

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВОЛН РОССБИ НА СОЛНЦЕ

В.И. Мордвинов, Е.В. Девятова, В.М. Томозов

ROSSBY WAVE PROPAGATION ON THE SUN

V.I. Mordvinov, E.V. Devyatova, V.M. Tomozov

В работе представлены результаты численных экспериментов по распространению волн Россби на Солнце с использованием баротропной квазигеострофической модели [Крупномасштабные..., 1988; Branstator, 1983; 1987]. Характер дифференциального вращения на Солнце способствует дальнему и трансэкваториальному распространению волн Россби, с помощью которого можно объяснить эффекты межполушарного взаимодействия источников магнитного поля, регулярные колебания солнечной активности в низкочастотном диапазоне. Одним из приложений модели является оценка неустойчивостей в тахоклине, обусловленных проникающей конвекцией. Расчеты показали, что наличие проникающей конвекции с долгоживущими ячейками может способствовать раскачке длинных планетарных волн с зональным волновым числом 1, даже если профиль дифференциального вращения устойчив относительно баротропных возмущений. Время раскачки существенно зависит от широтной зоны и глубины ячеек проникающей конвекции. Аналогичные неустойчивости могут возникать и в тонком верхнем слое над конвективной оболочкой.

The results of the model simulations of the Rossby-waves propagation on the Sun are demonstrated, using barotropic quasi-geostrophic model [Крупномасштабные..., 1988; Branstator, 1983; 1987]. The character of the Sun's differential rotation is favorable to long-distance and cross equatorial Rossby-waves propagation. This fact may help us in the understanding and explanation of the inter-hemispherical magnetic field sources interaction, regular solar activity low-frequency variations and background field variations. One application of the quasi-geostrophic model is to estimate the tachocline instability caused by penetrative convection. Simulations demonstrate that the presence of penetrative convection with long-lived cells may contribute to the excitation of long planetary waves with zonal wave number $k=1$, even if the profile of differential rotation is stable relative to barotropic disturbances. The excitation time is essentially depending on latitude and depth of the penetrative convection cells. Similar instabilities may also appear in the near-surface layer over convective zone.

Модель

Основой модели является уравнение квазигеострофического потенциального вихря в баротропном (дивергентном) приближении:

$$\frac{\partial (\Delta - L_0^{-2}) \Psi}{\partial t} = \frac{1}{a^2} \left[\frac{\partial \Psi}{\partial \mu} \frac{\partial \Delta \Psi}{\partial \lambda} - \frac{\partial \Psi}{\partial \lambda} \frac{\partial \Delta \Psi}{\partial \mu} \right] - \frac{2\Omega}{a^2} \frac{\partial \Psi}{\partial \lambda} + R - r \Delta \Psi - K \Delta^2 (\Delta \Psi),$$

где Ψ – функция тока, $L_0 \equiv \sqrt{gh} / l \approx \sqrt{gh} / 2\Omega \sin 45^\circ$ – радиус Россби–Обухова, R – источник завихренности, r – коэффициент рэлеевского трения, K – коэффициент затухания за счет мелкомасштабной турбулентности, a – радиус Солнца.

Для численного решения использовалась спектральная модель с треугольным усечением до $N=13$. Время рэлеевского затухания для рассмотренных в докладе случаев было принято равным семи оборотам Солнца, шаг по времени составлял 0.1 оборота Солнца. Для расчета источника завихренности R была принята модель расчета топографических возмущений в земной атмосфере.

Исходное уравнение было линеаризовано относительно стандартного профиля дифференциального вращения Солнца:

$$\alpha = k_1 \left(1 - k_2 \mu^2 - k_3 \mu^4 \right) = \frac{1}{26} \left(1 - \frac{1}{8} \mu^2 - \frac{1}{6} \mu^4 \right).$$

Результаты

Были рассмотрены два варианта постановки задачи:

Задача 1. Эволюция возмущений в тонком однородном слое жидкости с дифференциальным вращением при задании источников завихренности, моделирующих проникающую конвекцию.

Задача 2. Расчет стационарных волн, обусловленных постоянными источниками завихренности.

Задача 1

Уотсон [Watson, 1981] показал, что профиль дифференциального вращения на Солнце устойчив относительно раскачки баротропных возмущений, если градиент дифференциального вращения между экватором и полюсом не превышает 30%. Результаты численного эксперимента, представленные на рис. 1, подтверждают этот вывод. На рис. 1 слева представлены результаты расчетов эволюции начального возмущения при отсутствии постоянных источников завихренности (верхний левый кадр) через последовательные 3.6 оборота Солнца. На каждом кадре нанесены изолинии функции тока, нормированные относительно максимального значения возмущений. Максимальные значения возмущений приведены в верхней строке над каждым кадром. К 25-му обороту амплитуда возмущений составила 0.02 от начального значения. На рис. 1 справа представлены результаты расчетов изменений со временем энергии сферических гармоник. Как и следовало ожидать, все коэффициенты разложений по сферическим гармоникам быстро убывают со временем.

На рис. 2 слева представлены результаты расчетов эволюции начального возмущения при наличии двух постоянных источников завихренности, расположенных в разных полушариях Солнца на широте 30° . Положение источников завихренности выделено значками (пространственная структура источников завихренности, моделирующих обтекание жидкостью симметричного углубления в слое, представлена далее на рис. 4). Видно, что при том же, что и в первом эксперименте, профиле дифференциального вращения динамика возмущения является неустойчивой. К 10-му обороту появляются признаки формирования дипольной структуры, которая

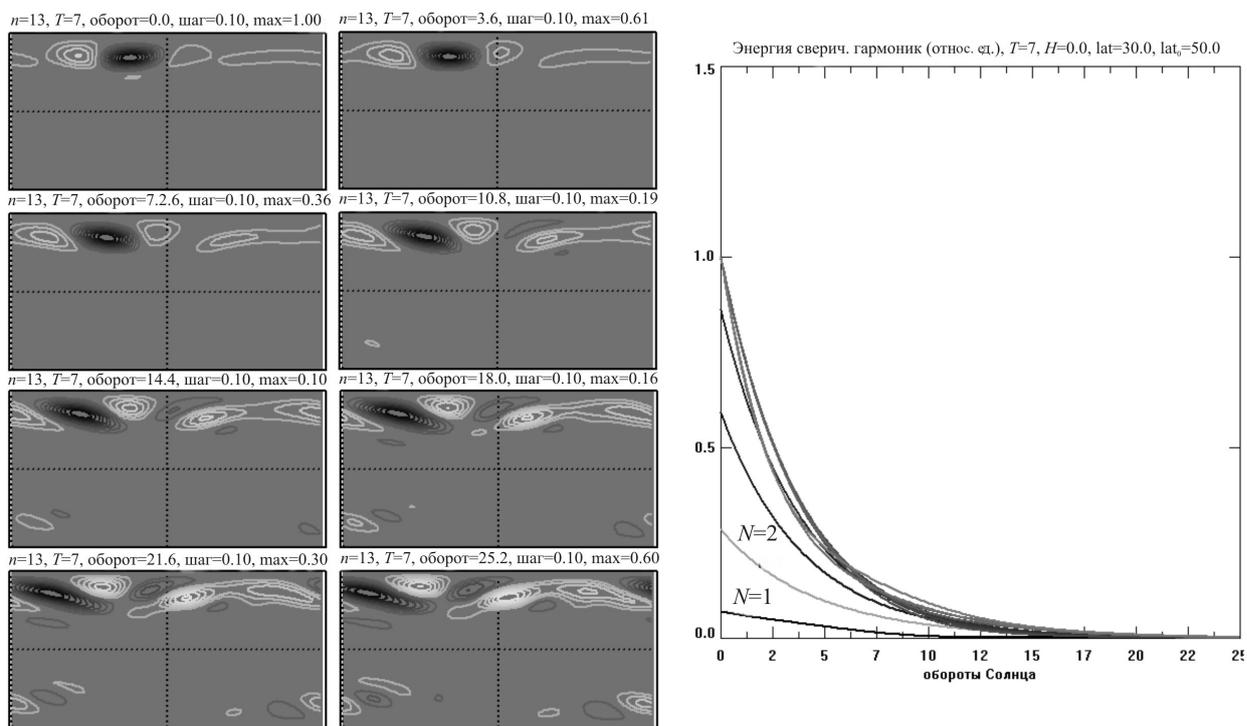


Рис. 1. Слева – результаты расчетов эволюции начального возмущения (верхний левый кадр) в отсутствие постоянных источников завихренности через последовательные 3.6 оборота Солнца. На каждом кадре нанесены изолинии функции тока, нормированные относительно максимального значения возмущений. Справа – результаты расчетов изменений со временем энергии сферических гармоник.

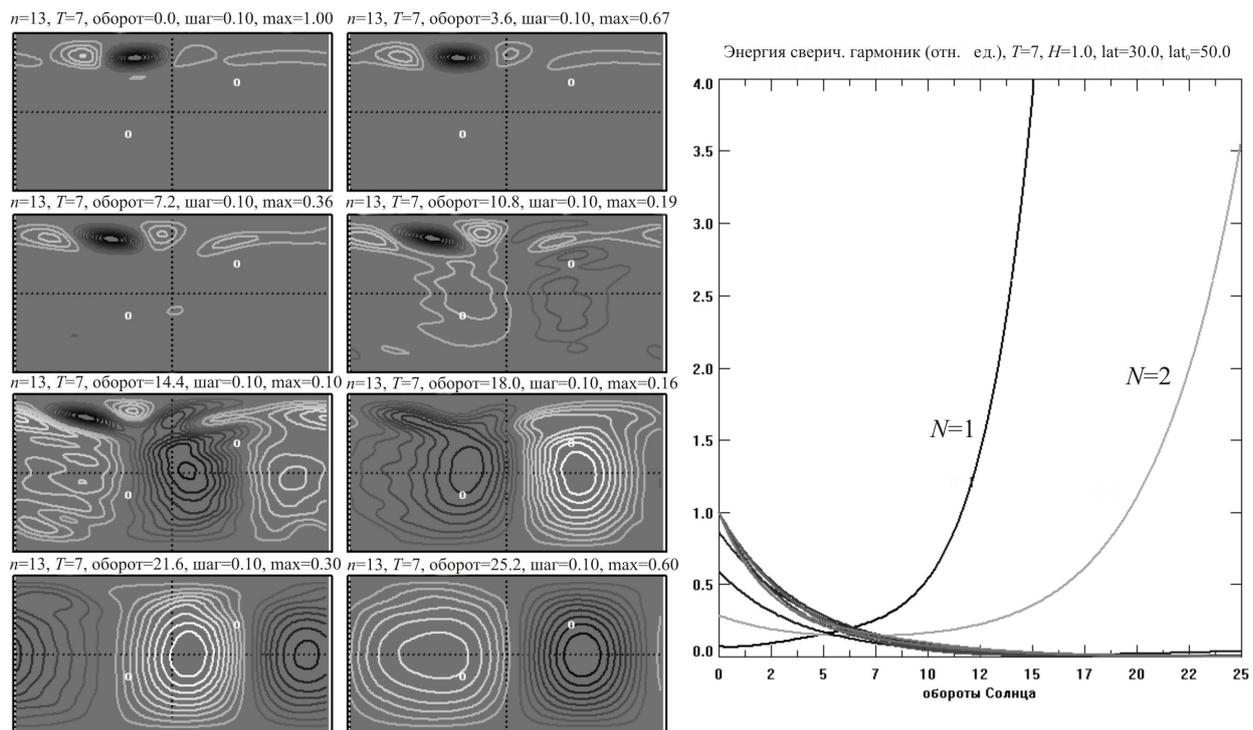


Рис. 2. Слева – результаты расчетов эволюции начального возмущения при наличии двух постоянных источников завихренности (положение источников выделено значками), расположенных в разных полушариях Солнца на широте 30° . Справа – результаты расчетов изменений со временем энергии сферических гармоник.

к 25-му обороту доминирует в распределении функции тока. Приведенная на рис. 2 справа динамика коэффициентов разложения сферических гармоник подтверждает развитие неустойчивостей с $N=1, 2$ и $M=1$, где N – степень, M – зональное волновое число.

Существенное значение для динамики возмущений имеет направление переноса в слое вблизи

источника завихренности. В случае, представленном на рис. 2, источник завихренности находился в области западного переноса (с запада на восток). На рис. 3 слева представлены результаты расчета динамики возмущений при нахождении источника завихренности в области восточного переноса на широте 65° . Как и в отсутствие постоянных источ-

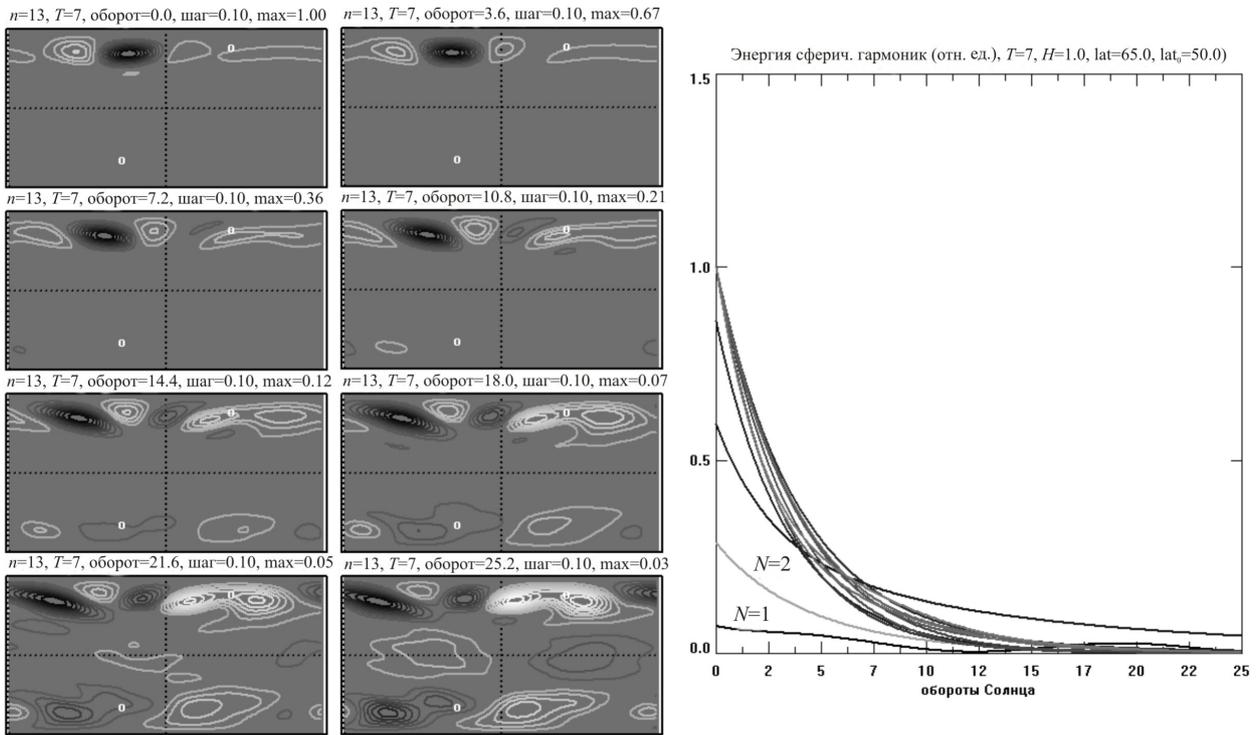


Рис. 3. Слева – результаты расчета динамики возмущений при нахождении источников завихренности в области восточного переноса на широтах 65° в разных полушариях Солнца. Справа – результаты расчетов изменений со временем энергии сферических гармоник.

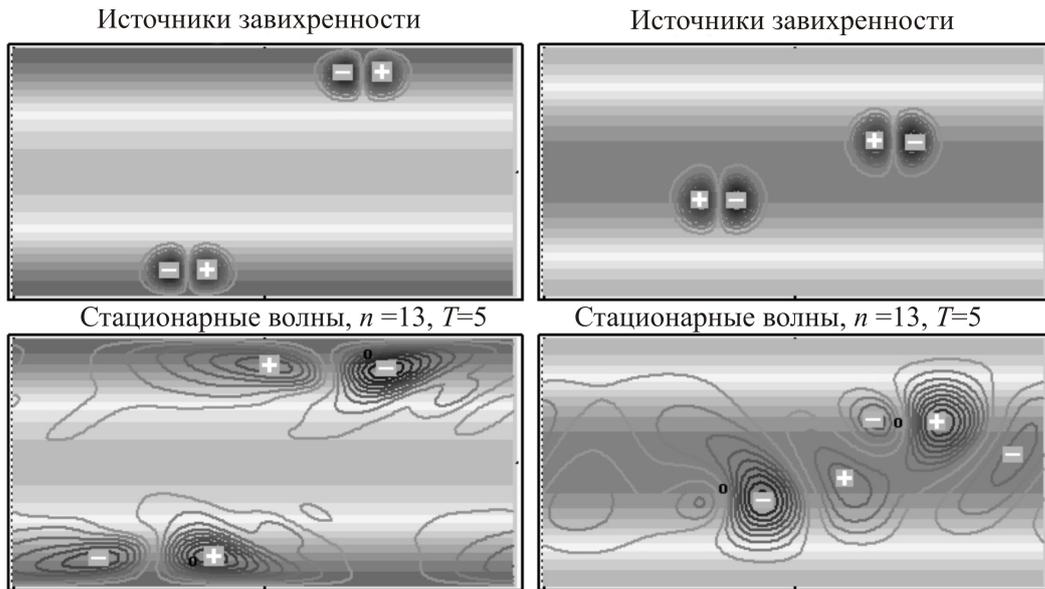


Рис. 4. Результаты модельных расчетов стационарных волн, излучаемых источниками завихренности в высоких (слева) и низких (справа) широтах. На верхних панелях изображены источники завихренности, имеющие дипольный характер (подъем – опускание).

ников завихренности (см. рис. 1), возмущение быстро затухает со временем, что подтверждается результатами расчетов изменений со временем энергии сферических гармоник (рис. 3, справа).

Задача 2

Несмотря на то, что эволюционные решения уравнения завихренности не стремятся к стационарному решению, практика анализа общей циркуляции атмосферы показывает, что самые большие по амплитуде аномалии в распределении гидротермодинамических полей достаточно точно воспроизводятся в линеаризованном стационарном уравнении вихря.

Если циркуляция на Солнце близка по свойствам циркуляции на Земле хотя бы в каком-то ограниченном по толщине слое, представляется интересным оценить возможную конфигурацию стационарных волн при разном положении источников завихренности. Важность этой задачи определяется тем, что именно посредством стационарных волн, излучаемых различными источниками завихренности, могут реализовываться дальние связи, в частности межполушарные взаимодействия между комплексами активности.

На рис. 4 представлены результаты модельных расчетов стационарных волн, излучаемых источни-

ками завихренности в высоких (рис. 4, слева) и низких (рис. 4, справа) широтах на Солнце. На верхних панелях изображены источники завихренности, имеющие дипольный характер (подъем – опускание), рассчитанные так, как это делается при моделировании топографических источников завихренности на Земле. Расчеты показывают, что структура источников завихренности слабо влияет на пространственную структуру и масштабы стационарных волн. В гораздо большей степени на пространственные масштабы стационарных волн влияет характерный временной масштаб рэлеевского затухания. На приведенных рисунках этот масштаб принят равным пяти оборотам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Крупномасштабные динамические процессы в атмосфере / Под ред. Б. Хоскинса, Р. Пирса. М.: Мир, 1988. 430 с.

Branstator G.W. Horizontal energy propagation in a barotropic atmosphere with meridional and zonal structure // J. Atmos. Sci. 1983. V. 40, N 7. P. 1689–1708.

Branstator G.W. Striking example of the atmosphere's leading traveling pattern // J. Atmos. Sci. 1987. V. 44, N 16. P. 2310–2323.

Watson M. Shear instability of differential rotation in stars // Geophys. Astrophys Fluid Dyn. 1981. V. 16. P. 285–298.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск