

МЕТЕОРОЛОГИЯ

А.С. Зарубин, А.И. Погорельцев

ПЛАНЕТАРНЫЕ ВОЛНЫ В ЗИМНЕЙ СТРАТОСФЕРЕ СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЯ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ЭКСПЕРИМЕНТА COSMIC

A.S. Zarubin, A.I. Pogoreltsev

PLANETARY WAVES IN THE WINTER STRATOSPHERE OF NORTHERN HEMISPHERE ON THE BASIS OF COSMIC EXPERIMENT OBSERVATIONS

Данные о температуре, полученные в эксперименте по радиозатменному зондированию атмосферы COSMIC, используются для изучения изменчивости активности планетарных волн на высотах стратосферы. Разделение волн на стационарные и бегущие позволяет исследовать их амплитуды, периоды и направление распространения. Проводится сопоставление полученных результатов с характеристиками волн, полученными из анализа данных UK Met Office.

Ключевые слова: стратосфера, планетарные волны, радиозатменные наблюдения.

Temperature data from the COSMIC radio occultation sounding experiment are used to study the variability of planetary wave activity at stratospheric heights. Separation of the waves on stationary and travelling allows us to investigate their amplitudes, periods and direction of propagation. The results are compared with the wave characteristics obtained from analysis of UKMO data.

Key words: stratosphere, planetary waves, radio occultation measurements.

Изучение изменчивости динамических процессов в стратосфере является важной фундаментальной задачей физики атмосферы. Одним из основных объектов исследования служат волны планетарного масштаба. В результате диссипации в стратосфере и выше в мезосфере и термосфере, волны передают переносимые энергию и импульс среде, тем самым воздействуя на тепловой баланс и циркуляцию атмосферы. Последние десятилетия характеризуются интенсивным развитием различных систем наблюдения за состоянием и динамикой атмосферы, идет накопление новых экспериментальных данных, требующих дальнейшего осмысления, обработки и интерпретации. Одним из источников информации о глобальном распределении метеорологических полей стали данные радиозатменного зондирования атмосферы эксперимента COSMIC/FORMOSAT-3 (Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate, в дальнейшем COSMIC).

В рамках проекта COSMIC была сформирована группировка из 6 низкоорбитальных спутников, которая в течение суток проводит около 2000 зондирований атмосферы по всему земному шару, в том числе над океанами и труднодоступными районами суши [Anthes et al., 2008]. Значения температуры воздуха в диапазоне высот от 5 до 25 км определяются с погрешностью менее 1К. На высотах выше 25 км ошибки определения температуры возрастают из-за влияния ионосферных флуктуаций и на высоте 50 км составляют около 5К [Rocken et al., 2004]. Отличительной особенностью радиозатменного метода зондирования является возможность получения вертикальных профилей в условиях облачной атмосферы, поскольку влияние гидрометеоров на значения показателя преломления незначительны.

Основная трудность при использовании данных радиозатменных наблюдений для анализа динамических процессов в атмосфере заключается в их крайне нерегулярном распределении в пространстве и времени. Для перехода к регулярной сетке использовалась аппроксимация распределения температуры на каждом уровне и в широтных поясах по 10 градусов, центрированных на широтах сетки Модели Средней и Верхней Атмосферы (МСВА) [Погорельцев, 2007; Pogoreltsev et al., 2007]. Аппроксимация данных производится по методу наименьших квадратов с использованием сингулярного разложения матрицы системы нормальных уравнений [Форсайт и др., 1980], при этом учитываются постоянная составляющая, линейная зависимость от широты и три гармоники с зональными волновыми числами $m = 1-3$. К временным рядам, восстановленным с помощью полученных амплитуд и фаз гармоник на долготах, смещенных на четверть длины волны, применяется вейвлет-преобразование Морле [Togre and Compo, 1998], что позволяет в дальнейшем разделить волны на стационарные (неподвижные относительно земной поверхности) и бегущие на запад и восток. В работе [Зарубин и др., 2012] были приведены предварительные результаты анализа данных о температуре эксперимента COSMIC, а также было показано, что амплитуды и распределения осцилляций по данным о температуре проекта COSMIC и данным, ассимилированным в модели UK Met Office [Погорельцев и др., 2009] качественно (а частично и количественно) совпадают. На рис. 1–3 в качестве примера показаны вейвлет амплитуды осцилляций стационарной волны, а также вейвлет амплитуды волн, распространяющихся на восток и запад, по данным, полученным в ходе эксперимента COSMIC, и данным модели UK Met Office для января–февраля 2009 г. на высоте 30 км и широте 67.5N.

Усредненные за январь–февраль амплитуды осцилляций стационарной волны и бегущих планетарных волн в поле температуры на высоте 30 км и широте 67.5N для 2008–2011 гг. показаны на рис. 4–6. В 2008 г. наблюдалась большая амплитуда бегущей на восток планетарной волны, что, по-видимому, указывает на быстрое затухание этой волны с высотой. Для распространяющихся на запад планетарных волн в отдельные годы прослеживаются максимумы на частотах близких к резонансным, в частности, в 2010 г. видны максимумы ам-

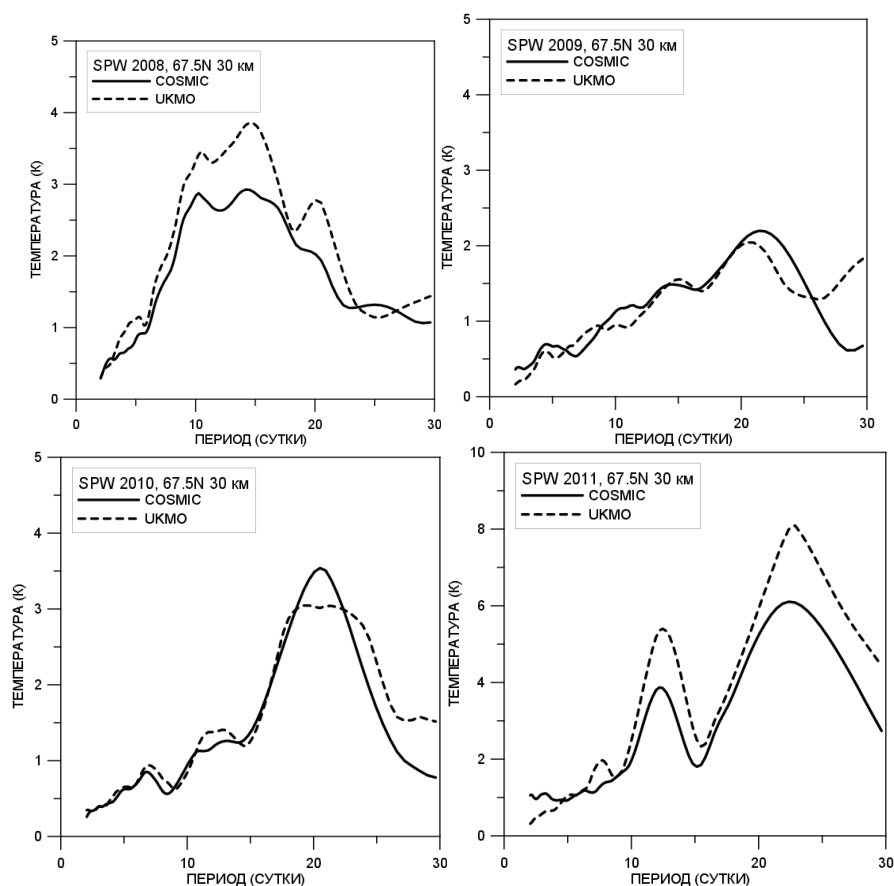
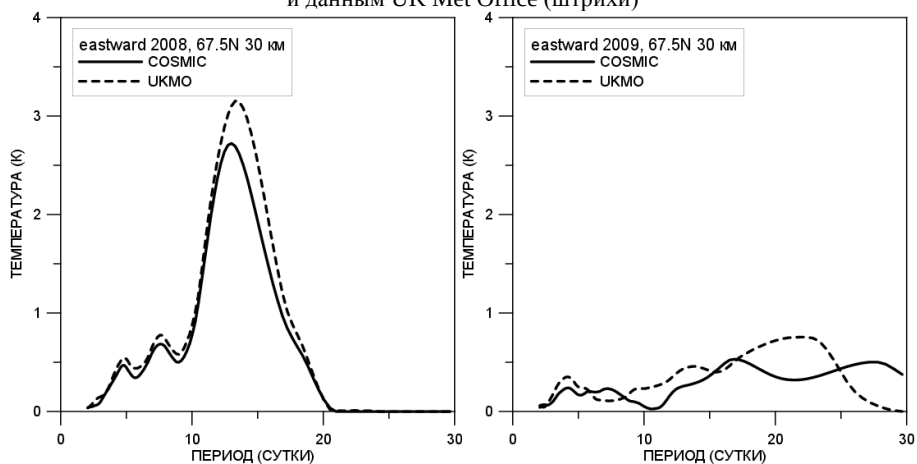


Рис. 4. Усредненные за январь-февраль амплитуды осцилляций стационарной волны ($m = 1$) по данным о температуре эксперимента COSMIC (сплошная линия) и данным UK Met Office (штрихи)



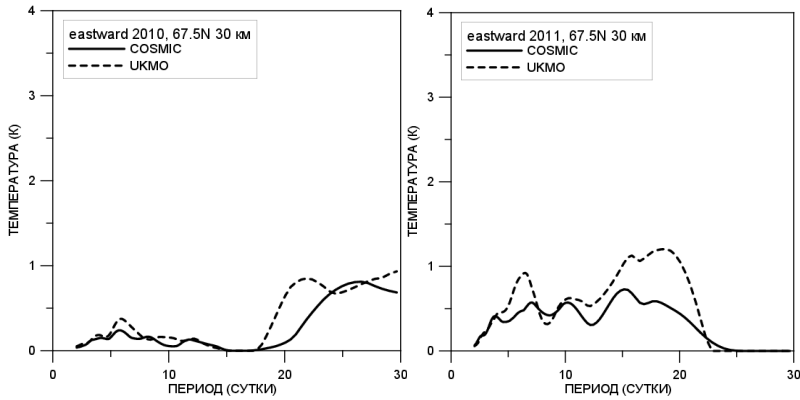


Рис. 5. Усредненные за январь-февраль амплитуды бегущих на восток планетарных волн ($m = 1$) по данным о температуре эксперимента COSMIC (сплошная линия) и данным UK Met Office (штрихи)

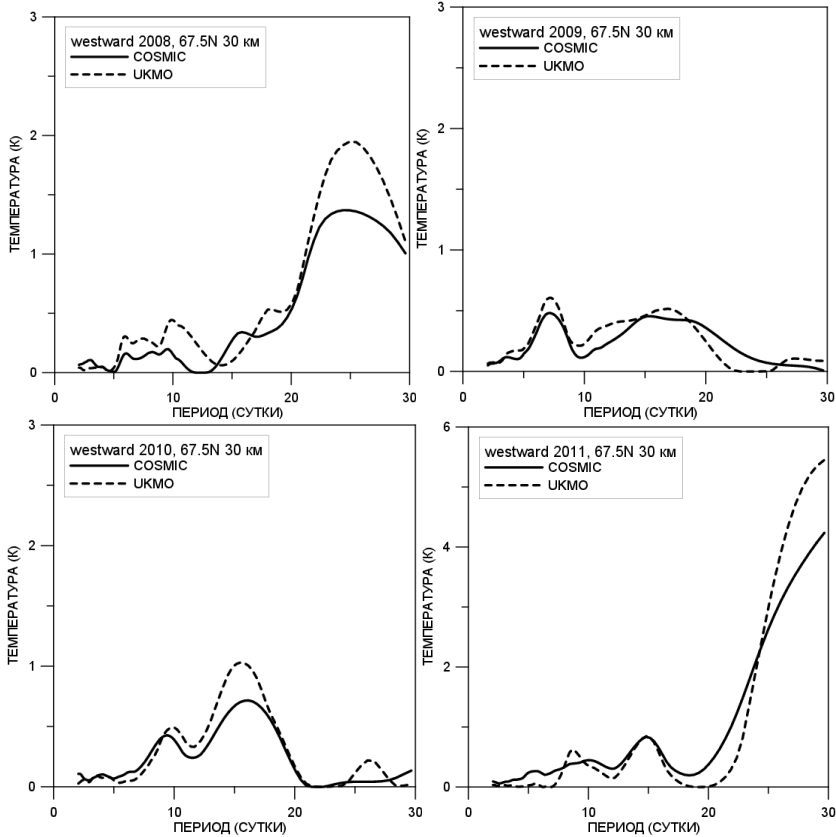


Рис. 6. Усредненные за январь-февраль амплитуды бегущих на запад планетарных волн ($m = 1$) по данным о температуре эксперимента COSMIC (сплошная линия) и данным UK Met Office (штрихи)

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что данных о температуре эксперимента COSMIC вполне достаточно для обнаружения планетарных волн на высотах стратосферы, однако, амплитуды осцилляций в полях температуры характеризуют главным образом условия распространения волн. Используя уравнение гидростатики, по данным о температуре были восстановлены поля геопотенциальной высоты, к которым затем применялся тот же метод для определения характеристик планетарных волн, что и для температуры.

На рис. 7–9 в качестве примера приведены вейвлет амплитуды осцилляций стационарной волны, а также вейвлет амплитуды волн, распространяющихся на восток и запад, в поле геопотенциальной высоты, восстановленном по данным о температуре эксперимента COSMIC, и по данным модели UK Met Office для января-февраля 2009 г. на высоте 30 км и широте 67.5N. Из рисунков видно, что амплитуды и распределения осцилляций для бегущих планетарных волн в поле геопотенциальной высоты, восстановленном по данным COSMIC, и по данным UK Met Office хорошо согласуются. Для осцилляций стационарной волны результаты несколько различаются, что может быть связано с внутренней изменчивостью, которую генерирует модель UK Met Office (особенно в условиях возмущенной атмосферы).

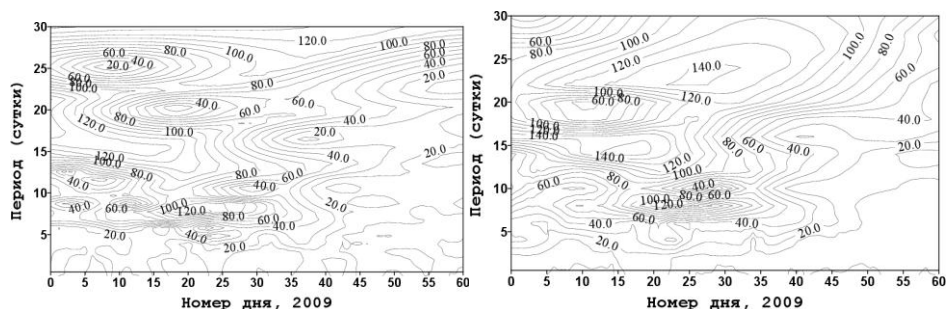


Рис. 7. Вейвлет-амплитуды осцилляций стационарной волны ($m = 1$) в поле геопотенциальной высоты, восстановленном по данным о температуре эксперимента COSMIC (слева), и по данным UK Met Office (справа)

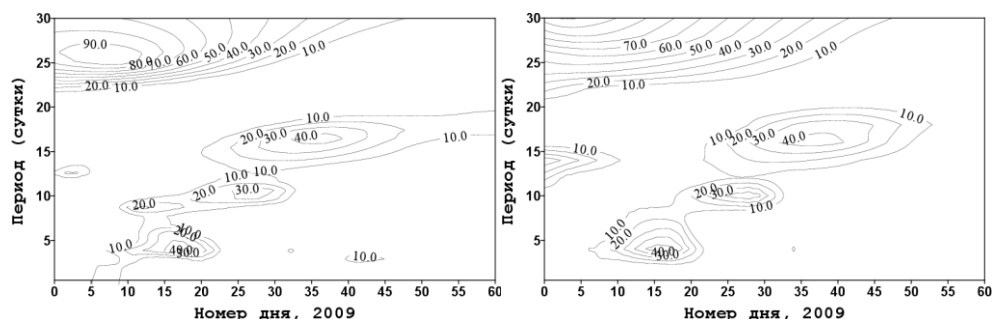


Рис. 8. Вейвлет-амплитуды бегущих на восток планетарных волн ($m = 1$) в поле геопотенциальной высоты, восстановленном по данным о температуре эксперимента COSMIC (слева), и по данным UK Met Office (справа)

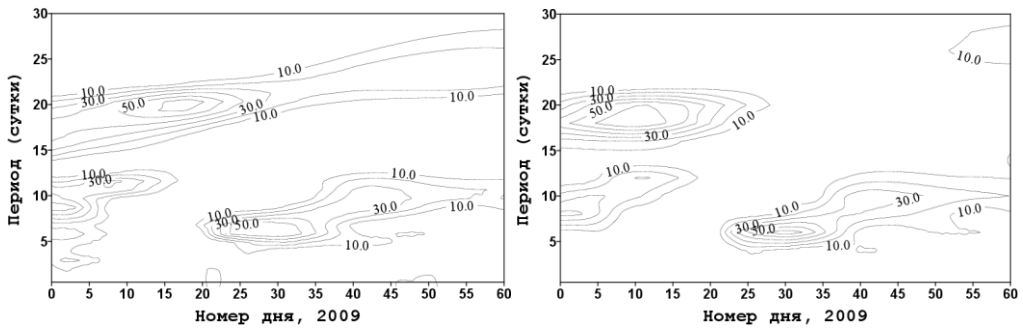
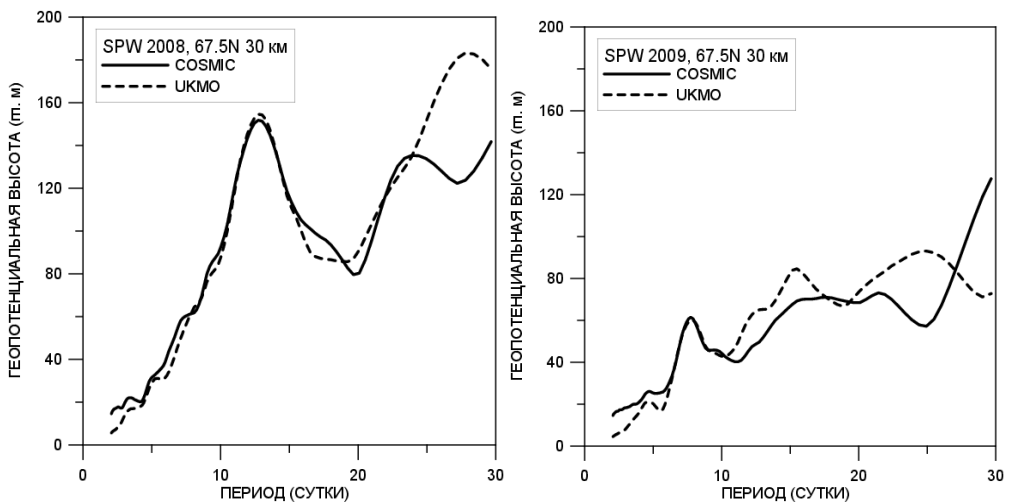


Рис. 9. Вейвлет-амплитуды бегущих на запад планетарных волн ($m = 1$) в поле геопотенциальной высоты, восстановленном по данным о температуре эксперимента COSMIC (слева), и по данным UK Met Office (справа)

На рис. 10–12 показаны усредненные за январь–февраль амплитуды осцилляций стационарной волны и бегущих планетарных волн в поле геопотенциальной высоты на высоте 30 км и широте 67.5N для 2008–2011 гг. Как видно из рисунков, наблюдаемые максимумы амплитуд осцилляций по данным COSMIC и данным UK Met Office качественно совпадают, некоторые различия, как отмечалось ранее, могут быть вызваны внутренней изменчивостью, генерируемой моделью UK Met Office. Эта изменчивость, а также возрастающая с высотой погрешность при измерении температуры в эксперименте COSMIC за счет ионосферных флуктуаций могут объяснить расхождения в значениях амплитуд волн. Анализ результатов показал, что в полях геопотенциальной высоты глобальные резонансные колебания прослеживаются лучше, например, для 2008 г. отчетливо видны максимумы амплитуд на периодах около 5, 10 и 16 суток, в то время как в поле температуры эти проявления нормальных атмосферных мод слабо выражены.



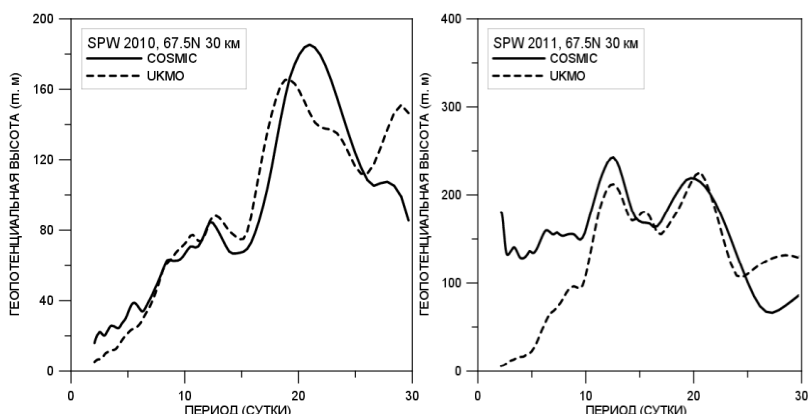


Рис. 10. Усредненные за январь–февраль амплитуды осцилляций стационарной волны ($m = 1$) в полях геопотенциальной высоты, восстановленных по данным о температуре эксперимента COSMIC (сплошная линия), и по данным UK Met Office (штрихи)

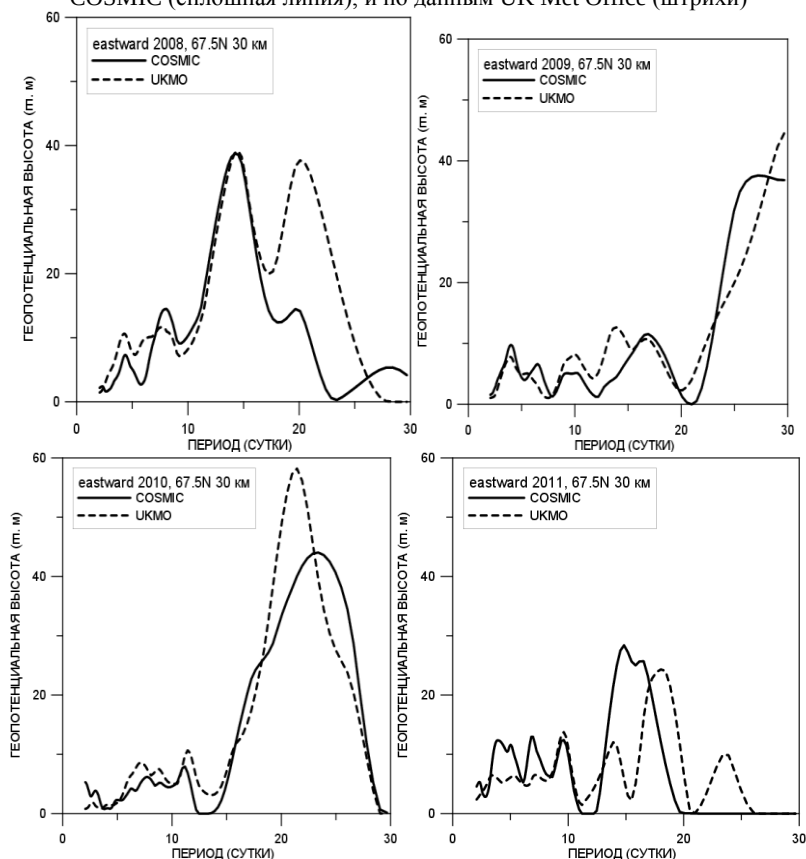


Рис. 11. Усредненные за январь–февраль амплитуды бегущих на восток планетарных волн ($m = 1$) в полях геопотенциальной высоты, восстановленных по данным о температуре эксперимента COSMIC (сплошная линия), и по данным UK Met Office (штрихи)

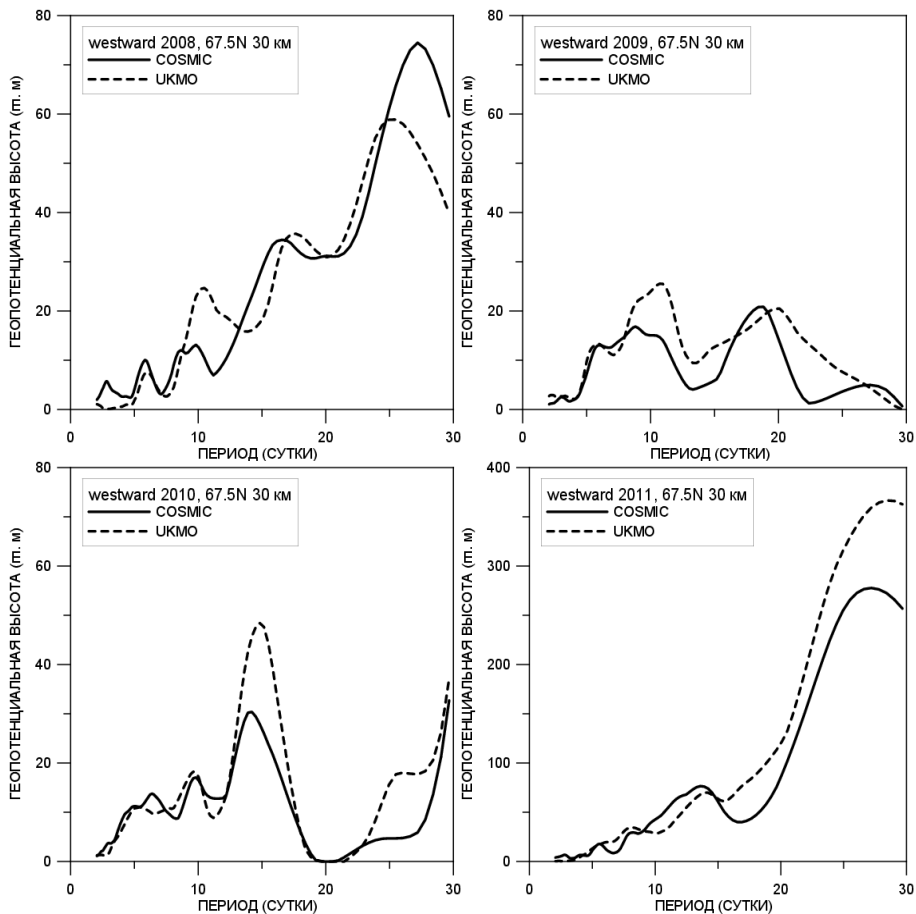


Рис. 12. Усредненные за январь–февраль амплитуды бегущих на запад планетарных волн ($m = 1$) в полях геопотенциальной высоты, восстановленных по данным о температуре эксперимента COSMIC (сплошная линия), и по данным UK Met Office (штрихи)

Литература

1. Зарубин А.С., Погорельцев А.И., Савенкова Е.Н. Планетарные волны в стратосфере на основе анализа радиозатменных наблюдений эксперимента COSMIC // Труды II Всеросс. науч. конф. «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды». – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2012. – Т. 2, с. 193-197.
2. Погорельцев А.И. Генерация нормальных атмосферных мод стратосферными вассилляциями // Изв. РАН, Физика атмосферы и океана, 2007, № 43, № 4, с. 463-475.
3. Погорельцев А.И., Савенкова Е.Н. Межгодовая и климатическая изменчивость сроков весенней перестройки циркуляции стратосферы // Уч. зап. РГТМУ, 2009, № 11, с. 53-62.
4. Форсайт Дж., Малькольм М., Моулер К. Машинные методы математических вычислений. – М.: Мир, 1980. – 280 с.
5. Anthes R. A., Bernhardt P.A., Chen Y., Cucurull L., Dymond K.F., Ector D., Healy S.B., Ho S.-P., Hunt D.C., Kuo Y.-H., Liu H., Manning K., McCormick C., Meehan T.K., Randel W.J., Rocken C., Schreiner W.S., Sokolovskiy S.V., Syndergaard S., Thompson D.C., Trenberth K.E., Wee T.-K., Yen

- N.L., Zeng Z. The COSMIC / FORMOSAT-3 Mission. Early results // Bull. American Meteorological Society. 2008. Vol. 89. P. 313-333.
6. Pogoreltsev, A.I., A.A. Vlasov. K. Fröhlich, and Ch. Jacobi, 2007: Planetary waves in coupling the lower and upper atmosphere. J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 69, 2083-2101, doi:10.1016/j.jastp.2007.05.014.
 7. Rocken C., Kuo Y.-H., Sokolovskiy S., Anthes R. A. The ROCSAT-3/COSMIC Mission and Applications of GPS Radio Occultation Data to Weather and Climate // in Remote Sensing Applications of the Global Positioning System / Edited by Michael Bevis, Yoshinori Shoji, Steven Businger. – Proceedings of SPIE. – 2004. – Vol. 5661 (SPIE Bellingham, WA). P. 1-12.
 8. Torrence Ch., Compo G.P. A practical guide to wavelet analysis// Bull. Amer. Meteorol. Soc. 1998. Vol. 79. № 1. P. 61–78.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты РФФИ № 11-05-00971, № 12-05-31423).