

Влияние короткопериодических вариаций солнечной активности на характеристики собственного излучения области мезопаузы

В.И. Перминов¹, Н.Н. Перцев¹, П.А. Далин^{2, 3}, В.А. Семенов¹, В.А. Суходоев¹,
И.В. Медведева^{1, 4}, Ю.А. Железнов⁵

¹*Институт физики атмосферы имени А. М. Обухова РАН, Москва, Россия*

²*Swedish Institute of Space Physics, Kiruna, Sweden*

³*Институт космических исследований РАН, Москва, Россия*

⁴*Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия*

⁵*Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Санкт-Петербург, Россия*

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящей работе с целью исследования влияния 27-суточной осцилляции солнечной активности анализируются наблюдения характеристик собственного излучения области мезопаузы, выполненные на Звенигородской научной станции (56° N, 37° E) Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (Москва) в 2000-2021 гг.

Поскольку термодинамический режим средней и верхней атмосферы в зимний и летний периоды различен и вследствие этого может более или менее восприимчив к влиянию солнечной активности. Настоящая работа в значительной степени направлена на выявление сезонности солнечного отклика в характеристиках излучения мезопаузы.

АНАЛИЗИРУЕМЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

В качестве характеристик собственного излучения области мезопаузы и индикатора солнечной активности были использованы следующие данные:

1. Интенсивности (I) полос излучения (0-1) 865 нм Атмосферной системы молекулярного кислорода (в дальнейшем $O_2A(0-1)$) и (6-2) 835 нм гидроксила ($OH(6-2)$), измеряемые в рэлях ($1 \text{ Рл} = 10^6 \text{ фотон см}^{-2} \text{ с}^{-1}$).
2. Вращательная температура (T) колебательно-возбужденного гидроксила (OH^*), определяемая по интенсивности первых трех линий Р1-ветви полосы $OH(6-2)$ в градусах Кельвина (К).
3. Поток солнечного излучения в линии Лайман-альфа 121.6 нм ($Ly-\alpha$) в единицах 1011 фотон $\text{см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, принятых за 1 *sfu* (solar flux unit).

Наблюдения полос излучения $O_2A(0-1)$ и $OH(6-2)$ ведутся на Звенигородской научной станции в ночное время с помощью светосильного спектрографа СП-50, оснащенного регистрирующей камерой с высокочувствительной ПЗС-матрицей (см. рис. 1). Время экспозиции спектра составляет 10 мин. Условия наблюдений и характеристики прибора позволяли определять интенсивности полос излучения с ошибкой измерения 5-6 рэлей, а вращательную температуру с точностью до 2 К. В ходе анализа полученные интенсивности эмиссий приводились к зенитным условиям.

Данные по потоку солнечного излучения в линии $Ly-\alpha$ взяты согласно LASP Interactive Solar Irradiance Data Center (<https://lasp.colorado.edu/lisird>).



Рис. 1. Спектрограф СП-50, с помощью которого ведутся регулярные наблюдения эмиссий ночного излучения области мезопаузы на Звенигородской научной станции

БАЗА АНАЛИЗИРУЕМЫХ ДАННЫХ

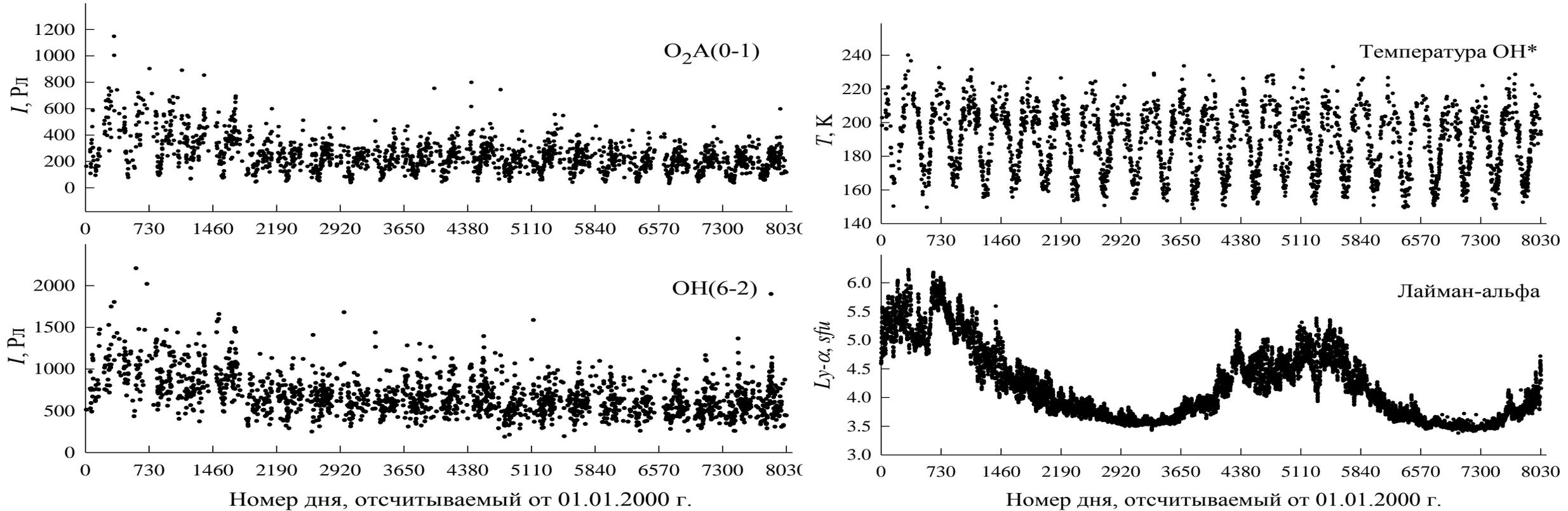


Рис. 2. Анализируемые данные для периода 2000-2021 гг. Каждое значение, показанное точками, является средним с 21 до 22 ч по всемирному времени (UT), т.е. около местной полуночи. Значения солнечного потока излучения в линии $Ly-\alpha$ относятся к 12:00 UT каждого дня. Значения характеристик излучения области мезопаузы были взяты либо только для ясных ночей, как в случае каждой интенсивности (1911 значений), либо для ясных и полублачных ночей, как в случае температуры (2456 значений).

АНАЛИЗ

Данные, показанные на графиках рис. 2, имеют значительные межсуточные, сезонные, межгодовые вариации и трендовые составляющие. В этом случае, чтобы провести анализ влияния короткопериодических изменений солнечной активности на характеристики атмосферного излучения, необходимо предварительно удалить многолетние и сезонные изменения из всех анализируемых рядов данных. Для этого из ряда $L\gamma\text{-}\alpha$ (рис. 2) было удалено бегущее 27-суточное среднее, что позволило оставить в остаточных данных только каррингтоновский цикл и его гармоники (см. рис. 3).

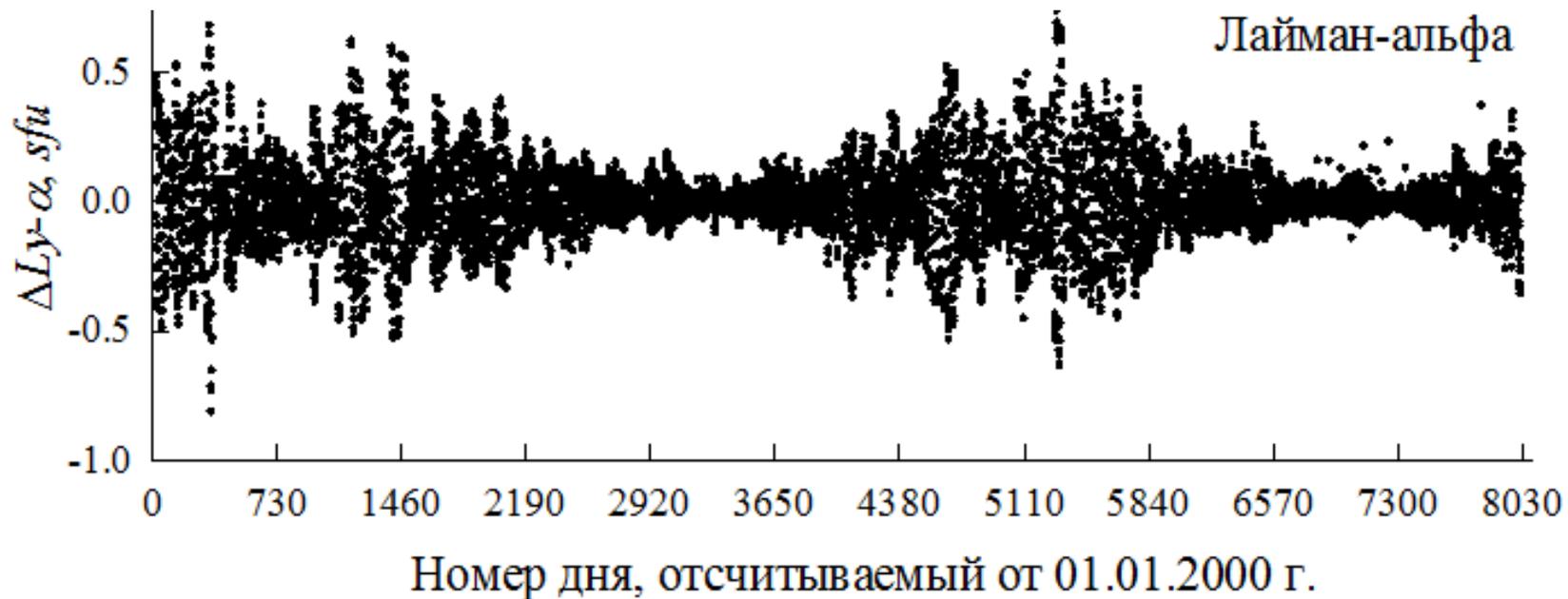
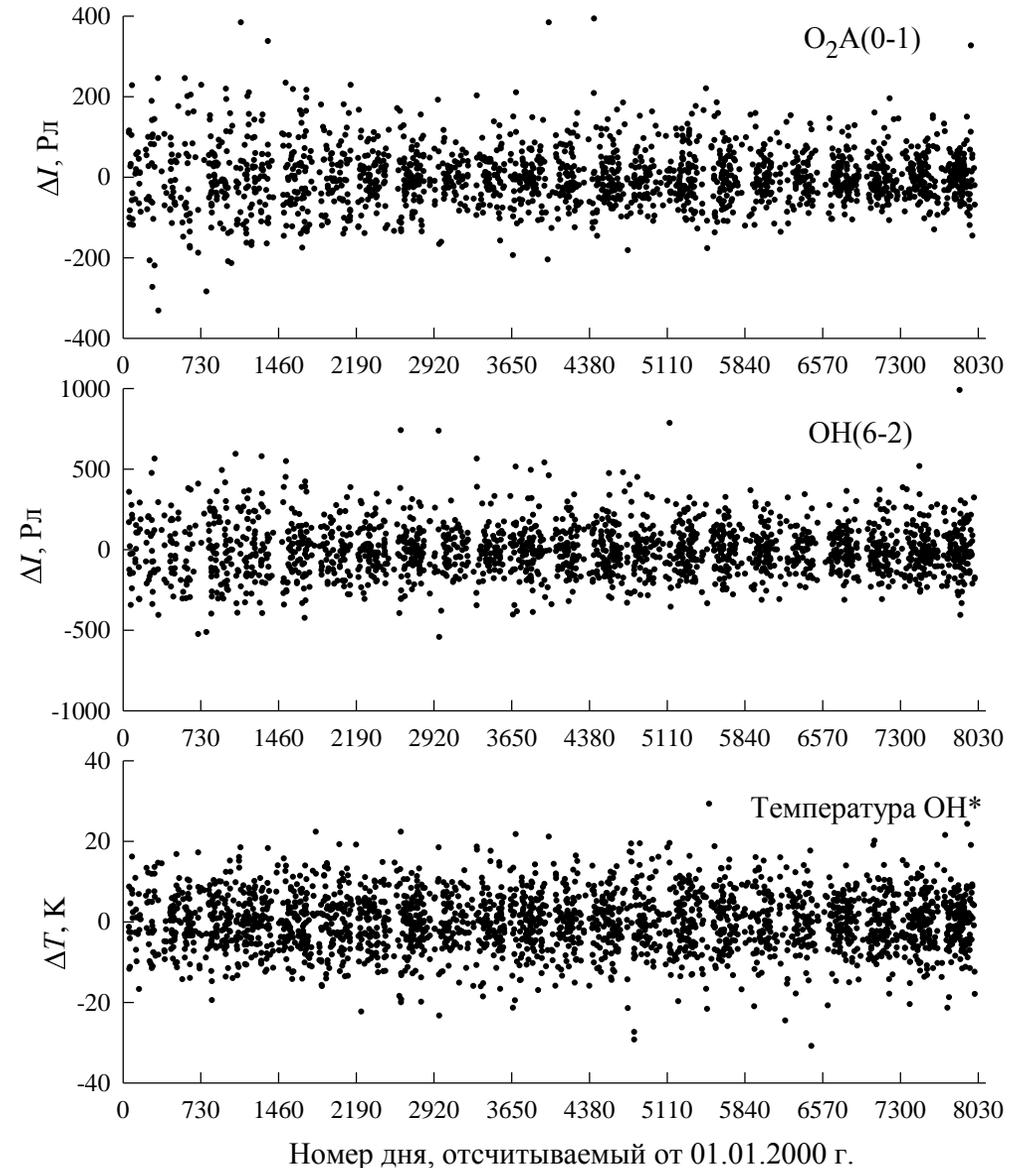


Рис. 3. Отклонения потока солнечного Лайман-альфа излучения ($\Delta L\gamma\text{-}\alpha$) от бегущего среднего 27-суточного значения.

АНАЛИЗ

Для определения отклонений ΔI и ΔT от долговременных изменений интенсивности эмиссий и температуры был использован подход с удалением статистически значимых гармоник годового хода, широко применяемого для анализа планетарных волн и их активности. Для всех интервалов времени с 1 января по 31 декабря и с 1 июля одного года по 30 июня последующего года методом множественной регрессии были определены значимые годовые гармоники: первые четыре для интенсивностей излучения и первые две для температуры OH^* . Гармоники, определенные по первому интервалу, вычитались из соответствующих рядов на временном отрезке с 1 апреля по 30 сентября, а гармоники, определенные по второму интервалу, - из данных, полученных с 1 октября по 31 марта. Такой подход дал возможность удалить из начальных рядов помимо основных внутригодовых гармонических вариаций также многолетний тренд и межгодовые вариации.

Рис. 4. Ряды полученных отклонений интенсивности (ΔI) эмиссий $\text{O}_2\text{A}(0-1)$ и $\text{OH}(6-2)$, а также температуры OH^* (ΔT).



АНАЛИЗ

- **Анализ** отклонений ΔI и ΔT был проведен **методом парной линейной регрессии** с применением сдвига временных рядов друг относительно друга на задаваемый временной промежуток (лаг, Δt), при котором определяется влияние солнечного потока Лайман-альфа на характеристику атмосферного излучения с некоторым запаздыванием (положительные значения Δt) или опережением (отрицательные значения Δt). Этот метод аналогичен кросс-корреляции, только здесь искомым параметром является коэффициент регрессии ($S_{Ly-\alpha}$).
- **Анализ** был выполнен как отдельно по сезонам, а именно для данных, полученных зимой и летом, так и для данных, полученных в течение всех сезонов года. Для зимнего периода были использованы данные с 1 октября по 31 марта, а для летнего – с 15 мая по 15 августа. На рис. 5 показаны результаты анализа.

РЕЗУЛЬТАТЫ ВЛИЯНИЯ 27-СУТОЧНОЙ СОЛНЕЧНОЙ ОСЦИЛЛЯЦИИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ ОБЛАСТИ МЕЗОПАУЗЫ

Летом коэффициент регрессии значим с вероятностью более 95% только для $O_2A(0-1)$. Зимой его значения значимы с такой же вероятностью для всех характеристик излучения мезопаузы. Без учета сезона он также высокосignificant для обеих полос излучения, но для температуры его статистическая значимость на уровне 90%. Поскольку вариации солнечной активности являются периодическими, то анализ в некоторых случаях показал наряду с положительными значениями коэффициента регрессии также отрицательные со сдвигом во временном лаге, близким к полупериоду солнечного колебания.

Рис. 5. Коэффициенты регрессии ($S_{Ly-\alpha}$) для лета (а, б, в), зимы (г, д, е) и среднее по всем сезонам (ж, з, и). Штриховая линия – 95%-уровень значимости.

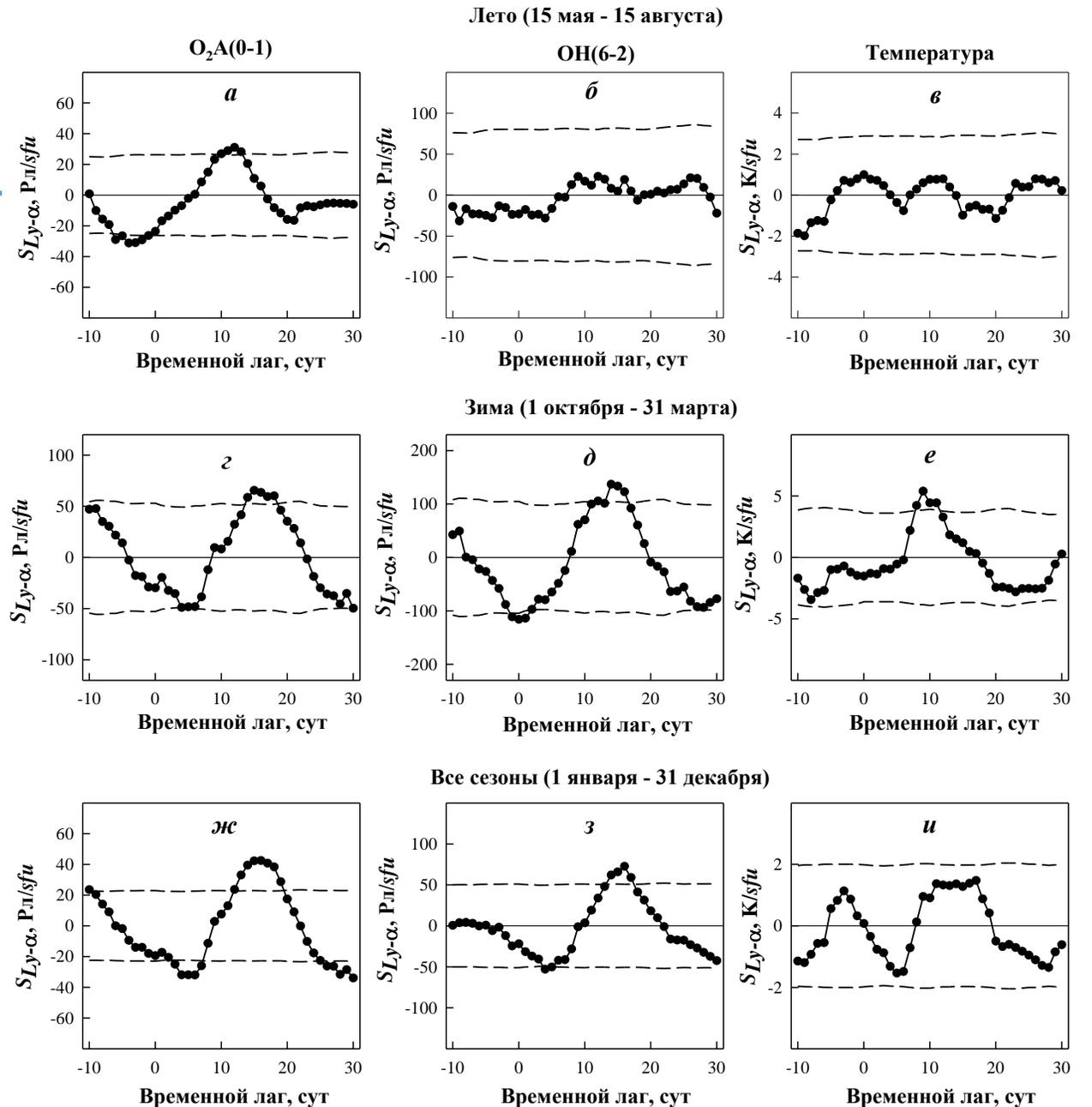


Табл. 1. Коэффициенты регрессии с наибольшей статистической значимостью в области положительных значений, показанных на рис. 5.

Характеристика атмосферного излучения	Коэффициент регрессии		Временной лаг Δt , сут
	$S_{Ly-\alpha}$, Рл/ <i>sfu</i> или К/ <i>sfu</i>	$S_{Ly-\alpha}$, %/ <i>sfu</i>	
Лето			
Интенсивность $O_2A(0-1)$	30.9±26.1	12.6± 10.6	12
Зима			
Интенсивность $O_2A(0-1)$	65.4±52.5	23.7±19.0	15
Интенсивность $OH(6-2)$	136.6±102.9	19.0±14.3	14
Температура OH^*	5.4±3.9	2.6±1.9	9
Все сезоны			
Интенсивность $O_2A(0-1)$	42.4±22.7	16.6±8.9	16
Интенсивность $OH(6-2)$	72.5±50.6	10.4±7.3	16
Температура OH^*	1.5±2.0	0.8±1.0	17

Значения в процентах даны относительно среднесезонных и среднегодовых значений характеристик атмосферного излучения. В качестве ошибки указан 95%-й доверительный интервал.

Механизмы влияния солнечной активности на эмиссии $O_2A(0-1)$ и $OH(6-2)$ и температуру мезопаузы

1. **Фотохимический механизм** заключается в том, что рост солнечного ультрафиолетового излучения ведет к изменению концентраций химического состава верхних слоев атмосферы и увеличению интенсивности экзотермических реакций, которые приводят к разогреву атмосферы. Согласно модельным исследованиям [Schmidt et al., 2006] этот механизм является основным в 11-летнем цикле солнечного влияния. Кроме того, при изменении концентраций химического состава происходит рост атомарного кислорода (за счет увеличения диссоциации O_2), что приводит к росту интенсивности излучения молекулярного кислорода и гидроксила. Вследствие этого должна наблюдаться синхронность вариаций солнечной активности и интенсивности атмосферного излучения.

2. **Динамический механизм.** В этом случае происходят изменения скорости вертикального и меридионального ветра, ответственного за пространственное перераспределение атомарного кислорода. Эти изменения, например, могут быть следствием модуляции амплитуд гармоник суточного прилива 27-суточной солнечной осцилляцией в нижних слоях атмосферы [Pancheva et al., 2003], либо следствием проникновения 27-суточных планетарных волн (типа Россби) из тропосферы, где они возникают из-за модуляции конвективной активности 27-суточной солнечной осцилляцией [Huang et al., 2015].

Huang K.M. et al. Ann. Geophysicae. V. 33. P. 1321-1330. 2015.

Pancheva D. et al. J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. V. 65. P. 1-19. 2003.

Schmidt H. et al. J. Climate. V. 19. P. 3903-3931. 2006.

Выводы

В результате анализа сделаны следующие выводы.

1. Для годовых данных положительные отклики (коэффициенты регрессии) составляют около $17 \text{ \%}/sfu$ для излучения молекулярного кислорода, $10 \text{ \%}/sfu$ для излучения гидроксила и $1.5 \text{ K}/sfu$ для температуры OH^* при временном лаге 16–17 сут.
2. Для зимнего периода значения откликов выше и составляют около $24 \text{ \%}/sfu$ и $19 \text{ \%}/sfu$ соответственно для излучения молекулярного кислорода и гидроксила при лагах 14–15 сут. Для температуры отклик достигает $5.4 \text{ K}/sfu$ при лаге 9 сут.
3. В летний период положительный отклик для излучения молекулярного кислорода ниже зимнего в ~ 2 раза и составляет около $13 \text{ \%}/sfu$ при лаге 12 сут.
4. Предполагается, что сезонные различия влияния солнечной активности обусловлены тем, что зимой доминирует динамический механизм, а летом вследствие конкуренции между фотохимическим и динамическим механизмами, действующими в противофазе, солнечный отклик ослабевает или становится незначимым.