED/SABER // J. Geophys. Res. V. 115. A06313. 2010. <https://doi.org/10.1029/2009JA014641>
- Gao H., Xu J., Chen G.-M. The responses of the nightglow emissions observed by the TIMED/SABER satellite to solar radiation // J. Geophys. Res. – Space. V. 121. P. 1627–1642. 2016.
- Gamiz-Fortis S., Pozo-Vazquez D., Esteban-Parra M., Castro-Diez Y. Spectral characteristics and predictability of the NAO assessed through Singular Spectral Analysis // J. Geophys. Res. V. 107. 2002. <https://doi.org/10.1029/2001JD001436>
- Grygalashvyly M., Sonnemann G.R., Lübken F.-J., Hartogh P., Berger U. Hydroxyl layer: Mean state and trends at midlatitudes // J. Geophys. Res. – Atmos. V. 119. P. 12391–12419. 2014.
- Grygalashvyly M. Several notes on the OH* layer // Ann. Geophysicae. V. 33. № 7. P. 923–930. 2015. <https://doi.org/10.5194/angeo-33-923-2015>
- Höppner K., Bittner M. Evidence for solar signals in the mesopause temperature variability? // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 69. P. 431–448. 2007.
- Jajcay N., Hlinka J., Kravtsov S., Tsonus A.A., Paluš M. Time scales of the European surface air temperature variability: The role of the 7–8 year cycle // Geophys. Res. Lett. V. 43. P. 902–909. 2016.
- 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.
- Kondrashov D., Feliks Y., Ghil M. Oscillatory modes of extended Nile River records (A.D. 622–1922) // Geophys. Res. Lett. V. 32. L10702. 2005. <https://doi.org/10.1029/2004GL022156>
- Liu G., Shepherd G.G., Roble R.G. Seasonal variations of the nighttime O(1S) and OH airglow emission rates at mid-to-high latitudes in the context of the large-scale circulation // J. Geophys. Res. V. 113. A06302. 2008. <https://doi.org/10.1029/2007JA012854>
- Lomb N.R. Least-squares frequency analysis of unequally spaced data // Astrophys. Space Sci. V. 39. № 2. P. 447–462. 1976.
- Lopez-Gonzalez M.J., Rodriguez E., Wiens R.H. et al. Seasonal variations of O_2 atmospheric and OH(6-2) airglow and temperature at mid-latitudes from SATI observations // Ann. Geophysicae. V. 22. № 3. P. 819–828. 2004.
- Paluš M., Novotna D. Detecting modes with nontrivial dynamics embedded in colored noise: Enhanced Monte Carlo

- SSA and the case of climate oscillations // *Phys. Lett. A*. V. 248. № 2. P. 191–202. 1998.
- *Paluš M., Novotná D.* Enhanced Monte Carlo singular system analysis and detection of period 7.8 years oscillatory modes in the monthly NAO index and temperature records // *Nonlinear Processes Geophys.* V. 11. № 5–6. P. 721–729. 2004.
- *Plaut G., Ghil M., Vautard R.* Interannual and interdecadal variability in 335 years of central England temperature // *Science*. V. 268. P. 710–713. 1995.
- *Perminov V.I., Semenov A.I., Medvedeva I.V., Zheleznyu.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.
- *Popov A.A., Gavrilov N.M., Perminov V.I., Pertsev N.N., Medvedeva I.V.* Long-term changes in the mesoscale variations of hydroxyl rotational temperature near the mesopause at Tory and Zvenigorod // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 205. 105311. 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105311>
- *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.
- *Reid I.M., Spargo A.J., Woithe J.M.* Seasonal variations of the nighttime O(1S) and OH(8-3) airglow intensity at Adelaide, Australia // *J. Geophys. Res. – Atmos.* V. 119. P. 6991–7013. 2014.
- *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. Solar-Terr. Phys.* V. 119. P. 71–82. 2014.
- *Scargle J. D.* Studies in astronomical time series analysis. II. Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data // *Astrophys. J.* V. 263. P. 835–853. 1982.
- *Scheer J., Reisin E.R., Mandrini C.H.* Solar activity signatures in mesopause region temperatures and atomic oxygen related airglow brightness at El Leoncito, Argentina // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 67. P. 145–154. 2005.
- *Shefov N.N.* Hydroxyl emission of the upper atmosphere – I. The behavior during a solar cycle, seasons and geomagnetic disturbances // *Planet. Space Sci.* V. 17. P. 797–813. 1969.
- *Sonnemann G.R., Hartogh P., Berger U., Grygalashvily M.* Hydroxyl layer: trend of number density and intra-annual variability // *Ann. Geophysicae*. V. 33. № 6. P. 749–767. 2015.
- *Teiser G., von Savigny C.* Variability of OH(3-1) and OH(6-2) emission altitude and volume emission rate from 2003 to 2011 // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 161. P. 28–42. 2017.
- *Wiens R.H., Weill G.* Diurnal, annual and solar cycle variations of hydroxyl and sodium nightglow intensities in the Europe-Africa sector // *Planet. Space Sci.* V. 21. P. 1011–1027. 1973.