Колебания солнечной атмосферы, связанные с неустойчивостью акустико-гравитационных волн

О.Н. Савина

Нижегородский государственный технический университет, г. Нижний Новгород

Хорошо известные вертикальные колебания солнечной атмосферы принято связывать с акустико-гравитационными волнами (Гиббсон, 1977). Свойства этих волн существенны для понимания процессов в хромосфере и нижней короне, поскольку в этих областях солнечной атмосферы для соответствующих временных и пространственных масштабов магнитные силы могут быть относительно малы и описание волновых процессов можно проводить с помощью системы гидродинамических уравнений (Штейн и Лейбечер, 1974). Свойства акустико-гравитационных волн наиболее полно изучены для модели изотермической атмосферы, когда высотным изменением температуры можно пренебречь. В то же время, температура солнечной атмосферы зависит от высоты и особенно резко она меняется в области переходной области Солнца между хромосферой и короной, где наблюдается очень резкий её перепад. Учет этой зависимости приводит к интересным особенностям. Так, например, ранее рассматривалась возможность существования на резком скачке температуры различных типов поверхностных атмосферных волн (Савина и Беспалов, 1998). Авторы работы (Хиндман и Лайбел , 1994) отмечали, что наличие переходной области в солнечной атмосфере может сказаться на характере поведения акустико-гравитационных волн и дать более полную интерпретацию пятиминутных колебаний в солнечной хромосфере.

В данной работе исследуется возможность генерации колебаний солнечной атмосферы, связанная с её неизотермичностью. Принципиально новым в данной работе представляется поиск аналитических решений, описывающих волновые возмущения во всей толще атмосферы. Построение решений проводится на основе модельного задания температурного профиля в виде отношения полиномов, что позволило найти аналитическую зависимость для низшей моды быстрых акустико-гравитационных волн для любого конкретного температурного профиля, а также сделать заключение о предельной акустической частоте. С использованием найденного решения делается заключение о неустойчивости атмосферы и её параметрах.

Решение задачи проводится на основе волнового уравнения для быстрой ветви акустико-гравитаци-онных волн

$$\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \gamma g \frac{\partial w}{\partial z} - c^2 \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} = 0, \qquad (1)$$

где w -возмущение вертикальной скорости среды, H - высота однородной атмосферы, z - вертикальная координата, c- скорость звука, γ -отношение теплоемкостей, g -ускорение свободного падения. Уравнение записано в пренебрежении вязкостью, теплопроводностью, ветрами, а так же нелинейными членами.

Выберем граничные условия для вертикальной скорости следующим образом. Используя тот факт, что вблизи фотосферы плотность резко уменьшается, возмущения вертикальной скорости на нижней границе ($z = 0$) солнечной атмосферы можно считать отсутствующими. Будем считать, что верхняя граница ($z = z_c$) находится в области солнечной короны , где температура выходит на постоянное значение на высоте, намного превосходящей высоту однородной атмосферы ($z_c \to \infty$). С учетом того, что на верхней границе должно выполняться условие непрерывности вертикальной скорости и давления, граничные условия примут вид:

$$c^2 \frac{\partial w}{\partial z}|_{z \to z_c - 0} = \frac{\gamma g}{2}|_{z \to z_c + 0}. \tag{2}$$

Из этого соотношения однозначно следует, что частота колебаний равна предельной акустической частоте ω_A, определяемой температурой в солнечной короне.

Решение уравнения (1), удовлетворяющее граничным условиям (2) , можно найти в аналитическом виде, если представить зависимость высоты однородной атмосферы $H(z)$ в виде отношения полиномов

$$H(z) = \frac{\sum_{k=0}^{n} B_k z^k}{\sum_{k=0}^{n} C_k z^k}. \tag{3}$$

Для того, чтобы предложенная функция $H(z)$ хорошо описывала реальную зависимость необходимо, чтобы полиномы в числителе и знаменателе удовлетворяли следующим требованиям. Во-первых, ни числитель, ни знаменатель не обращаются в нуль при $z > 0$. Во-вторых, полиномы имеют одинаковую степень, что необходимо, чтобы функция $H(z)$ на больших высотах имела конечную ненулевую величину. Коэффициенты полиномов, удовлетворяющих этим условиям, находятся путем решения системы алгебраических уравнений

$$H(z_i) \sum_{k=0}^{n} C_k {z_i}^k = \sum_{k=0}^{n} B_k {z_i}^k, \tag{4}$$

число которых определяется требуемой степенью точности описания реальной зависимости.

Будем искать решение уравнения (1) в виде разложения по полиномам,

$$w(z,t) = (\sum_{k=0}^{n} A_k z^{k+1}) \exp(z/2H + i\omega_A t), \tag{5}$$

которое, как нетрудно убедиться, удовлетворяет граничным условиям (2). Непосредственной подстановкой решения (3) в уравнение (1) находятся коэффициенты разложения A_k, с необходимым условием, чтобы амплитуда колебаний не обращалась в нуль в области $z > 0$. Изложенный выше алгоритм поиска решения позволил аналитически описать колебания атмосферы для данного высотного профиля её температуры.

Анализ уравнения (1) позволил заключить, что частота собственных колебаний $\omega_A = c/2H_c$ и определяется значением высоты однородной атмосферы в короне H_c. Таким образом, в связи с тем, что температура короны намного превышает температуру хромосферы, значение частоты Вяйсяля-Бранта ω_B больше значения предельной акустической частоты ω_A во всей толще солнечной атмосферы. Особенность дисперсионных свойств акустико-гравитационных волн такова, что в этом случае возникает их неустойчивость (Джонстон, 1969). Для оценки инкремента неустойчивости будем рассматривать задачу в локальном приближении, то есть полагать для каждой высотной области что ω_B имеет определенное постоянное значение, амплитуда волны изменяется по тем же законам, что и в изотермической атмосфере, но с некоторым эффективным значением высоты однородной атмосферы H_c. Решение дисперсионного уравнения для акустико-гравитационных волн имеет вид:

$$\omega_{1,2}^2 = \frac{\omega_A^2 + c^2k^2}{2}\left(1 \pm \sqrt{1 - \frac{4\omega_B^2 c^2 k^2}{(\omega_A^2 + c^2k^2)^2}}\right) \tag{6}$$

и при $\omega_B > \omega_A$ является комплексной величиной. Это происходит, если горизонтальное волновое число k удовлетворяет неравенству

$$2\omega_B^2 - \omega_A^2 - 2\omega_B^2(\omega_B^2 - \omega_A^2)^{1/2} < c^2k^2 < 2\omega_B^2 - \omega_A^2 + 2\omega_B^2(\omega_B^2 - \omega_A^2)^{1/2}.$$

Инкремент неустойчивости максимален для горизонтальных масштабов с $k = \omega_B/c$, когда $\omega = \omega_B$, и равен $\sqrt[4]{\omega_B^2(\omega_B^2 - \omega_A^2)}$.

Таким образом, проведенное в данной работе исследование на базе приближенного локального метода показало принципиальную возможность существования неустойчивости акустико-гравитационных волн в неизотермической атмосферы. Развитие такой неустойчивости происходит на частотах и пространственных масштабах, характерных для вертикальных колебаний солнечной атмосферы.

Работа выполнена при поддержке РФФИ по гранту 00-05-65051.

Литература

Джонстон Т.В. (Jhonston T.W.), 1969, J. Goephys. Res., 72, 2972

Штейн Р.Ф., Лейбечер И. (Stein R.F., Leibacher Y.), 1974, Ann. Rev. Astron. Astrophys., 12, 407

Гиббсон Э., 1977, Спокойное Солнце, М.:Мир

Хиндман Б.В., Цвайбел Е.Г. (Hindman B.W.; Zweibel E. G.), 1994, Astrophys. J., 436, 929

Савина О.Н., Беспалов П.А., 1998, Письма в Астрон. ж., 24, 58