

ИЗМЕРЕНИЕ ВЫСОТ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ В АТМОСФЕРЕ ПЯТНА НА РЯДЕ ДЛИН ВОЛН ПО НАБЛЮДЕНИЯМ ТРЕХМИНУТНЫХ КОЛЕБАНИЙ

¹А.С. Дерес, ²С.А. Анфиногентов

THE MEASUREMENT OF EMISSION FORMATION HEIGHTS IN THE SUNSPOT ATMOSPHERE FOR SEVERAL WAVELENGTHS IN UV AND EUV BAND BASED ON THE ANALYSIS OF THE THREE-MINUTE OSCILLATIONS

¹A.S. Deres, ²S.A. Anfinogetov

Исследование колебаний и волн в атмосфере Солнца является важным разделом физики солнечной атмосферы. Колебания являются природными зондами, которые несут информацию о среде, где они распространяются. Поэтому они могут быть использованы для исследования атмосферы Солнца. В работе представлены результаты анализа трехминутных колебаний по наблюдениям Обсерватории солнечной динамики (SDO). Мы анализировали задержки между колебаниями, наблюдающимися над тенью пятна на разных длинах волн. Каждой длине волны соответствует слой в атмосфере пятна с определенной температурой. Выявлено относительное расположение в атмосфере Солнца слоев, излучающих на разных длинах волн ультрафиолетового и крайнего ультрафиолетового диапазонов. Получены численные оценки расстояний между некоторыми из них. Результаты сопоставлены с моделями атмосферы солнечного пятна. Несмотря на достаточно высокую погрешность, полученные оценки расстояний позволяют отдать предпочтение одной из моделей атмосферы тени пятна как более реалистичной.

The study of MHD oscillations and waves in the solar atmosphere is an important part of the solar physics. They are natural probes containing information about physical medium, where they propagate. In this report we present the analysis of 3-minutes oscillations observed with Solar Dynamics Observatory. We investigated delays between oscillations detected at different wavelengths over the sunspot umbrae. Each wavelength corresponds to a layer in the sunspot atmosphere with certain temperature. The relative position of the emission formation layers was revealed. We also estimated the distance between some of these layers. The results obtained were compared with two models of the sunspot umbrae atmosphere. Despite low accuracy of the measured quantities our measurements allow us to select the model which is more realistic according our measurements.

Введение

Данная работа посвящена исследованию атмосферы тени солнечного пятна посредством анализа трехминутных колебаний на разных уровнях солнечной атмосферы. Предпринята попытка измерить относительные высоты формирования излучения на нескольких длинах волн ультрафиолетового диапазона: 171, 304, 193, 1600 и 1700 Å. Для этого проведена оценка временных задержек распространения колебаний между различными уровнями солнечной атмосферы, что позволило определить направление движения волн и рассчитать приблизительное расстояние между слоями. Проведено сравнение полученных данных с двумя моделями атмосферы солнечного пятна.

Используемые данные

Для работы были использованы изображения Солнца в ультрафиолетовом излучении, полученные космическим аппаратом SDO(AIA) [http://aia.lmsal.com] 8 декабря 2010 г. в интервале 05:00–06:00 UT. Изображения были взяты с сайта центра обработки и хранения данных SDO [http://jsoc.stanford.edu]. Анализировалась небольшая область размером 60×60 угл. сек вокруг солнечного пятна активной области NOAA 11131. Задержка была измерена для всевозможных пар длин волн. Методика измерения задержки описана ниже.

Для каждой точки изображений рассчитывается коэффициент корреляции сигналов на двух сравниваемых длинах волн. Для дальнейшего анализа выбираются те точки, в которых значение коэффициента корреляции превышает 0.6. Это позволяет отсеять участки изображения, в которых совпадение сигналов отсутствует или минимально. Затем по

всем точкам рассчитывается средняя задержка и ее среднее квадратичное отклонение. На основании этих данных определяется доверительный интервал по Стьюденту с достоверностью 90 %. Описанная методика анализа данных реализована в виде программы на языке IDL, в которую можно подставлять данные наблюдений, прошедшие предварительную обработку.

Делая предположения о величине скорости распространения волн и зная время, которое требуется волне, чтобы пройти расстояние между слоями, можно оценить это расстояние. Для оценки скорости звука мы использовали тот факт, что излучение на каждой длине волны формируется в основном при определенной температуре. Мы использовали температуры формирования излучения на выбранных длинах волн, опубликованные на сайте SDO's Atmospheric Imaging Assembly (AIA) [http://aia.lmsal.com]. Скорость звука рассчитывалась по формуле

$$V_{зв}^2 = \gamma \frac{kT}{m_0},$$

где γ – показатель адиабаты, k – постоянная Больцмана, T – температура, m_0 – масса молекулы. В приближении идеального газа, состоящего из атомов водорода $\gamma=5/3$, а m_0 – масса атома водорода.

Результаты измерений, обсуждение

Были обработаны данные наблюдений на следующих длинах волн: 171, 304, 193, 1600 и 1700 Å. Проведены измерения для всевозможных сочетаний двух длин волн. Результаты представлены в таблице.

Не для всех измерений оказалось возможным получить значимое значение расстояния между излучающими слоями, так как доверительный интервал

Результаты измерений для различных комбинаций длин волн

№	Длины волн (Å)	Задержка (с)	Средняя корреляция	СКО	Количество точек	Расстояние (км)	Средняя скорость (км/с)
1	171 и 304	-5.5±14.5	0.68	8.75	215	-332±870	60
2	171 и 193	-1.07±9.7	0.71	5.9	260	-121±1101	113
3	171 и 1600	-5.6±20.9	0.62	11.8	13	-368±1374	66
4	171 и 1700	-21.2±2.5	0.61	0.84	2	-	-
5	304 и 193	3.99±11.7	0.67	7.1	176	318±936	79
6	304 и 1600	3.9±8.5	0.64	5.1	99	125±270	32
7	304 и 1700	-12.64±8.9	0.64	5.3	55	-221±154	17
8	193 и 1600	2.66±14.3	0.61	7.78	9	-	-
9	193 и 1700	-	-	-	-	-	-
10	1600 и 1700	-18.7±8.9	0.67	3.55	155	429±134	23

в некоторых случаях оказался слишком велик. Для этих длин волн можно определить лишь порядок следования излучающих слоев в атмосфере пятна.

Значимые численные оценки расстояния между излучающими слоями удалось получить только для следующих пар длин: 1700 и 304 Å и 1700 и 1600 Å. Они составили 200 и 400 км соответственно. Важно отметить, что высота расположения самого нижнего слоя из рассмотренных (длина волны 1700 Å) неизвестна. Поэтому высоты формирования остальных длин волн (193, 171 и 1600 Å) оцениваются относительно слоя, излучающего на длине волны 1700 Å, а не относительно фотосферы.

Полученное взаимное расположение слоев (см. рис. 1) соответствует возрастанию температуры с высотой, что подтверждает корректность проведенного анализа.

Несмотря на низкую точность, полученные результаты могут быть использованы для верификации моделей атмосферы тени пятна. Для примера (рис. 2) приводим зависимость температуры от высоты согласно двум разным моделям [Maltby et al., 1986; Fontenl et al., 2009]. Расстояния между слоями с температурами 5000 К (1700 Å) и 50000 К (304 Å) отличаются на порядок: 100–200 км в модели 2009 г.

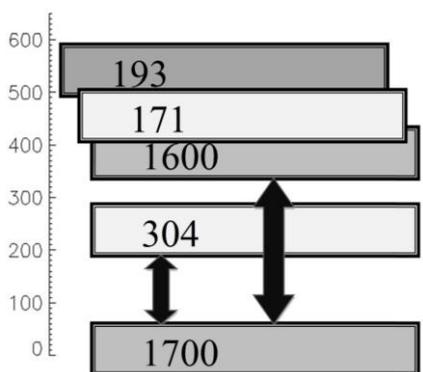


Рис. 1. Расположение слоев излучения.

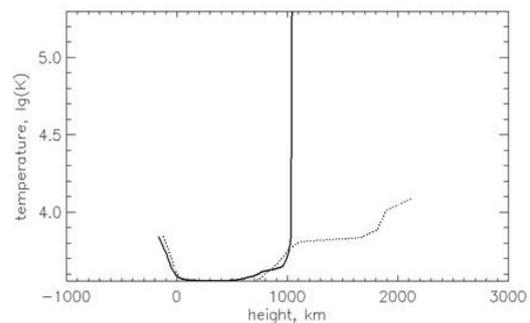


Рис. 2. Зависимость температуры от высоты согласно двум моделям атмосферы тени пятна: [Maltby et al., 1986] – пунктирная линия, [Fontenl et al., 2009] – сплошная линия.

против >1000 км в модели 1986 г. Наши измерения согласуются только со второй моделью.

Проведенное исследование показывает перспективность использования трехминутных колебаний для изучения атмосферы солнечных пятен. Однако величина задержек распространения в большинстве случаев оказывается меньше скважности наблюдений, что обуславливает большую величину ошибок. С точки зрения авторов, эта проблема может быть решена путем использования данных с меньшей скважностью, более длинных рядов наблюдений и набора статистики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Fontenla J.M., Gurdт W., Habberreiter M., et al. Semiempirical models of the solar atmosphere. III. Set of non-LTE models for far-ultraviolet/extreme-ultraviolet irradiance computation // *Astrophys. J.* 2009. V. 707. P. 482–502.

Maltby P., Avrett E.H., Carlsson M., et al. A new sunspot umbral model and its variation with the solar cycle // *Astrophys. J.* 1986. V. 306. P. 284–303.

SDO's Atmospheric Imaging Assembly (AIA) [электронный ресурс]. URL: <http://aia.lmsal.com>.
<http://jsoc.stanford.edu>.

¹Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

²Институт солнечно-земной физики, Иркутск, Россия