

КРИТИЧЕСКИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ МАСШТАБЫ АКУСТИКО-ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ НЕОДНОРОДНОЙ ХРОМОСФЕРЫ

Савина О.Н.¹, Беспалов П.А.², Ашина П.Н.¹

¹*Национальный исследовательский университет – Высшая школа экономики,
Нижний Новгород, Россия*

²*Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия*

CRITICAL SPACE TEMPORAL SCALES OF ACOUSTIC-GRAVITY PERTURBATIONS IN INHOMOGENEOUS CHROMOSPHERE

Savina O.N.¹, Bespalov P.A.², Ashina P.N.¹

¹*National Research University Higher School of Economics, Nizhny Novgorod, Russia*

²*Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russia*

The characteristics of acoustic-gravity perturbations in a strongly inhomogeneous chromosphere are considered. The influence of the temperature gradient on the limiting frequency of acoustic vibrations of the atmosphere is investigated. It is shown that the acoustic-gravity waves propagation at frequencies below the limiting acoustic frequency as for the model of isothermal atmosphere is possible. The general form of the characteristic equation for acoustic-gravity waves in a two-layer model of the height profile of atmosphere temperature is obtained. In the framework of this model, the influence of the lower boundary of the chromosphere on the space scales of surface waves near the transition region is studied.

DOI: 10.31725/0552-5829-2019-345-348

Введение

Для солнечной атмосферы характерны так называемые пятиминутные колебания, наблюдаемые как с Земли, так и с помощью космических аппаратов [1]. Важно разобраться с частотами этих колебаний и локализацией их энергии. Этот вопрос обсуждался в литературе для различных моделей профиля температуры [2–4], где было показано, что значение предельной акустической частоты определяется выбранной моделью, но всегда оценка предельной акустической частоты получается меньше значения, соответствующего изотермической модели.

В данной работе проводится анализ частот собственных колебаний атмосферы со скачком температуры на высотах переходного слоя солнечной атмосферы, результаты которого показывают, что свойства собственных колебаний зависят от величины перепада температур и мало зависят от положения нижней границы атмосферы на высоте фотосферы. Частоты собственных колебаний определяются температурой выше перепада, и их период больше пяти минут. В такой ситуации возможно распространение быстрых акустико-гравитационных волн с периодом около пяти минут от фотосферы в корону.

Собственные колебания атмосферы со скачком температуры

Рассмотрим линеаризованную систему уравнений газодинамики для возмущения давления p , горизонтальной скорости u и вертикальной скорости w [5]:

$$\begin{aligned}\rho_0 \frac{\partial u}{\partial t} &= -\frac{\partial p}{\partial x}; \quad \rho_0 \frac{\partial w}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial z} - \rho g; \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + w \frac{d\rho_0}{dz} + \rho_0 \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) &= 0; \\ \frac{\partial p}{\partial t} + w \frac{dp_0}{dz} &= c_s^2 \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + w \frac{d\rho_0}{dz} \right).\end{aligned}\quad (1)$$

Здесь ось z направлена против ускорения силы тяжести $\vec{g}$ и ось x в горизонтальном направлении, c_s – скорость звука. Регулярное давление

$p_0(z) = p_{00} \exp \left[-\int_0^z H^{-1}(z') dz' \right]$ подчиняется условию термодинамического равновесия, распределение регулярной плотности $\rho_0(z) = p_0(z)/(gH(z))$, где $H(z)$ – локальное значение высоты однородной атмосферы.

Возьмем за основу модельный профиль атмосферной температуры, состоящий из двух изотермических слоев с различными, меняющимися скачком значениями температуры (Рис. 1). Тогда решение для вертикальной скорости среды w_1 в нижнем слое (индекс 1) с жесткой нижней границей ищем в виде

$$w_1 = \left(A \exp\{-ik_{z1}z\} + B \exp\{ik_{z1}z\} \right) \exp\{-i\omega t + ik_x x + z / 2H_1\}$$

и в верхнем слое (индекс 2) в виде $w_2 = D \exp\{-i\omega t + ik_x x + ik_{z2}z + z / 2H_2\}$. Здесь A, B, D – постоянные, значения которых определяются граничными условиями, ω – частота волны, k_x – горизонтальная и $k_{z1,2}$ – вертикальные компоненты волнового вектора, H – высота однородной атмосферы, координата z отсчитывается от области перепада температуры. Воспользовавшись известным дисперсионным соотношением для акустико-гравитационных волн в изотермической атмосфере, запишем для каждого из изотермических слоев [5]

$$k_{z1,2} = \sqrt{\frac{\omega^2 - \omega_{A1,2}^2}{c_{1,2}^2} - \frac{(\omega^2 - \omega_{g1,2}^2)k_x^2}{\omega^2}}. \quad (2)$$

Рассмотрим задачу о нахождении собственных частот колебаний для выбранной модели атмосферы. Поля возмущений должны соответствовать нулевому среднему вертикальному потоку энергии. Поэтому в верхней

среди решений представляет собой прижатую к перепаду волну, т.е. должно быть выполнено условие $k_{z2} = -ik_2$, где k_2 – действительная величина.

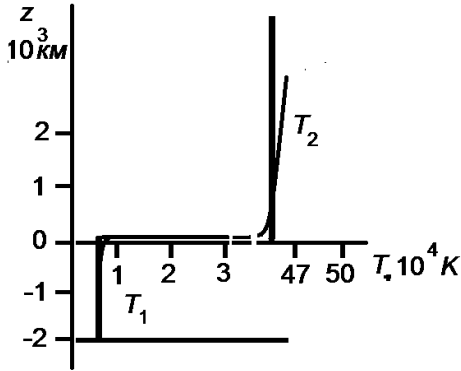


Рис. 1.

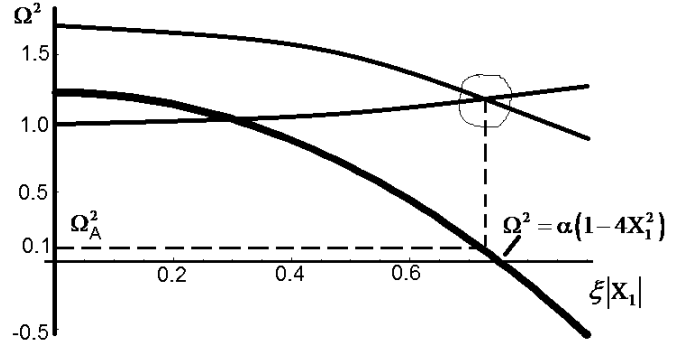


Рис. 2.

Характеристическое уравнение для акустико-гравитационных волн в атмосфере со скачком температуры нетрудно получить, воспользовавшись граничными условиями. В модели с жесткой нижней границей при $z = -l$ имеем $w_1(z = -l) = 0$, на границе $z = 0$ выполняется условие непрерывности вертикальной скорости $w_1|_{z=0} = w_2|_{z=0}$, а также условие равенства давлений:

$$p_1 = p_2 + g(\rho_{01} - \rho_{02}) \frac{i w_2}{\omega}.$$

Для нетривиального решения, удовлетворяющего принятым граничным условиям, получаем характеристическое уравнение:

$$\frac{\rho_{01} \left(\gamma H_1 k_1 \operatorname{ctg}(k_1 l) + \frac{\gamma}{2} - 1 \right)}{(\omega^2 - c_1^2 k_x^2)} = \frac{\rho_{02} \left(i k_2 \gamma H_2 + \frac{\gamma}{2} - 1 \right)}{(\omega^2 - c_2^2 k_x^2)} + \frac{\rho_{02} - \rho_{01}}{\omega^2}. \quad (3)$$

Будем рассматривать колебания атмосферы с большими горизонтальными масштабами, полагая $k_x = 0$. Введем обозначения: $X_1 = k_{z1} H_1 = \sqrt{\frac{\Omega^2 - \alpha}{4\alpha}}$,

$$X_2 = k_{z2} H_2 = \sqrt{\frac{\Omega^2 \tau - \alpha}{4\alpha}}; \quad \alpha = \frac{\omega_{A1}^2}{\omega_{g1}^2} = \frac{\gamma^2}{4(\gamma - 1)}; \quad \Omega = \frac{\omega}{\omega_{g1}}; \quad \tau = \frac{T_2}{T_1}.$$

Для прижатой к перепаду сверху волны с $k_{z2}^2 < 0$ получаем оценку собственной частоты колебаний: $\Omega^2 \leq \alpha/\tau$. Последнее неравенство позволяет сделать вывод о том, что если собственная частота существует, то ее значение значительно меньше ω_{A1} – предельной частоты акустико-гравитационных волн в хромосфере, оцениваемой для модели изотермической атмосферы с темпера-

турой T_1 . Покажем, что характеристическое уравнение имеет решение для моды с $k_{z2}^2 < 0$ и $k_x = 0$. Анализ уточняет, что решение существует, если выполняется еще одно условие: $k_{z1}^2 < 0$. Характеристическое уравнение, соответствующее поверхностной волне, имеет следующий вид:

$$|X_1| \operatorname{cth}(|X_1| \xi) = \frac{2 - \gamma}{2\gamma} + \frac{1 - R}{\gamma} \left(-|X_2| + \frac{\gamma - 2}{2\gamma} \right). \quad (4)$$

Следует отметить, что уравнение (4) имеет аналитическое решение в приближении $R = 0$ и в отсутствии нижней границы $\xi \rightarrow \infty$ [6]. На рис.2 решению характеристического уравнения соответствует отмеченное пересечение сплошных линий, представленное для $\xi = 1.5$, $\tau = 10$, $R = 0.1$. Численный анализ уравнения (4) показал, что вынужденные колебания атмосферы, обусловленные, например, конвективными движениями фотосферы, при $\xi > 1.5$ и $\tau > 10$ не захвачены в волновод, и высвечиваются в корону, если их частоты превосходят частоту $\tau \omega_{A1}$ в τ раз меньше ω_{A1} в нижней среде. Отметим, что в работе [4] указано, что при больших градиентах температуры реализуются условия неустойчивости акустико-гравитационных возмущений на частотах близких к ω_{A1} , что может привести к их возбуждению.

Заключение

Согласно проведенному анализу, основанному на применении аппроксимации атмосферной температуры скачком на высотах переходного слоя, параметры собственных колебаний зависят от величины перепада температур. Частота собственных колебаний определяется температурой сверху, и их период ниже пяти минут. Весьма вероятно, что взаимодействие акустико-гравитационных колебаний с токовой системой в верхней хромосфере может служить причиной пятиминутных изгибных колебаний корональных арок и трехминутных колебаний солнечных пятен.

Работа поддержана программой РАН №. 19-270.

Литература

1. Battams K., Gallagher B.M., Weigel R.S. // Solar Phys., 2019, p. 294-310.
2. Taroyan Y., Erdelyi R. // Solar Phys., 2008, v. 251, p. 523-531.
3. Петрухин Н.С., Пелиновский Е.Н., Бацина Е.К. // Письма в астрономический журнал, 2012, т. 38, №6, с. 439-445.
4. Savina O.N. // Central European Bulletin, 2015, v. 39, p. 83-90.
5. Госсард Э., Хук У. Волны в атмосфере. – М.: Мир, 1978. – 532 с.
6. Беспалов П.А., Савина О.Н. // Письма в астрономический журнал. 1998. т. 24. № 1. с. 58-62.