

УДК 550.388

ДОЛГОТНЫЕ ВАРИАЦИИ ГИДРОКСИЛЬНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.

1. ТЕМПЕРАТУРА

© 2013 г. А. И. Семенов¹, Н. Н. Шефов¹, И. В. Медведева²

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

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

e-mail: anasemenov@yandex.ru

Поступила в редакцию 19.09.2011 г.

После доработки 26.11.2012 г.

На основе данных многолетних исследований температуры мезопаузы по ее гидроксильному (ОН) излучению на различных наземных станциях северного полушария, а также данных измерений температуры со спутника UARS WINDII, получены сведения о ее долготных изменениях. В глобальном долготном распределении температуры выявлены ее максимумы на долготях Евразии и Северной Америки и минимумы над Тихим и Атлантическим океанами. Среднедолготные значения температуры имеют отчетливые сезонные изменения. На фоне средней глобальной вариации температуры, отображающей рельеф земной поверхности, существуют локальные нестационарные крупномасштабные неоднородности в виде максимумов и минимумов температуры до 30 К относительно среднего значения температуры, которые коррелируют с изменениями их размеров, достигающих десятки градусов долготы и широты, что соответствует нескольким тысячам километров.

DOI: 10.7868/S0016794013040135

1. ВВЕДЕНИЕ

Многолетние систематические исследования гидроксильного излучения атмосферы на высотах мезопаузы ведутся с середины 1950-х годов. Активизация измерений его параметров началась с Международного Геофизического Года (1957–1959 гг.). К настоящему времени наиболее длительные и непрерывные ряды наблюдений за температурным режимом мезопаузы по излучению ОН получены на станциях Звенигород [Шефов и др., 2006], Абастумани [Фишкова, 1983; Torosheidze, 1994], Якутск [Игнатъев и др., 1974; Гаврильева и Аммосов, 2003], Вупперталь [Offermann et al., 2003], Свалбард [Sigernes et al., 2003]. Данные, накопленные в течение многих десятилетий, позволили выявить разнообразные закономерности вариаций измеренной вращательной температуры молекулы ОН с различным колебательным возбуждением, отображающей кинетическую температуру атмосферы в области мезопаузы [Семенов и Шефов, 1996; Шефов и др., 2006]. Одной из важных особенностей поведения вращательной температуры является характер ее планетарного распределения в зависимости от широты и долготы, обусловленный влиянием на эмиссию ОН орографических волновых процессов, возникающих при взаимодействии воздушных потоков в нижней атмосфере с рельефом земной поверхности, а также с активными метеорологическими образованиями, такими как фронты атмосферного давления. Первые такие свидетельства о воз-

можном проявлении орографического эффекта на состояние верхних слоев атмосферы были получены еще в работе Кессениха и Булатова [1944]. Эти авторы по данным ионосферного зондирования слоя F_2 проанализировали пространственное распределение электронной концентрации в F_2 слое ионосферы и обнаружили увеличение электронной концентрации над континентами по сравнению с океанами.

Возможности для исследований закономерностей пространственного распределения вращательной температуры гидроксильной эмиссии в значительной степени зависят от наличия сети геофизических станций в рассматриваемом диапазоне широт и долгот и равномерности их распределения в долготном и широтном диапазонах. Преимущественно большинство таких пунктов наблюдений расположено в средних широтах северного полушария. В южном полушарии станции наблюдений расположены в экваториальной части Южной Америки и в Антарктиде. Отсутствие пунктов наблюдений в акваториях Тихого и Атлантического океанов в какой-то степени могут быть компенсированы эпизодическими измерениями со спутников.

Долготные неоднородности в собственном свечении верхней атмосферы первоначально исследовались и были выявлены по серебристым облакам [Шефов и Семенов, 2004а] и эмиссии атомарного кислорода 557.7 нм [Шефов и Семенов, 2004б]. Исследование широтно-долготного

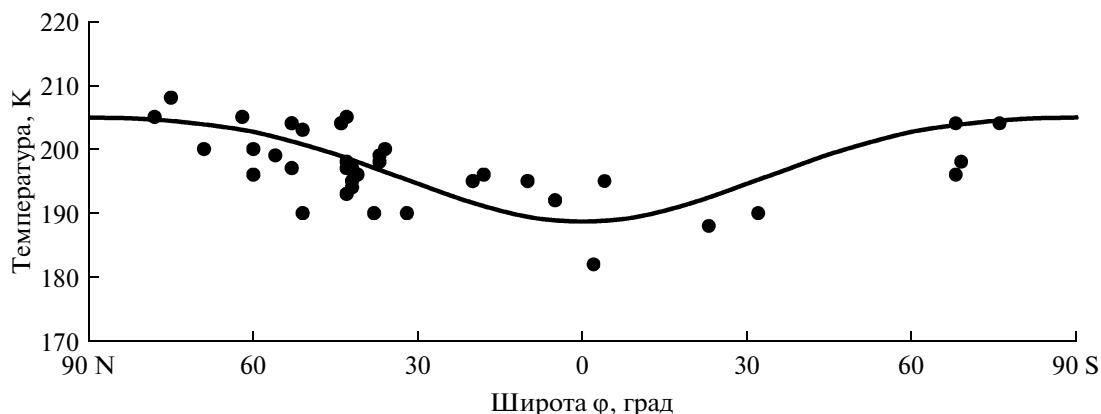


Рис. 1. Широтные вариации среднегодовой температуры излучающего слоя для полосы ОН (6–2).

распределения характеристик мезопаузы является главной целью систематизации и анализа имеющихся данных о гидроксильной эмиссии, как энергетически наиболее существенной для этой области атмосферы. В настоящей работе сделана попытка выявления закономерностей долготных и широтных вариаций температуры эмиссии гидроксила, выявленных на основе анализа данных измерений на различных отечественных и зарубежных станциях за последние годы.

2. ДАННЫЕ ИЗМЕРЕНИЙ

Данные, собранные со всех станций для анализа, представляли собой ряды значений интенсивности и вращательной температуры, измеренных по различным вращательно-колебательным полосам ОН. Это накладывало ряд дополнительных требований к их использованию, так как известно, что вращательная температура, определенная по различным полосам ОН, может существенно отличаться друг от друга [Шефов, 1961, 1976]. Кроме того, некоторые авторы при расчетах значений вращательной температуры и интенсивности излучения ОН в различные периоды времени применяли значения факторов интенсивностей вращательных линий полос ОН, полученные на основе различных теоретических расчетов. Все эти обстоятельства приводили к неизбежным различиям определяемых значений температур и вызывали необходимость учета таких особенностей в используемых данных измерений. Список станций и обсерваторий, на которых проводились исследования гидроксильного излучения, представлен в таблице. Интервалы лет, указанные в таблице для каждой станции, соответствуют периодам измерений температуры полос ОН, данные для которых использовались при анализе в данной работе. Для получения сведений о долготных закономерностях поведения температуры гидроксильного излучения для си-

туации начала XXI века необходимо учитывать влияния многолетнего тренда температуры на высотах мезопаузы [Golitsyn et al., 1996; Семенов, 1996; Semenov, 2000], солнечной активности, а также особенности ее сезонных вариаций для рассматриваемых в работе станций.

3. СРЕДНЕГОДОВЫЕ ШИРОТНЫЕ ВАРИАЦИИ ВРАЩАТЕЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

Исследование глобального распределения вращательной температуры ОН предполагает изучение ее долготного и широтного поведения. Первоначальные попытки выявления таких изменений для среднегодовых значений температуры на основе имеющихся данных только среднеширотных измерений в северном полушарии практически не обнаружили каких-либо широтных зависимостей [Семенов и Шефов, 1996; Шефов и др., 2006]. За последние годы были накоплены и систематизированы результаты измерений температуры ОН на различных станциях, расположенных в большом широтном диапазоне. Сопоставление среднегодовых значений температуры, полученных на этих станциях, и соответствующих временно-му интервалу 1995–2005 гг., свидетельствует о наличии тенденции увеличения температуры с ростом географической широты как северного, так и южного полушария. Характер широтного поведения вращательной температуры ОН, полученной на различных станциях и приведенной к одинаковым гелиогеофизическим условиям, представлен на рис. 1. Аналитическая аппроксимация средних широтных вариаций температуры (К) имеет вид

$$T_{ma}(\varphi) = 198 + 8.1 \cos 2\varphi - 1.2 \cos 4\varphi.$$

Как видно из рис. 1, на средних широтах (30–60° N) северного полушария широтная зависимость температуры выявляется слабо, что не противоречит

Станции исследований гидроксильного излучения

№	Станция	φ, °	λ, °	T(OH)	Годы	Авторы
1	Longyearbyen	78.2 N	15.6 E	(6–2)	1980–2001	Sigernes et al., 2003; Semenov et al., 2006
2	Resolute Bay	74.7 N	265.1 E	(6–2)	2001–2002	Cho et al., 2004
3	Skitbotn	69.5 N	20.3 E	(6–2)	1986–1987	Myrabø and Harang, 1988
4	Andoya Island	68.8 N	10.8 E	(3–1)	1995–1996	Mulligan, 1997; Bittner et al., 2002
5	Маймага, Якутск	63.0 N	129.5 E	(6–2)	1997–2000	Игнатъев и др., 1974; Гаврильева и Аммосов, 2003
6	Holter	60.3 N	10.9 E	(6–2)	1985–1987	Myrabø and Harang, 1988
7	Ås	59.7 N	10.8 E	(6–1)	1964	Kvifte, 1967
8	Stokholm	59.5 N	18.2 E	(3–1)	1991–2002	Espy et al., 2007
9	Звенигород	55.7 N	36.8 E	(6–2)	2000–2001	Bakanas et al., 2003; Pertsev and Perminov, 2007
10	Maunoth	53.2 N	353.6 E	(4–2)	1993	Mulligan et al., 1995
11	Торы, Иркутск	51.8 N	103.0 E	(6–2)	2010	Медведева и др., 2011
12	Wuppertal	51.3 N	7.2 E	(6–2)	1990–2001	Offermann et al., 2003
13	Calgary	51.0 N	245.9 E	(8–3)	1987–1990	Sahai et al., 1996
14	Haute Provence	43.9 N	5.7 E	(6–1)	1961	Nguyen-Huu-Doan, 1963
15	Алма-Ата	43.2 N	76.9 E	(6–1)	1957–1958	Карягина, 1962
16	Delaware	42.8 N	278.6 E	(3–1)	1993	She and Lowe, 1998
17	Millstone Hill	42.6 N	287.5 E	(6–2)	2005–2007	Smith et al., 2010
18	Yerkes Observatory	42.5 N	288.7 E	(6–2)	1958–1960	Wallace, 1961
19	Michigan	42.3 N	276.3 E	(3–1)	1992–1995	Niciejewski and Killeen, 1995
20	Bear Lake	41.9 N	248.6 E	(6–2)	1994–1995	Choi et al., 1998; Pendleton et al., 2000
21	Абастумани	41.8 N	42.8 E	(6–2)	1987–1992	Toroshelidze, 1994
22	Fort Collins	40.6 N	255.0 E	(4–1)	1990–1999	She et al., 2002
23	Ашхабад	38.0 N	58.1 E	(6–1)	1958	Салова, 1962
24	Sierra Nevada	37.1 N	3.4 E	(6–2)	1998–2000	López-González et al., 2007
25	El Arenosillo	37.1 N	353.3 E	(6–2)	1998–2000	Scheer et al., 1994
26	Yokosuka	35.2 N	139.7 E	(6–2)	1979–1980	Takeuchi and Misawa, 1981
27	Hawaii	20.7 N	203.8 E	(4–2)	1990–1993	Gu et al., 1995; Lowe and Turnbull, 1995; Espy et al., 1995
28	Puna	18.5 N	73.9 E	(7–2)	1985–1986	Agashe et al., 1989
29	Alcantara	2.5 S	44.4 E	(9–4)	1992	Takahashi et al., 1996
30	Fortaleza	3.9 S	321.6 E	(9–4)	1986–1991	Takahashi et al., 1994
31	Cachoeira Paulista	22.7 S	314.7 E	(9–4)	1987–1991	Takahashi et al., 1994
32	El Leoncito	31.8 S	290.7 E	(6–2)	1998–2002	Scheer et al., 2005
33	Mawson	67.6 S	63.9 E	(6–2)	1992–1993	Greet et al., 1994
34	Rothera	67.6 S	291.9 E	(6–2)	1992–1993	Espy et al., 2003
35	Davis	68.6 S	78.0 E	(6–2)	1995–2001	French et al., 2004; Holdsworth et al., 2006
36	Halley	75.6 S	333.4 E	(6–2)	2000	Espy et al., 2003
37	UARS (WINDII)	40 S–73 N	0–360 E		1991–1997	Shepherd et al., 2004, 2005

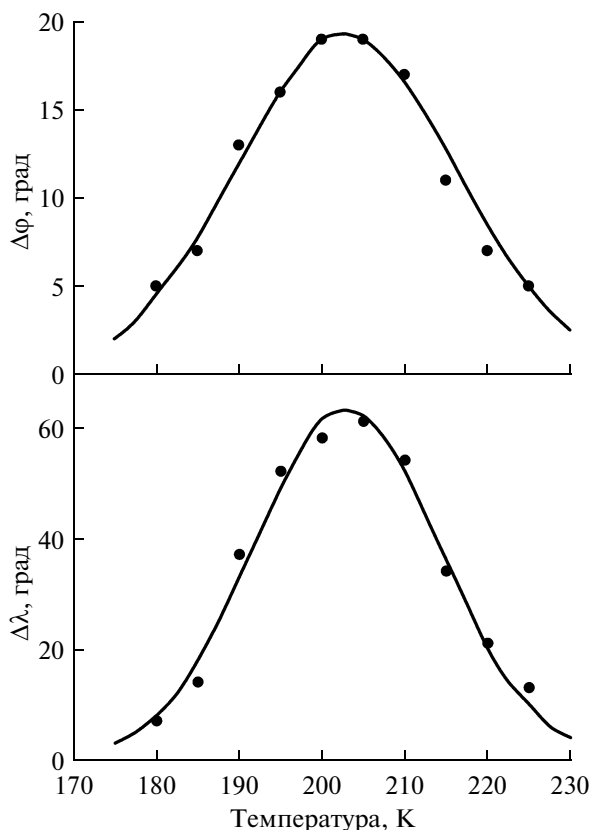


Рис. 2. Широтные и долготные распределения размеров неоднородностей температуры излучающего слоя полосы ОН (6–2) для широтной области 40–60° N.

первоначальным оценкам. Среднеширотная среднегодовая температура составляет $\sim 200 \pm 5$ К. Аналогичная ситуация имеет место и для экваториальных широт (25° S–25° N), для которых температура равна $\sim 190–195 \pm 5$ К.

4. ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ НЕОДНОРОДНОСТИ ТЕМПЕРАТУРЫ

Важной особенностью при измерениях температуры является их пространственная неоднородность, которая имеет характерную пятнистую структуру. Такое поведение атмосферного излучения было уже ранее отмечено при исследованиях пространственного распределения интенсивностей многих эмиссий мезопаузы и термосферы [Роч и Гордон, 1977]. Спутниковые измерения также позволили выявить высотную неоднородность излучающих слоев [Ross et al., 1992]. В работах [Offermann et al., 2003; Shepherd et al., 2004, 2005] представлены изолинии температурных неоднородностей. Полученные авторами результаты дают возможность оценить параметры пятнистой структуры в пространственном распределении температуры гидроксильного излучения. Они были использованы для оценки широтно-долготных размеров пятен. На рисунке 2 показана

ны статистические распределения размеров температурных неоднородностей в долготных и широтных направлениях для диапазона широт 40–60° N. Аналитическая аппроксимация этих распределений может быть представлена формулами по долготе (градусы)

$$\Delta\lambda = 63 \exp\left[-\frac{(T - 203)^2}{16^2}\right] = 63 \exp\left[-\frac{4 \ln 2 (T - 203)^2}{22^2}\right]$$

по широте (градусы)

$$\Delta\phi = 19 \exp\left[-\frac{(T - 203)^2}{19^2}\right] = 19 \exp\left[-\frac{4 \ln 2 (T - 203)^2}{26^2}\right].$$

Для указанных зависимостей полуширина нормальных распределений температуры по долготе равна 22 К, по широте – 26 К.

Для условий экваториальных широт 25° S–25° N аналогичные соотношения имеют вид

$$\Delta\lambda = 62 \exp\left[-\frac{(T - 195)^2}{22^2}\right] = 62 \exp\left[-\frac{4 \ln 2 (T - 195)^2}{30^2}\right],$$

$$\Delta\phi = 27 \exp\left[-\frac{(T - 195)^2}{24^2}\right] = 27 \exp\left[-\frac{4 \ln 2 (T - 195)^2}{33^2}\right].$$

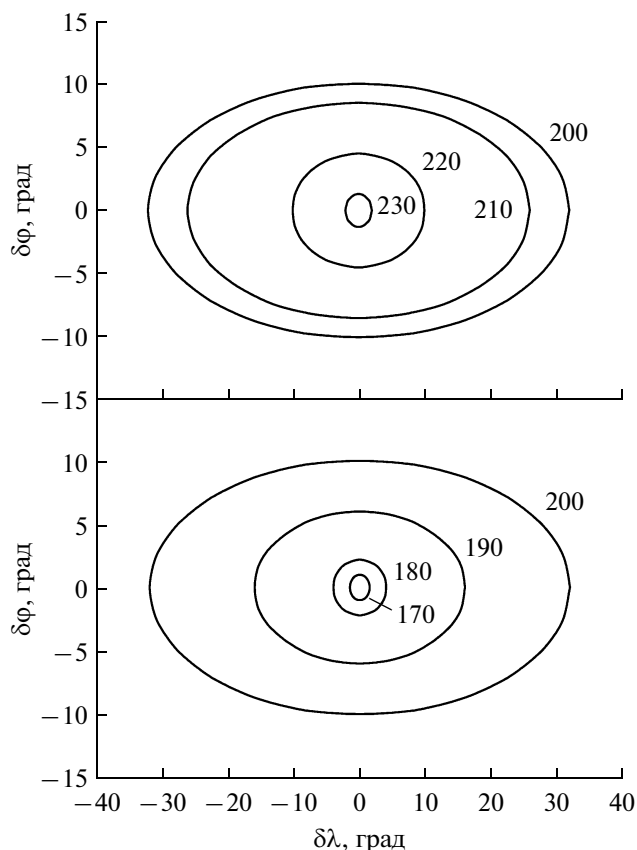


Рис. 3. Широтно-долготные изолинии неоднородностей температуры излучающего слоя для полосы ОН (6–2) для широтной области $40^\circ \text{N}–60^\circ \text{N}$. На верхней и нижней панелях представлены изолинии, соответствующие максимуму и минимуму температуры, соответственно, относительно среднего уровня температуры $T = 200 \text{ K}$.

Интересно отметить, что средние значения температуры для этих интервалов широт весьма удовлетворительно соответствуют среднегодовым значениям на соответствующих диапазонах широт на рис. 1.

Существование таких крупномасштабных неоднородностей, по-видимому, может быть причиной наблюдающихся отклонений данных измерений на некоторых станциях от среднестатистических закономерностей.

Пространственные распределения изолиний температуры в реальных условиях определяются динамическими процессами и поэтому имеют произвольные (случайные) геометрические формы. Для идеализированного представления размеров этих распределений были использованы данные рис. 2 и приведенные выше аналитические выражения. В результате было получено, что идеализированные изолинии образуют эллиптические контуры, параметры которых описываются на основе приведенных выше соотношений с учетом

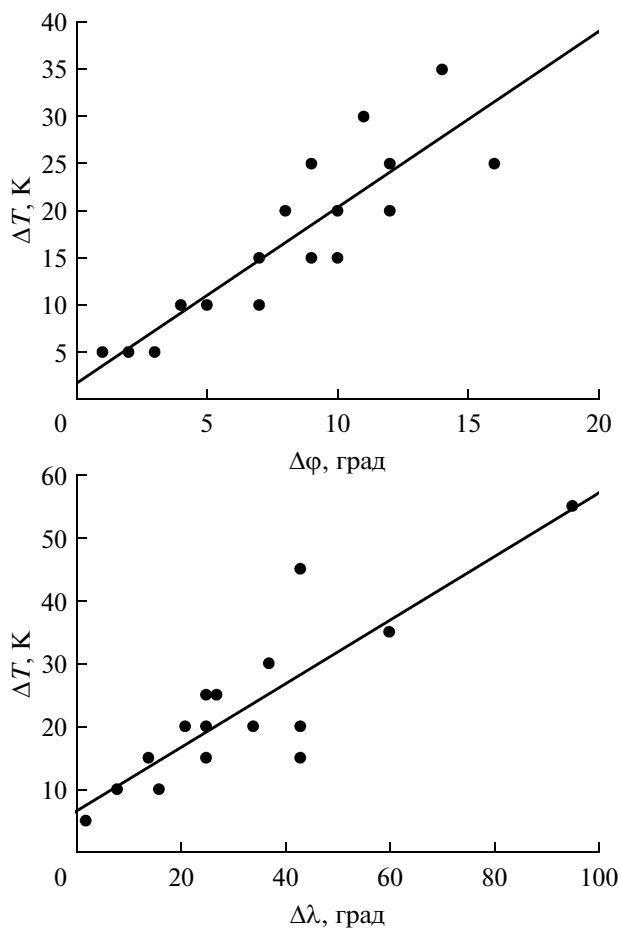


Рис. 4. Зависимости разностей температур между изолиниями от расстояний между ними по широте и долготе.

того, что $\Delta\lambda = 2\delta\lambda$ и $\Delta\varphi = 2\delta\varphi$, где $\delta\lambda$ и $\delta\varphi$ – большая и малая полуоси эллипса (рис. 3).

Картины широтно-долготных распределений температуры в работах [Shepherd et al., 2004, 2005] представлены с использованием различных масштабов для долготного и широтного направлений. Поэтому на рисунках этих работ неоднородности имеют преимущественно удлиненную структуру по широте. В действительности, эти неоднородности имеют существенно большие размеры по долготе. В линейной шкале размеры таких неоднородностей составляют несколько тысяч километров.

Для понимания картины распределения крупномасштабных температурных неоднородностей важно проследить тенденции изменения ΔT (K) между температурными изолиниями в долготном λ и широтном φ направлениях. На рисунке 4 представлены зависимости расстояний между температурными изолиниями вдоль широты и долготы, полученные на основе данных из работ [Shepherd et al., 2004, 2005]. Коэффициенты корреляции r для широтной $\Delta T = 1.9\Delta\varphi + 1.7$ и долготной $\Delta T =$

$= 0.51\Delta\lambda + 6.4$ зависимостей составляют соответственно 0.770 ± 0.102 и 0.739 ± 0.117 .

5. СЕЗОННЫЕ ВАРИАЦИИ ДОЛГОТНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ВРАЩАТЕЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

При анализе используемых температурных данных, полученных в различных географических районах, важным было все эти данные привести к однородным гелио-геофизическим условиям, характеризваемым конкретным годом, среднегодовым уровнем солнечной активности, среднемесячным ее значениям и т.д. Эта процедура позволила учесть и исключить влияние многолетнего тренда, солнечной активности и т.д. [Семенов и Шефов, 1996]. После этого на основе всех данных о вращательной температуре ОН, измеренной на различных станциях северного полушария для интервала широт $30-60^\circ$ N, были построены долготные вариации для различных месяцев года. Такое построение справедливо, поскольку широтные вариации для этого широтного диапазона имеют сходство – максимум в зимнее время и минимум – в летнее. Для такого построения использовались также и результаты анализа долготного распределения температуры для осеннего равноденствия на основе данных измерения прибора WINDII, установленного на спутнике UARS, в широтном диапазоне $30-60^\circ$ N. Сведения для Южного полушария весьма малочисленны и обнаруживают некоторое согласие с вариациями температуры северного полушария только в периоды равноденствий, естественно, при смещении сезонных данных на полгода. Они позволили сделать вывод о наличии двух максимумов температуры на долготах вблизи $60-80^\circ$ E и $270-300^\circ$ E. Поскольку имеющиеся данные в ряде случаев для летнего периода северного полушария обладают несколько большей дисперсией, чем для зимнего периода, то первоначально было построено предварительное распределение температуры от долготы. Для аппроксимации этих исходных данных были определены амплитуды и фазы трех гармоник для различных месяцев года.

Они выявили существование сезонных вариаций этих параметров от дня года t_d (рис. 5). Их аналитические формулы имеют вид:

Сезонные вариации среднедолготной температуры (К)

$$T_{md}(t_d) = 196 + 21.5 \cos \frac{2\pi}{365}(t_d + 9) + 4.2 \cos \frac{4\pi}{365}(t_d - 90).$$

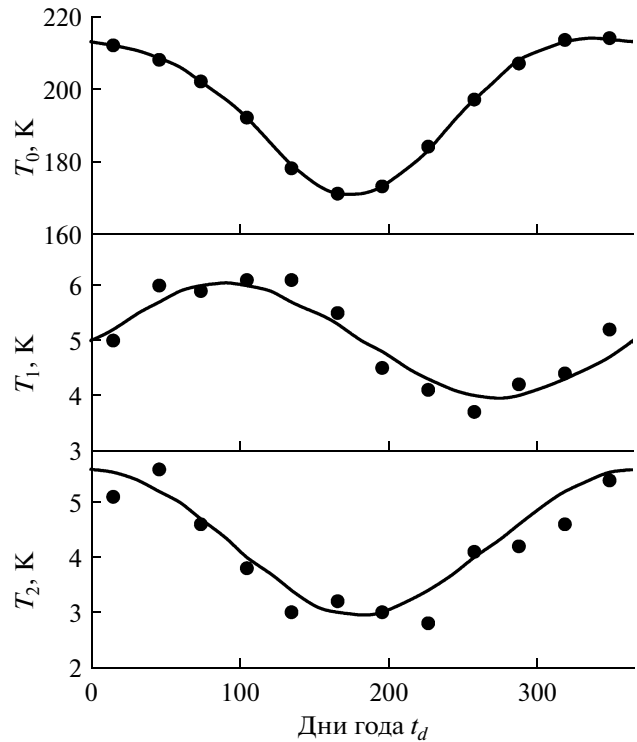


Рис. 5. Сезонные вариации гармоник долготного распределения вращательной температуры полосы ОН (6–2) для широтной области $30-60^\circ$ N Северного полушария. Точки – данные непосредственного спектрального анализа долготных вариаций, сплошные линии – аппроксимация сглаженных вариаций.

Первая гармоника

$$T_1(t_d) = 5 + \cos \frac{2\pi}{365}(t_d - 91).$$

Вторая гармоника

$$T_2(t_d) = 4.3 + 1.3 \cos \frac{2\pi}{365} t_d.$$

Таким образом, долготные изменения температуры (К) определяются формулой

$$T(\lambda) = T_0(t_d) + T_1(t_d) \cos(\lambda - 20) + T_2(t_d) \cos 2(\lambda - 90),$$

где λ – географическая долгота (град). Вычисленные долготные вариации показаны на рис. 6. В верхней части рис. 6 схематично показано положение материков и океанов в зависимости от долготы для диапазона широт ($30-60^\circ$ N). Как видно, положение максимумов температуры соответствует особенностям рельефа земной поверхности в долготном направлении. Такое поведение температуры возможно связано с воздействием

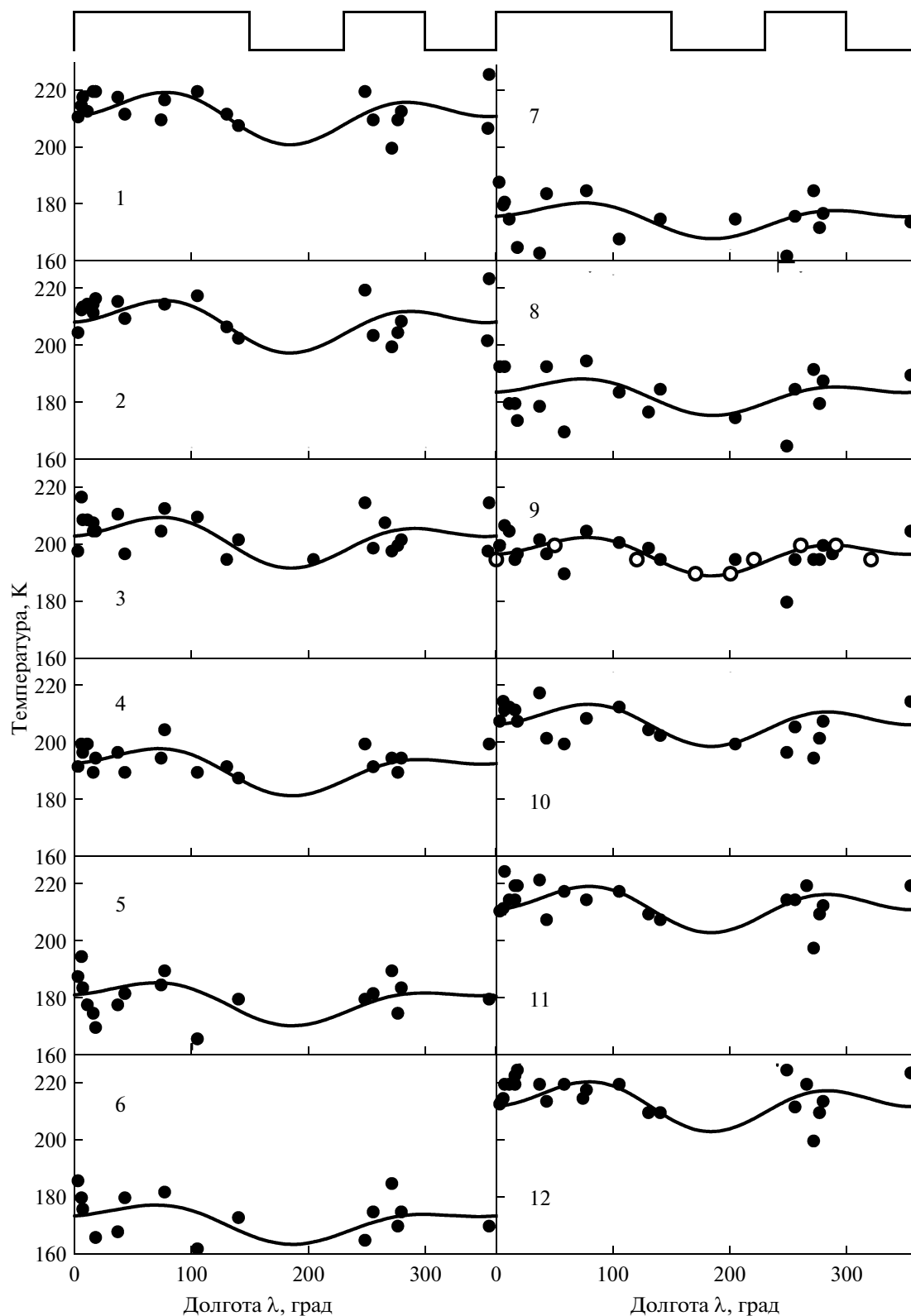


Рис. 6. Долготные вариации вращательной температуры полосы ОН (6–2) для различных месяцев года в широтной области 30–60° N Северного полушария. Точки – среднемесячные данные станций измерений, кружки для сентября – данные измерений спутника UARS (WINDII) [Shepherd et al., 2004], сплошные линии – аппроксимация.

орографических возмущений, возникающих в результате взаимодействия зонального ветрового потока с неоднородностями поверхности Земли [Суходоев и др., 1989; Eckermann and Preusse, 1999; Shefov et al., 2000].

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты свидетельствуют о том, что существует долготное изменение вращательной температуры гидроксильной эмиссии мезопаузы. Оно характеризуется максимумами на долготах Евразии и Северной Америки и минимумами над Тихим и Атлантическим океанами. На фоне глобальных систематических широтно-долготных вариаций постоянно существуют нестационарные неоднородности температуры с амплитудой до 30 К, размеры которых составляют несколько тысяч километров.

Работа выполнялась при поддержке гранта РФФИ № 10-05-00062.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- *Гаврильева Г.А., Аммосов П.П.* Сезонные вариации температуры мезопаузы над Якутском (63° N, 129.5° E) // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 43. № 2. С. 270–273. 2003.
- *Игнатьев В.М., Сивцева Л.Д., Югов В.А., Атласов К.В.* Регулярные вариации вращательных температур гидроксильной эмиссии над Якутском // Физика верхней атмосферы высоких широт. Якутск: Изд-во ЯФ СО АН СССР, № 2. С. 22–31. 1974.
- *Карягина З.В.* Гидроксильное излучение в спектре ночного неба по наблюдениям в Алма-Ате // Полярные сияния и свечение ночного неба / Ред. В.И. Красовский. М.: Изд-во АН СССР, № 8. С. 6–8. 1962.
- *Кессених В.Н., Булатов Н.Д.* Континентальный эффект в географическом распределении электронной концентрации слоя F_2 // Докл. АН СССР. Т. 45, № 6. С. 250–253. 1944.
- *Медведева И.В., Белецкий А.Б., Перминов В.И., Семенов А.И., Черниговская М.А., Шефов Н.Н.* Вариации температуры атмосферы на высотах мезопаузы и нижней термосферы в периоды стратосферных потеплений по данным наземных и спутниковых измерений в различных долготных секторах // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 8. № 4. С. 56–63. 2011.
- *Роч Ф., Гордон Дж.* Свечение ночного неба. М.: Мир, 152 с. 1977.
- *Салова Г.И.* Вращательная температура полос ОН по наблюдениям в Ашхабаде // Полярные сияния и свечение ночного неба / Ред. В.И. Красовский. М.: Изд-во АН СССР. № 9. С. 44–45. 1962.
- *Семенов А.И.* Температурный режим нижней термосферы по эмиссионным измерениям в течение последних десятилетий // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 36. № 5. С. 90–97. 1996.
- *Семенов А.И., Шефов Н.Н.* Эмпирическая модель вариаций гидроксильного излучения // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 36. № 4. С. 68–85. 1996.
- *Суходоев В.А., Перминов В.И., Решетов Л.М., Шефов Н.Н., Яров В.Н., Смирнов А.С., Нестерова Т.С.* Орографический эффект в верхней атмосфере // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. Т. 25. № 9. С. 926–932. 1989.
- *Фишкова Л.М.* Ночное излучение среднеширотной верхней атмосферы Земли / Под ред. Н.Н. Шефова. Тбилиси: Мецниереба, 272 с. 1983.
- *Шефов Н.Н.* Об определении вращательной температуры полос ОН // Спектральные, электрофотометрические и радиолокационные исследования полярных сияний свечения ночного неба / Ред. В.И. Красовский. М.: Изд-во АН СССР, № 5. С. 5–9. 1961.
- *Шефов Н.Н.* Сезонные вариации гидроксильной эмиссии // Полярные сияния и свечение ночного неба / Ред. В.И. Красовский. М.: Сов. Радио. № 24. С. 32–36. 1976.
- *Шефов Н.Н., Семенов А.И.* Особенности долготно-временного распределения частоты появления серебристых облаков // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 44. № 2. С. 283–286. 2004а.
- *Шефов Н.Н., Семенов А.И.* Долготные вариации эмиссии атомарного кислорода 557.7 нм // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 44. № 5. С. 671–674. 2004б.
- *Шефов Н.Н., Семенов А.И., Хомич В.Ю.* Излучение верхней атмосферы – индикатор ее структуры и динамики. М.: ГЕОС, 741 с. 2006.
- *Agashe V.V., Pawar V.R., Aher G.R., Nighut D.N., Jhangir A.* Study of mesopause temperature and its behaviour from OH nightglow // Indian J. Rad. Space Phys. V. 18. № 4. P. 309–314. 1989.
- *Bakanas V.V., Perminov V.I., Semenov A.I.* Seasonal variations of emission characteristics of the mesopause hydroxyl with different vibrational excitation // Adv. Space Res. V. 32. № 5. P. 765–770. 2003.
- *Bittner M., Offermann D., Graef H.H., Donner M., Hamilton K.* An 18-year time series of OH rotational temperatures and middle atmosphere decadal variations // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 64. № 8–11. P. 1147–1166. 2002.
- *Choi G.H., Monson I.K., Wickwar V.B., Rees D.* Seasonal variations of temperature near the mesopause from Fabry-Perot interferometer observations of OH Meinel emissions // Adv. Space Res. V. 21. № 6. P. 843–846. 1998.
- *Cho Y.I., Shepherd G.G., Won Y.I., Sargoytchev S., Brown S., Solheim B.* MLT cooling during stratospheric warming events // Geophys. Res. Lett. V. 31. № 10. L10104, doi:10.1029/2004GL019552. 2004.
- *Eckermann S. D., Preusse P.* Global measurements of stratospheric mountain waves from space // Science. V. 286. № 5444. P. 1534–1537. 1999.

- *Espy P.J., Huppi R., Manson A.* Large-scale, persistent latitude structures in the mesospheric temperature during ANLC-93 // *Geophys. Res. Lett.* V. 22. № 20. P. 2801–2804. 1995.
- *Espy P.J., Hibbins R.E., Jones G.O.L., Riggan D.M., Fritts D.C.* Rapid, large-scale temperature changes in the polar mesosphere and their relationship to meridional flows // *Geophys. Res. Lett.* V. 30. № 5. 1240, doi: 10.1029/2002GL016452. 2003.
- *Espy P.J., Stegman J., Forkman P., Murtagh D.* Seasonal variation in the correlation of airglow temperature and emission rate // *Geophys. Res. Lett.* V. 34. L17802, doi: 10.1029/2007GL031034. 2007.
- *French W.J.R., Burns G.B.* The influence of large-scale oscillations on long-term trend assessment in hydroxyl temperatures over Davis, Antarctica // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 66. № 6–9. P. 493–506. 2004.
- *Golitsyn G.S., Semenov A.I., Shefov N.N., Fishkova L.M., Lysenko E.V., Perov S.P.* Long-term temperature trends in the middle and upper atmosphere // *Geophys. Res. Lett.* V. 23. № 14. P. 1741–1744. 1996.
- *Greet P.A., Innis J., Dyson P.L.* High-resolution Fabry-Perot observations of mesospheric OH (6–2) emission // *Geophys. Res. Lett.* V. 21. № 12. P. 1153–1156. 1994.
- *Gu Y.Y., Qian J., Papen G.C., Swenson G.R., Espy P.J.* Concurrent observations of auroral activity and a large sporadic sodium layer event during ANLC-93 // *Geophys. Res. Lett.* V. 22. № 20. P. 2805–2808. 1995.
- *Holdsworth D.A., Morris R.J., Murphy D.J., Reid I.M., Burns G.B., French J.R.* Antarctic mesospheric temperature estimation using the Davis mesosphere-stratosphere-troposphere radar // *J. Geophys. Res.* V. 111. D05108. doi: 10.1029/2005Jd006589. 2006.
- *Kvifte G.J.* Hydroxyl rotational temperatures and intensities in the nightglow // *Planet. Space Sci.* V. 15. № 10. P. 1515–1523. 1967.
- *López-González M.J., García-Comas M., Rodríguez E., López-Puertas M., Shepherd M.G., Shepherd G.G., Sargoytchev S., Aushev V.M., Smith S.M., Mlynczak M.G., Russel J.M., Brown S., Cho Y.M., Wiens R.H.* Ground-based mesospheric temperatures at mid-latitude derived from O₂ and OH airglow SATI data: Comparison with SABER measurements // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 69. № 17–18. P. 2379–2390. 2007.
- *Lowe R.P., Turnbull D.N.* Comparison of ALOHA-93, ANLC-93 and ALOHA-90 observations of the hydroxyl rotational temperature and gravity wave activity // *Geophys. Res. Lett.* V. 22. № 20. P. 2813–2816. 1995.
- *Mulligan F.J., Horgan D.F., Galligan I.G., Griffin E.M.* Mesopause temperatures and integrated band brightnesses calculated from airglow on emission recorded at Maynooth (53.2° N, 6.4° W) during 1993 // *J. Atmos. Terr. Phys.* V. 57. № 13. P. 1623–1637. 1995.
- *Mulligan F.J.* Mesospheric temperatures from the OH (3,1) band, and the temperature altitude profile over Andøya during the winter of 1995/96 // *Proc. 24th Annual European Meeting on Atmospheric Studies by Optical Methods (Norway, Andenes, 18–22 August, 1997).* P.
- *Myrø H.K., Harang O.E.* Temperatures and tides in the high latitude mesopause region as observed in the OH night airglow emissions // *J. Atmos. Terr. Phys.* V. 50. № 8. P. 739–748. 1988.
- *Nguyen-Huu-Doan.* Temperature de rotation des bandes (9–3) et (6–1) de la molécule OH émises dans la haute atmosphère // *C.R. Acad. Sci.* V. 256. № 3. P. 245–247. 1963.
- *Niciejewski R.J., Killeen T.L.* Annual and semi-annual temperature oscillations in the upper mesosphere // *Geophys. Res. Lett.* V. 22. № 23. P. 3243–3246. 1995.
- *Offermann D., Donner M., Grossmann K.U., Gusev O., Jarisch M., Kaufmann M., Oberheide J., Semenov A.I.* Zonal asymmetries in middle atmosphere temperatures // *Adv. Space Res.* V. 32. № 9. P. 1771–1780. 2003.
- *Pendleton W.R., Taylor M.J., Gardner L.C.* Terdiurnal oscillations in OH Meinel rotational temperatures for fall conditions at northern mid-latitude sites // *Geophys. Res. Lett.* V. 27. № 12. P. 1799–1802. 2000.
- *Ross M.N., Christensen A.B., Meng C.I., Carbary J.F.* Structure in the UV nightglow observed from low Earth orbit // *Geophys. Res. Lett.* V. 19. № 10. P. 985–988. 1992.
- *Sahai Y., Giers D.H., Cogger L.L., Fagundes P.R., Garbe G.P.* Solar flux and seasonal variations of the mesopause temperature at 51° N // *J. Atmos. Terr. Phys.* V. 58. № 16. P. 1927–1934. 1996.
- *Scheer J., Reisin E.R., Espy J.P., Bittner M., Graef H.H., Offermann D., Ammosov P.P., Ignatyev V.M.* Large scale structures in hydroxyl rotational temperatures during DYANA // *J. Atmos. Terr. Phys.* V. 56. № 13–14. P. 1701–1715. 1994.
- *Scheer J., Reisin E.R., Mandrini C.H.* Solar activity signatures in mesopause region temperatures and atomic oxygen related airglow brightness at El Leoncito, Argentina // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 67. № 1. P. 145–154. 2005.
- *Semenov A.I.* Long-term temperature trends for different seasons by hydroxyl emission // *Phys. Chem. Earth. Pt B.* V. 25. № 5–6. P. 525–529. 2000.
- *Semenov A.I., Shefov N.N., Sukhodoev V.A.* Re-analysis of the long-term hydroxyl rotational temperature trend according to measurements in Spitsbergen // *Proc. XX–IX annual Seminar “Physics of Auroral Phenomena”*, Apatity: Kola Sci. Center, RAS, P. 245–249. 2006.
- *She C.Y., Lowe R.P.* Seasonal temperature variations in the mesopause region at mid-latitude: comparison of lidar and hydroxyl rotational temperatures using WINDII/UARS OH height profiles // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 60. № 16. P. 1573–1583. 1998.
- *She C.Y., Sherman J., Vance J.D., Yuan T., Zhilin Hu., B.P. Williams B.P., Arnold K., Acott P., Krueger D.A.* Evidence of solar cycle effect in the mesopause region: observed temperatures in 1999 and 2000 at 98.5 km over Fort Collins, CO (41° N, 105° W) // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 64. № 15. P. 1651–1657. 2002.
- *Shefov N.N., Semenov A.I., Pertsev N.N., Sukhodoev V.A.* The spatial distribution of the gravity wave energy influx into the mesopause over a mountain lee // *Phys. Chem. Earth. Pt B.* V. 25, № 5–6. P. 541–545. 2000.

- *Shepherd M.G., Rochon Y.J., Offermann D., Donner M., Espy P.J.* Longitudinal variability of mesospheric temperatures during equinox at middle and high latitudes // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 66. № 6–9. P. 463–479. 2004.
- *Shepherd M.G., Shepherd G.G., Evans W.F.J., Sridharan S.* Global variability of mesospheric temperature: Planetary-scale perturbations at equatorial and tropical latitudes // *J. Geophys. Res.* V. 110. № D24103, doi: 10.1029/2005JD006128. 2005.
- *Sigernes F., Shumilov N., Deehr C.S., Nielsen K.P., Svenóe T., Havnes O.* Hydroxyl rotational temperature record from the auroral station in Adventalen, Svalbard (78° N, 15° E) // *J. Geophys. Res.* V. 108. № A9. 1342, doi: 10.1029/2001JA009023. P. S1A1–S1A9. 2003.
- *Smith S.M., Baumgardner J., Mertens C.J., Russel J.M., Mlynczak M.G., Mendillo M.* Mesospheric OH temperatures: Simultaneous ground-based and SABER OH measurements over Millstone Hill // *Adv. Space Res.* V. 45. № 2. P. 239–246. 2010. doi: 10.1016/j.asr.2009.09.022.
- *Takahashi H., Clemesha B.R., Sahai Y., Batista P.P.* Seasonal variations of the mesopause temperature observed at equatorial (4° S) and low (23° S) latitude stations // *Adv. Space Res.* V. 14. № 9. P. 97–100. 1994.
- *Takahashi H., Clemesha B. R., Simonich D.M., Melo S.M.L., Teixeira N.R., Eras A., Stegman J., Witt G.* Rocket measurements in the equatorial airglow: MULTIFOT 92 database // *J. Atmos. Terr. Phys.* V. 58. № 16. P. 1943–1961. 1996.
- *Takeuchi I., Misawa K.* Short-period oscillations of intensity and rotational temperature of the OH(6–2) band // *Ann. Géophysicae.* V. 37. № 2. P. 315–319. 1981.
- *Toroshelidze T.I.* Measurements of the O₂ and OH atmospheric bands in nightglow // *Astrophys. Space Sci.* V. 215. № 1. P. 10–15. 1994.
- *Wallace L.* Seasonal variation and interpretation of the OH rotational temperature of the airglow // *J. Atmos. Terr. Phys.* V. 20. № 1. P. 85–93. 1961.