

ПЕРИОДИЧЕСКИЕ ВАРИАЦИИ ШИРИНЫ КОНТУРА ЛИНИИ 6563 Å КАК ИНДИКАТОР ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ХРОМОСФЕРЕ СОЛНЦА

А.В. Зубкова, Н.И. Кобанов

PERIODIC VARIATIONS OF H α 6563 Å LINE WIDTH AS AN INDICATOR OF WAVE PROCESSES IN THE SOLAR CHROMOSPHERE

A.V. Zubkova, N.I. Kobanov

Изучение волновых процессов в солнечной атмосфере, в том числе в корональных дырах (КД), необходимо для понимания механизмов переноса энергии в хромосферу и корону, их нагрева и роли КД в обмене энергией. Представлены результаты изучения колебательно-волновых движений ширины профиля линии H α 6562.8 Å в КД на основе данных, полученных на Горизонтальном автоматизированном солнечном телескопе Саянской солнечной обсерватории. При анализе десяти временных серий продолжительностью 45–160 мин обнаружено, что амплитуда колебаний увеличивается к границам хромосферной сетки. Наибольшее различие между колебаниями в сетке и ячейке отмечено на частоте 2.5–4 мГц. Получена зависимость средней амплитуды колебаний от угла, под которым КД наблюдались на солнечном диске, что, возможно, связано с наклоном магнитных трубок. По предварительным оценкам, наблюдаемые вариации не могут быть вызваны тепловым уширением. Возможной причиной их могут быть альфвеновские волны, распространяющиеся в магнитных трубках.

The study of wave processes in the solar atmosphere including coronal holes (CH) is necessary for comprehending mechanisms of energy transfer in the chromosphere and corona, their heating and CH role in the energy transport and exchange. We present results of research into wave motions of H α 6562.8 Å line width in CH from data obtained at the Horizontal Solar Telescope of Sayan Solar Observatory. When analyzing ten time sets of 45–160 min duration, it was found that the oscillation amplitude increases to the chromospheric network boundaries. The largest difference between the fluctuations on the cell boundary and inside the cell corresponds to the frequency range of 2.5–4 MHz. The average amplitude dependence on the oscillation angle at which the CH were observed at the solar disk was obtained. This can be related to the inclination of the magnetic tubes. According to preliminary estimates, the observed variations can not be caused by thermal broadening. Perhaps their possible reason is the Alfvén waves propagating in the magnetic flux tubes.

Наблюдательный материал был получен на горизонтальном автоматизированном солнечном телескопе Саянской солнечной обсерватории. Телескоп оснащен целостной системой с рабочим диаметром основных зеркал 800 мм, а также гидирующей системой. В работе была использована часть данных, полученных в 2005, 2010 и 2011 гг. Продолжительность временных серий, полученных при наблюдении в семи корональных дырах (КД) с различным расположением на диске, находится в диапазоне от 45 мин до 160 мин. Наблюдения проводились с высокой каденцией от 1 до 10 с. Размер наблюдаемой области равен примерно 1.5×60". Один пиксель соответствовал 0.24" по пространственной координате и около 8 мÅ вдоль дисперсии спектрограмм.

Ширина профиля линии H α 6562.8 Å измеряется на его полувысоте, которая определяется из соотношения:

$$I_{1/2} = \frac{I_{\max} + I_{\min}}{2}, \quad (1)$$

где I_{\max} – значение интенсивности профиля между двумя атмосферными линиями воды 6564 и 6564.2 Å в красном крыле H α , I_{\min} – минимальная интенсивность в ядре H α . Для каждого пространственного элемента в каждом кадре уровень полувысоты определяется с помощью выражения (1). Ширина профиля вычисляется из разности координат точек, в которых уровень полувысоты пересекает красное и фиолетовое крылья контура спектральной линии.

Средняя по всем сериям амплитуда колебаний составляет ~28 мÅ, а максимальные значения для отдельных цугов (peak-to-peak) в среднем достигают ~64 мÅ.

Примеры пространственного распределения мощности для различных частотных мод (большой мощности соответствуют более темные участки) показаны на рис. 1.

Анализируемый спектральный диапазон был разбит на четыре участка (рис. 2): 1–2.5, 2.5–4, 4–6, 6–8 мГц. Границы хромосферной сетки определялись как участки пониженной интенсивности в линии H α [Зирин, 1969].

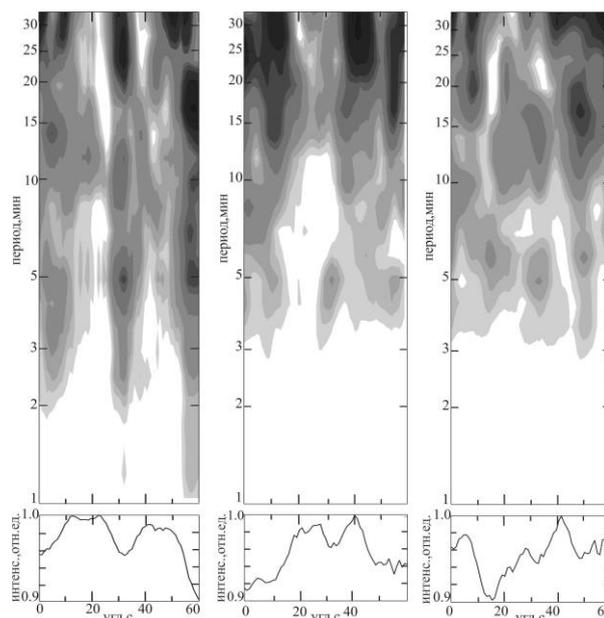


Рис. 1. Спектры мощности колебаний ширины профиля H α для КД № 6, 2, 3. Внизу представлены усредненные по всей серии распределения интенсивности вдоль щели.

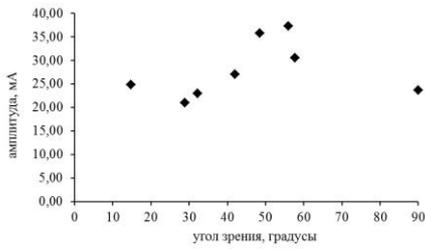


Рис. 2. Зависимость средних значений амплитуды колебания ширины профиля линии Na от угла зрения.

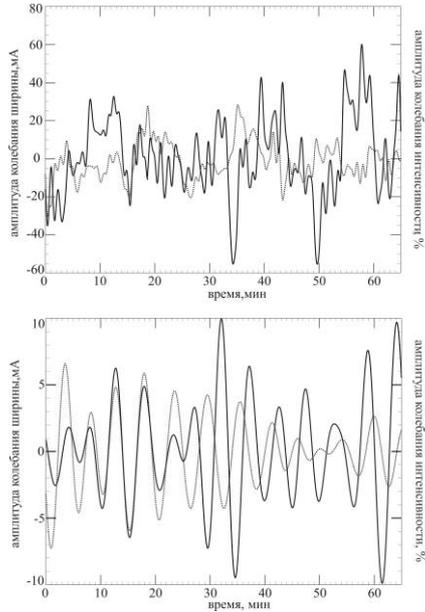


Рис. 3. Колебания ширины профиля (сплошная линия) и интенсивности (пунктир) в КД № 10: верхняя панель – нефильтрованные сигналы (коэффициент корреляции 0.12), нижняя – фильтрованные колебания для диапазона частот 2.5–4 МГц (коэффициент корреляции 0.11).

Для диапазона частот с 5-минутными колебаниями максимумы мощности преобладают на границах сетки и на участках, совпадающих с максимумами средней лучевой скорости. Антикорреляция распределения доплеровской скорости вдоль щели спектрографа и яркости была обнаружена в работе [Kobanov, Sklyar, 2007]. Возможно, из-за усиления магнитного поля на краю ячейки [Leighton, 1962] мы наблюдаем усиление мощности колебаний на границах сетки.

На основе полученных данных была определена зависимость значений амплитуды колебаний от вычисленного угла зрения. В диапазоне 30–60° достаточно четко прослеживается восходящий тренд кривой амплитуда – угол зрения, для угла зрения 30° амплитуда колебаний минимальна; при 50° – максимальная амплитуда колебаний (рис. 2). Для КД № 7 (~56°) и КД № 9 и №10 (~57° и ~48° соответственно) амплитуды колебаний принимают максимальные значения на всех частотах колебаний ширины профиля линии, в полярных КД № 2 и № 3 амплитуды колебаний близки к минимальным значениям.

В работе мы определили, что при сопоставлении реально измеренных сигналов коэффициент корреляции между изменениями интенсивности и ширины очень мал (рис. 3). Видно, что поведение сигналов различное, на некоторых временных отрезках сигналы находятся в фазе, на других – в противофазе.

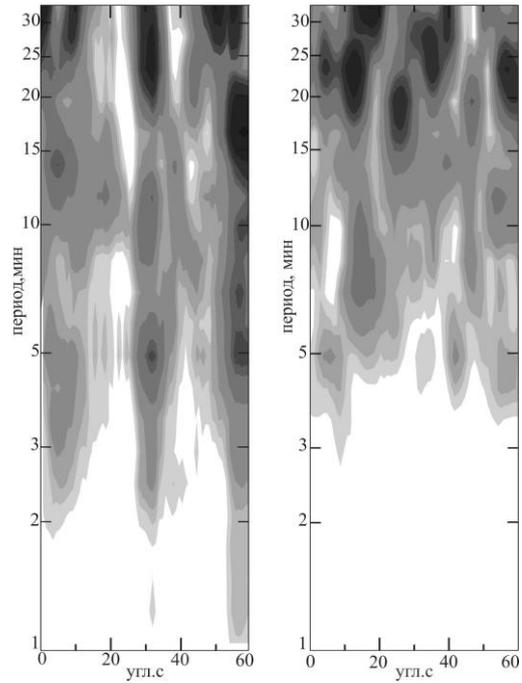


Рис. 4. Полутоновые диаграммы, иллюстрирующие пространственную локализацию мощности колебаний с разными периодами. Более темные участки соответствуют большей мощности, более светлые – меньшей. Левая панель – вариации ширины профиля Na, правая – вариации интенсивности Na. Анализ выполнен для КД № 6.

Анализ данных временных серий показал, что большинство спектральных пиков, характеризующих мощность колебаний ширины профиля, превосходит уровень значимости 3σ , который соответствует достоверности колебаний с вероятностью 99.7 %.

При анализе полученных результатов можно сопоставить локализацию частотных мод для колебаний интенсивности и ширины профиля (рис. 4).

Кроме того, мы попытались выяснить, есть ли связь между изменением интенсивности и измеренными вариациями ширины профиля. Оказалось, что при данном способе измерения полуширины результат не изменяется при разных значениях интенсивности и подтверждается экспериментом, в котором мы с помощью нейтральных светофильтров меняли интенсивность анализируемого излучения.

Таким образом, мы получили следующие результаты. Во-первых, мощность колебаний ширины профиля возрастает к границам хромосферной сетки. Кроме того, было определено, что наибольшее различие в мощности колебаний при сравнении положения на границе и в ячейках хромосферной сетки соответствует диапазону частот 2.5–4 МГц, что, возможно, связано с усилением магнитного поля на границах хромосферной сетки.

В ходе исследования мы обнаружили также зависимость амплитуды колебаний ширины профиля от угла зрения, под которым наблюдаются КД. Максимальные амплитуды соответствуют углам 40–55°, что предположительно связано с углом наклона магнитных трубок и, возможно, с различными свойствами КД.

Средний размах вариаций интенсивности достигал 5 %, что соответствует вариациям ширины кон-

тура ~ 1.6 мÅ. Эта величина в 40 раз меньше зарегистрированных нами колебаний (64 мÅ). Определено также, что спектры мощности колебаний ширины профиля линии и интенсивности существенно различаются. Анализ показывает, что столь большие колебания ширины профиля линии не могут быть вызваны акустическими и магнитозвуковыми волнами, существование которых связано с изменением плотности среды. Мы предполагаем, что наблюдаемые колебания ширины профиля H α в хромосфере КД обусловлены распространением торсионных альфвеновских волн, на существование которых указывали другие авторы [Jess, 2009; Van Doorselaere, 2008].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Зирин Г. Солнечная атмосфера. М.: Мир, 1969. 504 с.
- Kobanov N.I., Sklyar A.A. Periodic processes and plasma motions in solar coronal holes // *Astron. Rep.* 2007. V. 51, N 9. P. 773–779.
- Leighton R.B., Noyes R.W., Simon G.W. Velocity fields in the solar atmosphere. I. Preliminary report // *Astrophys. J.* 1962. V. 135. P. 474–499.
- Jess David B., Mathioudakis M., Erdélyi R., et. al. Alfvén waves in the lower solar atmosphere // *Science.* 2009. V. 323, N 5921. P. 1582–1585.
- Van Doorselaere T., Nakariakov V.M., Verwichte E. Detection of waves in the solar corona: Kink or Alfvén? // *Astrophys. J.* 2008. V. 676. P. L73–L75.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия