

УДК 523.98:533.951

ВРЕМЕННАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ДОЛГОПЕРИОДИЧЕСКОЙ ЧАСТИ СПЕКТРА ГЛОБАЛЬНЫХ ОСЦИЛЛЯЦИЙ ЗА ВРЕМЯ РАЗВИТИЯ СТАНДАРТНОГО ЦИКЛА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

В.А. Романов, Д.В. Романов, К.В. Романов, И.В. Семенов

TIME EVOLUTION OF LOW-FREQUENCY PART OF GLOBAL OSCILLATION SPECTRUM DURING ORDINARY SOLAR ACTIVITY CYCLE

V.A. Romanov, D.V. Romanov, K.V. Romanov, I.V. Semenov

В работе методами численного моделирования исследуются нелинейные колебания тонкой магнитной трубки в верхних слоях зоны динамо. Показано, что в основном период колебаний зависит от волнового числа m и напряженности магнитного поля в трубке. При подъеме магнитного поля период колебаний увеличивается от нескольких часов до величин порядка 102 ч, приводя к сдвигу пика мощности в долгопериодическую часть спектра.

In the paper a magnetic field oscillation spectrum is studied numerically for upper region of ynamo zone. It is shown that period of nonlinear oscillations is mainly a function of magnetic field strength and wave number. direct simulations shows that frequency of the oscillations is significantly downshifted as field arises (period of oscillations grows from hours up to 102 hours).

Математическая постановка задачи

Колебания магнитного поля в приближении тонкой магнитной трубки [1] описываются следующей безразмерной системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{v}, \\ \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{(\vec{f}, \vec{\ell})\vec{\ell}}{\rho} + \frac{\vec{f} - \vec{\ell}(\vec{f}, \vec{\ell})}{\rho + \rho_e}, \\ \vec{f} = C_0 \rho H \sigma \frac{\partial(H \cdot \vec{\ell})}{\partial s} + (\rho - \rho_e) \vec{g}(\vec{r}), \\ \frac{\rho^\gamma}{\gamma - 1} \frac{d}{dt} \left(\frac{p}{\rho^\gamma} \right) = -\text{div} \vec{W} + Q, \\ H \sigma = H_0 \sigma_0, \\ p + H^2 = p_e \vec{r}, \\ \vec{\nabla} p_e = \frac{2}{C_0} \rho_e \vec{g}(\vec{r}), \\ |\vec{\ell}| = 1, \\ \vec{\ell} = \rho \sigma \frac{d\vec{r}}{ds}, \\ \varepsilon = \frac{1}{\gamma - 1} \frac{p}{\rho}, \\ p = \frac{R}{\mu} \rho T, \end{cases}$$

где s обозначает массовую переменную вдоль трубки, $\vec{\ell}$ – вектор единичной касательной к оси, индекс e обозначает параметры среды, а остальные величины имеют традиционные значения. В качестве начального состояния магнитная трубка расположена в экваториальной плоскости Солнца и замкнута в кольцо, как показано на рис. 1.

Для численного решения этой системы используется конечно-разностная схема (рис. 2.) «шахматного» типа второго порядка аппроксимации по всем переменным [1, 2]. Система разностных уравнений разбивается на динамическую и тепловую группу, а также

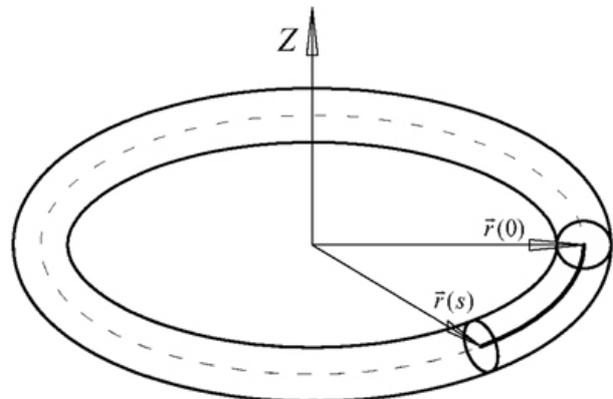


Рис. 1. Начальная конфигурация магнитного поля.

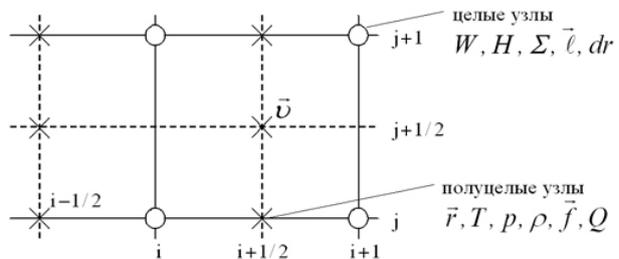


Рис. 2. Шаблон конечно-разностной схемы [1].

на группу пересчета координат. Решение нелинейных разностных уравнений производится по методу Ньютона [3].

Развитие неустойчивости медленной волны на различных глубинах зоны динамо.

Существует два типа колебаний магнитной трубки относительно положения равновесия [4]: поперечные быстрые волны и продольные медленные волны (в литературе их называют варикозными, или касповыми); структура обеих показана на рис. 3. При малой амплитуде радиальной компоненты возмущений реализуются устойчивые линейные колебания магнитной трубки (рис. 4).

Главной особенностью поляризации медленных волн в зоне Динамо следует считать то, что амплитуды радиальной и продольной компонент скорости

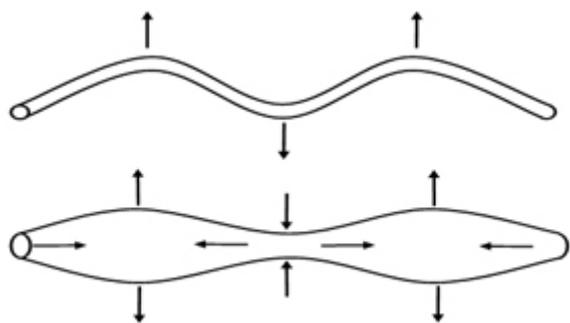


Рис. 3. Структура основных мод колебаний тонкой магнитной трубки.

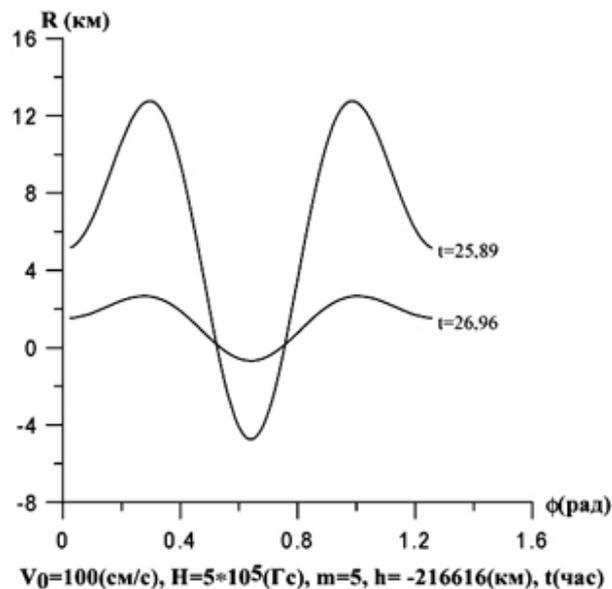


Рис. 4. Пятая мода радиальных линейных колебаний тонкой магнитной трубки для быстрой волны.

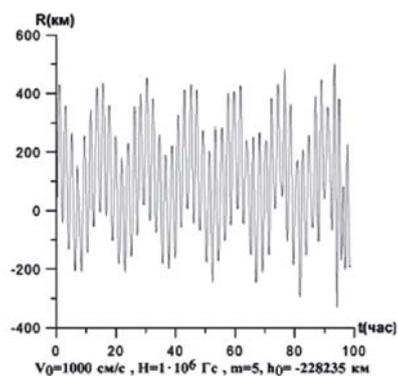
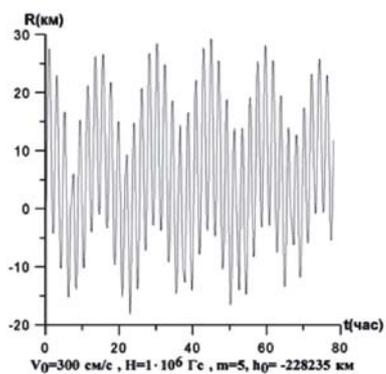


Рис. 5. Увеличение частоты биений при росте амплитуды волны (на графиках отложена радиальная компонента смещения замороженного элемента магнитной трубки).

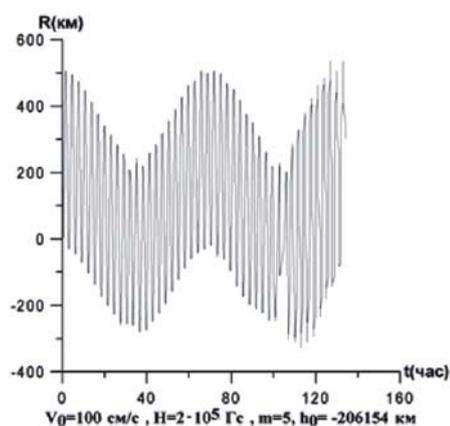
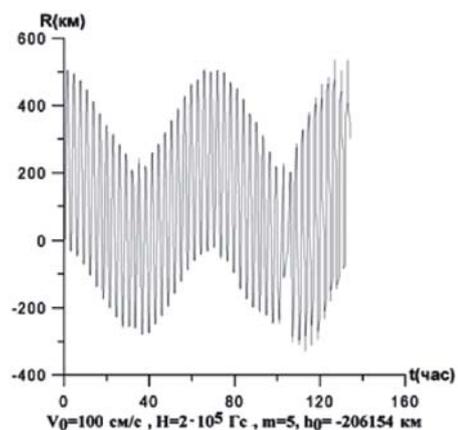


Рис. 6. Увеличение частоты биений при росте напряженности магнитного поля.

могут отличаться на порядки. Это значит, что даже колебания с существенно дозвуковыми (порядка м/с) радиальными скоростями быстро становятся нелинейными [4].

При переходе линейных колебаний в нелинейные часто возникают биения: мгновенное положение равновесия, вокруг которого колеблется трубка, само испытывает гармонические колебания с периодами, существенно превышающими период опорной частоты колебаний (рис. 5). Период биений существенно зависит от напряженности магнитного поля в трубке (рис. 6) и волнового числа m (рис. 7), медленно и монотонно возрастающая с ростом глубины (рис. 8). Зависимость периода биений от волнового числа m

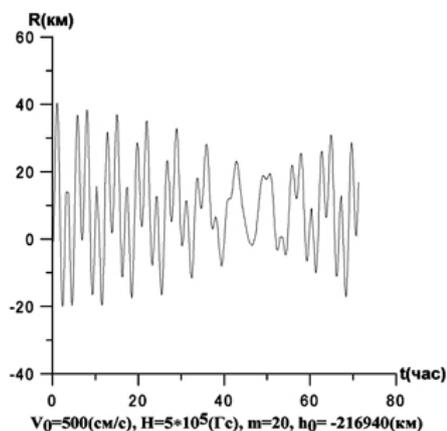


Рис. 7. Зависимость периода биений от волнового числа m .

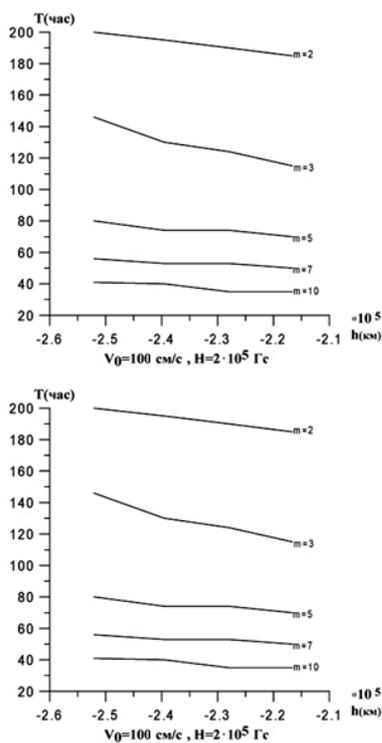


Рис. 8. Зависимость периода биений от глубины трубки и напряженности магнитного поля.

гораздо сильнее, чем от глубины, и с ростом m период биений резко падает, изменяясь в диапазоне от 100 часов до 10 ч и менее (как показано на рис. 9). Для старших гармоник на краю зоны динамо реализуется биения с периодом порядка 4 часов (рис. 10).

При подъеме магнитного поля напряженность поля очень быстро падает с высотой [1, 4], приводя в итоге к значительному увеличению периода биений.

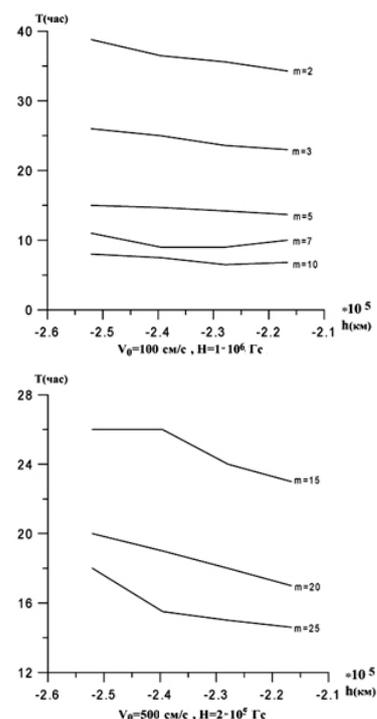


Рис. 9. Диапазон параметров биений с периодом колебаний меньше 50 ч.

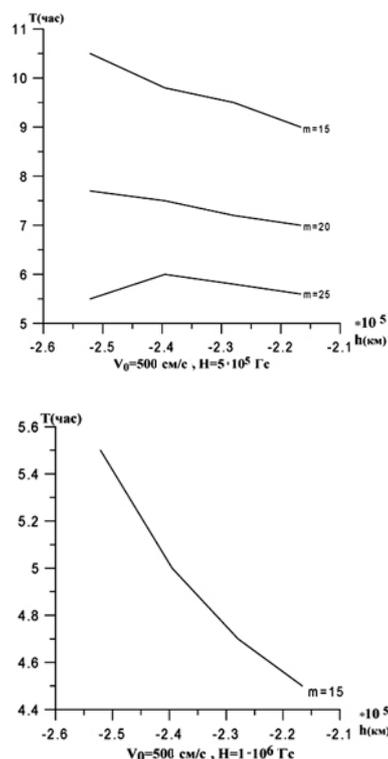


Рис. 10. Диапазон параметров биений с периодом колебаний меньше 10 ч.

Выводы

1. Наиболее важными физическими параметрами, определяющими период биений, являются напряженность магнитного поля в трубке и волновое число m .

2. С уменьшением напряженности магнитного поля период биений нелинейно растет. При всплывании магнитных полей к верхнему краю зоны динамо спектр глобальных осцилляций обогащается долгопериодическими гармониками. Этот результат согласуется с наблюдательными данными [5].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Романов Д.В., Романов К.В. Численное моделирование развития неустойчивости медленной волны тонкой магнитной трубки в конвективной зоне Солнца // Вычисл. технологии. 2001. Т. 6, № 6. С. 81–92.
2. Семенов И.В.. Численное моделирование влияния теплового прогрева на динамику подъема магнитных полей в атмосферу Солнца / Кандидатская диссертация. Красноярск: КГТУ, 2006. 140 с.
3. Самарский А.А., Попов Ю.П. Разностные схемы газовой динамики // М.: Наука, 1975. 351 с.
4. Alekseenko S.V., Romanov V.A., Romanov K.V., Seменов I.V.. Hypersonic pulsing regimes of magnetic field emerge from lower layers of the convective zone up to the photosphere of the Sun // Intern. Conf. on the Methods of Aerophysical Research. 2002. V. II. P.8–13.
5. Котов В.А., Северный А.Б., Цап Т.Т. Исследование глобальных осцилляций Солнца. II. Результаты наблюдений в 1974 – 1980 гг., их анализ и некоторые выводы // Изв. Крымской астрофиз. обс. 1983. Т. 66. С. 3 – 71.

Красноярский институт железнодорожного транспорта,
Красноярск