

# Особенности влияния солнечной активности на температуру высокоширотной мезопаузы над Якутией в 23 цикле

АММОСОВА А. М., АММОСОВ П. П., ГАВРИЛЬЕВА Г. А., КОЛТОВСКОЙ И. И.  
Институт Космофизических Исследований и Аэронавтики им.Ю.Г. Шафера СО РАН,  
г.Якутск, Россия  
e-mail: ammosovaam@mail.ru ammosov@ikfia.sbras.ru gagavrilyeva@ikfia.sbras.ru  
koltigor@mail.ru

## Аннотация

Представлен анализ изменения температуры области мезопаузы на основе измерения вращательной температуры  $OH(6,2)$  в зависимости от солнечной активности. Наблюдения проводились на станции Маймага ( $63.04^\circ N$ ,  $129.51^\circ E$ ) на период с августа 1999 года по март 2013 года. Измерения ведутся инфракрасным цифровым спектрографом. Средне-месячные остатки температуры после вычитания сезонной климатической составляющей были использованы для поиска солнечной составляющей в температурном отклике. Линейная регрессия остаточных температур дает отклик на солнечную активность равный  $4.2K/100$  солнечных потоков единиц (SFU). Кросскорреляционный анализ показал, что изменения остаточной температуры отстают за изменениями солнечной активности с задержкой в 25 месяцев. Отклик температуры на влияние 11-летнего солнечного цикла при задержке в 25 месяцев достигает  $7K/100$  SFU.

## Введение

По сведениям Всемирной метеорологической организации, средняя глобальная температура воздуха, являющаяся очень чувствительной мерой климатических изменений, повысилась в приземном слое на  $0.3-0.6$  K за последние 100 лет. При этом скорость потепления за последние три десятилетия заметно превышает среднее значение скорости за столетие. Согласно теоретическим работам положительный тренд температуры в нижней атмосфере должен сопровождаться отрицательным трендом температуры в средней и верхней атмосфере [Акмаев et al., 2006]. Тщательный обзор работ, связанных с исследованием многолетних изменений температуры на высоте мезопаузы был сделан в работе [Beig 2011]. Исследование отклика температуры атмосферы на антропогенное воздействие маскируется изменениями, вызываемыми вариациями солнечной активности и волновыми процессами различной природы. Поэтому при оценке трендов температуры атмосферы на различных высотах важным условием является длительность рядов измерений, охватывающих хотя бы один 11-летний солнечный цикл. Целью данной работы является переоценка влияния солнечной активности на температуру высокоширотной мезопаузы [Гаврильева и Аммосов, 2002] и выявление возможного тренда температуры измеренной инфракрасным спектрографом с августа 1999 по май 2013 годы.

## Описание прибора и база данных

В данной работе приведены результаты анализа данных о температуре мезопаузы полученных инфракрасным спектрографом, изготовленным на базе решетчатого спектрографа СП – 50. Прибор установлен на оптической станции Маймага ( $63^\circ N$ ,  $129,5^\circ E$ ), который расположен 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. Одним и тем же прибором

регистрируется один и тот же параметр вращательная температура молекулы гидроксила. С 1999 и по настоящее время для регистрации спектра на выходе спектрографа используется цифровая ПЗС камера, что позволяет использовать для оценки вращательной температуры полностью весь спектр [Аммосов и Гаврильева, 2000]. Как показывают оценки, случайные ошибки измерения температуры лежат в пределах 2-10К в зависимости от уровня отношения сигнал/шум. Съемки спектра ночного неба ведутся только с середины августа до конца апреля.

Температура области мезопаузы подвержена многочисленным гелиогеофизическим воздействиям: сезонные изменения, вариации солнечной активности, распространения планетарных, приливных и внутренних гравитационных волн, квазидвухлетние колебания атмосферы, внезапные стратосферные потепления и извержения вулканов. Влияние приливных и внутренних гравитационных волн можно уменьшить, используя средние ночные температуры. Сезонные изменения могут быть представлены в виде суммы годовой, полугодовой и третьей годовой гармоник. Зная значение этих гармоник, возможно вычесть сезонную составляющую из временных рядов температуры ОН. На рисунке 1(а) сплошной линией показана подгонка годовой, полугодовой и третьей годовой гармоник с амплитудами 28,6 К (максимум на 312 день), 10,6 К (максимум на 350 день) и 3 К (максимум на 361 день) соответственно.

### Анализ влияния солнечной активности

В работе рассмотрено 2229 средне ночных значений температуры, удовлетворяющие критериям выбора. Внезапные стратосферные потепления обусловлены взаимодействием планетарных волн со стратосферным ветром и их продолжительность порядка от 15 до 30 дней. Для уменьшения влияния планетарных волн, в дальнейшем рассматриваем среднемесячные значения температуры. Для анализа данных использовался критерий Фишера (F-критерий). В таблице 1 приведены рассчитанные значения  $F_{calc}$  и критические значения  $F_{crit}$  для уровня значимости  $p=0.05$ . Оценка коэффициента регрессии является статистически значимой при  $F_{calc} > F_{crit}$ .

Таблица 1. Коэффициенты регрессии, 95% доверительный интервал, F-тест и вероятность (p) для линейной модели, включающей остаточные значения температуры (T) и солнечный индекс F10.7 во временных интервалах ( $F_{crit}=3.9$ )

Временной интервал, нумерация месяцев с января 1999	Отклик на солнечный цикл				Долгосрочный тренд			
	К/100 SFU	95% доверительный интервал	$F_{calc}$	p	К/десятилетие	95% доверительный интервал	$F_{calc}$	p
8 <T< 173 8<F10,7< 173	4,24	(1,49 6,98)	9,35	0,0027	-2,11	(-5,10 0,87)	1,95	0,1647
8<T<173 -17<F10,7<148	7,11	(4,66 9,56)	33,02	<0,0001	0,51	(-2,27 3,29)	0,13	0,7186
33 <T<173 8<F10,7<148	7,79	(5,41 10,17)	42,12	<0,0001	2,04	(-1,20 5,28)	1,55	0,2157

На рисунке 3 (а) и (b) показаны остаточные среднемесячные значения температуры и среднемесячные значения потока радиоизлучения F10.7. Рисунок 3 (d) показывает

зависимость остаточных температур от солнечного индекса F10.7. Значение коэффициента отклика на вариации солнечной активности равно 4,24 K/100SFU. На рисунке 3 (с) представлены остаточные температуры после снятия сезонного хода и влияния солнечной активности. Линия регрессии соответствует возможному температурному тренду 2,11K/десятилетие, однако, это значение является статистически незначимым ( $F_{calc} < F_{crit}$ ). На рисунке 3 (с) хорошо видно, что после снятия влияния солнечной компоненты, зависимость остаточной температуры от индекса F10.7 все еще остается. Поэтому результат проведения кросскорреляционного анализа среднемесячных остаточных температур и среднемесячных значений F10.7, рассчитанного с шагом в 1 месяц, приведен на рисунке 5. Максимальная корреляция наблюдается при условии опережения индекса F10.7 значения температуры области мезопаузы на 25 месяцев. На основании кросскорреляционного анализа можно сделать вывод, что температура на высоте свечения слоя ОН реагирует на изменения солнечной активности с задержкой около 2 лет.

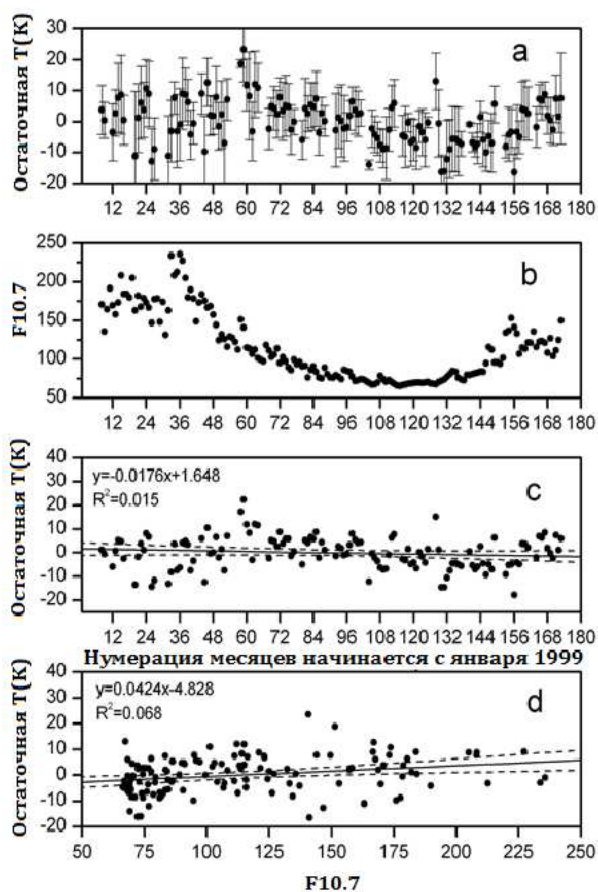


Рис. 3. (а) Среднемесячные остаточные значения температуры, показаны со стандартными отклонениями, (б) среднемесячные значения солнечного индекса F10.7, (с) остаточные температуры, после снятия влияния солнечной активности, (д) зависимость остаточных температур от значений солнечного индекса F10.7.

На рисунке 4 показано сравнение остаточных температур с значениями индекса F10.7, полученных с апреля 1997 года, т.е. за 25 месяцев до начала постоянных измерений полосы ОН(6,2) на станции Маймага. Результат кросскорреляционного анализа среднемесячных остаточных температур и среднемесячных значений F10.7, полученных с июля 1997 года показаны на рисунке 4, на котором не существует запаздывания между временными рядами. В данном случае температурный отклик на солнечную активность возрастает до 7,1 K/100SFU, представлен на рисунке 4 (д). Положительный температурный тренд, полученный при помощи остаточных температур после снятия сезонного хода и влия-

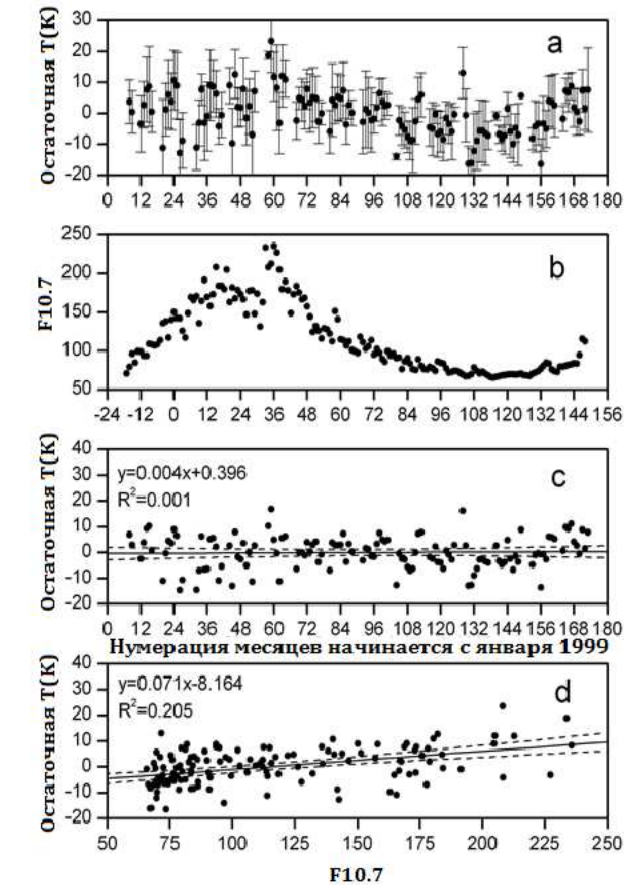


Рис. 4. Все также как на рис 3, но для остаточных температур с августа 1999 по март 2013 года и значений F10.7 с июля 1997 по апрель 2011 года

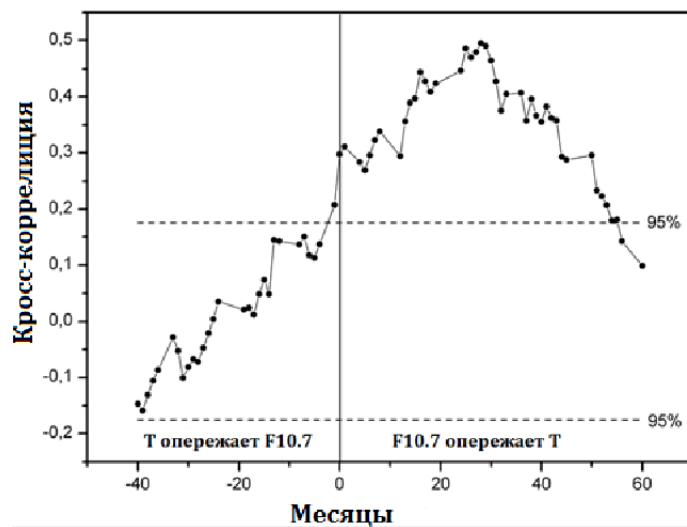


Рис. 5. Кросс-корреляционная функция для остаточной температуры и солнечного индекса F10.7.

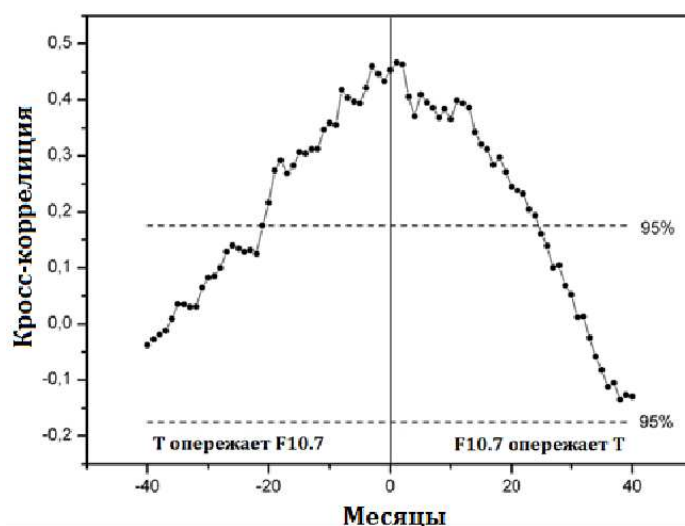


Рис. 6. Кросс-корреляционная функция для остаточной температуры и солнечного индекса F10.7, полученных с апреля 1997 года.

ния 11-летнего солнечного цикла представлен на рисунке 4 (с). В двух случаях значения тренда являются статистически незначимыми ( $F_{calc} < F_{crit}$ ), эти результаты отражены в таблице 1.

### Обсуждение и выводы

Несмотря на широкий разброс оценки различных исследователей влияния солнечной активности на температуру области мезопаузы, большинство значений варьируются в пределах 2-5 K/100SFU. В работе [French and Klekociuk, 2011] обнаружили запаздывание температуры на станции Дэвис, Антарктида ( $69^\circ \text{S}$ ,  $78^\circ \text{E}$ ) от солнечного потока на 160 дней. Авторы объяснили данный феномен краткосрочным ростом температуры в 2002 году в связи со внезапным стратосферным потеплением. Конечно, временная задержка на 25 месяцев гораздо продолжительней, чем запаздывание, полученное на Антарктиде.

Поскольку линия регрессии, указывающие на наличие температурного тренда, не являются статистически значимыми, невозможно утверждать о наличии температурного тренда в области мезопаузы. В обзоре многочисленных исследований температурных трендов в верхних слоях атмосферы [Lastovicka et al., 2012] пришли к выводу, что в области мезопаузы не наблюдается температурный тренд. Вероятно, дальнейшие исследования с ростом базы данных позволит выявить статистически значимый температурный тренд.

Корреляционный анализ показал, что изменение температуры по отношению к изменению солнечного индекса F10.7 происходит с запаздыванием в 25 месяцев. Отклик температуры на солнечную активность возрос с 4 K/100SFU до 7 K/100SFU при смещении изменения солнечного индекса на 25 месяцев. Значение температурного тренда после снятия сезонного хода и влияния солнечной активности является статистически незначимым.

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. Akmaev, R.A., Fomichev, V.I., Zhu, X., 2006. Impact of middle atmospheric composition changes on greenhouse cooling in the upper atmosphere. *J. Atmos. Solar Terr. Phys.* 68, 1879–1889.

2. Beig, G., 2011. Long-term trends in the temperature of the mesosphere/lower thermosphere region: 2. Solar response. *J. Geophys. Res.* 116, A00H12. <http://dx.doi.org/10.1029/2011JA016766>.
3. Гаврильева Г.А., Аммосов П.П. Сезонные вариации температуры мезопаузы над Якутском (63 ° N, 129.5 ° E) // *Геомагнетизм и аэрономия*. Т. 42. № 2. С. 279–283. 2002.
4. Аммосов П.П., Гаврильева Г.А. Инфракрасный цифровой спектрограф для измерения вращательной температуры гидроксила // *Приборы и техника эксперимента*. Т. 43. № 6. С. 792–797. 2000.
5. French, J.W.R., Klekociuk, A.R., 2011. Long-term trends in Antarctic winter hydroxyl temperatures. *J. Geophys. Res.* 116, D00P09. <http://dx.doi.org/10.1029/2011JD015731>.
6. Lastovicka, J., Solomon, S.C., Qian, L., 2012. Trends in the neutral and ionized upper atmosphere. *Space Sci. Rev.* 168, 113–145. <http://dx.doi.org/10.1007/s11214-011-9799-3>