

Влияние геомагнитной активности на температуру субавроральной мезопаузы над Якутией

А.М. Аммосова, П.П. Аммосов, Г.А. Гаврильева, И.И. Колтовской

Институт космofизических исследований и аэрoнoмии им. Ю. Г. Шафера СО РАН, г. Якутск

С 1999 г. ведутся регулярные наблюдения свечения эмиссии гидроксила полосы (6,2) на станции Маймага (63°с.ш., 129,5°в.д.) инфракрасным цифровым спектрографом. Ранее были исследованы остаточные вращательные температуры ОН(6,2) после учета их сезонной составляющей. Было выявлено, что максимум в рядах остаточных температур запаздывает на 25 месяцев относительно максимума потока радиоизлучения Солнца с длиной волны 10,7 см. Для нахождения возможных причин временного запаздывания была проведена оценка влияния геомагнитной активности на температуру субавроральной мезопаузы. В статье рассмотрено 2229 средненочных значений вращательной температуры, удовлетворяющих критериям выборки. Для анализа использовался индекс A_p , который косвенно зависит от характеристики солнечного ветра. Для оценки связи вращательной температуры ОН(6,2) с геомагнитной активностью был проведен кросскорреляционный анализ. Коэффициент корреляции составляет $R=0,44$ при количестве измерений $n=130$. Можно сделать вывод, что найденная корреляция между среднемесячными остаточными температурами ОН(6,2) и среднемесячными значениями индекса A_p с 1999 по 2013 г. является достоверной.

Ключевые слова: геомагнитная активность, субавроральная мезопауза, ОН(6,2).

The Influence of Geomagnetic Activity on the Subauroral Mesopause Temperature over Yakutia

A.M. Ammosova, P.P. Ammosov, G.A. Gavrilyeva, I.I. Koltovskoi

Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy SB RAS, Yakutsk

Regular observations of the hydroxyl emission band (6,2) were carried out at the Maimaga station (63°N, 129,5°E) since 1999. Measurements were conducted with an infrared spectrograph. The monthly average residuals of ОН(6,2) temperature after the subtraction of the mean seasonal variation were studied earlier. The residual temperature maximum follow peak of Ottawa 10.7 cm flux with 25 months delay was found. The effect of geomagnetic activity on the subauroral mesopause temperature was evaluated to find the possible reasons for the time lag. The rotational temperature data set comprises 2229 nightly averages which pass selection criteria. For the analysis was used A_p index, which is indirectly dependent on the characteristics of the solar wind. The cross-correlation analyses showed connection between ОН(6,2) rotational temperature with the geomagnetic activity. The correlation coefficient $R = 0.44$ with a number of measures $n=130$. It can be concluded that the correlation between monthly average residuals of ОН(6,2) temperature and monthly average of A_p index is significant for period from 1999 to 2013.

Key words: geomagnetic activity, subauroral mesopause, ОН(6,2).

АММОСОВА Анастасия Михайловна – м.н.с., Ammosovaam@mail.ru; АММОСОВ Петр Петрович – к.ф.-м.н., с.н.с., ammosov@ikfia.ysn.ru; ГАВРИЛЬЕВА Галина Алексеевна – н.с., gagavrilyeva@ikfia.ysn.ru; КОЛТОВСКОЙ Игорь Иннокентьевич – м.н.с., koltik@ikfia.ysn.ru.

Введение

Еще на заре исследования свечения ночного неба Красовским В.И. было предсказано, что геомагнитные возмущения могут влиять на состав и температуру верхней атмосферы [1]. В работе [2] было показано, что интенсивность эмиссии и вращательная температура молекулы гидроксила реагируют на геомагнитную активность. Известно, что полная солнечная радиация колеблется в течение 11-летнего цикла активности всего на 0,1%, в то время как излучение в ультрафиолетовой области изменяется до 5–8% [3]. В максимуме солнечной активности усиленный ультрафиолет поглощается в верхней атмосфере другими атомами и молекулами кислорода, озона и нагревает окружающую среду за счет экзотермических химических реакций [4]. Дополнительным каналом передачи энергии от Солнца к Земле могут являться геомагнитные возмущения, сопровождающиеся прямым проникновением энергичных корпускулярных частиц, в первую очередь протонов [5] и ускоренных в магнитосфере электронов, в атмосферу. В последние десятилетия появились многочисленные работы, указывающие влияние 11-летней активности Солнца на динамику и температуры термосферы и даже тропосферы [6]. В качестве меры геомагнитной активности обычно используют индекс Ap, который косвенно зависит от характеристики солнечного ветра. Ap достигает максимума примерно через два года после максимума солнечной активности [5]. В работе [7] было показано, что отклик температуры атмосферы на высоте излучения гидроксила (ОН) на 11-летний солнечный цикл доходит до 7 К при смещении температурного ряда на 2 года назад относительно максимума солнечного цикла. Целью настоящей статьи является поиск возможного механизма зарегистрированного отклика температуры субаврооральной мезопаузы на солнечный цикл.

Аппаратура и методика измерения

Мезопауза – это область атмосферы, где мезосфера граничит с термосферой (80–100 км) и находится температурный минимум. Излучающий слой ОН находится примерно на высоте 87 км, т.е. в области мезопаузы. Возбужденная молекула гидроксила до излучения совершает $2 \cdot 10^4$ с⁻¹ столкновений [4], что достаточно для термализации с окружающей средой. Таким образом принято считать, что вращательная температура ОН, вычисленная по спектрам ночного неба, равна температуре нейтральной атмосферы на высоте мезопаузы.

В статье приведены результаты анализа данных о вращательной температуре ОН(6,2), по-

лученных инфракрасным цифровым спектрографом, созданным соавторами [8]. Прибор установлен на оптической станции Маймага (63°с.ш., 129,5°в.д.), которая расположена в 150 км к северу от г. Якутска. Наблюдения проводились в ночное время, при угле погружения Солнца $>9^\circ$, в безоблачную погоду. Для анализа выбирались данные, полученные в безлунное время и при отсутствии сияний. Метод оценки вращательной температуры молекулярной эмиссии основан на подгонке модельных спектров, построенных с учетом аппаратной функции прибора для различных заранее заданных температур, к реально измеренному спектру методом наименьших квадратов. Модельный спектр, отклонение которого от реального не превышает шума регистрации, считается наиболее соответствующим действительности и что вращательная температура молекулы гидроксила, которая определяется по спектру, соответствует температуре на высоте мезопаузы.

Как показывают оценки, случайные ошибки измерения температуры лежат в пределах 2–5 К в зависимости от уровня отношения сигнал/шум. Калибровка инфракрасного спектрографа проводится два раза в год с помощью газоразрядной лампы (Ne). В данной статье анализируются вращательные температуры полосы ОН(6,2), измеренные с 1999 по 2013 г. Как было указано в различных исследованиях, в зависимости от применяемых значений спектральных параметров вращательная температура может отличаться до 12 К [9]. Поэтому, начиная с 1999 г., для оценки вращательной температуры используются одни и те же вращательные вероятности перехода Mies [10].

Съемки спектра ночного неба ведутся с середины августа до середины мая. Наиболее длинные ночные ряды данных регистрируются в зимние месяцы. Количество измерений в месяц варьирует от 10 до 25 ночей.

Результаты

Определенное влияние на сезонный ход в области мезопаузы может оказывать динамический режим, определяющий перенос малых составляющих. Не последнюю роль играет турбулентное перемешивание, обуславливающее вертикальный перенос. Так как Солнце является основным поставщиком энергии, поступающим в атмосферу, то изменения состояния верхней атмосферы тесно связаны с вариациями распределения суммарного радиационного поступления тепла в атмосферу. Зависимость параметров верхней атмосферы от сезонного хода с максимальными скоростями нагрева и охлаждения на летнем и зимнем полушариях определяется солнечной активностью.

В нашей статье рассмотрено 2229 средненочных значений температуры, удовлетворяющих критериям выбора. Для получения значений гармоник сезонного хода был рассмотрен весь временной ряд вращательной температуры гидроксидной полосы (6,2) за 14 лет путем нахождения сезонных вариаций средненочных температур. На рис. 1 показаны сезонные колебания средненочных температур ОН(6,2). Сезонные изменения могут быть представлены в виде суммы годовой, полугодовой и третьгодовой гармоник. Зная значение этих гармоник, можно вычлесть сезонную составляющую из временных рядов температуры гидроксидной.

Сезонные вариации температуры можно представить в виде суммы 3 гармоник: годовой, полугодовой и третьгодовой, которые определяются методом наименьших квадратов:

$$T = A_0 + A_1 \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{365,25} \cdot (d - \varphi_1)\right) + A_2 \cdot \cos\left(\frac{4 \cdot \pi}{365,25} \cdot (d - \varphi_2)\right) + A_3 \cdot \cos\left(\frac{6 \cdot \pi}{365,25} \cdot (d - \varphi_3)\right),$$

где A_0 – средняя температура для каждого года; A_1, A_2, A_3 – три компоненты сезонного хода температуры и их фазы $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$; d – номер дня, за 1-й день берется 1 августа.

Значение средней температуры оценивается в 188 К, амплитуды годовой, полугодовой и третьгодовой гармоник составляют 28,6 К (максимум на 312-й день), 10,6 К (максимум на 350-й день) и 3 К (максимум на 361-й день) соответственно.

Ранее в работе [7] были исследованы остаточные вращательные температуры ОН(6,2), измеренные на станции Маймага с 1999 по 2013 г., после вычитания их сезонной составляющей. Было выявлено, что максимум в рядах остаточных температур запаздывает на 25 месяцев относительно максимума потока радиоизлучения Солнца с длиной волны 10,7 см (индекс F10,7). Индекс F10,7 (в единицах $10^{-22} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{Гц}^{-1}$), который излучается на частоте 2800 МГц (длина волны 10,7 см), характеризует условия в солнечной короне и имеет высокую корреляцию с коротковолновым ультрафиолетовым излучением.

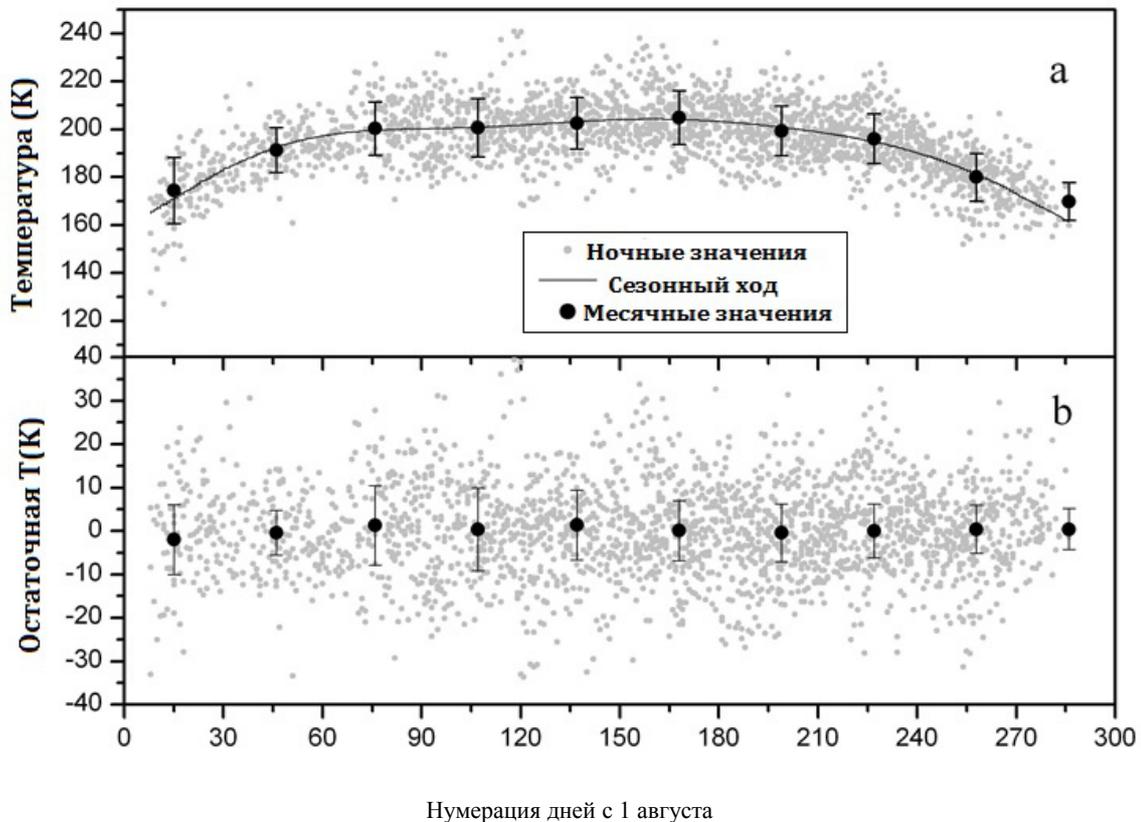


Рис. 1. Сезонные колебания средненочных температур ОН(6,2): а – сплошной линией показана подгонка годовой, полугодовой и третьгодовой гармоник; б – остаточные значения температуры, полученные после учета сезонной компоненты, вертикальной линией показаны стандартные отклонения

ВЛИЯНИЕ ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ НА ТЕМПЕРАТУРУ СУБАВРОРАЛЬНОЙ МЕЗОПАУЗЫ

ем Солнца. Однако следует учесть, что измерения температуры мезопаузы проводились на субавроральной станции, где влияние Солнца на температуру не ограничивается только световой радиацией, необходимо также учитывать вклад геомагнитной активности. Рост отклика температуры мезопаузы при смещении на 2 года

относительно солнечного цикла составляет до 7 К, указывает на предположительную связь с геомагнитной активностью. Известно, что геомагнитная активность достигает максимума, спустя примерно 2 года от максимума солнечного цикла.

На рис. 2 показаны среднемесячные остаточные температуры ОН(6,2) после вычитания се-

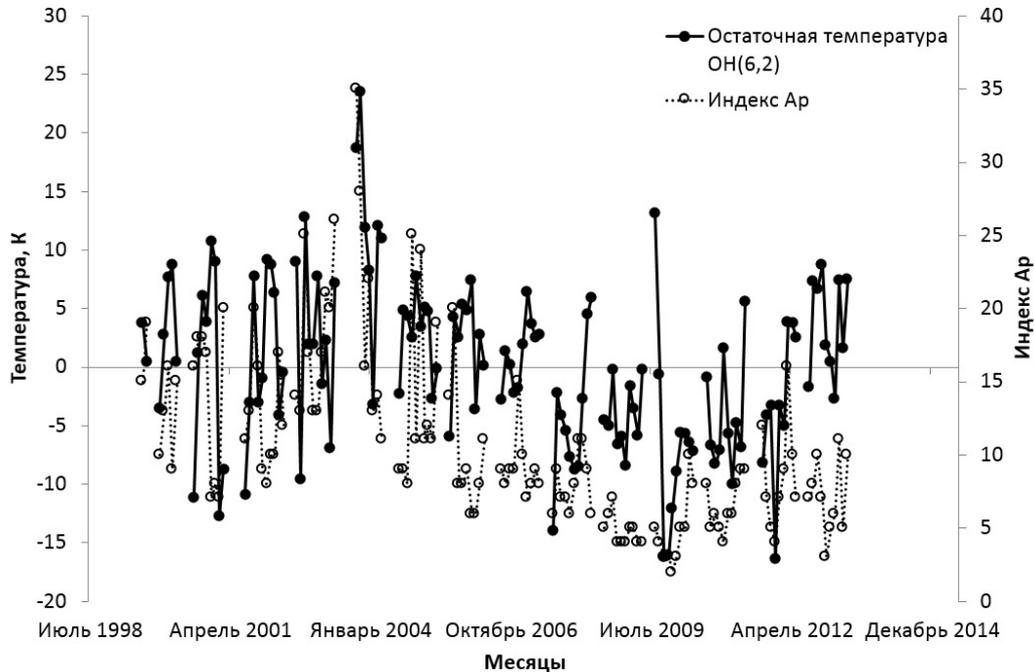


Рис. 2. Остаточные температуры ОН(6,2) и индекс Ap с 1999 по 2013 г.

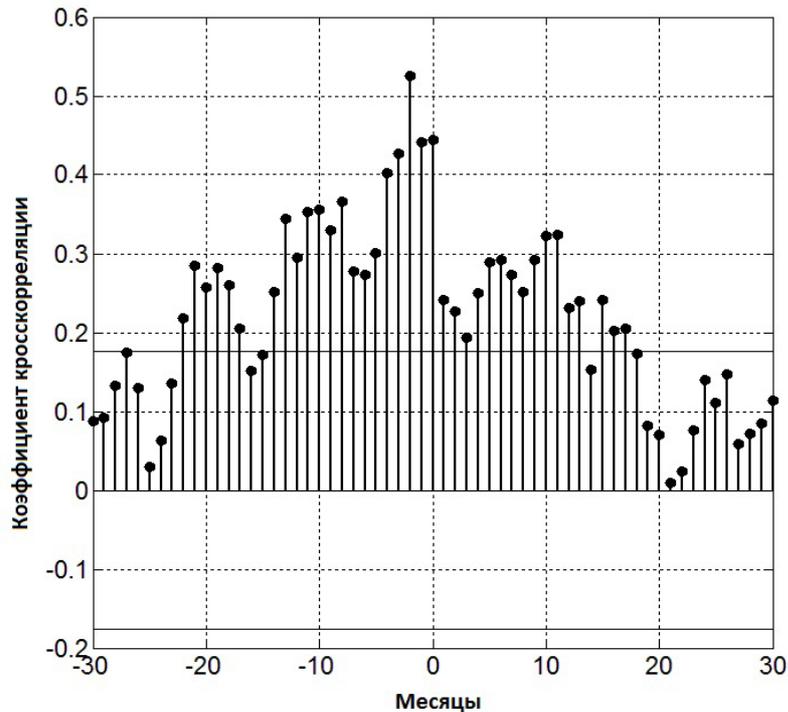


Рис. 3. Кросскорреляционная функция для остаточной температуры после учета сезонного хода с индексом Ap

зонной компоненты и среднемесячные значения индекса Ap.

Для выявления корреляции геомагнитной активности и вращательной температуры OH(6,2) использовались среднемесячные значения остаточных температур гидроксила и среднемесячные значения линейного индекса Ap. Индекс Ap является усредненным планетарным индексом геомагнитной активности, получаемый как среднеарифметическое из восьми Kp-индексов, характеризующих колебания горизонтальной составляющей магнитного поля Земли, измеряемые каждые 3 часа магнитометрами в нескольких точках Земного шара за прошедшие сутки. Следует уточнить, что для нахождения среднемесячных значений индекса Ap была сделана выборка среднесуточных значений, в которую попали только те дни, во время которых проводились наблюдения свечения эмиссии гидроксила.

Для оценки связи вращательной температуры OH(6,2) с геомагнитной активностью был проведен корреляционный анализ. На рис. 3 представлена кросскорреляция среднемесячной остаточной температуры с среднемесячным значением индексом Ap.

Коэффициент корреляции составляет $R=0,44$ при уровне 95% доверительного интервала 0,18. Можно сделать вывод, что найденная корреляция является достоверной.

Выводы

По наблюдениям свечения эмиссии гидроксила с 1999 по 2013 г. на станции Маймага было найдено 2229 средненочных значений вращательной температуры гидроксила. По результатам кросскорреляционного анализа между среднемесячными остаточными температурами OH(6,2) после учета сезонного хода и среднемесячных значений индекса Ap выявлено влияние геомагнитной активности на температуру субавроральной мезопаузы. Обнаружена статистически достоверная положительная корреляция между индексом геомагнитной активности Ap и температурой мезопаузы после учета сезонного хода, которая может указывать, что одним из основных источников нагрева субавроральной мезопаузы является геомагнитная активность. *Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов №*

16-35-00121 мол_а, № 16-35-00204 мол_а, № 15-05-05320 А.

Литература

1. *Krassovsky V.I.* Infra-red night airglow as manifestain of the process of oxygen recombination // *The airglow and Aurora.* London and N.Y.: Pergamon Press., 1956. 193 p.
2. *Шефов Н.Н.* Поведение гидроксильной эмиссии в течение солнечного цикла, сезонов и геомагнитных возмущений // *Полярные сияния и свечение ночного неба.* М.: Наука, 1973. С. 23–39.
3. *Lean J.L., Rottman G.J., Kyle H.L., Woods T.N., Hickey J.R., Puga L.C.* Detection and parameterization of variations in solar mid and near-ultraviolet radiation (200 – 400 nm) // *J. Geophys. Res.* 1997. V.102. P. 29939–29956.
4. *Шефов Н.Н., Семенов А.И., Хомич В.Ю.* Изучение верхней атмосферы-индикатор ее структуры и динамики. М.: ГЕОС, 2006. 741 с.
5. *Funke B., Lopez-Puertas M., Stiller G. P., T. von Clarmann.* Mesospheric and stratospheric NOy produced by energetic particle precipitation during 2002–2012 // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2014. V. 119. P. 4429–4446. doi:10.1002/2013JD021404.
6. *Gray L. J., Beer J., Geller M., Haigh J. D., Lockwood M., Matthes K., Cubasch U., Fleitmann D., Harrison G., Hood L., Luterbacher J., Meehl G. A., Shindell D., B. van Geel, White W.* Solar influences on climate // *Rev. Geophys.* 2010. V. 48. RG4001, doi:10.1029/2009RG000282.
7. *Ammosov P., Gavrielyeva G., Ammosova A., Koltovskoi I.* Response of the mesopause temperatures to solar activity over Yakutia in 1999–2013 // *Advances in Space Research.* 2014. V. 54. P. 2518–2524. doi:10.1016/j.asr.2014.06.007.
8. *Аммосов П.П., Гаврильева Г.А.* Инфракрасный цифровой спектрограф для измерения вращательной температуры гидроксила // *Приборы и техника эксперимента.* 2000. №6. С. 792–797.
9. *Greet P.A., French W.J.R., Burns G.B., Williams P.F.B., Lowe R.P., Finlayson K.* OH(6,2) spectra and rotational temperature measurements at Davis. Antarctica // *Ann. Geophys.* 1998. V.16. P. 77–89.
10. *Mie F.H.* Calculated vibrational transition probabilities of OH(X2A) // *J. Mol. Spectrosc.* 1974. V. 53. P.150–180.

Поступила в редакцию 21.11.2016