

УДК 550.388

ОСОБЕННОСТИ ДОЛГОТНЫХ ВАРИАЦИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ АТМОСФЕРЫ НА ВЫСОТАХ ИЗЛУЧАЮЩЕГО СЛОЯ ЭМИССИИ АТОМАРНОГО КИСЛОРОДА 557.7 НМ

© 2012 г. А. И. Семенов¹, Н. Н. Шефов¹, И. В. Медведева², А. Б. Белецкий²

¹ Учреждение РАН Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова, г. Москва

² Учреждение РАН Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск

e-mail: anasemenov@yandex.ru

Поступила в редакцию 05.10.2010 г.

На основе корреляционных соотношений сезонных вариаций интенсивности и температуры эмиссии 557.7 нм построены среднемесячные долготные вариации температуры. Сделано сопоставление с данными интерферометрических и лидарных измерений температуры, проводившихся на различных станциях, а также с результатами спутниковых исследований. Получены зависимости амплитуд сезонных вариаций температуры от широты.

1. ВВЕДЕНИЕ

Многолетние исследования поведения характеристик (интенсивность, температура, высота слоя свечения) различных эмиссий ночной верхней атмосферы уже давно обнаружили, что имеется заметная неоднородность в их глобальном пространственном распределении. Основные работы, посвященные этой проблеме обычно связаны с измерениями интенсивностей наблюдаемых эмиссий верхних слоев атмосферы. Среди них выделяется излучение атомарного кислорода 557.7 нм на высотах нижней термосферы, которое является наиболее доступным для измерений, вследствие своей яркости, и поэтому обладает надежными сведениями о вариациях его интенсивности [Шефов и Семенов, 2004]. Однако наибольший интерес представляет знание поведения температуры в этой области высот (90–100 км), так как именно оно во многом предопределяет характер высотного распределения температуры в области термосферы. К сожалению, измерения температуры по доплеровскому профилю эмиссии 557.7 нм достаточно скудны, так как они связаны с большими техническими и методическими трудностями интерферометрических измерений. Тщательный подбор и анализ многолетних данных измерений характеристик эмиссии 557.7 нм, полученных на различных среднеширотных станциях, позволили получить представление о закономерностях различного типа вариаций параметров этого излучения – интенсивности, температуры и высоты излучающего слоя – и создать на этой основе эмпирическую модель вариаций этих параметров. Модель дает возможность взаимно связать вариации характеристик эмиссии 557.7 нм и производить их оценки для

заданных гелио-геофизических условий [Семенов и Шефов, 1997а, б, в; Semenov and Shefov, 1997].

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Интерферометрические измерения температуры атмосферы на высотах ~97 км с помощью эмиссии 557.7 нм проводились в течение ряда лет (1965–1974 гг.) в основном на средних широтах северного и южного полушарий – в Австралии ($\varphi = 37.1^\circ\text{S}$, $\lambda = 209.6^\circ\text{E}$) [Armstrong, 1968], на обсерваториях Бэдфорд ($\varphi = 42.5^\circ\text{N}$, $\lambda = 288.7^\circ\text{E}$) [Hernandez and Turtle, 1965], Фриц Пик ($\varphi = 39.9^\circ\text{N}$, $\lambda = 254.5^\circ\text{E}$) [Hernandez, 1976, 1977; Hernandez and Killeen, 1988] и Звенигороде ($\varphi = 55.7^\circ\text{N}$, $\lambda = 36.8^\circ\text{E}$) в 1984–1988 гг. [Красовский и др., 1986]. Лидарные измерения максимума и профиля слоя свечения этой эмиссии проводились в 1991–1993 гг. в Форт Коллинз ($\varphi = 40.6^\circ\text{N}$, $\lambda = 255.0^\circ\text{E}$) [She et al., 1993], Халеакала, Мауи ($\varphi = 20.7^\circ\text{N}$, $\lambda = 203.7^\circ\text{E}$) [Dao et al., 1995]. Спутниковые исследования с помощью этой эмиссии преимущественно были посвящены анализу суточных и широтных вариаций температуры атмосферы у основания термосферы, полученным при усреднении долготных характеристик. Средние долготные распределения температуры в зависимости от высоты вблизи экваториальной области широт для весеннего периода приведены в работе [Roble and Shepherd, 1997]. Имеется отдельное значение измеренной температуры, относящееся к географическим координатам ($\varphi = 38^\circ\text{S}$, $\lambda = 285^\circ\text{E}$) для 0.9^h местного солнечного времени 18 декабря 1991 г., сделанное со спутника UARS с помощью прибора WINDII [Shepherd et al., 1993a]. Все эти спутниковые данные соответству-

ют летнему периоду в южном полушарии. Основной массив имеющихся сведений об измеренных температурах с помощью эмиссии 557.7 нм, накопленный на основе регулярных измерений, относится к северному полушарию. Поэтому при условии сходства рассматриваемых закономерностей в обоих полушариях значение температуры, полученное с помощью WINDII [Shepherd et al., 1993a], было отнесено к июню в северном полушарии.

В более высокоширотной зоне (65°N–72°N) измерения проводились при помощи аппаратуры WINDII на спутнике UARS [Evans et al., 1995], в Якутске ($\varphi = 62.1^\circ\text{N}$, $\lambda = 129.7^\circ\text{E}$) [Югов и др., 1997]. Необходимо отметить, что при измерениях в этой области широт следует учитывать возможное существенное влияние авроральной активности и особенностей широтной зависимости параметров эмиссии 557.7 нм [Шефов и др., 2006].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

Разработка эмпирических моделей вариаций характеристик эмиссии атомарного кислорода – интенсивности, температуры и высоты максимума излучающего слоя позволила установить, что результаты конкретных измерений для различных времен года весьма удовлетворительно аппроксимируются одинаковыми аналитическими формулами. Гармонический анализ выявленных вариаций показал, что амплитуды соответствующих гармоник для интенсивности и температуры имеют пропорциональные значения [Семенов и Шефов, 1997а, б; Semenov and Shefov, 1997]. Данные о долготных вариациях интенсивностей эмиссии 557.7 нм для различных месяцев года приведены в публикациях [Шефов и Семенов, 2004; Шефов и др., 2006]. Это позволило построить средние долготные вариации температуры излучающего слоя эмиссии 557.7 нм, приведенные, как и данные для интенсивностей, для минимума солнечной активности при $F_{10.7} = 74$ и к зенитному углу Солнца $\chi_s \approx 120^\circ$ (рис.1). Сведения об интерферометрических измерениях температуры были взяты из работ, в которых представлены соответствующие данные для различных географических мест, имеющих существенно отличающиеся долготы. Была, естественно, сделана корректировка за счет вариаций уровня солнечной активности и географической широты. Кроме этого были использованы результаты измерений спутника UARS WINDII [Shepherd et al., 1993a; Roble and Shepherd, 1997], а также данные измерений температуры в мезосфере, полученные с помощью зонда MLS, установленного на борту космического аппарата EOS Aura (<http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/Aura/MLS/index.shtml>). Эти результаты показаны различными значками на рис. 1.

Горизонтальными линиями показаны средне-долготные значения температуры для каждого месяца года. В верхней части рисунка схематично показаны интервалы долгот, соответствующие материкам и океанам.

На основе эмпирической аппроксимации среднемесячных долготных вариаций температуры на высотах излучающего слоя 557.7 нм для заданного дня года t_d получены следующие формулы:

$$T(\lambda, t_d) = 206.2 + T_0(t_d) \cos(\lambda - 8) + T_1(t_d) \cos(\lambda - 300) + T_2(t_d) \cos(\lambda - 5) + T_3(t_d) \cos(\lambda - 9) + T_4(t_d) \cos \lambda,$$

$$T_0(t_d) = 8.52,$$

$$T_1(t_d) = 1.05 \cos \frac{2\pi}{365} (t_d - 274),$$

$$T_2(t_d) = 1.48 \cos \frac{4\pi}{365} (t_d - 134),$$

$$T_3(t_d) = 1.90 \cos \frac{6\pi}{365} (t_d - 67),$$

$$T_4(t_d) = 0.54 \cos \frac{8\pi}{365} (t_d - 28),$$

где температуры приведены в К.

Они позволяют производить оценку сезонных вариаций температуры в зависимости от дня года t_d для заданной долготы λ .

На основе полученных соотношений на рис. 2 представлены сезонные вариации температуры эмиссионного слоя 557.7 нм для различных долгот в указанном широтном диапазоне. Горизонтальными линиями отмечены среднегодовые значения температуры для указанных долгот.

$$T(t_d, \lambda) = 206.2 + T_0(\lambda) + T_1(\lambda) \cos \frac{2\pi}{365} (t_d - 274) + T_2(\lambda) \cos \frac{4\pi}{365} (t_d - 134) + T_3(\lambda) \cos \frac{6\pi}{365} (t_d - 67) + T_4(\lambda) \cos \frac{8\pi}{365} (t_d - 28),$$

$$T_0(\lambda) = 8.52 \cos(\lambda - 8),$$

$$T_1(\lambda) = 5.66 + 1.05 \cos(\lambda - 300),$$

$$T_2(\lambda) = 3.47 + 1.48 \cos(\lambda - 5),$$

$$T_3(\lambda) = 9.81 + 1.90 \cos(\lambda - 9),$$

$$T_4(\lambda) = 4.00 + 0.54 \cos \lambda,$$

где температуры приведены в К.

Как видно, несмотря на сохранение общего характера сезонных вариаций температуры, естественно, и интенсивности, и высоты максимума излучающего слоя, реальные вариации суще-

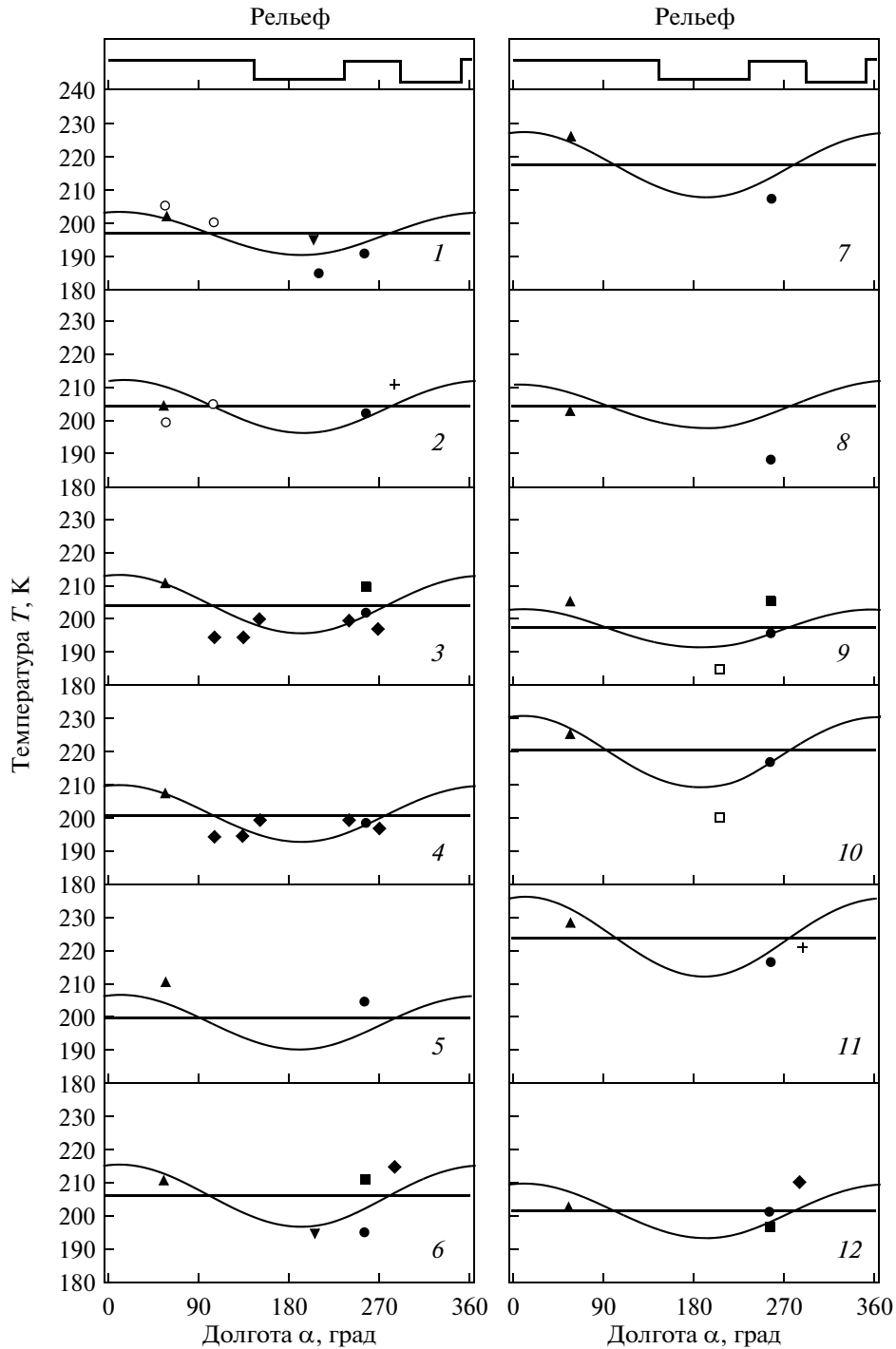


Рис.1. Среднемесячные (указаны цифрами) долготные вариации температуры излучающего слоя эмиссии 557.7 нм. Сплошные линии – результаты вычисления на основе корреляции сезонных вариаций температуры и интенсивности. Треугольники – Звенигород, кружки – Фриц Пик [Hernandez, 1976, 1977; Hernandez and Killeen, 1988], крестики – [Hernandez and Turtle, 1965], квадраты – лидарные измерения Форт Коллинз [She et al., 1993], ромб – данные спутника UARS WINDII [Shepherd et al., 1993a; Roble and Shepherd, 1997], обратные треугольники – [Dao et al., 1995], полые квадраты – [Armstrong, 1968], полые кружки – данные спутника AURA для Звенигорода и Иркутска (2008, 2009 гг.).

ственно зависят от географической долготы. Обращает на себя внимание, что практически на всех рассматриваемых долготах в течение года,

наблюдается линейный рост амплитуды сезонных вариаций температуры излучающего слоя эмиссии 557.7 нм.

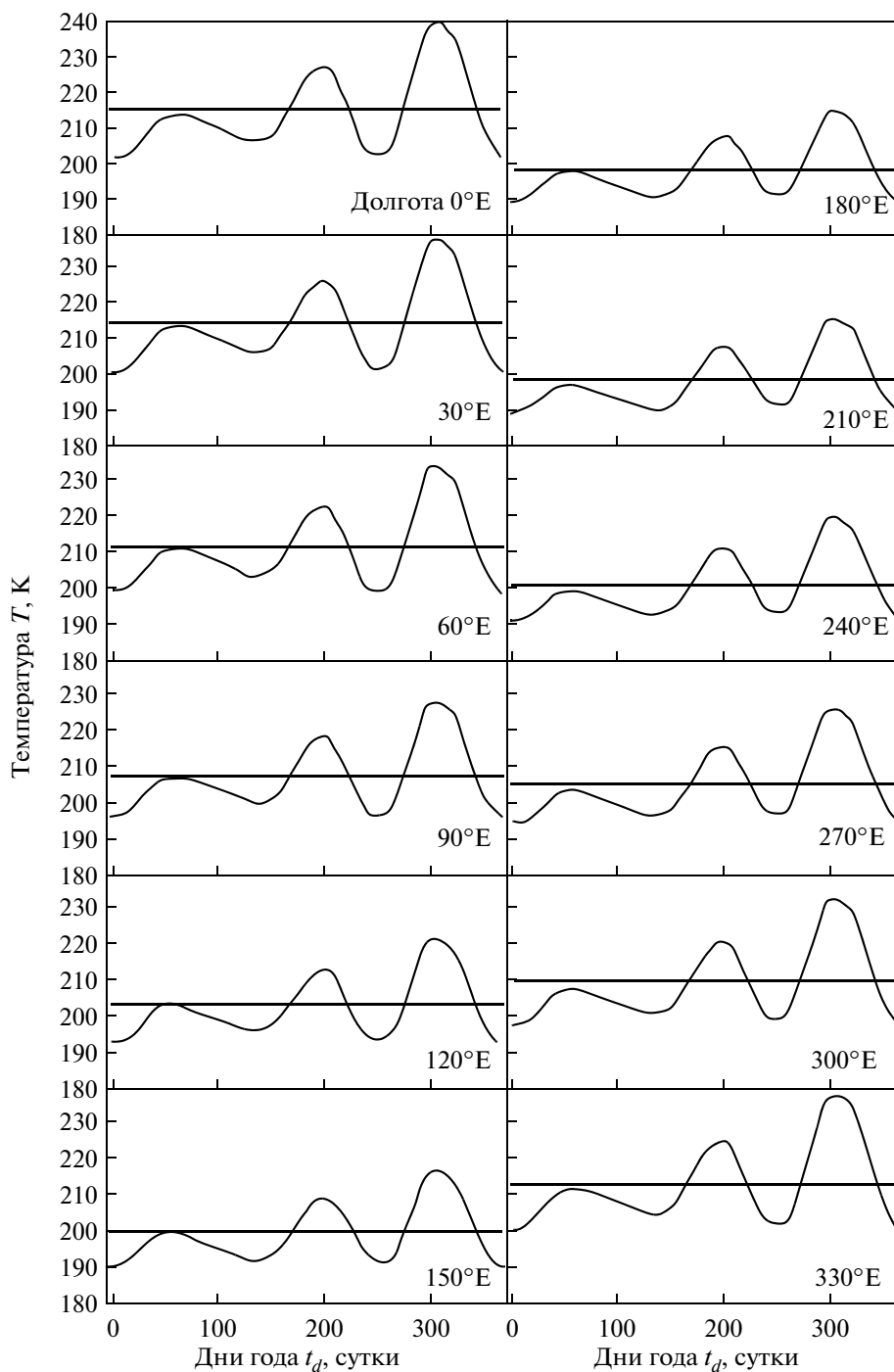


Рис. 2. Среднемесячные сезонные вариации температуры излучающего слоя эмиссии 557.7 нм для различных долгот (указаны цифрами). Сплошные линии – результаты вычисления на основе корреляции сезонных вариаций температуры и интенсивности.

В связи с этим вызывает сожаление, что имеющиеся у авторов работы [Shepherd et al., 1993a] данные измерений WINDII со спутника UARS не были использованы для анализа долготных особенностей параметров эмиссии атомарного кислорода 557.7 нм. Проведенное ими в дальнейших

работах по обработке этого материала усреднение долготных данных было вполне обоснованно для более четкого выявления характера зависимостей искомых параметров. Тем не менее, после этого было необходимо выяснить долготные свойства, так как они оказываются существенными. Это

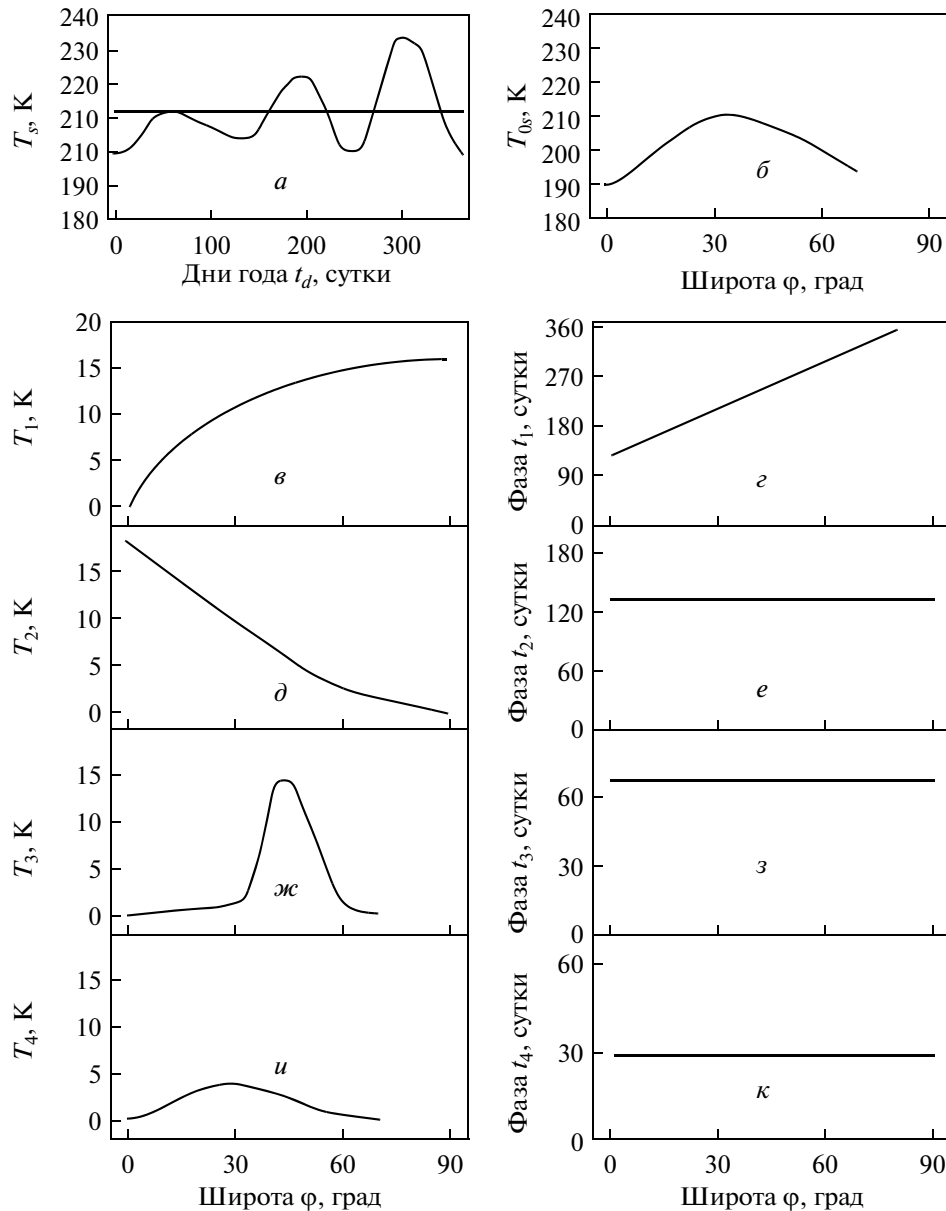


Рис. 3. Средние широтные вариации температуры излучающего слоя эмиссии 557.7 нм для долготы 60°N и условий минимума солнечной активности. Сезонные вариации T_5 – а; широтные вариации среднегодовых значений T_{0s} – б; амплитуда T_1 (в) и фаза t_1 (г) годовой гармоники 365 суток; амплитуда T_2 (д) и фаза t_2 (е) полугодовой гармоники 182.5 суток; амплитуда T_3 (ж) и фаза t_3 (з) третьей гармоники 121.7 суток; амплитуда T_4 (и) и фаза t_4 (к) четвертой гармоники 91.2 суток.

уже было показано на основе измерений интенсивности эмиссии 557.7 нм [Shepherd et al., 1993b]. Это особенно интересно было бы определить в максимально широком диапазоне широт обоих полушарий – северного и южного.

Следует отметить, что подобные закономерности проявляются и в широтном распределении рассматриваемых параметров эмиссии 557.7 нм. Для интенсивности излучения они были представлены в работах [Фишкова и др., 2000; Шефов и др., 2006]. Поскольку измерений температуры

эмиссии 557.7 нм в широком диапазоне широт практически нет, то для выявления закономерностей вариаций соответствующих температур излучающего слоя были использованы существующие корреляционные соотношения между интенсивностью и температурами [Шефов и др., 2006]. На этой основе были получены зависимости амплитуд гармоник температуры и их фаз от широты для долготы 60°N (рис. 3). Средняя зависимость среднегодового значения температуры была использована согласно работе [Shepherd

et al., 1993b]. Эмпирические аппроксимации, аналогичные вариациям интенсивности, имеют вид

$$T_{0.5}(\varphi) = 190 + 20[\cos 1.8(\varphi - 35)]^{2.7},$$

$$T_1(\varphi) = (16.1 \pm 0.15)[\sin \varphi]^{0.66 \pm 0.01},$$

$$T_2(\varphi) = (17.8 \pm 0.1)[1 - (\sin \varphi)^{1.05 \pm 0.01}],$$

$$T_3(\varphi) = (14.1 \pm 1.2)[\cos 2(\varphi - 45)]^{16.4 \pm 1},$$

$$T_4(\varphi) = 3.8 \exp \left[- \left(\frac{\varphi - 30}{20} \right)^{2.13} \right],$$

$$t_1(\varphi) = (133 \pm 7) + (2.80 \pm 0.16)\varphi,$$

$$t_2(\varphi) = 134; \quad t_3(\varphi) = 67; \quad t_4(\varphi) = 28,$$

где температуры приведены в К, а время в сутках.

Полученные результаты свидетельствуют, что амплитуды гармоник зависят также и от долготы. Фазы сохраняют свои значения.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе статистических закономерностей долготных вариаций интенсивности и температуры эмиссии атомарного кислорода 557.7 нм были получены аппроксимирующие соотношения, позволяющие делать оценки долготных значений температуры на высотах 95–100 км в широтной зоне 30–55°N для условий минимума солнечной активности. Учет влияния географических широт также может быть оценен на основе имеющихся характеристик. Сопоставления с данными немногочисленных прямых измерений температуры интерферометрическими, лидарными и спутниковыми методами показали, что они соответствуют представленным эмпирическим закономерностям.

Работа была выполнена при поддержке гранта РФФИ № 10-05-00062.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Красовский В.И., Семенов А.И., Соболев В.Г., Тихонов А.В. Вариации доплеровской температуры и интенсивности эмиссии 557.7 нм при прохождении ВГВ // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 26. № 6. С. 941–945. 1986.
- Семенов А.И., Шефов Н.Н. Эмпирическая модель вариаций эмиссии атомарного кислорода 557.7 нм в ночное время. 1. Интенсивность // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 36. № 2. С. 81–90. 1997а.
- Семенов А.И., Шефов Н.Н. Эмпирическая модель вариаций эмиссии атомарного кислорода 557.7 нм в ночное время. 2. Температура // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 36. № 3. С. 143–145. 1997б.
- Семенов А.И., Шефов Н.Н. Эмпирическая модель вариаций эмиссии атомарного кислорода 557.7 нм в ночное время. 3. Высота излучающего слоя // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 36. № 4. С. 105–111. 1997в.
- Шефов Н.Н., Семенов А.И. Долготные вариации эмиссии атомарного кислорода 557.7 нм // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 44. № 5. С. 671–674. 2004.
- Шефов Н.Н., Семенов А.И., Хомич В.Ю. Излучение верхней атмосферы – индикатор ее структуры и динамики. М.: ГЕОС. 741 с. 2006.
- Югов В.А., Николашкин С.В., Игнатъев В.М. Связь температуры субавроральной нижней термосферы с солнечной активностью и фазами квазидвухлетних колебаний // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 37. № 6. С. 108–112. 1997.
- Armstrong E.B. Variations in the width of the OI λ 5577 line in the night airglow // Planet. Space Sci. V. 16. № 2. P. 211–229. 1968.
- Dao P.D., Farley R., Tao X., Gardner C.S. Lidar observations of the temperature profile between 25 and 102 km: evidence of strong tidal perturbation // Geophys. Res. Lett. V. 22. № 20. P. 2825–2828. 1995.
- Evans W.F.L., Laframboise L.R., Sine K.R., Wiens R.H., Shepherd G.G. Observation of polar mesospheric clouds in summer, 1993 by the WINDII instrument on UARS // Geophys. Res. Lett. V. 22. № 20. P. 2793–2796. 1995.
- Hernandez G.J., Turtle J.P. Nightglow 5577 A [OI] line kinetic temperatures // Planet. Space Sci. V. 13. № 9. P. 901–904. 1965.
- Hernandez G. Lower thermosphere temperatures determined from the line profiles of the OI 17.924-K (5577 Å) emission in the night sky. 1. Long-term behaviour // J. Geophys. Res. V. 81. № 28. P. 5165–5172. 1976.
- Hernandez G. Lower thermosphere temperatures determined from the line profiles of the OI 17.924-K (5577 Å) emission in the night sky. 2. Interaction with the lower atmosphere during stratospheric warming // J. Geophys. Res. V. 82. № 16. P. 2127–2131. 1977.
- Hernandez G., Killeen T.L. Optical measurements of winds and kinetic temperatures in the upper atmosphere // Adv. Space Res. V. 8. № 5–6. P. 149–213. 1988.
- Roble R.G., Shepherd G.G. An analysis of wind imaging interferometer observations of O(¹S) equatorial emission rates using the thermosphere-ionosphere-mesosphere-electrodynamics general circulation model // J. Geophys. Res., V. 102. № A2. P. 2467–2474. 1997.
- Semenov A.I., Shefov N.N. Empirical model of the variations of atomic oxygen emission 557.7 nm // Proc. SPIE (23rd European Meeting on Atmospheric Studies by Optical Methods, Kiev, September 2–6, 1997) / Ed. V.N. Ivchenko. V. 3237. P. 113–122. 1997.
- She C.Y., Yu J.R., Chen H. Observed thermal structure of a midlatitude mesopause // Geophys. Res. Lett. V. 20. № 7. P. 567–570. 1993.
- Shepherd G.G., Thuillier G., Gault W.A. et al. WINDII, the wind imaging interferometer on the upper atmosphere research satellite // J. Geophys. Res. V. 98. № D6. P. 10725–10750. 1993a.
- Shepherd G.G., Thuillier G., Solheim B.H. et al. Longitudinal structure in atomic oxygen concentrations observed with WINDII on UARS // Geophys. Res. Lett. V. 20. № 12. P. 1303–1306. 1993b.