

УДК 551.510.532

**ВЫСОТНО-ШИРОТНАЯ СТРУКТУРА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В НИЖНЕЙ И СРЕДНЕЙ АТМОСФЕРЕ***В.В. Гурьянов***Аннотация**

Предложена эмпирическая модель годовых и полугодовых колебаний геопотенциальной высоты, температуры и преобладающего зонального ветра в слое, расположенном от уровня Земли до изобарической поверхности 0.1 гПа. Модель основана на ежедневных данных UK Met Office о геопотенциальной высоте, температуре и зональном ветре за период 2004–2012 гг. для Северного и Южного полушарий. Высотно-широтные распределения амплитуд и фаз годовых и полугодовых колебаний дают представление об интенсивности рассматриваемых волновых возмущений и их зависимости от сезона. В отличие от других работ подобного рода, в которых основное внимание уделяется исследованию зонального ветра и в меньшей степени температуры, в настоящей работе представлена также и геопотенциальная высота и дается сравнительная характеристика годовых и полугодовых колебаний рассматриваемых параметров.

**Ключевые слова:** годовые и полугодовые колебания, геопотенциальная высота, температура, зональный ветер, средняя атмосфера.

**Введение**

В последние годы преобладают методы исследования средней атмосферы (10–120 км), опирающиеся на математические модели разной степени сложности. При разработке моделей используются как гидродинамический, так и статистический подходы [1–9]. Однако независимо от подхода многие современные модели основываются на данных реанализов, то есть данных, полученных не непосредственно с помощью наблюдений, а путем обработки разнородного эмпирического материала с помощью моделей общей циркуляции атмосферы [1–8, 10–12]. Исследования показывают, что качество данных реанализа вполне удовлетворительно для изучения структуры и динамики крупномасштабных процессов в нижней и средней атмосфере [13, 14]. В настоящей работе используется один из таких реанализов – UK Met Office [14].

В работе предложена эмпирическая модель годовых и полугодовых колебаний геопотенциальной высоты, температуры и преобладающего зонального ветра в слое, расположенном от уровня Земли до изобарической поверхности 0.1 гПа. Модель основана на ежедневных данных UK Met Office о геопотенциальной высоте, температуре и зональном ветре за период 2004–2012 гг. для Северного (СП) и Южного (ЮП) полушарий. Высотно-широтные распределения амплитуд и фаз годовых и полугодовых колебаний, представленные в работе (рис. 1–3), дают представление об интенсивности рассматриваемых волновых возмущений и их зависимости от сезона.

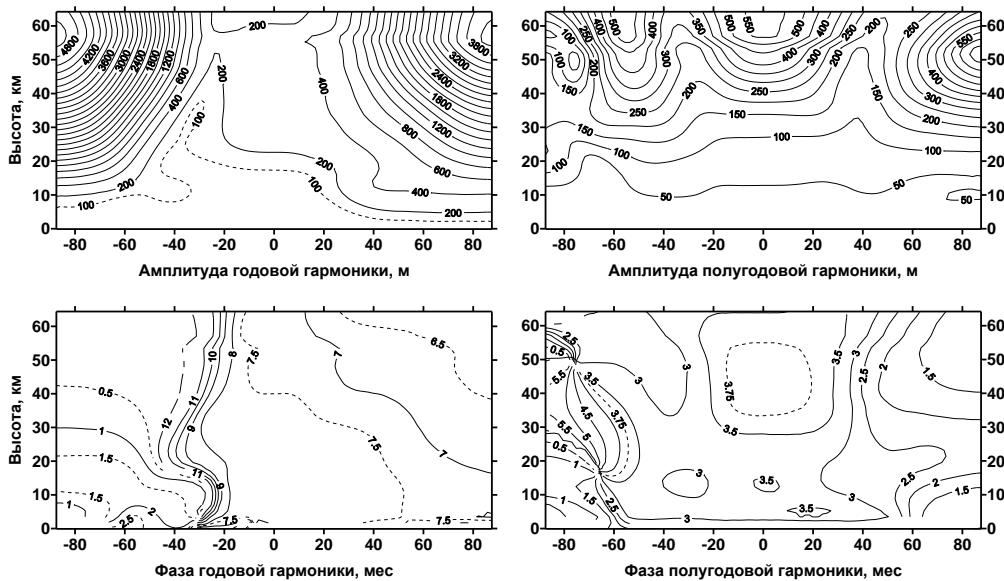


Рис. 1. Высотно-широтное распределение амплитуд и фаз годового и полугодового колебаний геопотенциальной высоты (отрицательные широты соответствуют ЮП)

### 1. Высотно-широтное распределение амплитуды и фазы годовых и полугодовых колебаний

**Геопотенциальная высота.** Природа годовых колебаний геопотенциальной высоты (рис. 1) во внетропических широтах хорошо понятна и не требует объяснений. Однако в среднем за рассматриваемый период во всем диапазоне высот детали годового хода в СП и ЮП заметно отличаются. В тропосфере внетропических широт СП амплитуда годового хода геопотенциальной высоты более чем в 2 раза превышает соответствующие значения ЮП. Но в стратосфере вертикальный градиент амплитуды годовой гармоник в ЮП существенно выше, чем в СП: в нижней стратосфере в 2 раза, а в средней – в 1.5 раза. Это приводит к тому, что вблизи полюсов на высоте около 55 км амплитуда в ЮП (~ 5000 гп. м) примерно на 1000 гп. м больше, чем в СП (~ 4000 гп. м). Минимальные значения годовой амплитуды в тропосфере и стратосфере наблюдаются в ЮП в субтропическом поясе. Здесь же расположена область сдвига фазы при переходе от одного полушария к другому. Таким образом, фазовый сдвиг расположен не симметрично относительно экватора, а смещен в ЮП.

Полугодовые колебания (ПГК) геопотенциальной высоты, в отличие от годовых, имеют хорошо выраженный максимум не только во внетропических широтах, но также и в тропической зоне выше высоты 35 км (рис. 1). Полугодовые колебания в верхней стратосфере в низких широтах впервые наблюдались в рядах температуры и зонального ветра в 60-х годах XX в. [15, 16]. Они являются основной модой годовой изменчивости в этой области атмосферы. Обращает на себя внимание, что особенности распределения амплитуды и фазы ПГК геопотенциальной высоты существенно различаются в стратосфере СП и ЮП. Так, в ЮП наблюдается локальный минимум амплитуды (50 гп. м) в районе

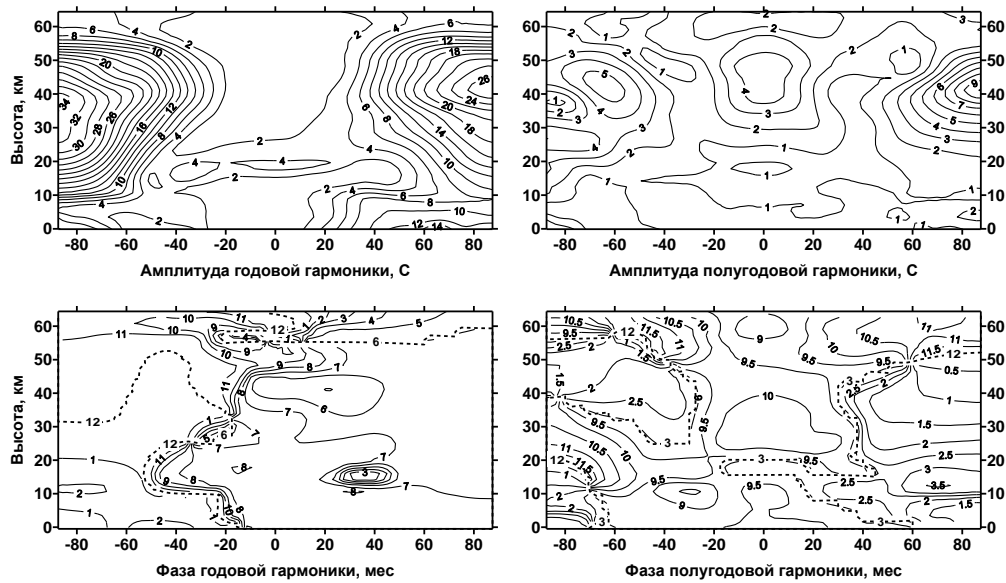


Рис. 2. Высотно-широтное распределение амплитуд и фаз годового и полугодового колебаний температуры (отрицательные широты соответствуют ЮП)

полярной стратопазузы. Это связано с тем, что циркумполярный вихрь в ЮП практически симметричен относительно полюса и достигает большей интенсивности, чем в СП, особенно в зимний период. Поэтому в приполярных районах ЮП проявляется лишь годовая гармоника. В умеренных широтах ЮП (50–65° ю.ш.) полугодовая гармоника активизируется в переходные сезоны, когда происходят сезонные перестройки циркуляции. По данным [17], интенсивность планетарных волн достигает максимума в ЮП в сентябре. Более того, возмущение циркуляции в отдельные годы имеет признаки финального стратосферного потепления [18].

**Температура.** Из рис. 2 видно, что максимальные значения амплитуды годового хода температуры наблюдаются в полярных районах в средней и верхней стратосфере обоих полушарий в летний период. При этом максимум ЮП на 6 °С превосходит максимум СП, но располагается примерно на 5 км ниже него.

Высотно-широтное распределение амплитуды и фазы полугодовых колебаний температуры имеет более сложный характер. В противоположность годовым колебаниям, максимум СП полугодовой волны превосходит соответствующий максимум ЮП примерно на 4 °С. Для полугодовых колебаний также хорошо выражен максимум амплитуды в низкоширотной верхней стратосфере в переходные сезоны и минимумы около ±40° широты. Экваториальные и высокоширотные колебания расходятся по фазе на 3–4 месяца, так что максимальные разности температур между полюсами и экватором наблюдаются во время максимальных западных ветров в соответствии с формулами термического ветра [19].

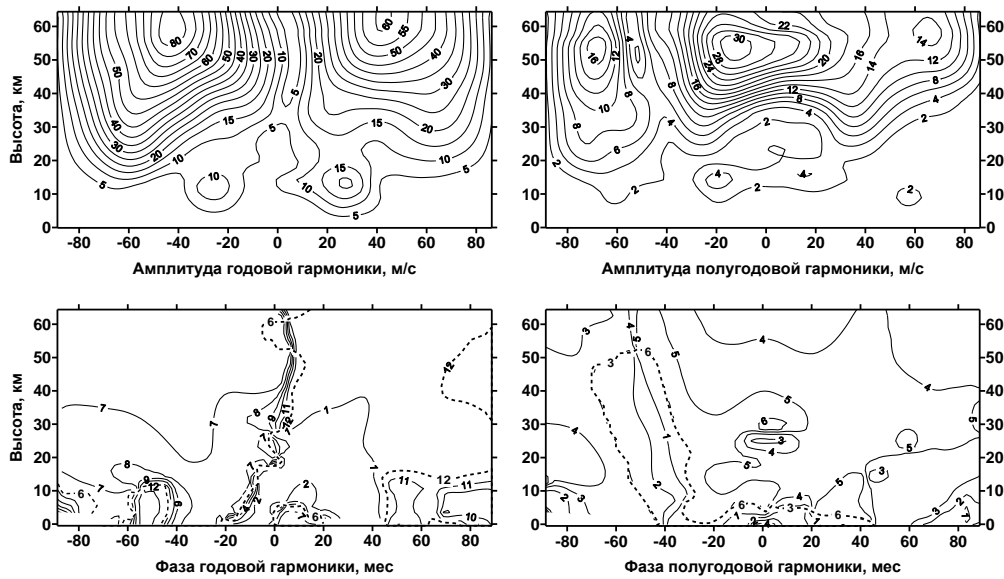


Рис. 3. Высотно-широтное распределение амплитуд и фаз годового и полугодового колебаний зонального ветра (отрицательные широты соответствуют ЮП)

**Зональный ветер.** В поле годовых колебаний зонального ветра (рис. 3) так же, как и для температуры, хорошо выражены области максимальных значений, однако они наблюдаются не вблизи полюсов, а в умеренных широтах в нижней мезосфере. Это хорошо согласуется с положением максимумов западных (положительных) ветров в стратосфере – нижней мезосфере в зимний период обоих полушарий. Максимальные значения амплитуды годовых колебаний зонального ветра в ЮП более чем на 20 м/с больше, чем в СП. В целом положение этих максимумов очень устойчивое и фаза зональных ветров практически не меняется с высотой в стратосфере – нижней мезосфере во внетропических широтах. Такая ситуация характерна для режима волновода.

Хорошо проявляются также локальные максимумы амплитуды годовых колебаний в верхней тропосфере в субтропиках обоих полушарий, обусловленные климатологией зонального ветра.

Полугодовые колебания зональной компоненты ветра с разной интенсивностью наблюдаются почти во всей стратосфере (рис. 3), но максимальных амплитуд достигают в верхней стратосфере вблизи экватора. Фактически на экваторе, где годовой цикл ослаблен, полугодовые колебания представляют основную наблюдаемую изменчивость среднего зонального ветра. Эта особенность поля зонального ветра хорошо известна [15, 16].

Пики полугодовых колебаний скорости зонального ветра наблюдаются вблизи стратоспаузы с амплитудой чуть более 30 м/с (по данным [15, 16] они могут достигать до 50 м/с). На стратоспаузе максимальные западные потоки встречаются в апреле и октябре, в то время как максимальные восточные аномалии можно наблюдать в январе и июле. Исследования [20, 21] показали, что выше 60 км полугодовые колебания уменьшаются по амплитуде и выше стратоспаузы достигают минимума около высоты 65 км. Выше ПГК укрепляются снова, достигнув максимума во второй раз в верхней мезосфере. Это приводит

к различию между стратосферными и мезосферными полугодовыми колебаниями. Мезосферные ПГК зонального ветра имеют одинаковые амплитуды со стратосферными ПГК, но фазы их отличаются приблизительно на  $180^\circ$  [21, 22].

Амплитуда ПГК обычно уменьшается с увеличением широты, но может усилиться вновь в субтропиках в зависимости от высоты. В этой связи полугодовые колебания обуславливают широтную асимметрию с более высокой амплитудой в субтропиках ЮП [23, 24] (рис. 3). Свой вклад в широтную асимметрию вносит локальный минимум амплитуды ПГК около широты  $55^\circ$  ю.ш. в области стратосферы, который находится примерно на  $10^\circ$  южнее максимума годовых колебаний (рис. 3). В СП такой минимум не наблюдается. Помимо широтной асимметрии полугодовые колебания показывают также сезонную асимметрию с сильной вариацией зонального ветра в ходе первого цикла, который начинается с восточной фазы зонального ветра в СП в зимний период [25, 26].

Ранние попытки объяснить полугодовые колебания зонального ветра использовали в качестве возможной причины полугодовые колебания солнечного излучения в тропиках [27]. Довольно скоро исследования показали, что солнечный форсинг не является достаточным для создания наблюдаемых ПГК зонального ветра [28]. Причины, которые вызывают восточные и западные ускорения среднего потока в стратосферных полугодовых колебаниях, весьма различны по своей природе. С одной стороны, восточные ускорения обусловлены меридиональной адвекцией скорости восточных ветров из летнего полушария через экватор [28, 29]. Этот эффект наблюдается два раза в год и достигает пиков после солнцестояния. Еще один вклад в восточные ускорения происходит от воздействия вихревого момента импульса вследствие разрушения планетарных волн, захваченных волноводом в тропиках. С другой стороны, западные ускорения возникают благодаря вертикально распространяющимся сверхбыстрым волнам Кельвина и внутренним гравитационным волнам, которые взаимодействуют со средним потоком и переносят момент импульса в верхнюю стратосферу. Соотносительный вклад этих двух видов волн обстоятельно рассмотрен в работах [30–32]. Механизм возникновения мезосферных полугодовых колебаний является более неопределенным. В целом их форсинг объясняется широким спектром вертикально распространяющихся гравитационных и быстрых волн Кельвина, возбужденных в нижних слоях атмосферы. Эти волны фильтруются вариациями среднего зонального ветра в стратосферных полугодовых колебаниях. Это позволяет большей части волн с противоположным горизонтальным направлением распространения по отношению к направлению зонального ветра распространяться далее вверх в область мезосферы, где эти волны обычно разрушаются. Фильтрация этих волн дает рациональное объяснение фазовому сдвигу между стратосферными и мезосферными полугодовыми колебаниями [33, 34].

Выше было отмечено, что полугодовым колебаниям зонального ветра сопутствуют, также в глобальном масштабе, существенные полугодовые колебания температуры. Однако, в отличие от зонального ветра, ПГК температуры в тропической зоне расположены симметрично относительно экватора.

### Заключение

Подытоживая все вышесказанное, можно сделать следующие выводы.

1. Максимумы амплитуд годовых колебаний всех рассматриваемых параметров наблюдаются во внетропических широтах обоих полушарий, хотя области их расположения и распределение фаз различаются.

2. В отличие от годовых колебаний, высотно-широтные распределения амплитуд полугодовых колебаний рассматриваемых термодинамических параметров имеют локальный максимум в тропической зоне в верхней стратосфере. Но если для амплитуд полугодовых колебаний зонального ветра и температуры локальный максимум в верхней стратосфере сменяется более низкими значениями в нижней мезосфере, то для геопотенциальной высоты в нижней мезосфере рост амплитуды с высотой продолжается.

3. Полученные результаты высотно-широтного распределения амплитуды полугодовых колебаний термодинамических параметров для экваториальной области в качественном отношении хорошо согласуются с результатами других исследователей. Однако в количественном отношении имеются некоторые отличия.

4. Полученные в настоящей работе глобальные количественные оценки на основе современных и более надежных рядов данных могут служить уточнением к существующей справочной модели средней атмосферы.

Автор выражает благодарность Центру атмосферных данных Великобритании (BADC) за доступ к данным Met Office UARS Pressure Level Data.

### Литература

1. Атмосфера. Справочник. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 509 с.
2. CIRA 1972: COSPAR. International Reference Atmosphere. – Berlin: Acad. Verlag, 1972. – 450 p.
3. *Barnett J.J., Corney M.* Middle atmosphere reference model derived from satellite data // Handbook for MAP. – 1985. – V. 16. – P. 47–85.
4. *Barnett J.J., Corney M.* Planetary waves // Handbook for MAP. – 1985. – V. 16. – P. 86–143.
5. *Guryanov V.V., Fahrutdinova A.N.* Height and time variability of planetary wave activity // Adv. Space Res. – 2009. – V. 43, No 3. – P. 401–412. – doi:10.1016/j.asr.2008.06.002.
6. *Barnett J.J., Chandra S.* COSPAR International Reference Atmosphere Grand Mean // Adv. Space Res. – 1990. – V. 10, No. 12. – P. 7–10.
7. COSPAR: International Reference Atmosphere. – 2012. – URL: <https://spaceweather.usu.edu/htm/cira/>, свободный.
8. *Jacobi Ch., Fröhlich K., Portnyagin Y., Merzlyakov E., Solovjova T., Makarov N., Rees D., Fahrutdinova A., Guryanov V., Fedorov D., Korotyshkin D., Forbes J., Pogoreltsev A., Kürschner D.* Semi-empirical model of middle atmosphere wind from the ground to the lower thermosphere // Adv. Space Res. – 2009. – V. 43, No 2. – P. 239–246. – doi:10.1016/j.asr.2008.05.011.
9. *Fahrutdinova A.N., Perevedencev Yu.P., Guryanov V.V., Kulikov V.V.* Dynamical processes and correlations at midlatitudes in the lower and middle atmosphere // Adv. Space Res. – 2001. – V. 27, No 10. – P. 1667–1672. – doi: 10.1016/S0273-1177(01)00234-4.

10. Гурьянов В.В., Фахрутдинова А.Н. Высотно-широтная структура планетарных волн в стратосфере и тропосфере // Георесурсы. – 2006. – № 4 (21). – С. 36–39.
11. Гурьянов В.В., Фахрутдинова А.Н., Пиеничный П.В. Пространственно-временная изменчивость термодинамических полей в стратосфере // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. – 2008. – Т. 150, кн. 3. – С. 21–35.
12. Гурьянов В.В., Фахрутдинова А.Н. Высотно-широтная структура планетарных волн поля ветра в стратосфере // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. – 2013. – Т. 155, кн. 1. – С. 178–187.
13. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woollen J., Zhu Y., Leetmaa A., Reynolds B., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K.C., Ropelewski C., Wang J., Jenne Roy, Joseph Dennis. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project // Bull. Amer. Meteorol. Soc. – 1996. – V. 77, No 3. – P. 437–472.
14. Swinbank R., O'Neill A. A stratosphere-troposphere data assimilation system // Monthly Weather Rev. – 1994. – V. 122. – P. 686–702.
15. Reed R.J., Rogers D.G. The circulation of the tropical stratosphere in the years 1954–1960 // J. Atmos. Sci. – 1962. – V. 19, No 2. – P. 127–135.
16. Reed R.J. Zonal wind behavior in the equatorial stratosphere and lower mesosphere // J. Geophys. Res. – 1966. – V. 71, No 18. – P. 4223–4233.
17. Guryanov V.V., Fahrutdinova A.N. Height-latitude structure of stationary planetary waves in the stratosphere and lower mesosphere // Adv. Space Res. – 2014. – V. 53, No 4. – P. 674–688. – doi: 10.1016/j.asr.2013.12.010.
18. Peters D., Vargin P., Körnich H. A Study of the zonally asymmetric tropospheric forcing of the austral vortex splitting during September 2002 // Tellus. – 2007. – V. 59A, No 3. – P. 384–394.
19. Холтон Дж.Р. Динамическая метеорология стратосферы и мезосферы. – Л.: Гидрометеоздат, 1979. – 224 с.
20. Groves G.V. Annual and semi-annual zonal wind components and corresponding temperature and density variations, 60–130 km // Planet. Space Sci. – 1972. – V. 20, No 12. – P. 2099–2112.
21. Hirota I. Observational evidence of the semiannual oscillation in the tropical middle atmosphere – A review // Pure Appl. Geophys. – 1980. – V. 118, No 1. – P. 217–238.
22. Hamilton K. Rocketsonde observations of the mesospheric semiannual oscillation at Kwajalein // Atmosphere-Ocean. – 1982. – V. 20, No 4. – P. 281–286.
23. Belmont A.D., Dartt D.G. Semiannual variation in zonal wind from 20 to 65 kilometers at 80°N–10°S // J. Geophys. Res. – 1973. – V. 78, No 27. – P. 6373–6376.
24. Ray E.A., Alexander M.J., Holton J.R. An analysis of the structure and forcing of the equatorial semiannual oscillation in zonal wind // J. Geophys. Res. – 1998. – V. 103, No D2. – P. 1759–1774.
25. Delisi D.P., Dunkerton T.J. Seasonal variation of the semiannual oscillation // J. Atmos. Sci. – 1988. – V. 45, No 19. – P. 2772–2809.
26. Garcia R.R., Dunkerton T.J., Lieberman R.S., Vincent R.A. Climatology of the semiannual oscillation of the tropical middle atmosphere // J. Geophys. Res. – 1997. – V. 102, No D22. – P. 26019–26032.
27. Webb W.L. Structure of the stratosphere and mesosphere. – N. Y.; London: Acad. Press, 1966. – 392 p.

28. Meyer W.D. A diagnostic numerical study of the semiannual variation of the zonal wind in the tropical stratosphere and mesosphere // *J. Atmos. Sci.* – 1970. – V. 27, No 5. – P. 820–830.
29. Holton J.R., Wehrbein W.M. A numerical model of the zonal mean circulation of the middle atmosphere // *Pure Appl. Geophys.* – 1980. – V. 118, No 1. – P. 284–306.
30. Hitchman M.H., Leovy C.B. Estimation of the Kelvin wave contribution to the semiannual oscillation // *J. Atmos. Sci.* – 1988. – V. 45, No 9. – P. 1462–1475.
31. Hamilton K., John Wilson R., Mahlman J.D., Umscheid L.J. Climatology of the SKYHI troposphere–stratosphere–mesosphere general circulation model // *J. Atmos. Sci.* – 1995. – V. 52, No 1. – P. 5–43.
32. Sassi F., Garcia R.R. The role of equatorial waves forced by convection in the tropical semiannual oscillation // *J. Atmos. Sci.* – 1997. – V. 54, No 15. – P. 1925–1942.
33. Dunkerton T.J. Theory of the mesopause semiannual oscillation // *J. Atmos. Sci.* – 1982. – V. 39, No 12. – P. 2681–2690.
34. Hitchman M.H., Leovy C.B. Evolution of the zonal mean state in the equatorial middle atmosphere during October 1978–May 1979 // *J. Atmos. Sci.* – 1986. – V. 43, No 24. – P. 3159–3176.

Поступила в редакцию  
03.09.14

---

**Гурьянов Владимир Владимирович** – кандидат географических наук, доцент кафедры метеорологии, климатологии и экологии атмосферы, Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия.

E-mail: [Vladimir.Guryanov@kpfu.ru](mailto:Vladimir.Guryanov@kpfu.ru)

\* \* \*

## HEIGHT-LATITUDE STRUCTURE OF THERMODYNAMIC FIELDS IN THE LOWER AND MIDDLE ATMOSPHERE

V.V. Guryanov

### Abstract

We propose an empirical model of annual and semi-annual oscillations of the geopotential height, temperature and predominant zonal wind in the layer located from the ground level to the pressure surface of 0.1 hPa. The model is based on the daily UK Met Office data of the geopotential height, temperature and zonal wind over the period 2004–2012 for the Northern and Southern hemispheres. The height-latitude distributions of the amplitudes and phases of annual and semi-annual oscillations give an idea about the intensity of the wave disturbances under consideration and their dependence on season. Unlike other works of this kind, which focus on the study of zonal wind and, to a lesser degree, temperature, this paper also presents the geopotential height and provides a comparative analysis of the annual and semi-annual oscillations in the parameters under study.

**Keywords:** annual and semi-annual oscillations, geopotential height, temperature, zonal wind, middle atmosphere.

### References

1. Atmosphere. Handbook. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1991. 509 p. (In Russian)
2. CIRA 1972: COSPAR. International Reference Atmosphere. Berlin, Acad. Verlag, 1972. 450 p.
3. Barnett J.J., Corney M. Middle atmosphere reference model derived from satellite data. *Handbook for MAP*, 1985, vol. 16, pp. 47–85.



4. Barnett J.J., Corney M. Planetary waves. *Handbook for MAP*, 1985, vol. 16, pp. 86–143.
5. Guryanov V.V., Fahrutdinova A.N. Height and time variability of planetary wave activity. *Adv. Space Res.*, 2009, vol. 43, no. 3, pp. 401–412. doi:10.1016/j.asr.2008.06.002.
6. Barnett J.J., Chandra S. COSPAR International Reference Atmosphere Grand Mean. *Adv. Space Res.*, 1990, vol. 10, no. 12, pp. 7–10.
7. COSPAR: International Reference Atmosphere, 2012. Available at: <https://spaceweather.usu.edu/htm/cira/>.
8. Jacobi Ch., Fröhlich K., Portnyagin Y., Merzlyakov E., Solovjova T., Makarov N., Rees D., Fahrutdinova A., Guryanov V., Fedorov D., Korotyshkin D., Forbes J., Pogoreltsev A., Kürschner D. Semi-empirical model of middle atmosphere wind from the ground to the lower thermosphere. *Adv. Space Res.*, 2009, vol. 43, no. 2, pp. 239–246. doi:10.1016/j.asr.2008.05.011.
9. Fahrutdinova A.N., Perevedencev Yu.P., Guryanov V.V., Kulikov V.V. Dynamical processes and correlations at midlatitudes in the lower and middle atmosphere. *Adv. Space Res.*, 2001, vol. 27, no. 10, pp. 1667–1672. doi: 10.1016/S0273-1177(01)00234-4.
10. Guryanov V.V., Fahrutdinova A.N. Height-latitude structure of planetary waves in the stratosphere and troposphere. *Georesursy*, 2006, vol. 4, no. 21, pp. 36–39. (In Russian)
11. Guryanov V.V., Fahrutdinova A.N., Pshenichnyi P.V. Spatiotemporal variability of thermodynamic fields in the stratosphere. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Fiziko-Matematicheskie Nauki*, 2008, vol. 150, no. 3, pp. 21–35. (In Russian)
12. Guryanov V.V., Fahrutdinova A.N. Altitudinal and latitudinal structure of the planetary waves of a wind field in the stratosphere. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Fiziko-Matematicheskie Nauki*, 2013, vol. 155, no. 1, pp. 178–187. (In Russian)
13. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woollen J., Zhu Y., Leetmaa A., Reynolds B., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K.C., Ropelewski C., Wang J., Jenne Roy, Joseph Dennis. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 1996, vol. 77, no. 3, pp. 437–472.
14. Swinbank R., O'Neill A. A stratosphere-troposphere data assimilation system. *Monthly Weather Rev.*, 1994, vol. 122, pp. 686–702.
15. Reed R.J., Rogers D.G. The circulation of the tropical stratosphere in the years 1954–1960. *J. Atmos. Sci.*, 1962, vol. 19, no. 2, pp. 127–135.
16. Reed R.J. Zonal wind behavior in the equatorial stratosphere and lower mesosphere. *J. Geophys. Res.*, 1966, vol. 71, no. 18, pp. 4223–4233.
17. Guryanov V.V., Fahrutdinova A.N. Height-latitude structure of stationary planetary waves in the stratosphere and lower mesosphere. *Adv. Space Res.*, 2014, vol. 53, no. 4, pp. 674–688. doi: 10.1016/j.asr.2013.12.010.
18. Peters D., Vargin P., Körmich H. A Study of the zonally asymmetric tropospheric forcing of the austral vortex splitting during September 2002. *Tellus*, 2007, vol. 59A, no. 3, pp. 384–394.
19. Holton J.R. The Dynamic Meteorology of the Stratosphere and Mesosphere. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1979. 224 p. (In Russian)
20. Groves G.V. Annual and semi-annual zonal wind components and corresponding temperature and density variations, 60–130 km. *Planet. Space Sci.*, 1972, vol. 20, no. 12, pp. 2099–2112.
21. Hirota I. Observational evidence of the semiannual oscillation in the tropical middle atmosphere – A review. *Pure Appl. Geophys.*, 1980, vol. 118, no. 1, pp. 217–238.
22. Hamilton K. Rocketsonde observations of the mesospheric semiannual oscillation at Kwajalein. *Atmosphere-Ocean*, 1982, vol. 20, no. 4, pp. 281–286.
23. Belmont A.D., Dart D.G. Semiannual variation in zonal wind from 20 to 65 kilometers at 80°N–10°S. *J. Geophys. Res.*, 1973, vol. 78, no. 27, pp. 6373–6376.
24. Ray E.A., Alexander M.J., Holton J.R. An analysis of the structure and forcing of the equatorial semiannual oscillation in zonal wind. *J. Geophys. Res.*, 1998, vol. 103, no. D2, pp. 1759–1774.
25. Delisi D.P., Dunkerton T.J. Seasonal variation of the semiannual oscillation. *J. Atmos. Sci.*, 1988, vol. 45, no. 19, pp. 2772–2809.

26. Garcia R.R., Dunkerton T.J., Lieberman R.S., Vincent R.A. Climatology of the semiannual oscillation of the tropical middle atmosphere. *J. Geophys. Res.*, 1997, vol. 102, no. D22, pp. 26019–26032.
27. Webb W.L. Structure of the stratosphere and mesosphere. N. Y., London, Acad. Press, 1966. 392 p.
28. Meyer W.D. A diagnostic numerical study of the semiannual variation of the zonal wind in the tropical stratosphere and mesosphere. *J. Atmos. Sci.*, 1970, vol. 27, no. 5, pp. 820–830.
29. Holton J.R., Wehrbein W.M. A numerical model of the zonal mean circulation of the middle atmosphere. *Pure Appl. Geophys.*, 1980, vol. 118, no. 1, pp. 284–306.
30. Hitchman M.H., Leovy C.B. Estimation of the Kelvin wave contribution to the semiannual oscillation. *J. Atmos. Sci.*, 1988, vol. 45, no. 9, pp. 1462–1475.
31. Hamilton K., John Wilson R., Mahlman J.D., Umscheid L.J. Climatology of the SKYHI troposphere–stratosphere–mesosphere general circulation model. *J. Atmos. Sci.*, 1995, vol. 52, no. 1, pp. 5–43.
32. Sassi F., Garcia R.R. The role of equatorial waves forced by convection in the tropical semiannual oscillation. *J. Atmos. Sci.*, 1997, vol. 54, no. 15, pp. 1925–1942.
33. Dunkerton T.J. Theory of the mesopause semiannual oscillation. *J. Atmos. Sci.*, 1982, vol. 39, no. 12, pp. 2681–2690.
34. Hitchman M.H., Leovy C.B. Evolution of the zonal mean state in the equatorial middle atmosphere during October 1978–May 1979. *J. Atmos. Sci.*, 1986, vol. 43, no. 24, pp. 3159–3176.

Received  
September 3, 2014

---

**Guryanov Vladimir Vladimirovich** – PhD in Geography, Associate Professor, Department of Meteorology, Climatology and Ecology of the Atmosphere, Kazan Federal University, Kazan, Russia.  
E-mail: [Vladimir.Guryanov@kpfu.ru](mailto:Vladimir.Guryanov@kpfu.ru)