

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НАБЛЮДЕНИЙ ТРЕХМИНУТНЫХ КОЛЕБАНИЙ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ЗВУКА И ВЫСОТ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ В АТМОСФЕРЕ СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН

А.С. Дерес, С.А. Анфиногентов

THE ESTIMATION OF THE SOUND VELOCITY AND HEIGHTS OF EMISSION FORMATION ABOVE SUNSPOTS FROM OBSERVATIONS OF THREE MINUTE OSCILLATIONS

A.S. Deres, S.A. Anfinogentov

В работе представлен сейсмологический метод измерения высотного расстояния и средней скорости звука между слоями атмосферы тени солнечного пятна, наблюдаемых на разных длинах волн. Предложенная нами методика позволяет оценить значения этих величин, не вводя дополнительных предположений о скорости звука или высотах формирования излучения. Метод основан на измерении задержек и пространственных смещений, возникающих при распространении трехминутных колебаний от одного уровня солнечной атмосферы к другому. Используя данную методику, мы оценили расстояние между излучающими слоями в температурном минимуме (1600 Å) и в переходной зоне (304 Å) над тенью солнечных пятен трех активных областей. Также получены оценки значения средней скорости звука. Среднее расстояние между температурным минимумом и переходной зоной составило около 500–800 км, а соответствующая средняя скорость звука 30 км/с, что очень близко к значению средней скорости звука в солнечной атмосфере.

We present a seismological method to measure the sound speed and vertical distance between different layers of the sunspot umbrae atmosphere. Our technique allows us to estimate both the vertical distance between atmosphere layers and the wave propagation speed without specifying any extra parameters like sound speed or emission formation heights. We estimated the vertical distance between emission layers in the temperature minimum (1600 Å) and the transition region (304 Å) as well as the average sound speed above the sunspot umbrae for 3 activity regions. We found that the distance between the temperature minimum and the transition region lies in the range of 500–800 km for the sunspot umbrae. The estimated wave propagation speed was found to be about 30 km/s. This value is close to the expected sound speed in the chromosphere.

Введение

Колебательные процессы в атмосфере солнечных пятен впервые наблюдались около 40 лет назад [Beckers, 1969]. Интерес к колебаниям связан с возможностью их использования для исследования солнечных пятен и атмосферы над ними сейсмологическими методами.

Дополнительную информацию могут дать наблюдения колебаний на нескольких уровнях солнечной атмосферы [Kobanov, 2012]. Измерение задержек распространения колебаний между разными уровнями атмосферы пятна в сочетании с информацией о высоте формирования соответствующих спектральных линий позволяет оценить скорость распространения магнито-звуковых волн в атмосфере солнечного пятна [Reznikova, 2012]. С другой стороны, можно оценить расстояние между излучающими слоями на основании измеренных задержек и предположений о скорости распространения волн [Дерес, 2015]. Таким образом, приходится вводить дополнительные предположения о значении одного из двух искомых параметров: скорости распространения волн или разницу высот формирования излучения.

В нашей работе мы исходим из того, что все параметры должны быть получены из наблюдательных данных без привлечения модельных оценок скорости распространения колебаний или высот формирования излучения. Для этого в качестве дополнительной наблюдательной информации мы измеряем смещение волн в пространстве, возникающее при их распространении вверх вдоль линий магнитного поля. Геометрия магнитного поля в свою очередь определяется с помощью экстраполяции фотосферных наблюдений полного вектора

магнитного поля в вышележащие слои атмосферы Солнца [Rudenko, 2009]. Привлечение дополнительных данных позволило нам избавиться от свободных параметров в виде высот формирования излучения или скорости распространения колебаний.

Используемые данные и их обработка

Для работы были выбраны наблюдения, выполненные космическим аппаратом SDO/AIA, трех активных областей: NOAA 11131 (8.12.2010), NOAA 11582 (2.10.2012) и NOAA 11711 (6.04.2013). Были взяты последовательности изображений на длинах волн 1600 и 304 Å длительностью 10 часов (рис. 1). Изображения были кадрированы до размеров солнечного пятна, а дифференциальное вращение Солнца было скомпенсировано. Указанные операции были выполнены на стороне центра хранения данных SDO <http://jsoc.stanford.edu>.

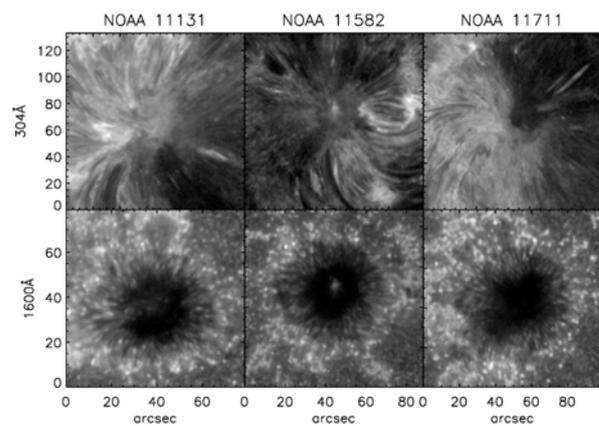


Рис. 1. Изображения изучаемых активных областей в УФ- и КУФ-диапазоне.

Активная область	Высота (км)	Задержка (с)	Скорость (км/с)
11131	519	18.9	27.4
11582	690	23.7	29.1
11711	743	24.84	29.9

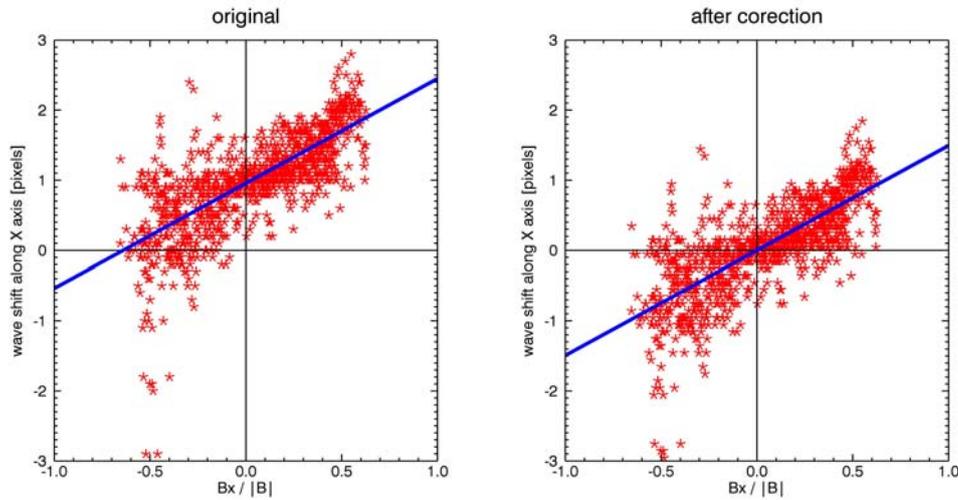


Рис. 2. Зависимость измеренных смещений от наклона магнитного поля относительно луча зрения. Справа показан результат коррекции несовмещенности разных каналов.

Дальнейшая обработка данных была выполнена с помощью языка программирования IDL и включила в себя следующие этапы:

- интерполяция данных на регулярную сетку;
- фильтрация в диапазоне периодов 2–4 мин с помощью преобразования Фурье;
- расчет смещений и задержек методом кросс-корреляции;
- экстраполяция магнитного поля из фотосферной магнитограммы;
- оценка разности высот излучающих слоев через сопоставление измеренных смещений с наклоном магнитного поля на высоте 500 км;
- оценка скорости распространения колебаний из измеренного расстояния и задержки.

Оценка высот излучающих слоев

Согласно общепринятой интерпретации трехминутные колебания являются медленными акустогравитационными волнами [Bogdan, 2006; Жугжда, 2014]. Такие волны распространяются вдоль силовых линий магнитного поля. Если силовые линии магнитного поля располагаются под углом к лучу зрения, то распространяющаяся волна смещается в картинной плоскости. В случае, если силовая линия оказывается параллельно лучу зрения, такого смещения происходить не должно. Сопоставление проекции измеренных смещений на горизонтальное направление картинной плоскости и угла отклонения магнитного поля от луча зрения в том же направлении. Представленная картина оказалась смещенной, так что нулевому отклонению магнитного поля от луча зрения соответствуют ненулевые смещения. Такое поведение вызвано неполной совмещенностью изображений в разных каналах SDO/AIA. Смещение между каналами 1600 и 304 Å мы оценили, аппрок-

симировав зависимость, представленную на рис. 2 линейной функцией.

Разность высот формирования излучения на длинах волн 1600 и 304 Å мы оценивали с помощью следующих формул, полученных из простейших геометрических соотношений:

$$h = \frac{\Delta w}{\text{tg}\gamma}, \quad (1)$$

$$\gamma = \arccos\left(\frac{B_z}{|B|}\right), \quad (2)$$

$$\Delta w = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}, \quad (3)$$

где h – разница высот излучающих высот, γ – наклон магнитного поля относительно луча зрения, Δx , Δy – проекции пространственного смещения волны, а Δw – абсолютная величина пространственного смещения волны.

На рис. 3 представлены гистограммы расстояния между излучающими слоями для каждой точки (слева) и его логарифма (справа). Значение разницы высот формирования излучения определялось путем вписывания гауссианы в гистограмму логарифма расстояния между слоями. А измеренная задержка в сочетании со средним значением высоты позволила оценить среднюю скорость распространения волн. Результаты измерений представлены в таблице.

Выводы

Мы проанализировали наблюдения трех активных областей в УФ- и КУФ-диапазоне. Трехминутные колебания над тенью солнечных пятен были использованы, в качестве сейсмологического инструмента для оценки разности высот формирования излучения, а также скорости распространения волны от одного

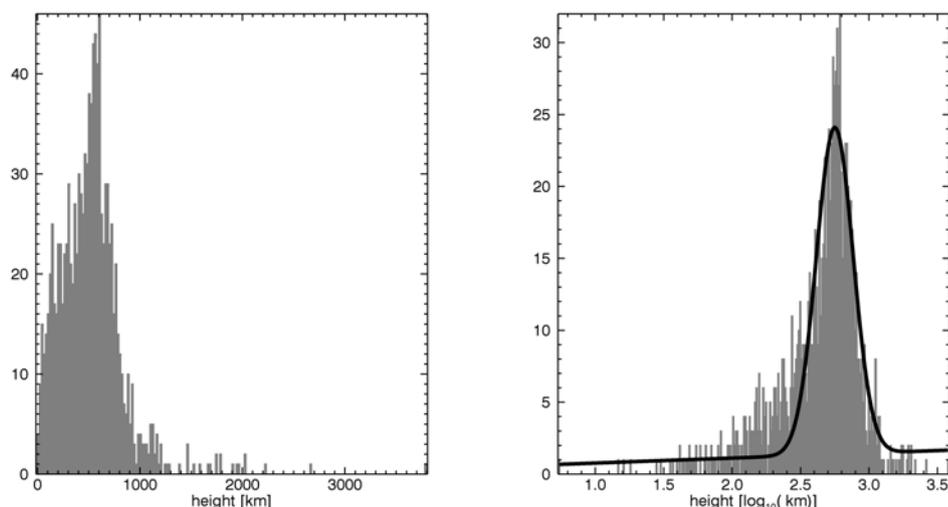


Рис. 3. Гистограмма разности высот (слева) и ее логарифма (справа) для всех точек изображения.

излучающего слоя к другому. Предложенный нами сейсмологический метод позволяет измерить скорость распространения волны и разность высот формирования излучения, не требуя предположений ни об одной из этих величин. Измеренное нами расстояние между температурным минимумом и переходной зоной находится в диапазоне 500–800 км для разных активных областей, а средняя скорость распространения волн во всех случаях близка к 30 км/с. Эта величина соответствует скорости звука при температуре около 40 000 К, типичной для хромосферы.

Авторы благодарны И.И. Мышьякову за восстановленное магнитное поле для исследуемых областей.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов Российского фонда фундаментальных исследований № 13-02-00044 А, 15-02-01089 А, 15-02-03835 А и 15-32-20504 мол\а\вед, а также программы Президиума РАН «Экспериментальные и теоретические исследования объектов Солнечной системы и планетных систем звезд» (проект «Радиоастрономические исследования динамических процессов в солнечной короне»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Дерес А.С., Анфиногентов С.А. Определение высот формирования УФ- и КУФ-излучения над тенью пятна по наблюдениям трехминутных колебаний // *Астрономический журнал*. 2015 (в печати).

Жугжда Ю.Д. и Сыч Р.А. Модель локальных колебаний в солнечных пятнах // *Письма в Астрон. журн.* 2014. Т. 40, № 10. С. 638–656.

Beckers J.M., Tallant P.E. Chromospheric Inhomogeneities in Sunspot Umbrae // *Solar Phys.* 1969. V. 7. P. 351–365.

Bogdan T.J., Judge P.G. Observational aspects of sunspot oscillations // *Royal Society of London Philosophical Transaction Series*. 2006. V. 364. P. 313–331.

Kobanov N., Kolobov D., Kustov A., et al. Direct Measurement Results of the Time Lag of LOS-Velocity Oscillations Between Two Heights in Solar Faculae and Sunspots // *Solar Phys.* 2013. V. 284. P. 379–396.

Reznikova V.E., Shibasaki K., Sych R.A., Nakariakov V.M. Three-minute Oscillations above Sunspot Umbra Observed with the Solar Dynamics Observatory /Atmospheric Imaging Assembly and Nobeyama Radioheliograph // *ApJ*. 2012. V. 746. P. 119.

Rudenko G.V., Myshyakov I.I. Analysis of Reconstruction Methods for Nonlinear Force-Free Fields // *Solar Phys.* 2009. V. 257. P. 287–304.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия