

УДК 523.98

## ИЗМЕРЕНИЯ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭРУПТИВНЫХ СТРУКТУР

С.С. Калашников

## MEASURING THE KINEMATIC CHARACTERISTICS OF ERUPTIVE STRUCTURES

S.S. Kalashnikov

Рассматриваются подходы к определению кинематических характеристик начальной стадии эруптивного процесса.

The approaches for determination of kinematic characteristics of eruptive process initial stage are considered.

Определение кинематики эруптивного процесса помогает понять физическую природу возникновения и развития корональных выбросов массы (КВМ) и связанных с ними корональных волн [Филиппов, 2007]. Это также служит вспомогательным инструментом для выяснения природы отдельных компонентов корональных транзиентов и позволяет дифференцировать природу разнообразных явлений, проявляющих себя как ЕИТ-волны (ЕИТ – Extreme ultraviolet Imaging Telescope) [Grechnev et al., 2011]. Особый интерес при исследовании эволюции КВМ представляет поведение кривой ускорения со временем, поскольку это непосредственно связано с участием движущих сил [Gallagher et al., 2003].

Для ряда авторов исследований эволюции КВМ [Maricic et al., 2004], [Temmer et al., 2010] надежное определение по измеренным данным профилей скорости и ускорения эруптивной особенности имеет решающее значение. Главная трудность заключается в корректной обработке полученных данных и оценке влияния ошибок измерений на производные величин, особенно на профиль ускорения.

Основной проблемой в исследовании [Temmer et al., 2010], из-за которой при дифференцировании данных по времени появляются ошибки измерений, является то, что оценка конечной разности всегда приводит к увеличению ошибки.

Кроме того, применяемый авторами регуляризованный метод [Kontar, MacKinnon, 2005] обеспечивает доверительный интервал для первой и второй производных, т. е. для профилей скорости и ускорения КВМ.

На примере кинематических характеристик (рис. 1) можно видеть неопределенность рассмотренного выше подхода к определению кинематики эруптивных структур. Вертикальные допуски на кривой расстояние–время обозначают неопределенность для зависимостей скорости и ускорения вследствие дифференцирования экспериментальных точек зависимости расстояний от центра эрупции. Серые закрашенные области показывают 95%-й уровень достоверности.

Из наблюдений эруптивных событий, связанных со вспышками, известно, что стадия импульсного ускорения характеризуется кратковременным переходом между почти постоянными скоростями – начальной  $v_0$  и конечной  $v_1$  [Grechnev et al., 2011]. Вместо дифференцирования экспериментальных точек, приводящего к значительным неопределенностям, целесообразней использовать аппроксимацию измеренных зависимостей время–расстояние эруптивной структуры аналитически заданной гладкой функцией, а скорости и ускорения получать дифференцированием данной гладкой функции.

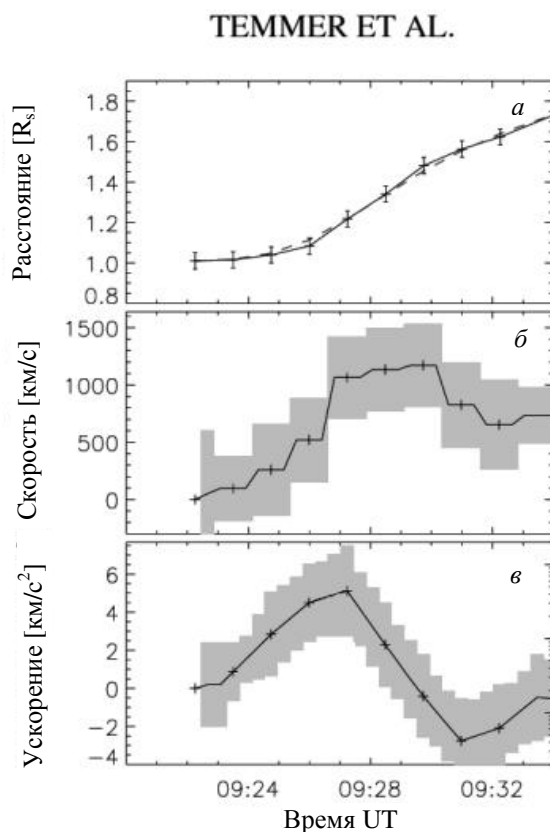


Рис. 1. Событие 3 июня 2007 г. (рентгеновский класс вспышки С 5.3). Профили зависимостей расстояния (а), скорости (б) и ускорения (в) от времени на ранней стадии эволюции КВМ. Штриховой линией на верхней панели авторы отмечают решение регуляризованным методом. Серые закрашенные площади на кривых скорости и ускорения КВМ указывают 95%-й уровень достоверности.

Последовательным измерением расширения эруптивной структуры от центра эрупции получается зависимость расстояние–время, применяемая для оценки. На кадрах видео можно проследить это расширение, даже если передний край на заранее подготовленном изображении иногда трудно обнаружить [Meshalkina, 2009]. Затем подбирается регулярная функция в соответствии с зависимостью расстояние–время и оцениваются параметры эруптивной особенности, такие как начальная и конечная скорости. С использованием аналитических кривых вычисляются ожидаемые точки расстояние–время. Сравнивая их с результатами наблюдений, мы последовательно улучшаем кривую (рис. 2).

Все кинематические кривые рассчитываются путем интегрирования или дифференцирования аналитической кривой, а не экспериментальных измерений.

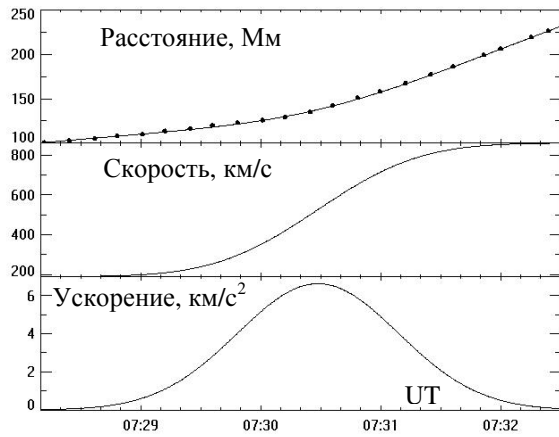


Рис. 2. Кинематические зависимости для протуберанца в событии 24 февраля 2011 г. (класс М 3.5). Данные SDO/AIA 211 Å. Точки на верхней панели графика – экспериментальные данные зависимости расстояние–время.

Ускорение  $a$  представляется гауссианой с шириной на половинном уровне  $\tau_{\text{acc}}\sqrt{8\ln 2}$ , центрированной на момент  $t_0$ :

$$a = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\tau_{\text{acc}}} (v_1 - v_0) e^{-1/2[(t-t_0)/\tau_{\text{acc}}]^2}. \quad (1)$$

Аналитический вид выражения (1) обусловлен потребностью точной аппроксимации экспериментальных точек расстояния и временного профиля расстояния, вычисляемого интегрированием по времени профиля ускорения. В случаях с более сложной кинематикой используется комбинация гауссиан с параметрами, подбираемыми вручную.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Филиппов Б.П. Эруптивные процессы на Солнце. М.: Физматлит, 2007. 139 с.

Gallagher P.T., Lawrence G.R., Dennis B.R. Rapid acceleration of a coronal mass ejection in the low corona and implications for propagation // *Astrophys. J.* 2003. V. 588, May 1. P. L53–L56.

Grechnev V.V., Uralov A.M., I.M. Chertok, et al. Coronal shock waves, EUV waves, and their relation to CMEs. I. Reconciliation of EIT waves and type II radio bursts // *Solar Phys.* 2011. 30 p. doi:10.1007/s11207-011-9780-2.

Kontar N.S., E. P., MacKinnon, A. L. Regularized energy-dependent solar hard x-ray spectral index // *Solar Phys.* 2005. V. 227. P. 299.

Meshalkina N.S., Uralov A.M., Grechnev V.V., et al. Eruptions of magnetic ropes in two homologous solar events of 2002 June 1 and 2: A key to understanding an enigmatic flare // *PASJ.* 2009. V. 61. P. 791M.

Maricic D., Vrsnak B., Stanger A.L., Veronig A. Coronal mass ejection of 15 May 2001: I. Evolution of morphological features of the eruption // *Solar Phys.* 2004. V. 225. P. 337–353.

Temmer M., Veronig A.M., Kontar E.P., et al. Combined STEREO/RHESSI study of coronal mass ejection acceleration and particle acceleration in solar flares // *Astrophys. J.* 2010. V. 712, April 1. P. 1410–1420.

*Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск*