

**БАЗА ДАННЫХ МНОГОЛЕТНИХ НАБЛЮДЕНИЙ ИЗЛУЧЕНИЯ ГИДРОКСИЛА И
МОЛЕКУЛЯРНОГО КИСЛОРОДА МЕЗОПАУЗЫ НА ЗВЕНИГОРОДСКОЙ
НАУЧНОЙ СТАНЦИИ**

В.И. ПЕРМИНОВ¹, Н.Н. ПЕРЦЕВ¹, П.А. ДАЛИН^{2,3}, Ю.А. ЖЕЛЕЗНОВ⁴, В.А. СУХОДОЕВ¹

¹ИНСТИТУТ ФИЗИКИ АТМОСФЕРЫ ИМ. А.М. ОБУХОВА РАН, МОСКВА, РОССИЯ

²ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ РАН, МОСКВА, РОССИЯ

³SWEDISH INSTITUTE OF SPACE PHYSICS, KIRUNA, SWEDEN

⁴ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОФИЗИКИ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ РАН, САНКТ-ПЕТЕРБУРГ, РОССИЯ

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время изменения характеристик области мезопаузы (80-100 км) являются предметом многих исследований верхней атмосферы Земли. Причинами изменений могут быть как гелиогеофизические факторы – солнечное радиационно-корпускулярное излучение и динамические процессы в атмосфере, так и эффект от антропогенного воздействия на окружающую среду. Одним из эффективных методов изучения области мезопаузы являются наблюдения эмиссий излучения ее атомов и молекул. Измерения интенсивности и спектральной структуры полос их излучения позволяют оценивать концентрации газовых компонентов и температуру. Исследования показывают, что характеристики излучения мезопаузы испытывают значительные пространственные и временные вариации. Последние представляют собой периодичности от нескольких минут, носящие, как правило, нерегулярный характер, до нескольких десятков лет.

Целью настоящей работы является представление базы данных измерений характеристик двух эмиссий, относящихся к собственному излучению мезопаузы: молекулярного кислорода (полоса A(0-1) Атмосферной системы $O_2(b^1\Sigma)$, 865 нм) и гидроксила (полоса (6-2) $OH(X^2\Pi)$, 840 нм). Спектральные наблюдения эмиссий ведутся на Звенигородской научной станции Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН.

СОБСТВЕННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ОБЛАСТИ МЕЗОПАУЗЫ

- Излучение гидроксила является наиболее мощным в свечении ночного неба. Интенсивность всех его колебательно-вращательных полос, располагающихся в спектральной области от 0.6 до 4.5 мкм, составляет около 1 МРл. Возбужденные молекулы $\text{OH}(X^2\Pi, \nu)$ возникают в результате озонородной реакции. Максимум их вертикального распределения приходится на высоту около 87 км и имеет толщину около 9 км.
- Излучение молекул $\text{O}_2(b^1\Sigma)$ представляет собой систему полос, называемую Атмосферной системой, которая возникает в результате рекомбинации атомарного кислорода в ночное время и дополнительно в дневное время в результате флуоресценции и фотолиза озона. Наиболее мощными среди полос Атмосферной системы являются полосы $A(0-0)$ 0.76 мкм и $A(0-1)$ 0.865 мкм. Однако вследствие самопоглощения в нижних слоях атмосферы только последняя из двух полос может наблюдаться с поверхности Земли. Ее интенсивность не превышает 1000 Рл. В ночное время слой излучения данной полосы имеет максимум вблизи 94 км и толщину около 10 км.

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ В ЗВЕНИГОРОДЕ



**Рис. 1. Спектрограф
СП-50**

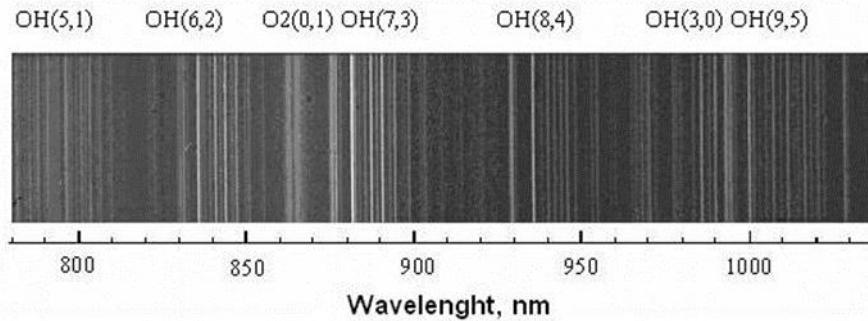


Рис. 2. Спектр ночного излучения неба в области 780-1040 нм

Измеряемые характеристики:

- Интенсивность полос O₂A(0-1) и OH(6-2) с точностью 5-6 рэлей (1 рэлей (Рл) – 10⁶ фотон см⁻² с⁻¹).
- Вращательная температура гидроксила с точностью 1-2 К.

Спектральные измерения собственного излучения области мезопаузы ведутся на Звенигородской станции (56°N, 37°E) на постоянной основе в ночное время. Для этих целей используется спектрограф СП-50 с регистрацией спектра на матричном приемнике. Спектральное разрешение в ближней инфракрасной области – 0.2-0.3 нм. Время накопления сигнала – 10 мин.

Детальное описание аппаратуры, методики наблюдений, обработки спектров и определения характеристик эмиссий гидроксила и молекулярного кислорода дано в (Семенов и др., 2002; Шефов и др., 2006; Pertsev and Perminov, 2008).

ДАННЫЕ ИЗМЕРЕНИЙ, ВОШЕДШИЕ В БАЗУ ДАННЫХ

- база пополняется на ежегодной основе. В настоящее время в нее вошли измерения с 2000 по 2019 г.;
- измерения взяты для временного интервала с 21 до 22 ч UT (т.е. около местной полуночи) и усреднены в его пределах;
- в базу вошли интенсивности полос только для ясных ночей. Всего таких ночей – 1663 (см. верхний и средний рисунки);
- температура измерялась по спектрам, полученным как при ясной погоде, так и при тонкой облачности. Всего таких ночей в базе – 2160 (см. нижний рисунок).

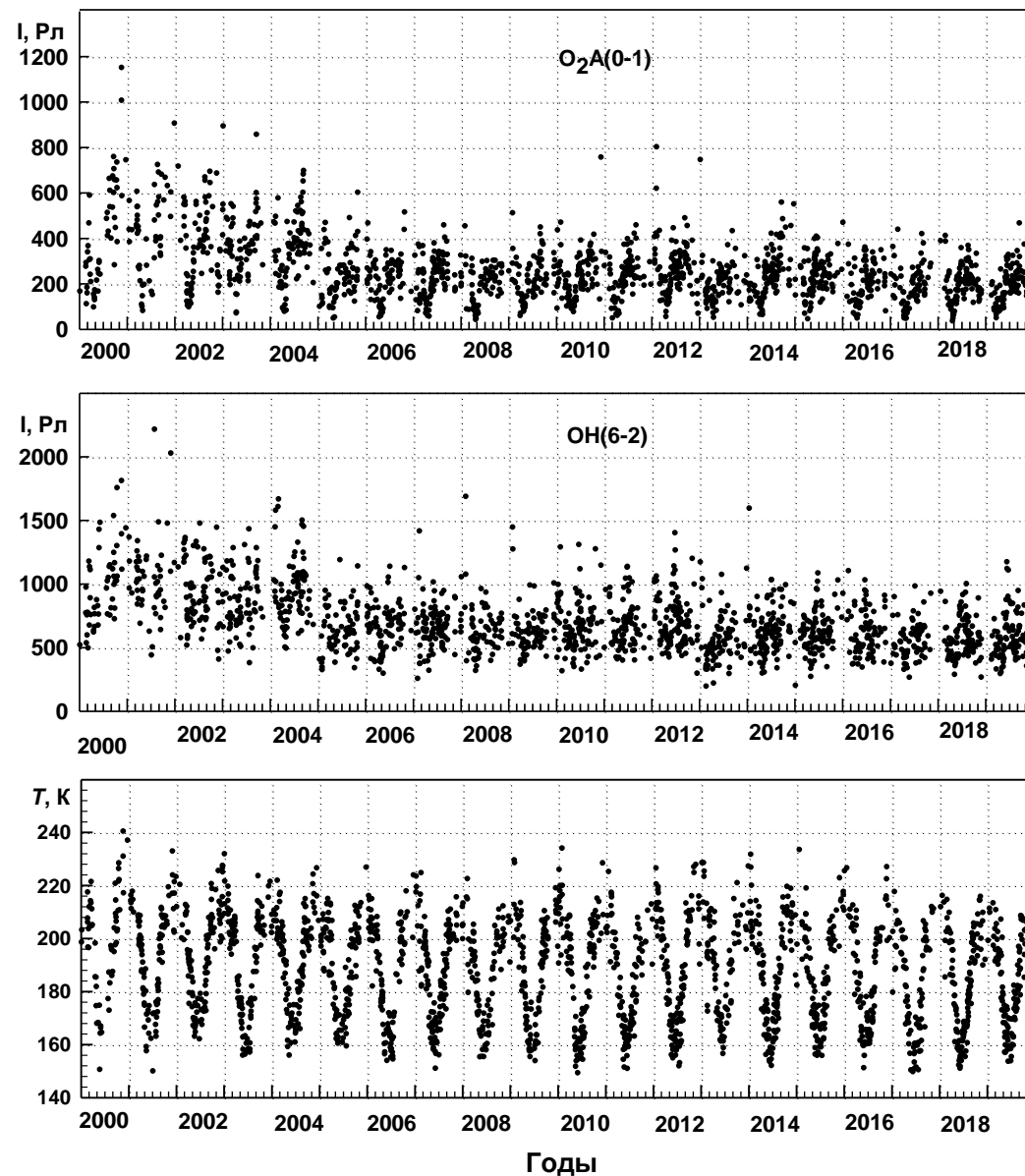


Рис. 3. Среднеполуночные (21-22 UT) значения интенсивности Полос $O_2A(0-1)$, $OH(6-2)$ и вращательной температуры гидроксила.

БАЗА ДАННЫХ В ИНТЕРНЕТЕ

База данных наблюдений характеристик собственного излучения мезопаузы доступна через пользовательский интерфейс в сети Интернет по веб-адресу:

http://ifaran.ru/lab/lfva/airglow_data_rus.html

The screenshot shows a web browser window displaying the website of the Institute of Physics of the Atmosphere (ИФА РАН). The browser's address bar shows the URL http://ifaran.ru/lab/lfva/airglow_data_rus.html. The website header features the logo of the Institute of Physics of the Atmosphere (ИФА РАН) and the text "Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова Российской академии наук".

The main content area is titled "Страницы лабораторий >> Лаборатория физики верхней атмосферы (ЛФВА)" and "Данные спектрофотометрических измерений свечения на Звенигородской научной станции ИФА им. А.М.Обухова РАН". Below the title, there is a brief description of the data: "Здесь приведены данные измерений гидроксильной температуры (файл MT.txt) и интенсивности свечения полосы гидроксила OH(6-2) и линии молекулярного кислорода O2A(0-1) (файл MAI.txt) с 2000 г. по настоящее время. Краткое описание методики измерений и комментарии к формату файлов с данными, а также необходимые ссылки и условия доступа к данным приведены в файле The_Airglow_Data_rus.pdf".

Below the text, there are links to download the data files: "The_Airglow_Data_rus (pdf)", "MT.txt", and "MAI.txt". Under the heading "Прикрепленные файлы", there are links to "MAI.txt", "MT.txt", and "The_Airglow_Data_rus.pdf".

The left sidebar contains a navigation menu with categories like "Об институте", "Новости", "Деятельность", "История", "Структура", "Контакты", "Дирекция", "Лаборатории", "Сотрудники", "Конкурсы вакансий ИФА РАН", "Профсоюз", "Фотогалерея", "Упоминания в СМИ", "СМУИС", "ФАНО", "Наука", "ГЕОПОЛИСАТ", "Семинары", "Экспедиции", "Проекты", "Публикации", "Аспирантура", "Библиотека", "Журнал ФАО", "Конкурсы и гранты", and "Конференции и школы".

The right sidebar contains an "АВТОРИЗАЦИЯ" section with login and password fields, a "Войти" button, and a "Регистрация" link. Below it is a section titled "УПОМИНАНИЯ В СМИ" with several news items, including "Климатолог РАН: За последние 100 лет май стал теплее больше чем на три градуса // Агентство городских новостей 'Москва' 28.05.2019" and "При каких условиях в Москву могут прийти смерчи: рассказывает метеоролог // Вечерняя Москва 28.05.2019".

**Направления исследований, ведущихся на основе базы данных измерений эмиссий,
в основном связаны с изучением области мезопаузы и включают:**

- [Внутрисуточные и межсуточные изменения](#), которые возникают вследствие распространения планетарных волн в верхних слоях атмосферы, влияния лунных гравитационных приливов, межсуточных вариаций солнечной активности и других нерегулярных гелиогеофизических явлений.
- [Сезонные вариации](#). Тепловой баланс области мезопаузы контролируется радиационными и динамическими процессами, среди которых особую роль играют внутренние гравитационные волны (ВГВ). Сезонные изменения в структуре ВГВ оказывают существенное влияние на меридионально-вертикальную циркуляцию, что приводит к адиабатическому расширению и охлаждению мезопаузы летом и ее сжатию и разогреву зимой. Обнаружено, что хотя сезонный ход имеет регулярный характер, в его поведении проявляются межгодовые изменения и тенденции к многолетней эволюции.
- [Межгодовые и долговременные изменения](#). Для понимания климатических изменений и влияния антропогенного воздействия на атмосферу область мезопаузы привлекает пристальное внимание. Многие процессы в нижележащих слоях имеют значительный отклик в данной области атмосферы.

Ниже представлены некоторые результаты анализа базы данных по интенсивности эмиссий и вращательной температуры гидроксила.

Сезонные вариации

Как видно на рис. 3, интенсивность эмиссий и вращательная температура испытывают значительные изменения на протяжении всего многолетнего периода наблюдений - от трех десятков до тысячи рэлей в случае $O_2A(0-1)$, от двух сотен до двух тысяч рэлей в случае $OH(6-2)$ и от 150 до 240 К в случае температуры. Среди них выделяются регулярные сезонные вариации. Анализ спектра вариаций показал, что высоко значимыми являются первые четыре гармоники. Их средние характеристики были оценены методом множественной регрессии. При вычислении ряды эмиссионных данных аппроксимировались суммой гармоник

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

где A_0 – нулевая гармоника, A_i и f_i – амплитуда и фаза первого максимума i -ой гармоники, t – порядковый номер суток, отсчитываемый с 1 января 2000 г. Результаты аппроксимации представлены в таблице 1.

Таблица 1. Гармоники сезонных вариаций. В качестве ошибки указано стандартное отклонение среднего.

Гармоника, i	Эмиссия $O_2A(0-1)$		Эмиссия $OH(6-2)$		Температура	
	A_i , Рл	f_i , сут	A_i , Рл	f_i , сут	A_i , К	f_i , сут
0	265.2±3.3	-	710.7±6.2	-	192.0±0.2	-
1	65.6±4.6	302.4±4.1	53.3±9.8	321.8±9.4	24.0±0.3	354.3±0.6
2	35.1±4.4	31.8±3.9	52.6±9.2	17.2±5.1	6.8±0.3	80.3±1.1
3	20.8±4.6	40.5±4.1	44.8±9.4	52.3±3.7	1.4±0.3	110.1±3.4
4	36.9±4.2	76.4±1.7	58.1±8.5	85.8±2.1	2.2±0.3	85.2±1.7

Многолетний тренд и отклик характеристик излучения мезопаузы на 11-летний цикл солнечной активности

Многолетний линейный тренд и зависимость от солнечной активности оценены методом множественной регрессии с применением модельного выражения:

$$S_{\text{ср}} = S_0 + A_{\text{тр}}(t - 2000) + A_{\text{сол}}(Ly\alpha - 4.5),$$

где $S_{\text{ср}}$ – среднегодовое значение интенсивности (или температуры), S_0 – среднее значение исследуемого параметра для 2000 г., приведенное к условиям средней солнечной активности, t – время (годы), $Ly\alpha$ – среднегодовой поток солнечного излучения Лайман-альфа (в единицах 10^{11} фотон $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$), взятый в качестве индикатора солнечной активности, $A_{\text{тр}}$ – линейный тренд (Рл (или К)/год), $A_{\text{сол}}$ – отклик на изменения солнечного излучения (Рл (или К)/ 10^{11} фотон $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$). Параметры (значения в табл. 2) характеризуются отрицательным линейным трендом и положительным откликом на 11-летние изменения солнечной активности.

Таблица 2. Результаты регрессионного анализа многолетнего линейного тренда и зависимости от солнечной активности.

Эмиссия	A_0 , Рл или К	$A_{\text{тр}}$, Рл (или К)/год	$A_{\text{сол}}$, Рл (или К)/ 10^{11} фотон $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$
O₂A(0-1)	357.2±12.3	-6.6±1.3	73.5±11.8
ОН(6-2)	893.0±21.7	-15.4±2.2	106.4±20.9
T	193.8±0.4	-0.1±0.4	2.4±0.4

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- 1. Создана база полуночных данных по многолетним измерениям интенсивностей полос $O_2A(0-1)$ и $OH(6-2)$, а также вращательной температуре излучающего гидроксила, на Звенигородской научной станции.**
 - 2. На ее основе показаны статистически значимые сезонные вариации характеристик эмиссий.**
 - 3. Статистически значимыми являются отрицательные линейные тренды интенсивностей исследуемых эмиссий и температуры излучения гидроксила мезопаузы.**
 - 4. Отклик всех характеристик эмиссий мезопаузы на 11-летние изменения солнечной активности является положительным.**
-

Литература

- 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 аэронавигация. 2002. Т. 42. № 3. С. 407-414.
- Шефов Н.Н., Семенов А.И., Хомич В.Ю. Излучение верхней атмосферы – индикатор ее структуры и динамики / М. ГЕОС, 2006. 741 с.
- Pertsev N., Perminov V. Response of the mesopause airglow to solar activity inferred from measurements at Zvenigorod, Russia // Annales Geophysicae. 2008. V.26. No.5. P.1049-1056.