

Временные вариации температуры средней атмосферы над регионом юга Восточной Сибири по спутниковым данным MLS Aura

М.А. Черниговская

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

E-mail: cher@iszf.irk.ru

В работе анализируются временные и высотные вариации температуры средней атмосферы (верхней тропосферы, стратосферы и мезосферы) за период с августа 2004 г. по август 2012 г. для региона Иркутска (52° с. ш., 104° в. д.), измеренной СВЧ зондом MLS (Microwave Limb Sounder), установленным на борту космического аппарата EOS Aura. Рассматриваются суточные, межсуточные и сезонные вариации температуры для высотных уровней порядка 11, 50 и 80 км. Отмечается сильная суточная и межсуточная изменчивость температуры на всех рассматриваемых высотных уровнях. Вариации температуры в течение суток проявляются в большинстве случаев в виде понижения температуры ночью по сравнению с дневными значениями. Особенно четко это различие отмечается на высотах верхней мезосферы. Отдельно были проанализированы временные вариации температуры и высоты стратосферы и мезосферы, в которых также отмечаются сезонная, суточная вариации и межсуточная изменчивость. В сезонном ходе температуры наблюдается четкая годовая вариация. Путем усреднения данных для каждого дня года за исследуемый период получены среднегодовые вариации температуры на заданных высотах. На основе анализа высотно-временных распределений температуры для каждого месяца рассматриваемого временного периода выявлены особенности сезонных вариаций температуры средней атмосферы. Отмечается сильное (разговорный стиль) различие степени изменчивости температуры атмосферы на высотах стратосферы для летних и зимних условий. Причина этого различия, возможно, связана с тем, что на высотах стратосферы в исследуемом регионе юга Восточной Сибири каждую зиму наблюдаются внезапные стратосферные потепления – аномальные потепления воздуха в стратосфере, составляющие десятки градусов, при которых температура может иногда превосходить летний максимум.

Ключевые слова: нижняя и средняя атмосфера, ионосфера, взаимодействие слоев атмосферы.

Введение

Температура атмосферы является ключевым параметром в радиационном балансе атмосферы, определяющим или влияющим на многие параметры (например, плотность, скорости химических реакций) и процессы (динамические, химические, перенос тепла). В последнее время исследования температурного режима приземного слоя, а также средней (область высот примерно от 10 до 120 км) и верхней атмосферы, получили особую актуальность в связи с широко обсуждаемой проблемой глобальных изменений климата. По данным Всемирной метеорологической организации, которая приводит климатические характеристики, как минимум, на основе 30-летнего ряда данных, в последнее столетие идет неуклонный рост средней глобальной температуры поверхности Земли и воздуха в приземном слое. Последнее десятилетие – одно из самых жарких за всю историю наблюдений за климатическими изменениями. Глобальная температура поверхности Земли в этот период была примерно на $0,45$ градусов выше среднего за 1961–1990 гг. показателя в $14,2^\circ\text{C}$, а средняя глобальная температура воздуха в приземном слое повысилась на $0,74^\circ\text{C}$ за последние 100 лет (Solomon et al., 2007).

В последние годы в связи с этой проблемой особое внимание специалистов привлекает исследование состояния средней и верхней атмосферы. Это обусловлено, с одной стороны, реальной возможностью катастрофических последствий антропогенного изменения химического состава атмосферы в целом, примером чего является истощение озонового слоя. С другой стороны, согласно теоретическим исследованиям, глобальные изменения термического и динамического режимов вследствие увеличивающегося притока парниковых газов сильнее проявляются в верхних слоях атмосферы, чем в приземном слое (Шефов и др., 2006).

При постановке задачи изучения атмосферы Земли как единой системы большое значение имеет вертикальное распределение температуры атмосферы. Средняя атмосфера простирается от тропопаузы до нижней термосферы, целиком включая стратосферу и мезосферу. Верхняя граница средней атмосферы в итоге определяется турбопаузой (или гомопаузой), отделяющей нижнюю, перемешанную вследствие турбулентности, часть атмосферы от верхней, контролируемой процессами молекулярной диффузии. Выше этой границы простирается верхняя атмосфера.

Методы вертикального зондирования атмосферы разнообразны (Гайгеро́в, 1973): с помощью радиозондов; оптическое – лучом лазера, с помощью спектрофотометров; акустическое – звуком; радиолокационное; ракетное; спутниковое. Поскольку наземные методы зондирования атмосферы дают лишь 20% информации, необходимой для метеорологического и климатического прогноза погоды (Кондратьев, Тимофеев, 1978), оставляя почти неохваченными обширные океанические, приполярные и горные районы, важнейшую роль играет зондирование атмосферы с помощью искусственных спутников Земли, дающих возможность сбора информации над всеми регионами земного шара. К важным достижениям космического дистанционного зондирования относится оперативное определение поля вертикальных профилей земной атмосферы (химический состав, ветер, влажность, температура и др.) (Кашкин, Сухинин, 2001).

С развитием и усовершенствованием методов дистанционного зондирования атмосферы, и особенно спутникового зондирования, возобновился интерес исследователей к изучению пространственно-временной структуры температуры атмосферы на различных высотных уровнях. Опубликовано множество работ, в которых анализируются периодичности различных временных масштабов (от внутренних гравитационных волн, приливов и планетарных волн до полугодовых, годовых, квазидвухлетних и т.д.) (States, Gardner, 2000; Wang et al., 2000; Svoboda et al., 2005; Huang et al., 2006; Forbes, Wu, 2006; Jacobi, Kürschner, 2006), ведутся работы по выявлению многолетних трендов температуры земной атмосферы как в нижней атмосфере (тропосфере), так и средней атмосфере (стратосфере и мезосфере) (Ramaswamy et al., 2001; Gavrilyeva, Ammosov, 2002; Veig et al., 2003; Перминов, Семенов, 2007; Artigas, Campa, 2011; Криволицкий, Репнев, 2012; Данилов, 2012).

Целью данной работы было исследование временных и высотных вариаций температуры средней атмосферы за период с августа 2004 г. по август 2012 г. для региона Иркутска (52° с. ш., 104° в. д.) по спутниковым данным.

Используемые данные

Для анализа использовались данные спутниковых измерений температуры атмосферы, полученных сканирующим СВЧ зондом MLS (Microwave Limb Sounder), установленным на борту космического аппарата EOS Aura, работающего на орбите с июля 2004 г. (приводятся на сайте <http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/Aura/>).

Спутник имеет солнечно-синхронную орбиту с периодом порядка 100 мин (~15 пролетов в сутки) и высотой 705 км. Пространственный охват почти глобален (от -82° до $+82^\circ$ по широте). Вертикальные профили измеряются с интервалом ~25 с через каждые $1,5^\circ$ (~165 км) вдоль траектории орбиты. СВЧ зонд MLS сканирует земной лимб в направлении полета, регистрируя микроволновую эмиссию в пяти полосах спектра (на частотах 118, 190, 240 и 640 ГГц и 2,5 ТГц). Данные измерений зонда MLS используются для восстановления профилей химического состава, относительной влажности и температуры для областей атмосферы от тропосферы, стратосферы, до верхней мезосферы как функций высоты изобарических поверхностей в гПа.

Вертикальный профиль температуры рассчитывается по результатам измерений спектрального распределения уходящего теплового излучения системы Земля-атмосфера, поскольку его интенсивность зависит от температуры вполне определенным образом. Измерения ведутся на узких участках спектра, соответствующих полосам поглощения газов, чьи вертикальные распределения в атмосфере стабильны и хорошо изучены.

Спутниковые данные MLS Aura по температуре представлены в виде высотных профилей от уровня поверхности земли до высоты 10^{-5} гПа (0–130 км). Рабочей областью является интервал высот 261–0,001 гПа (примерно 10–92 км). Точность измерения температуры составляет $\sim \pm 1$ К в интервале высот 10–80 км и $\sim \pm 2,3$ К в интервале высот 80–92 км (Schwartz et al., 2008). Ниже 10 км и выше 92 км ошибки измерения температуры возрастают. Файлы исходных данных в формате HDF-EOS (иерархический формат данных) содержат информацию о глобальном распределении температуры атмосферы для каждого дня рассматриваемого временного интервала.

В данном анализе высотный профиль температуры рассчитывался с помощью программы, входными параметрами которой были: географические координаты (широта, долгота); дневное или ночное местное время суток (т.е. выбор восходящей или нисходящей траектории орбиты спутника); дальность орбиты спутника.

Результаты анализа данных

Для анализа временных и высотных вариаций температуры атмосферы рассматривались суточные, межсуточные и сезонные (годовые) и среднегодовые вариации температуры для высотных уровней примерно 11, 50 и 80 км, что примерно соответствует высотам тропопаузы, стратопаузы и верхней мезосферы. Статистический анализ проводился для временного ряда, имеющего 2821 значение температуры для дневных условий и 2835 значений – для ночных условий.

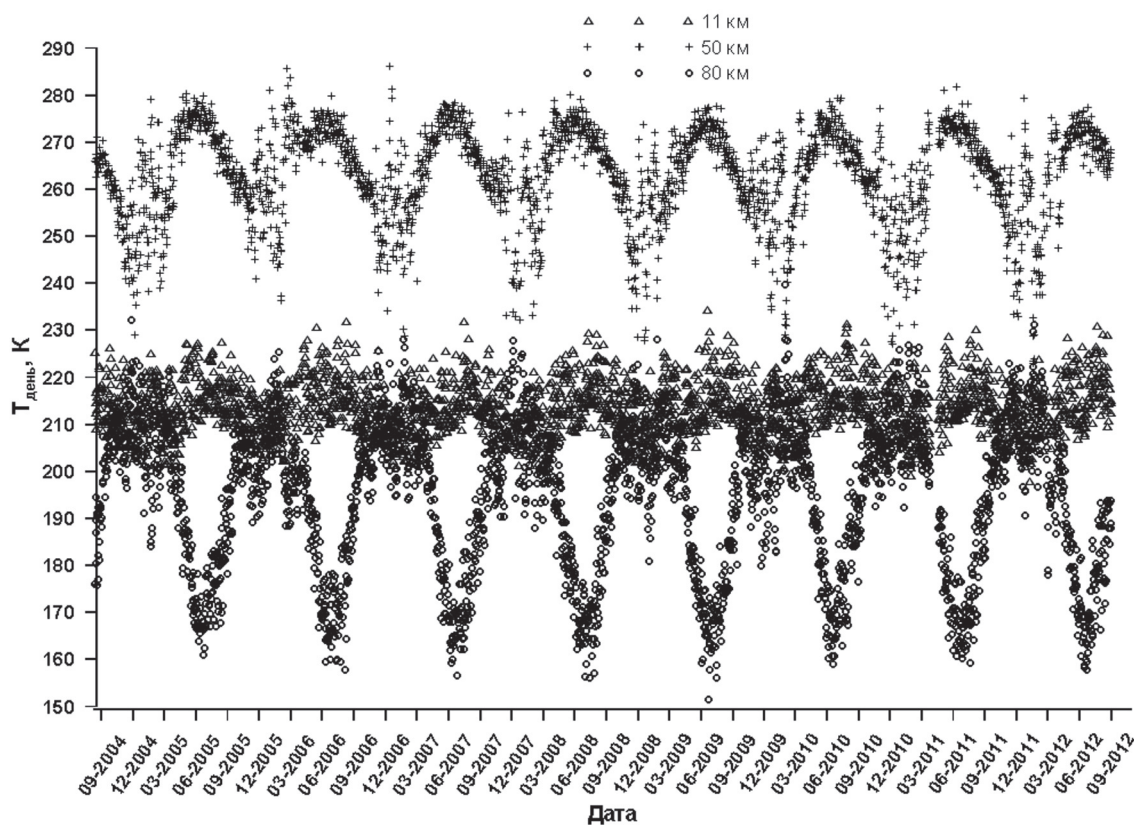


Рис. 1. Ежесуточные значения температуры для дневных условий на рассматриваемых высотных уровнях

На *рис. 1* представлены ежесуточные значения температуры для дневных условий на рассматриваемых высотных уровнях. Наблюдается сильная межсуточная изменчивость температуры на всех рассматриваемых высотных уровнях. Отмечается четкий годовой (сезонный) ход температуры на высотах ~50 и 80 км с наибольшей по амплитуде сезонной вариацией на высотах области верхней мезосферы. На высотах верхней стратосферы годовая вариация имеет максимум летом и минимум зимой. На высотах верхней мезосферы температура изменяется в противофазе со стратосферой: с минимумом летом и максимумом зимой. На высоте порядка 11 км вблизи уровня тропопаузы сезонная вариация с максимумом летом и минимумом зимой тоже прослеживается. Но вследствие большого разброса точек, практически одинакового для всех сезонов года, нельзя говорить, что годовая гармоника является основной во временных вариациях температуры в области тропопаузы. По-видимому, на этих высотах существенную роль играют более высокочастотные гармоники синоптического масштаба, характерные для временных вариаций параметров атмосферы в приземном слое атмосферы и на высотах тропосферы.

На *рис. 2* представлены сглаженные скользящим средним за месячный интервал кривые температуры для дневных (примерно 14 LT) и ночных (примерно 03 LT) условий за весь рассматриваемый временной интервал. Вариации температуры в течение суток проявляются, в большинстве случаев, в виде понижения температуры ночью по сравнению с дневными значениями. Особенно четко это различие отмечается на высотах

верхней мезосферы. По данным о временных вариациях температуры за 2004–2012 гг. выделяется слабый отрицательный тренд температуры в областях стратопазы и верхней мезосферы (причина этого процесса может заключаться по некоторым литературным источникам в увеличении концентрации углекислого газа и уменьшении концентрации озона в стратосфере) (Ramaswamy et al., 2001; Gavrilyeva, Ammosov, 2002; Beig et al., 2003; Перминов, Семенов, 2007; Artigas, Campra, 2011; Криволицкий, Репнев, 2012; Данилов, 2012).

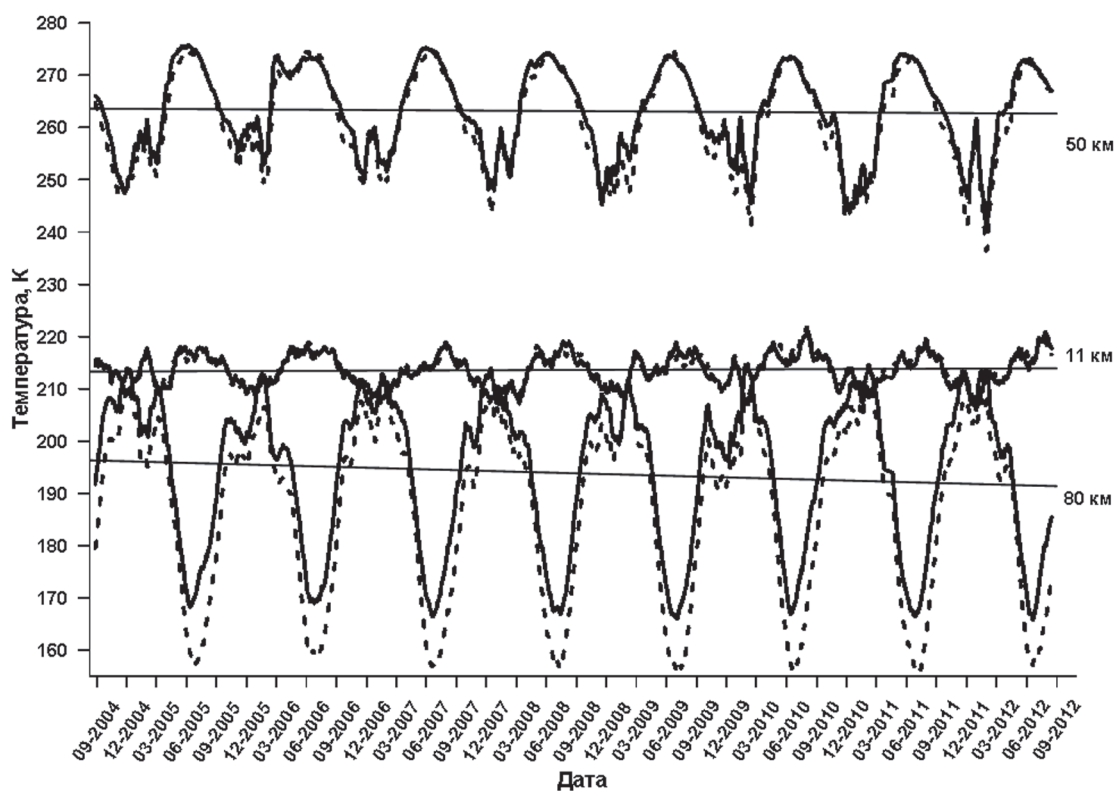


Рис. 2. Сглаженные кривые температуры для дневных (сплошная линия) и ночных (пунктирная линия) условий и тренды температуры на рассматриваемых высотных уровнях

Отмеченные выше особенности внутрисуточных и сезонных вариаций температуры на высотах средней атмосферы были отдельно проанализированы с помощью коэффициентов вариации, которые позволяют сравнить степени изменчивости различных рядов или частей одного ряда:

$$V_T = \frac{\sigma}{\bar{T}} \cdot 100\%,$$

где \bar{T} — средняя температура, σ — среднеквадратичное отклонение значений температур от средней. Расчеты проводились для летнего и зимнего сезонов. К зимнему сезону были отнесены месяцы с ноября по март, к летнему сезону — с июня по август. Результаты статистического анализа представлены в табл. 1 и 2.

На высотах тропопаузы коэффициент вариации очень незначительно изменяется в зависимости от времени суток и сезона. Отмечается сильное различие коэффициентов

вариации температуры на высотах стратопазузы: для летних условий $V_T \approx 1,4\%$ (табл. 1), для зимних – $V_T \approx 4,3 \div 4,6\%$ (табл. 2). По-видимому, это различие связано с тем, что на высотах стратосферы в исследуемом регионе юга Восточной Сибири практически каждую зиму происходят внезапные стратосферные потепления, когда температура повышается на десятки градусов, иногда превосходя летний максимум. При этом высота зимней стратопазузы может опускаться вниз вплоть до высот порядка 30 км. В области верхней мезосферы коэффициенты вариации для зимы выше, чем для лета.

Таблица 1. Статистические характеристики температуры средней атмосферы для летнего сезона в регионе Иркутска за период 2004–2012 гг.

Высота, км	Лето					
	\bar{T} , К		s, К		VT, %	
	день (N = 744)	ночь (N = 746)	день	ночь	день	ночь
11	216,7	216,6	4,9	4,6	2,3	2,1
50	270,7	270,7	3,8	3,9	1,4	1,4
80	174,7	163,6	8,6	9,1	4,2	4,5

Таблица 2. Статистические характеристики температуры средней атмосферы для зимнего сезона в регионе Иркутска за период 2004–2012 гг.

Высота, км	Зима					
	\bar{T} , К		s, К		VT, %	
	день (N = 1145)	ночь (N = 1154)	день	ночь	день	ночь
11	211,1	211,2	5,4	5,4	2,5	2,6
50	255,8	253,4	11,0	11,6	4,3	4,6
80	206,4	202,0	9,3	8,8	5,3	5,4

На рис. 3 приведены средние многолетние вариации температуры на рассматриваемых высотных уровнях для дневных и ночных условий, полученные путем расчета среднемесячных значений температур для каждого года, а затем усреднения их по всем годам. На графиках также нанесены среднеквадратичные отклонения значений температур от средних многолетних для каждого месяца. Анализ этих графиков подтверждает выводы, сделанные выше относительно внутрисуточных и сезонных вариаций температуры.

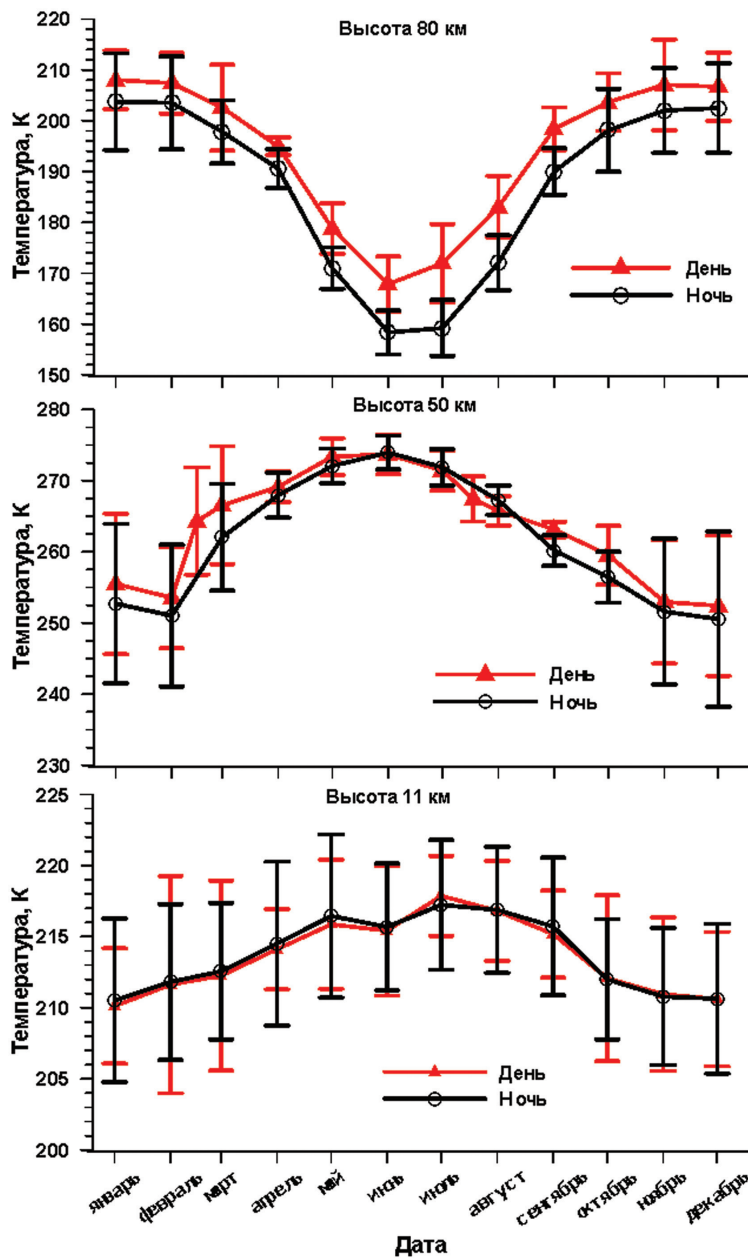


Рис. 3. Средние многолетние вариации температуры на рассматриваемых высотных уровнях для дневных и ночных условий

На рис. 4 среднегодовые вариации температуры для рассматриваемых высотных уровней приставлены на одних координатных осях, что позволяет наглядно сравнить температуры средней атмосферы на различных высотах. Эти среднегодовые вариации температуры рассчитаны путем усреднения исходных данных для каждого дня года по всем годам, и затем сглаженные скользящим средним за месячный интервал. Наибольшая по амплитуде средняя сезонная вариация (порядка 40 градусов) наблюдается на высотах верхней мезосферы, на высотах стратосферы – до 20 градусов, на высотах тропосферы амплитуда сезонной вариации составляет примерно 10 градусов. Зимой (декабрь, январь) средняя максимальная температура на высотах верхней мезосферы (~80 км) примерно равна средней минимальной температуре на высотах тропосферы (~11 км) и составляет 210 К.

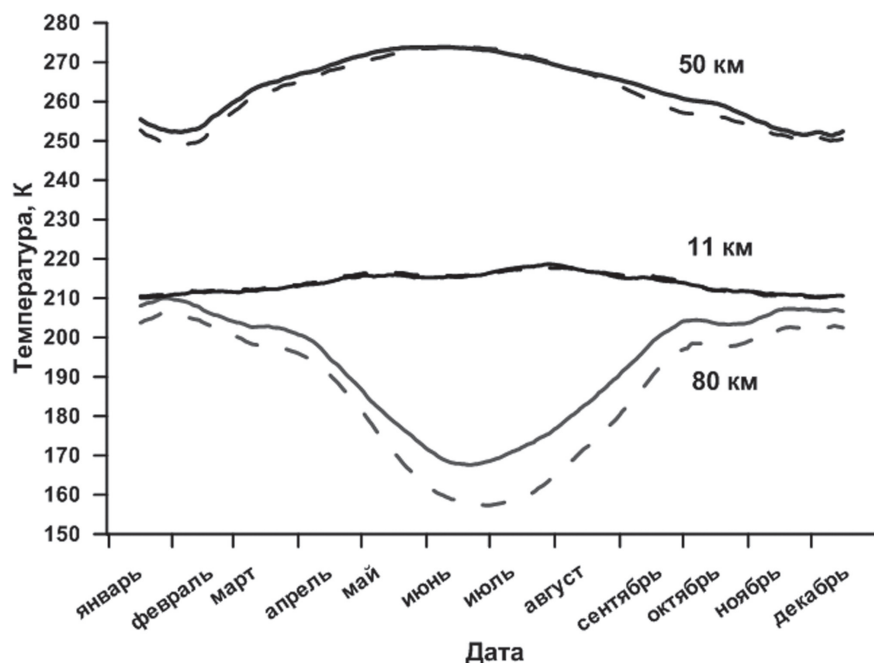


Рис. 4. Средние многолетние вариации температуры на рассматриваемых высотных уровнях для дневных (сплошная линия) и ночных (пунктирная линия) условий

Высотно-временные распределения температуры атмосферы для различных сезонов 2004–2012 гг. позволили подтвердить вывод о существенно различных температурных режимах средней атмосферы для летнего и зимнего периодов года. На рис. 5 для примера представлены высотно-временные распределения температуры атмосферы для июня–августа 2009 г. и декабря 2008 – января 2009 гг. На этом же рисунке приведены высотные профили температуры для 15.07.2009 и 21.01.2009, взятые с сайта спутника Aura (<http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/Aura/>). Летом температурный режим атмосферы регулярен с резко выраженными теплой стратопазой и холодной мезопазой (верхняя панель, рис. 5). Зимой высотно-временные распределения температуры в рассматриваемом высотном интервале имеют нерегулярную структуру, четко выраженные стратопауза и мезопауза отсутствуют. Область повышенных значений температуры в стратопазе расширяется до десятка и более километров и опускается до высот порядка 30 км. На высотных профилях температуры появляются несколько максимумов (нижняя панель, рис. 5).

Эти особенности зимнего температурного режима средней атмосферы можно связать, на наш взгляд, с проявлением известного эффекта повышенной зимней изменчивости параметров стратосферы и мезосферы (Кокин, Гайгерова, 1981; Данилов и др., 1987). Этот эффект выражается в усилении волновой активности различных временных масштабов в средней и верхней атмосфере и, как правило, сопровождается комплексом явлений – внезапными зимними стратосферными потеплениями, усилением вертикального переноса, турбулентных процессов, нарушением атмосферной циркуляции и др. При этом некоторые из указанных явлений могут обнаруживаться в виде региональных или долготных особенностей в характеристиках средней и верхней атмосферы.

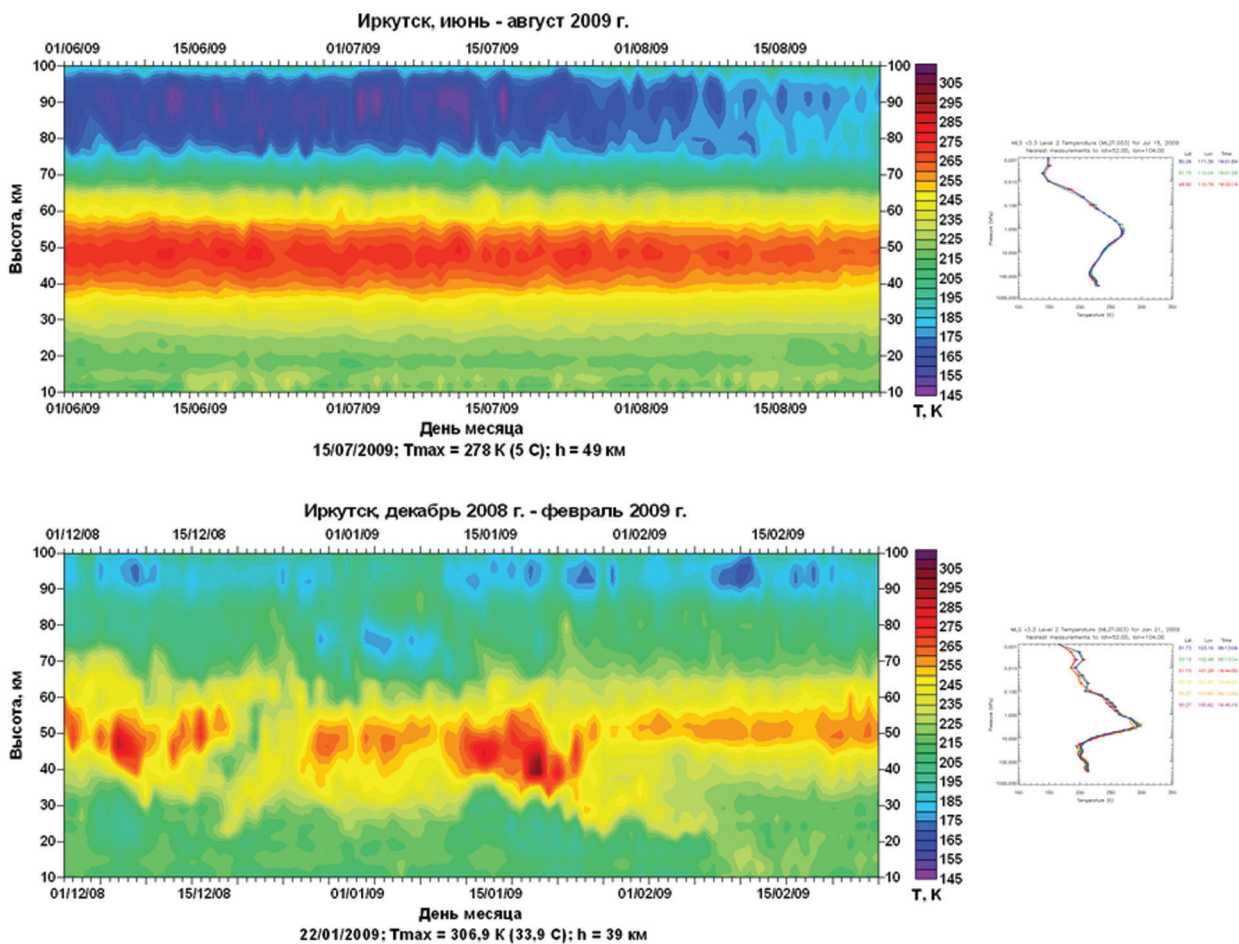


Рис. 5. Высотно-временные распределения температуры атмосферы для лета 2009 г. и зимы 2008/09 гг. и высотные профили температуры для 15.07.2009 и 21.01.2009

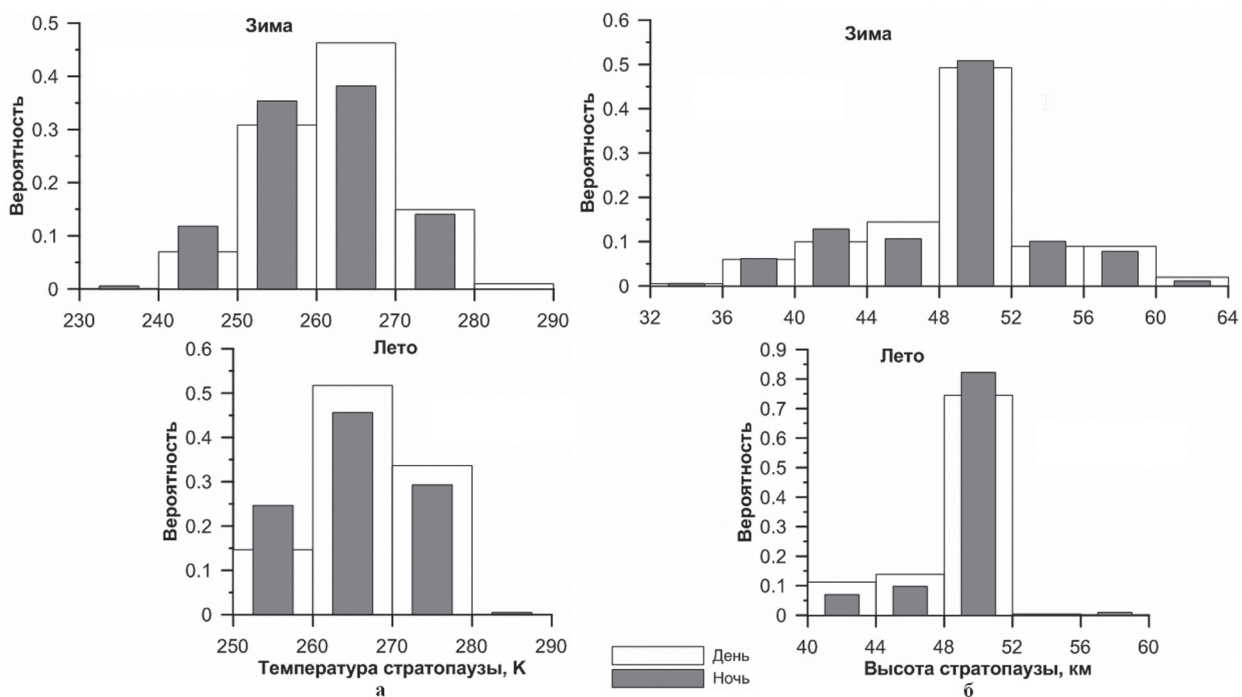


Рис. 6. Гистограммы распределения дневной и ночной температуры (а) и высоты (б) стратопазы для зимних и летних условий

Учитывая сезонные особенности температурного режима средней атмосферы, отдельно были проанализированы временные вариации температуры и высоты стратопазы и мезопазы. К зимнему сезону были отнесены месяцы с ноября по март, к летнему сезону – с июня по август.

В зимний период года (ноябрь–март) вариации температуры стратопазы отмечаются в более широком диапазоне значений, чем в летний период (июнь–август). Температура зимней стратопазы (рис. 6а) очень часто достигает летние значения (наиболее вероятная температура составляет величину $T_{страт} = 260\div 270$ К). Наиболее вероятная высота стратопазы располагается на 48–52 км в течение всего года (рис. 6б), однако в зимний период года наблюдается большой разброс значений высоты стратопазы как в сторону больших (до 60 км), так и меньших значений (до 40 км).

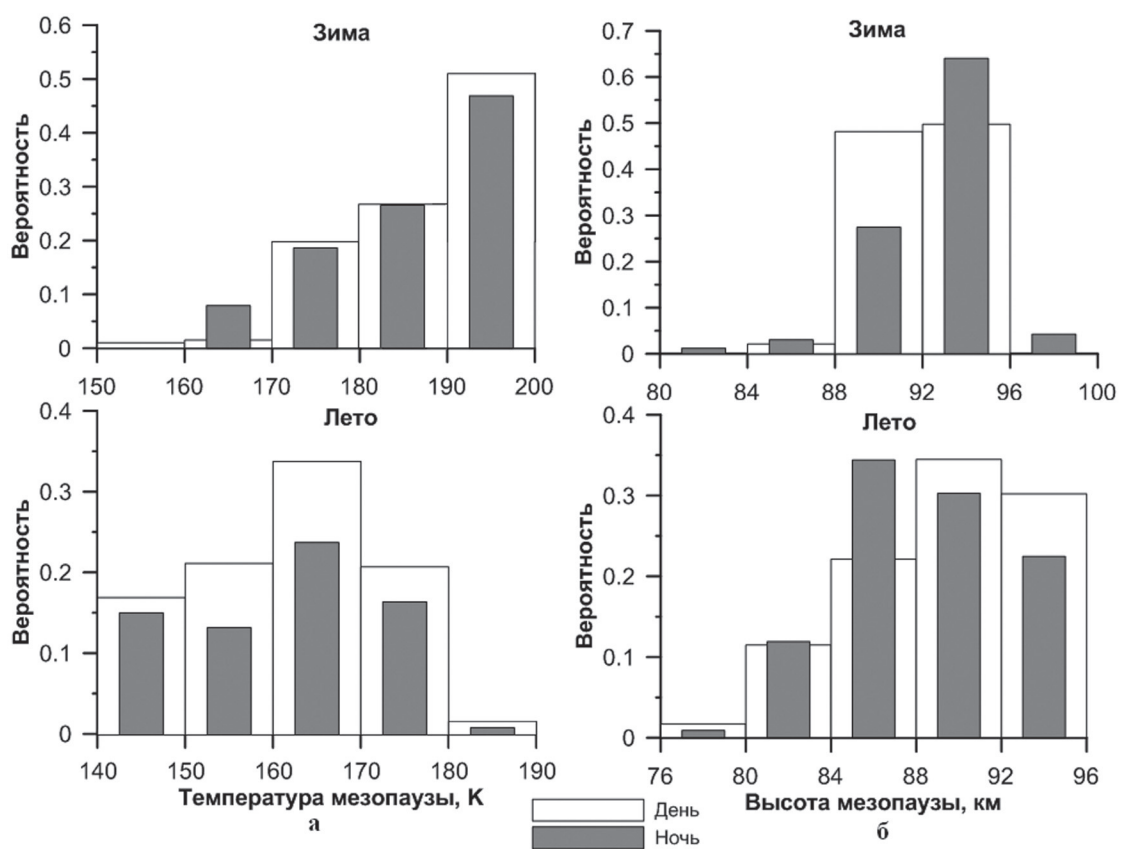


Рис. 7. Гистограммы распределения дневной и ночной температуры (а) и высоты (б) мезопазы для зимних и летних условий

Температура мезопазы проявляет более четкую сезонную вариацию. Зимняя мезопаза (наиболее вероятная температура $T_{мес} = 190\div 200$ К) теплее летней ($T_{мес} = 160\div 170$ К) (рис. 7а). Наиболее вероятная высота мезопазы выше зимой (92–96 км), чем летом (меняется в широких пределах от 80 до 96 км) (рис. 7б). При анализе параметров температурного профиля в области мезопазы следует помнить, что в этом случае мы находимся на верхней границе рабочей области спутниковых температурных измерений MLS Aura (уровень 0,001 гПа или примерно 92 км). Точность измерения температуры выше этой высоты существенно снижается (Schwartz et al., 2008), поэтому к этим данным надо относиться с большой осторожностью.

Заключение

В результате статистического анализа временных рядов данных спутниковых измерений температуры средней атмосферы за период с августа 2004 г. по август 2012 г. для региона Иркутска получены следующие результаты.

1. Проанализированы временные (суточные, межсуточные и сезонные) и высотные вариации температуры средней атмосферы для уровней тропопаузы, стратопаузы и верхней мезосферы.

2. Подчеркнуто наличие существенно различных температурных режимов средней атмосферы для летнего и зимнего периода года. Летом высотно-временные распределения температуры в рассматриваемом высотном интервале регулярны с резко выраженными теплой стратопаузой и холодной мезопаузой. Зимой распределение температуры имеет нерегулярную структуру, четко выраженные стратопауза и мезопауза отсутствуют.

3. Отмечен слабый отрицательный тренд температуры в стратосфере и верхней мезосфере.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 12-05-00865_а.

Литература

1. *Гайгеров С.С.* Исследование синоптических процессов в высоких слоях атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 252 с.
2. *Данилов А.Д., Казимировский Э.С., Вергасова Г.В., Хачикян Г.В.* Метеорологические эффекты в ионосфере. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 271 с.
3. *Данилов А.Д.* Симпозиум по трендам в атмосфере // Гелиогеофизические исслед. 2012. Вып. 2. С. 47–53.
4. *Кашкин В.Б., Сухинин А.И.* Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений. М.: Логос, 2001. 264 с.
5. *Кокин Г.А., Гайгерова С.С.* Метеорология верхней атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 270 с.
6. *Кондратьев К.Я., Тимофеев Ю.М.* Метеорологическое зондирование атмосферы из космоса. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 279 с.
7. *Криволицкий А.А., Репнев А.И.* Результаты российских исследований средней атмосферы в 2007–2010 гг. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48. № 3. С. 1–12.
8. *Перминов В.И., Семенов А.И.* Модель широтных, сезонных и высотных изменений многолетнего температурного тренда средней атмосферы // Геомагнетизм и аэрономия. 2007. Т. 47. № 5. С. 685–691.
9. *Шефов Н.Н., Семенов А.И., Хомич В.Ю.* Излучение атмосферы как индикатор структуры и динамики верхней атмосферы. М.: Геос, 2006. 741 с.
10. *Artigas M.Z., Campra P.F.* Stratospheric temperature trends between 10 and 70 hPa during the period 1948-2009 // The Open Atmosp. Sci. J., 2011. V. 5. P. 16–22.

11. *Beig G., Keckhut P., Lowe R.P. et al.* Review of mesospheric temperature trends // *Rev. Geophys.* 2003. Vol. 41. No. 4. P. 1015–1070, doi: 10.1029/2002RG000121.
12. *Forbes J.M., Wu D.* Solar tides as revealed by measurements of mesosphere temperature by the MLS experiment on UARS // *J. Atmos. Sci.* 2006. V. 63. No. 7. P. 177–1797.
13. *Huang F.T., Mayr H.G., Reber C.A., Russell J.M., Mlynczak M., Mengel J.G.* Stratospheric and mesospheric temperature variations for the quasi-biennial and semiannual (QBO and SAO) oscillations based on measurements from SABER (TIMED) and MLS (UARS) // *Ann. Geophys.* 2006. V. 24. No. 8. P. 2131–2149.
14. *Gavrilyeva G.A., Ammosov P.P.* Near-mesopause temperatures registered over Yakutia // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2002. V. 64. No. 8–11. P. 985–990.
15. *Jacobi C., Kürschner D.* Long-period upper mesosphere temperature and plasma scale height variations derived from VHF meteor radar and LF absolute reflection height measurements // *Adv. Radio Sci.* 2006. No. 4. P. 351–355.
16. *Ramaswamy V., Chanin M.-L., Angell J. et al.* Stratospheric temperature trends: Observations and model simulations // *Reviews of Geophysics.* 2001. Vol. 39. No. 1. P. 71–122.
17. *Solomon S.D., Qin M., Manning Z. et al.* *Climate Change 2007: The Physical Science Basis.* Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
18. *States R.J., Gardner C.S.* Thermal structure of the mesopause region (80–105 km) at 40°N latitude. Part I: Seasonal variations // *J. Atmos. Sci.* 2000. V. 57. No. 1. P. 66–77.
19. *Svoboda A.A., Forbes J.M., Miyahara S.* A space-based climatology of diurnal MLT tidal winds, temperatures and densities from UARS wind measurements // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2005. V. 67. No. 16. P. 1533–1543.
20. *Wang D.Y., Ward W.E., Solheim B.H., Shepherd G.G.* Wavenumber spectra of horizontal wind and temperature measured with WINDII, Part I: observational results // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2000. V. 62. No. 11. P. 967–979.

Temporal variations in temperature of the middle atmosphere over southeastern Siberia, according to the MLS Aura measurements

M.A. Chernigovskaya

*Institute of Solar-Terrestrial Physics of Siberian Branch of RAS, Irkutsk, Russia
E-mail: cher@iszf.irk.ru*

We analyse temporal and altitude variations in temperature of the middle atmosphere (upper troposphere, stratosphere, and mesosphere) over Irkutsk (52°N, 104°E) over the period from August 2004 to August 2012. The temperature was measured by MLS (Microwave Limb Sounder) on the EOS Aura satellite. We consider diurnal, interdiurnal, and seasonal variations of temperature at heights of 11, 50, and 80 km. We observe a strong diurnal and interdiurnal variability of temperature at all heights under consideration. Variations in temperature within 24 hours manifest themselves mainly as an increase in temperature at night compared with daytime values. This difference is most marked at heights of the upper mesosphere. Temporal variations in temperature and height of the stratopause and mesopause were analysed separately: seasonal, diurnal and interdiurnal variations were revealed. The seasonal dynamics of tem-

perature shows a clear annual periodicity. Average annual variations in temperature at given heights were obtained via data averaging for each day of the period under consideration. Using the analysis of altitude-temporal distribution of temperature for each month of the period under study, we revealed peculiarities of seasonal variations in temperature of the middle atmosphere. There is a significant difference between the degrees of variability in the atmospheric temperature at heights of the stratopause in summer and in winter. Apparently, it can be explained by the fact that there are sudden stratospheric warmings (anomalous warmings in the stratosphere up to several dozen degrees, which can sometimes exceed the summer maximum) observed at heights of the stratosphere over southeastern Siberia each summer.

Keywords: the lower and upper atmosphere, ionosphere, interaction between atmospheric layers.