

Морфологические особенности температурного режима атмосферы в регионе юга Восточной Сибири

М.А. Черниговская*

*Институт солнечно-земной физики СО РАН
664033, г. Иркутск, а/я 291*

Поступила в редакцию 16.07.2008 г.

Проведен анализ временных и высотных вариаций данных по температуре тропосферы, стратосферы и мезосферы за период с августа 2004 по март 2008 г. для региона г. Иркутска (52° с.ш., 104° в.д.). Использовались спутниковые данные, полученные СВЧ-зондом MLS (Microwave Limb Sounder), установленным на борту космического аппарата EOS Aura. Рассматриваются суточные, межсуточные и сезонные вариации температуры для высотных уровней примерно 11, 50 и 80 км. Среднегодовые вариации температуры на заданных высотах получены усреднением для каждого дня года за указанный период. Исследованы временные вариации температуры и высоты стратосферы и мезосферы для дневных и ночных условий. Построены и проанализированы высотно-временные карты распределения температуры атмосферы для каждого месяца рассматриваемого временного периода.

Ключевые слова: атмосфера, временные и высотные вариации температуры, спутниковые данные.

Введение

Температура играет центральную роль в физике атмосферы. Это ключевой параметр в радиационном балансе атмосферы. Температура атмосферы является параметром, определяющим или влияющим на многие параметры (например, плотность, скорость химических реакций) и процессы (динамические, химические, перенос тепла), имеющие место в атмосфере и ионосфере. Температура особенно важна в гидрологическом цикле, так как управляет формированием облаков и распределением влажности атмосферы.

Основные черты слоистой структуры атмосферы определяются, в первую очередь, особенностями вертикального распределения температуры [1, 2]. От поверхности Земли температура уменьшается с высотой. Затем, в стратосфере, температура начинает повышаться, потому что озон поглощает солнечную UV-энергию, нагревая стратосферу. Выше 50 км нагревание за счет озона уменьшается, и температура снова уменьшается. Выше 80 км солнечная радиация очень высокой энергии начинает нагревать атмосферу снова.

При постановке задачи изучения атмосферы Земли как единой системы большое значение имеет вертикальное зондирование атмосферы. Методы вертикального зондирования атмосферы разнообразны [3]: 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 [4], 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.) [5]. Вертикальный профиль температуры можно рассчитать 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.

С развитием и усовершенствованием методов зондирования атмосферы, и особенно спутникового зондирования, возобновился интерес исследователей к изучению пространственно-временной структуры температуры атмосферы на различных высотных уровнях [6–15]. 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.) [10–13], ведутся работы по выявлению многолетних трендов температуры земной атмосферы как в нижней атмосфере (тропосфере), так и в средней атмосфере (стратосфере и мезосфере) [14].

* Марина Артуровна Черниговская (cher@iszf.irk.ru).

В настоящей статье исследуются временные и высотные вариации температуры тропосферы, стратосферы и мезосферы за период с августа 2004 по март 2008 г. для региона г. Иркутска (52° с.ш., 104° в.д.) по спутниковым данным.

Анализируемые данные

Для анализа использовались данные о вертикальных профилях температуры атмосферы, которые получены с помощью сканирующего сверхвысокочастотного (СВЧ) лимбового зонда MLS (Microwave Limb Sounder), установленного на борту космического аппарата Aura EOS [15]. Запуск спутника Aura состоялся 15 июля 2004 г.

Спутник Aura EOS входит в миссию «А-Train» – «Дневной поезд». Это формирование спутников наблюдения за Землей, находящихся на близких по параметрам орбитах, позволило проводить уникальные комплексные исследования. Спутники пролетают друг за другом над одними и теми же регионами Земли с интервалом 15 мин, формируя базу данных для создания единой картины глобальных климатических изменений.

Спутник имеет полярную орбиту (период вращения примерно 100 мин и высота 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. В сутки осуществляется примерно 15 пролетов спутника. 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 гектопаскалях.

Спутниковые данные MLS Aura по температуре представлены в виде высотных профилей от уровня поверхности земли до высоты 10^{-5} гПа (0–130 км) [15]. Рабочей областью является интервал высот 316–0,001 гПа (примерно 9–92 км), точность измерения температуры составляет $0,5-1 \div 1-2$ К, вертикальное разрешение – примерно 3 км.

В ходе выполнения работы был сформирован банк данных температуры атмосферы по спутниковым данным MLS Aura с августа 2004 г. и по настоящее время. Файлы исходных данных содержат информацию о глобальном распределении температуры атмосферы для каждого дня рассматриваемого временного интервала. Создана программа, позволяющая получать высотный профиль температуры атмосферы для заданных входных параметров:

- географических координат (широта, долгота);
- дневного или ночного местного времени суток (т.е. выбор восходящей или нисходящей части орбиты спутника);
- дальности орбиты спутника.

Анализ данных наблюдений, результаты и обсуждение

Для анализа временных и высотных вариаций температуры атмосферы рассматривались суточные, межсуточные, сезонные (годовые) и среднегодовые вариации температуры для высотных уровней около 11, 50 и 80 км, что примерно соответствует высотам тропопаузы, стратопаузы и мезопаузы.

Наблюдается сильная межсуточная изменчивость температуры на всех рассматриваемых высотных уровнях. Для примера на рис. 1 точками представлены ежесуточные значения температуры в дневных условиях для рассматриваемых высотных уровней и сглаженные скользящим средним за месячный интервал кривые температуры для дневных (примерно 14 LT) и ночных (примерно 03 LT) условий за весь рассматриваемый временной интервал.

Отмечается четкий годовой (сезонный) ход температуры. На высотах тропосферы и стратосферы годовая вариация имеет максимум летом и минимум зимой. На высотах мезосферы температура изменяется в противофазе со стратосферой и тропосферой: с минимумом летом и максимумом зимой. 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.

Отмечается очень сильное различие степени изменчивости температуры атмосферы на высотах стратопаузы для летних ($V_x \approx 1,4 \div 1,5\%$) и зимних ($V_x \approx 3,8 \div 4,3\%$) условий (таблица).

Высота, км	\bar{X} , К		σ , К		$V_x = \sigma/\bar{X} \cdot 100\%$	
	день	ночь	день	ночь	день	ночь
<i>Лето</i>						
11	219	218,2	4,1	4,0	1,9	1,8
50	269,5	268,9	3,7	4,1	1,4	1,5
80	172,5	164,3	8,9	8,5	5,2	5,2
<i>Зима</i>						
11	211,4	212,5	5,1	5,2	2,4	2,4
50	256,7	254,4	9,8	10,9	3,8	4,3
80	206,3	203,5	8,9	9,8	4,3	4,8

Возможно, это различие связано с тем, что на высотах стратосферы в исследуемом регионе юга Восточной Сибири почти каждую зиму наблюдаются внезапные стратосферные потепления – аномальные потепления воздуха в стратосфере, составляющие десятки градусов, при которых температура может иногда превосходить летний максимум. Для стратосферных потеплений характерна географическая неравномерность распределения по земному шару, и их концентрация в Азиатском регионе велика [16].

Были рассчитаны среднегодовые вариации температуры для рассматриваемых высотных уровней путем усреднения исходных данных для каждого дня года по всем годам и затем сглаженные скользящим средним за месячный интервал (рис. 2).

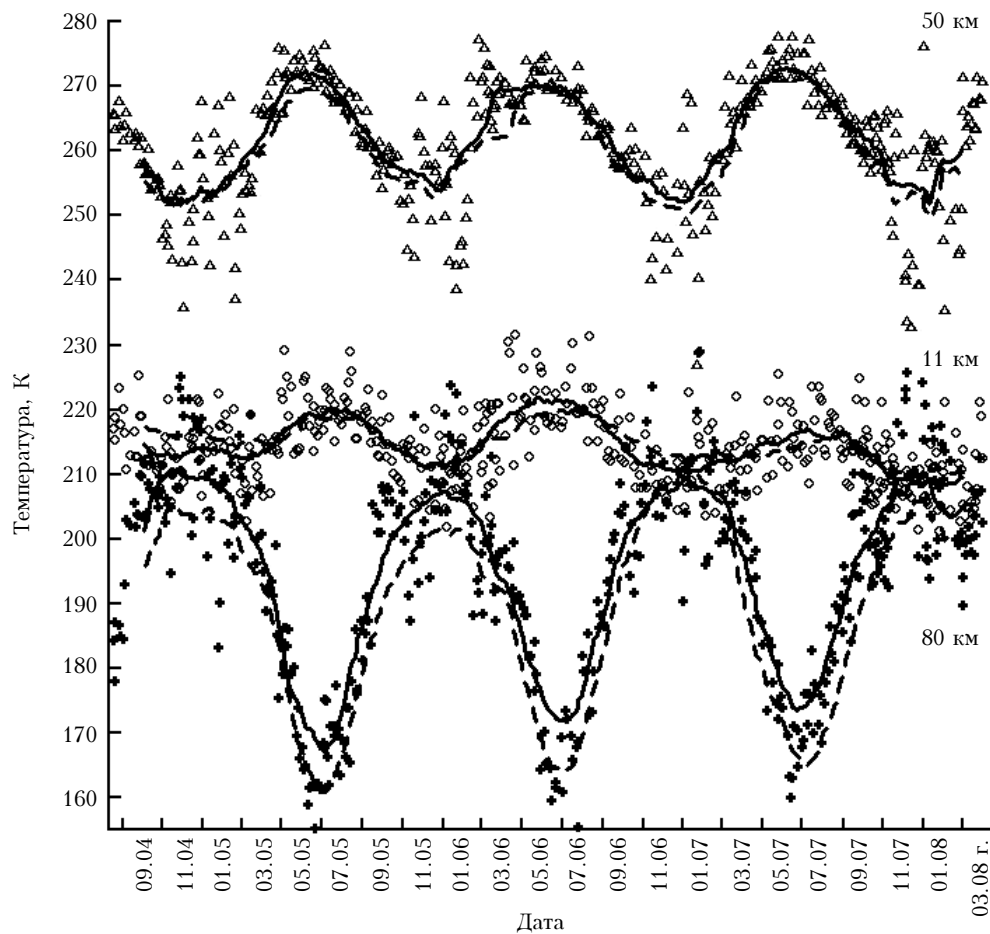


Рис. 1. Ежесуточные дневные значения температуры (значки) и сглаженные скользящим средним за месячный интервал кривые температуры для дневных (сплошная линия) и ночных (штриховая линия) на рассматриваемых высотных уровнях

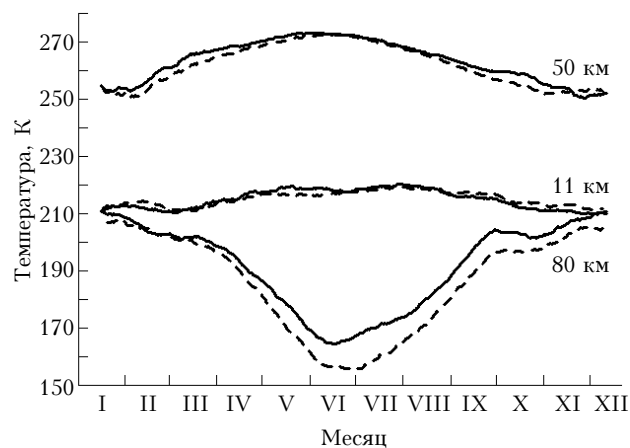


Рис. 2. Среднегодовые вариации температуры для рассматриваемых высотных уровней для дневных (сплошная линия) и ночных (пунктирная линия) условий

Наибольшая по амплитуде средняя сезонная вариация наблюдается на высотах мезопаузы (порядка 40°), на высотах стратопазузы — до 20° , на высотах тропопаузы амплитуда сезонной вариации составляет примерно 10° . Зимой (декабрь, январь) средняя максимальная температура на высотах мезопаузы (~ 80 км) примерно равна средней минимальной тем-

пературе на высотах тропопаузы (~ 11 км) и составляет 210 К.

Отдельно были проанализированы временные вариации температуры и высоты стратопазузы и мезопаузы, в которых также отмечаются сезонная, суточная вариация и межсуточная изменчивость.

В летний период года (апрель—октябрь) сезонная вариация температуры стратопазузы носит регулярный характер, в зимний же период (ноябрь—март) — вариации температуры стратопазузы крайне нерегулярны. Температура зимней стратопазузы очень часто достигает и даже превосходит летние значения (рис. 3, вверху).

Это подтверждают гистограммы распределения температуры стратопазузы: для лета и зимы наиболее вероятная температура составляет примерно $260 \div 270$ К (рис. 4, а).

Температура мезопаузы проявляет более четкую сезонную вариацию, хотя межсуточные вариации также велики (см. рис. 3, внизу). Зимняя мезопауза (наиболее вероятная $T_{\text{мез}} = 180 \div 190$ К) теплее летней ($T_{\text{мез}} = 170 \div 180$ К) (рис. 4, б).

Наиболее вероятная высота стратопазузы располагается на высотах $48\text{--}52$ км в течение всего года (рис. 4, в), однако в зимний период года наблюдается большой разброс значений высоты стратопазузы

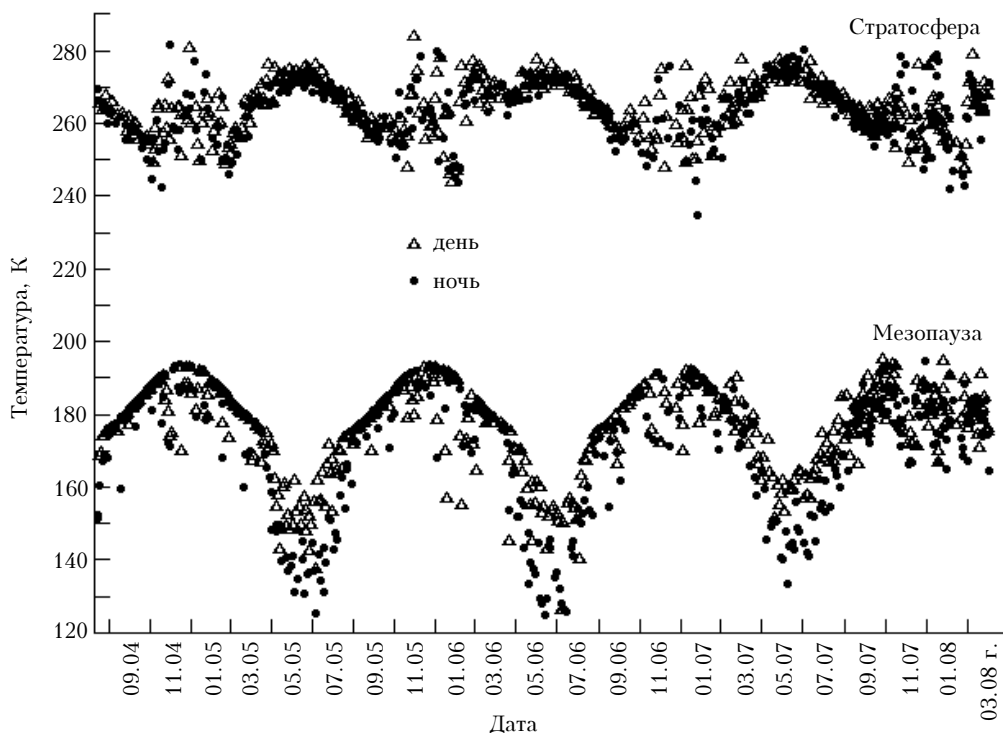


Рис. 3. Временные вариации температуры стратосферы и мезопаузы для дневных и ночных условий

в сторону как больших (до 60 км), так и меньших значений (до 40 км).

Наиболее вероятная высота мезопаузы зимой составляет 88–96 км, а летом опускается до 80 км (рис. 4, з).

Построенные и проанализированные высотно-временные распределения температуры атмосферы для каждого месяца рассматриваемого временного периода позволили подтвердить вывод о существенно различных температурных режимах средней атмосферы для летнего и зимнего периодов года. На рис. 5 приведены высотно-временные распределения температуры атмосферы для июня 2007 и января 2008 г. и высотные профили температуры для 15.06.2007 и 07.01.2008 г. [см. сайт спутника Aura (<http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/Aura/MLS/>)].

Летом температурный режим атмосферы регулярен с резко выраженными теплой стратосферой и холодной мезопаузой (рис. 5, а). Зимой высотно-временные распределения температуры в рассматриваемом высотном интервале имеют нерегулярную структуру, четко выраженные стратосфера и мезопауза отсутствуют. Область повышенных значений температуры в стратосфере расширяется до 10 км и более и опускается до высот порядка 30 км. На высотных профилях температуры появляются несколько максимумов (рис. 5, б).

Эти особенности зимнего температурного режима средней атмосферы можно связать, на наш взгляд, с проявлением известного эффекта повышенной зимней изменчивости параметров стратосферы и мезосферы [17, 18]. 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. К настоящему времени для средних широт долготные (или региональные) эффекты обнаружены в компонентах преобладающего ветра и приливах на высотах ~80–100 км [18, 19], в свечении верхней атмосферы в линии 557,7 нм (высоты высвечивания 85–115 км) [20, 21].

Объясняются эти эффекты квазистационарными планетарными волнами, источниками которых могут быть тепловые контрасты земной поверхности и орographic effects. Особенности планетарных волн состоят в их глобальной протяженности и большой амплитуде в холодные периоды и очень малых амплитудах — в летние сезоны [2, 3]. Это дает основание считать, что долготные эффекты могут наблюдаться также и для распределений температуры на высотах мезосферы — нижней термосферы. Региональные эффекты температурного режима могут являться предметом отдельного исследования.

Вариации атмосферных параметров на высотах тропосферы, стратосферы, а также мезосферы — нижней термосферы с периодами несколько (2–40) сут в большинстве случаев связывают с перемещающимися планетарными волнами [2, 3, 17, 18, 22]. Временные вариации с периодами в несколько (3–10) сут достаточно часто отмечаются в зимний период и в анализируемых спутниковых данных MLS Aura по температуре, в частности на высотах мезосферы.

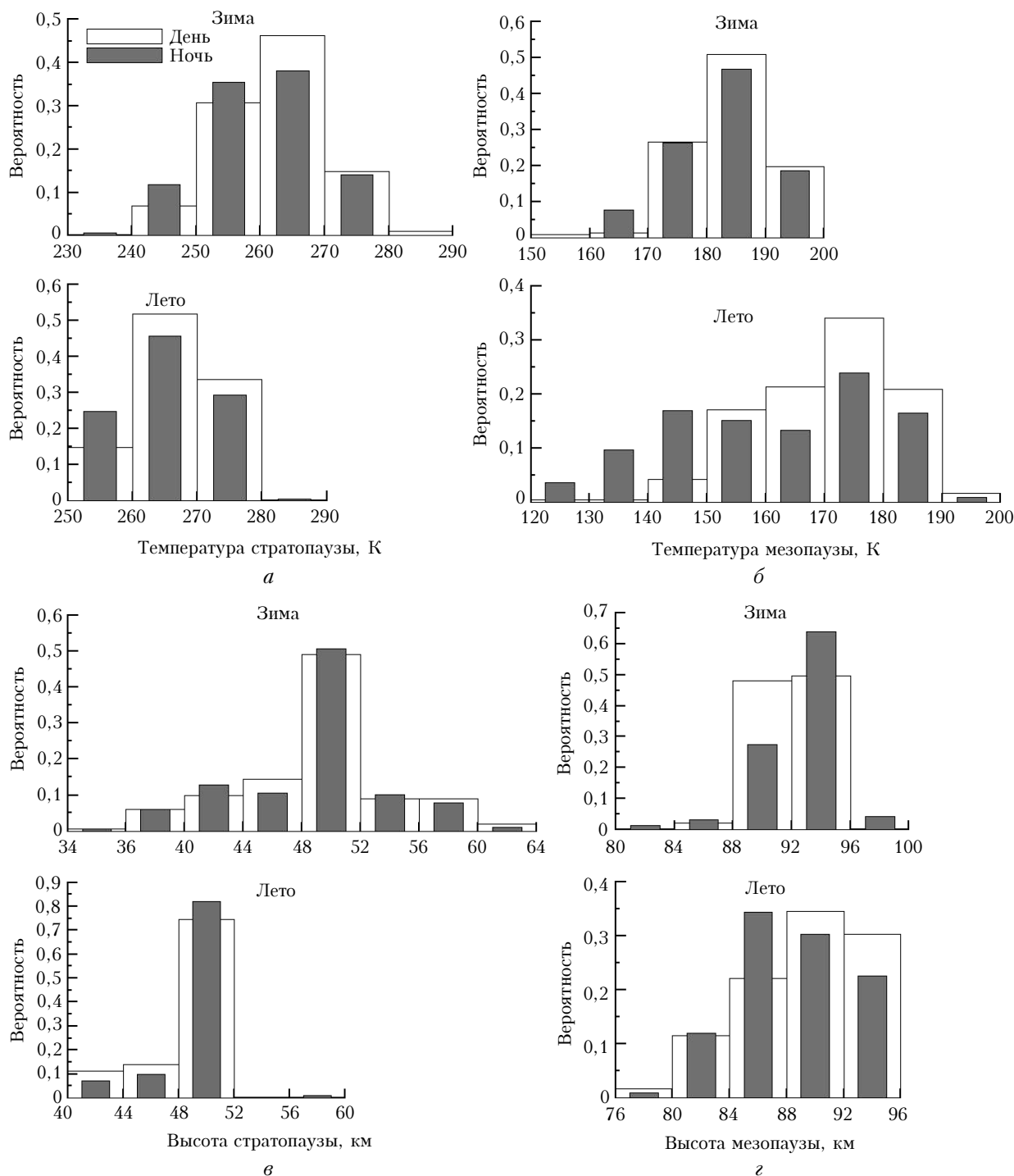


Рис. 4. Гистограммы распределения температуры стратопазы (а) и мезопазы (б), а также высоты стратопазы (в) и мезопазы (г) для летних и зимних условий

Такие возмущения температуры отмечались ранее в работах:

- по исследованию влияния атмосферных процессов на ионизацию $F2$ -слоя ионосферы по данным наклонного и вертикального зондирования на станции Иркутск [23];
- по выявлению регрессионной связи интенсивности зеленой эмиссии верхней атмосферы по дан-

ным Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН с температурой атмосферы на высотных уровнях 30 и 95 км [24];

- по исследованию одновременных усилений атмосферной эмиссии 557,7 нм [OI] и образования спорадических слоев в периоды температурных возмущений в стратомезосфере [25].

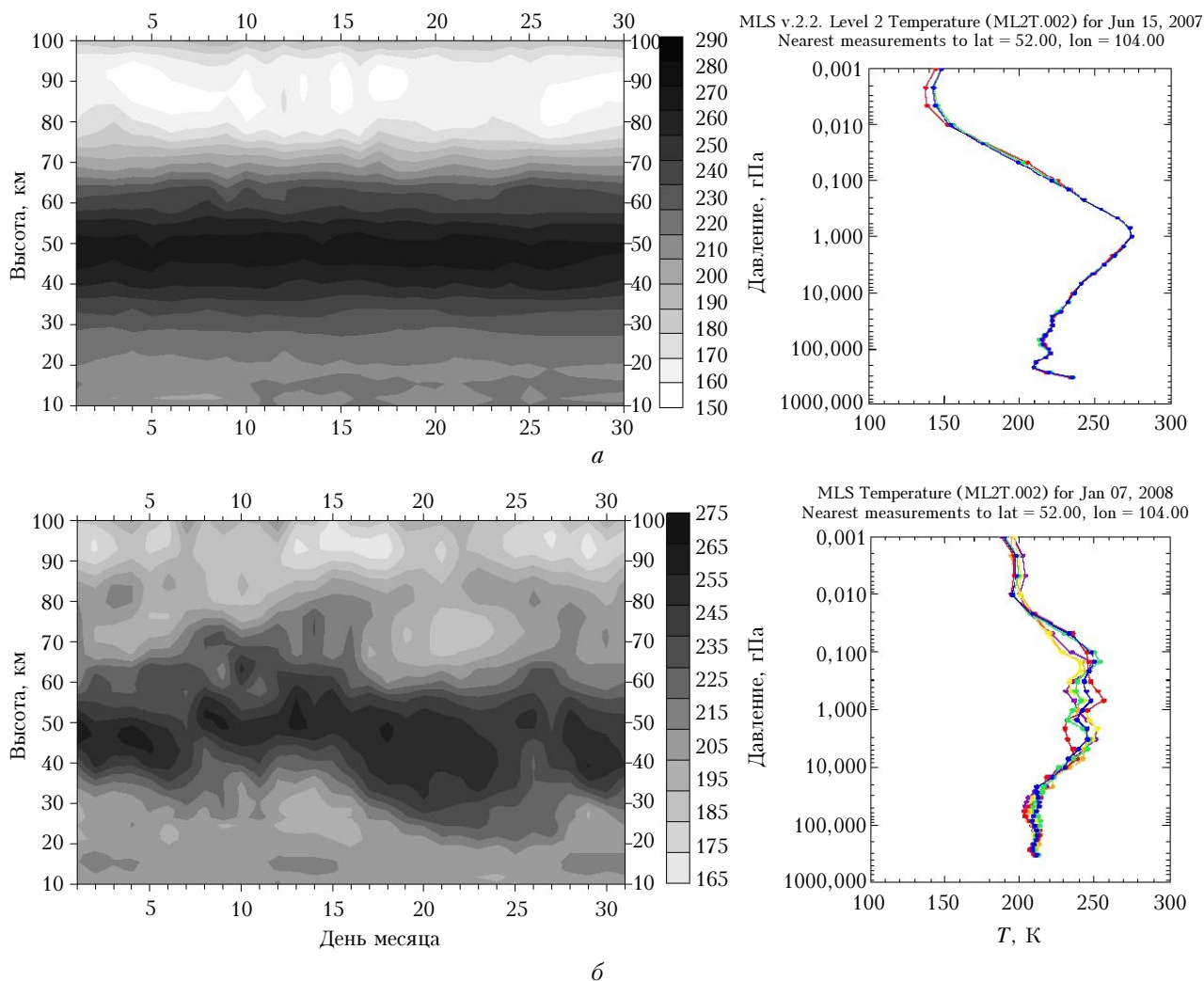


Рис. 5. Высотно-временные распределения и высотные профили температуры атмосферы для июня 2007 г. (а) и января 2008 г. (б)

Заклучение

В ходе исследования временных и высотных вариаций температуры на основе спутниковых данных MLS Aura о вертикальных профилях температуры атмосферы за период с августа 2004 по март 2008 г. для региона г. Иркутска (52° с.ш., 104° в.д.) были проанализированы суточные, межсуточные и сезонные (годовые) вариации температуры для высотных уровней тропопаузы, стратопаузы и мезопаузы, а также исследованы временные вариации температуры и высоты стратопаузы и мезопаузы для летних и зимних условий.

В результате проведенного анализа подчеркивается наличие существенно различных температурных режимов средней атмосферы для летнего и зимнего периодов 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.

Автор выражает благодарность А.В. Михалеву за участие в обсуждении статьи и ценные замечания по ее содержанию.

Настоящая работа выполнена при поддержке программы Президиума РАН № 16 (часть 3).

1. Хргиан А.Х. Физика атмосферы. Метеорология. Л.: Гидрометеонздат, 1969. 647 с.
2. Метеорология верхней атмосферы / Под ред. Г.А. Коккина, С.С. Гайгерова. Л.: Гидрометеонздат, 1981. 270 с.
3. Гайгеров С.С. Исследование синоптических процессов в высоких слоях атмосферы. Л.: Гидрометеонздат, 1973. 252 с.
4. Кондратьев К.Я., Тимофеев Ю.М. Метеорологическое зондирование атмосферы из космоса. Л.: Гидрометеонздат, 1978. 279 с.
5. Кашкин В.Б., Сухинин А.И. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений. М.: Логос, 2001. 264 с.
6. 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. N 1. P. 66–77.
7. *Gavrilyeva G.A., Ammosov P.P.* Near-mesopause temperatures registered over Yakutia // *J. Atmos. and Sol.-Terr. Phys.* 2002. V. 64. N 8–11. P. 985–990.
 8. *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. N 4. P. 351–355.
 9. *Wu D.L., Read W.G., Shippony Z., Leblanca T., Duckb T.J., Ortland D.A., Sicad R.J., Argalld P.S., Oberhaidee J., Hauchecornef A., Keckhutf P., Sheg C.Y., Krueger D.A.* Mesospheric temperature from UARS MLS: Retrieval and validation // *J. Atmos. and Sol.-Terr. Phys.* 2003. V. 65. N 2. P. 245–267.
 10. *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. and Sol.-Terr. Phys.* 2000. V. 62. N 11. P. 967–979.
 11. *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. and Sol.-Terr. Phys.* 2005. V. 67. N 16. P. 1533–1543.
 12. *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. N 8. P. 2131–2149.
 13. *Forbes J.M., Wu Dong.* Solar tides as revealed by measurements of mesosphere temperature by the MLS experiment on UARS // *J. Atmos. Sci.* 2006. V. 63. N 7. P. 1776–1797.
 14. *Гивцивили Г.В., Лещенко Л.Н., Лысенко Е.В., Перов С.П., Семенов А.И., Сергеев Н.П., Фишкова Л.М., Шефов Н.Н.* Многолетние тренды некоторых характеристик земной атмосферы. Результаты измерений // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана.* 1996. Т. 32. N 3. С. 329–339.
 15. *Schwartz M.J., Lambert A., Manney G.L., Read W.D., Livesey N.J., Froidevaux L., Ao C.O., Bernath P.F., Boone C.D., Cofield R.E., Daffer W.H., Drouin B.J., Fetzer E.J., Fuller R.A., Jarnot R.F., Jiang J.H., Knosp B.W., Krüger K., Li J.-L.F., Mlynczak M.G., Pawson S., Russell III J.M., Santee M.L., Snyder W.V., Stek P.C., Thurstans R.P., Tompkins A.M., Wagner P.A., Walker K.A., Waters J.W., Wu D.L.* Validation of the Aura Microwave Limb Sounder temperature and geopotential height measurements // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. D15S11. doi: 10.1029/2007JD008783.
 16. *Медведева И.В., Белецкий А.Б., Михалев А.В., Черниговская М.А., Абушенко Н.А., Тацлин С.А.* Поведение атмосферной эмиссии атомарного кислорода 557,7 нм в периоды стратосферных потеплений в регионе Восточной Сибири // *Оптика атмосф. и океана.* 2007. Т. 20 № 2. С. 143–147.
 17. *Данилов А.Д., Казимировский Э.С., Вергасова Г.В., Хачикян Г.В.* Метеорологические эффекты в поносфере. Л.: Гидрометеонздат, 1987. 271 с.
 18. *Гинзбург Э.И., Гуляев В.Т., Жалковская Л.В.* Динамические модели свободной атмосферы. Новосибирск: Наука, 1987. 292 с.
 19. *Kazimirovsky E.S., Kokourov V.D., Vergasova G.V.* Dynamical climatology of the upper mesosphere, lower thermosphere and ionosphere // *Surv. Geophys.* 2006. V. 27. N 2. P. 211–255.
 20. *Mikhalev A.V., Medvedeva I.V., Kazimirovsky E.S., Potapov A.S.* Seasonal variation of upper-atmospheric emission in the atomic oxygen 557.7 nm line over East Siberia // *Adv. Space Res.* 2003. V. 32. N 9. P. 1787–1792.
 21. *Wang D.Y., Ward W.E., Solheim B.H., Shepherd G.G.* Longitudinal variations of green line emission rates observed by WINDII at altitudes 90–120 km during 1991–1996 // *J. Atmos. and Sol.-Terr. Phys.* 2002. V. 64. N 8–11. P. 1273–1286.
 22. *Шефов Н.Н., Семенов А.И., Холмич В.Ю.* Излучение верхней атмосферы – индикатор ее структуры и динамики. М.: ГЕОС, 2006. 741 с.
 23. *Куркин В.И., Полех Н.М., Черниговская М.А., Абушенко Н.А.* Исследование влияния атмосферных процессов на ионизацию F2-слоя поносферы // *Оптика атмосф. и океана.* 2006. Т. 19. № 12. С. 1087–1091.
 24. *Медведева И.В., Черниговская М.А., Михалев А.В.* Исследование температурной зависимости интенсивности атмосферной эмиссии 557,7 нм // *Оптика атмосф. и океана.* 2007. Т. 20. № 12. С. 1077–1081.
 25. *Михалев А.В., Ратовский К.Г., Медведев А.В., Черниговская М.А., Медведева И.В.* Одновременные наблюдения усиления атмосферной эмиссии 557,7 нм [OI] и образования спорадических слоев в периоды температурных возмущений в стратомезосфере // *Оптика атмосф. и океана.* 2007. Т. 20. № 12. С. 1071–1076.

M.A. Chernigovskaya. Morphological characteristics of the atmosphere temperature regime in the south region of East Siberia.

The temporal and altitude variations of the temperature of troposphere, stratosphere, and mesosphere for the Irkutsk region (52°N, 104°E) over the period from August 2004 to March 2008 has been analyzed. We used the satellite data of vertical temperature distribution by MLS (Microwave Limb Sounder) aboard the satellite EOS Aura. Diurnal, interdiurnal, and seasonal variations of the temperature were considered for height levels of 11, 50, and 80 km. The annual mean temperature variations at given heights were obtained by averaging for each day of year for the investigated period. The temporal variations of the temperature and the height of the stratopause and mesopause for day and night conditions were studied. We have plotted and analyzed altitude-temporal maps of the atmosphere temperature distribution for each month of the period under consideration.