Письма в ЖЭТФ, том 34, вып.2, стр. 83 – 86 *20 июля 1981 г.*

БАРОКЛИННАЯ МОДИФИКАЦИЯ БАРОТРОПНОЙ МОДЕЛИ БОЛЬШОГО КРАСНОГО ПЯТНА ЮПИТЕРА

М.В.Незлин

Показано, что учет вертикального волнового движения, связанного с градиентом плотности атмосферы по высоте, позволяет привести солитонную модель Пятна Юпитера [1] в хорошее количественное соответствие с данными наблюдений.

В работе Петвиашвили [1] была предложена модель, согласно которой Большое Красное Пятно Юпитера представляет собой антициклонический солитон Россби, дрейфующий в атмосфере планеты на запад и вращающийся вокруг собственной оси против глобального вращения планеты. Модель [1] отличается от другой солитонной модели Пятна [2] простотой и доступностью для экспериментальной проверки [3]. Эта модель качественно согласуется с наблюдениями, но существенно расходится с ними количественно – в отношении размеров Пятна, скорости его дрейфа (вдоль параллели) и периода собственного вращения Пятна. Модель [1] является баротропной: в ней не учитывается вертикальное волновое движение, связанное с градиентом плотности атмосферы по вертикали. Цель данной заметки состоит в том, чтобы показать, что простой учет вертикального волнового движения (т.е. так называемого бароклинного эффекта) в солитоне позволяет привести модель [1] в хорошее количественное согласие с данными наблюдений.

Дисперсионное уравнение для волн Россби в слое мелкой атмосферы постоянной эквивалентной глубины имеет вид [4]:

$$\omega = \frac{\beta k_x}{k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 f_0^2 / N^2}, \qquad (1)$$

где ω – угловая частота волны, k_x, k_y, k_z – волновые числа колебаний вдоль широты, долготы и вертикали соответственно, $f_0 = 2\Omega_0 \sin\phi$ – параметр Кориолиса, Ω_0 – угловая частота вращения планеты, ϕ – широта, $\beta = -(2\Omega_0/R)\cos\phi$, R – радиус планеты, N – частота Брунта – Вяйсяля вертикальных колебаний среды, устойчивой по отношению к конвекции:

$$N^2 = -\frac{g}{\rho}\frac{d\rho}{dz} - \frac{g^2}{c_s^2}, \qquad (2)$$

g – ускорение свободного падения, c_s – скорость звука. Верхнюю оценку N получим для изотермической атмосферы, плотность которой $\rho(z)$ убывает по вертикали по больцмановскому закону с эквивалентной высотой H_0:

$$N = \left[\frac{(\gamma - 1)}{\gamma}\frac{g}{H_0}\right]^{1/2}, \qquad (2')$$

где T – температура атмосферы, $\gamma = 1{,}4$ – показатель адиабаты. Уравнению (1) удовлетворяют следующие разновидности волн Россби [4]: *баротропная* мода, существующая независимо от $d\rho/dz$ и единственно учитываемая в модели [1]:

$$k_z^{(o)} = \left(\frac{N^2}{gH_o}\right)^{1/2}, \tag{3}$$

бароклинные моды (не учитываемые в модели [1]):

$$k_z^{(m)} = \frac{m\pi}{H_o}, \quad m = 1, 2, 3, \ldots \tag{4}$$

Дисперсионное уравнение (1) для всех мод имеет одинаковый вид:

$$\omega = \frac{\beta k_x}{k_x^2 + k_y^2 + 1/r_R^2}, \tag{5}$$

причем для баротропной моды $r_R = r_e$, для бароклинных мод $r_R = r_i$, где параметры r_e и r_i – соответственно внешний и внутренний радиусы Россби:

$$r_e = \frac{(gH_o)^{1/2}}{f_o}, \quad r_i = \frac{NH_o}{m\pi f_o}. \tag{6}$$

В баротропной модели [1] диаметр солитона $2a$, скорость его дрейфа относительно планеты V_x и период собственного вращения солитона $T_r = 2\pi/\omega_r$ определяются соотношениями

$$\left.\begin{aligned} 2a &\approx 3{,}5\, r_e (h)^{-1/2}, \\ V_x &\gtrsim \beta r_e^2, \\ \frac{\omega_r}{f_o} &\approx \frac{1}{3} h^2 \ ^{1)}, \end{aligned}\right\} \tag{7}$$

где $h = \dfrac{\Delta H}{H_o}$ – относительное возвышение (амплитуда) солитона.

В бароклинной модификации рассматриваемой модели следует заменить r_e на r_i, т.е. положить

$$\left.\begin{aligned} 2a &\approx 3{,}5\, r_i (h)^{-1/2}, \\ V_x &\gtrsim \beta r_i^2, \\ \frac{\omega_r}{f_o} &\approx \frac{1}{3} h^2 \left(\frac{r_e}{r_i}\right)^2. \end{aligned}\right\} \tag{8}$$

---

1) Из соотношения (5) работы [1] имеем: $\omega_r a \approx f_o r_e^2 h/a$, откуда $\dfrac{\omega_r}{f_o} \approx \dfrac{r_e^2}{a^2} h \approx \dfrac{r_e^2}{r_R^2} \dfrac{h^2}{3}$, причем для баротропной моды $r_R = r_e$, для бароклинных мод $r_R = r_i$.

Видно, что различия в параметрах баротропного и бароклинного солитонов определяются величиной отношения r_e / r_i (в различных степенях). Это отношение, согласно (2′) и (6), составляет: для $m = 1$

$$\frac{r_e}{r_i} \gtrsim \left(\frac{\pi^2 \gamma}{\gamma - 1} \right)^{1/2} \approx 6. \qquad (9)$$

Наблюдения [5 – 7] дают для Юпитера и Большого Красного Пятна такие цифры: $\Omega_0 = 1{,}74 \cdot 10^{-4}$ сек$^{-1}$, $\tilde{\omega}_r \approx 1{,}1 \cdot 10^{-5}$ сек$^{-1}$, $R = 71000$ км $g = 2{,}5 \cdot 10^3$ см $\cdot$ сек$^{-2}$, широта Пятна $\phi = -22°$, $T = 130$K, $H_0 \approx 20$ км, диаметр Пятна по меридиану – 10000 км, по параллели – 20000 км, $N = 2 \cdot 10^{-2}$ сек$^{-1}$ (см. также (2′)), скорость дрейфа Пятна на запад – около 3 м/сек, амплитуда антициклона в Пятне (среднее из двух определений в [6]) $h = 10^{-1}$. Из этих цифр и соотношения (6) имеем: $r_e \approx 6000$ км, $r_i \approx 1\,000$ км ($m = 1$). По приведенным данным построена таблица.

	r_e / r_R	$2a$, 10^3 км	V_x, м/сек	ω_r / f_0
Баротропная модель [1]	1	66	160	$3 \cdot 10^{-3}$
Бароклинная модель, $m = 1$	6	11	4,5	$11 \cdot 10^{-2}$
Наблюдения	—	10 – 20	3	$9 \cdot 10^{-2}$

Из таблицы видно, что наблюдаемый размер Пятна в (3 – 7) раз меньше, скорость дрейфа в 50 раз меньше, а частота собственного вращения – в 30 раз больше, чем это предсказывает баротропная модель [1]. В то же время, бароклинная модификация этой модели при $m = 1$ находится в хорошем согласии с результатами наблюдений. Интересно было бы сравнить параметры более мелких пятен Юпитера с бароклинными модами высших порядков ($m > 1$).

Поступила в редакцию
8 июня 1981 г.

Литература

[1] В.И.Петвиашвили. Письма в ЖЭТФ, 32, 632, 1980.

[2] T.Maxworthy, L.G.Redekopp. Icarus, 29, 261, 1976.; Science, 210, 1350, 1980.

[3] С.В.Антипов, М.В.Незлин, Е.Н.Снежкин, А.С.Трубников. Письма в ЖЭТФ, 33, 368, 1981.

[4] В.М.Каменкович, А.С.Монин. Сб. Физика океана, под ред. В.М.Каменковича и А.С.Монина, т.2, гл.1. М., изд. Наука, 1978; А.С.Монин, М.Н.Кошляков. Сб. Нелинейные волны, Горький. изд. Наука, 1979, стр. 258.

[5] V.R.Eshleman, G.L.Tyler, G.E.Wood, G.F.Lindal, J.D.Anderson, G.S.Levy. Science, **204**, 978, 1979.

[6] C.W.Hord et. al. Science, **206**, 956, 1979.

[7] D.N.Beaumont. Icarus, **41**, 400, 1980.
