

О присутствии магнитных петель, вытянутых в межпланетное пространство из низкоширотной области солнечной короны, свидетельствуют данные [4], хотя в работе [5] теоретически обосновывается образование петель в результате магнитного пересоединения в токовом слое. Авторы [3] объясняют нерадиальность силовых линий ММП падением радиальной скорости солнечного ветра в окрестности токового слоя. Однако пониженная скорость ветра вряд ли может объяснить присутствие петель магнитного поля; скорее можно предположить обратное – влияние замкнутой конфигурации магнитного поля на скорость СВ. В работе [6] обнаружено меридиональное течение солнечного ветра со скоростью около 3 км/с, направленное на север и на юг от ГТС. Вероятно, это течение связано с замкнутой геометрией ММП вблизи токового слоя и представляет собой поток плазмы, направленный вдоль силовых линий от вершин петель магнитного поля.

Работа выполнена при поддержке Государственного контракта № 10104-34/П-16/041-400/140606-028 и Интеграционного проекта СО РАН – ДВО РАН № 183.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Обридо В.Н., Гольшев С.А., Левитин А. Е.* Связь структуры крупномасштабного магнитного поля Солнца в циклах солнечной активности со структурой ММП, оказывающей влияние на геомагнитную активность // Геомагнетизм и аэрономия, 2004, т. 44, с. 449–452
2. *Понявин Д.И., Усманов А.В.* Годовые вариации соотношения B_x - и B_z -компонент ММП в GSEQ-, GSE-, и GSM-системах координат // Геомагнетизм и аэрономия, 1985, т.25, с. 128–129
3. *Lyatsky W., Tan A., Lyatskaya S.* Effect of the Sun's magnetic field polarity on interplanetary magnetic field B_z // Geophys. Res. Lett., 2003, v. 30, p. 2258–2261
4. *Pudovkin M.I., Ponjavin D.I., Chertkov A.D.* Recurrency and the origin of the vertical component of the interplanetary magnetic field // Solar Phys., 1980, v. 66, p.411–416
5. *Pudovkin M.I., Runova A.V., Zaitseva S.A., Besser B.P., Meiser C.-V.* Electric currents at IMF sector boundaries // Solar Phys., 1999, v. 184, p. 173–186
6. *Richardson J.D., Paularena K.I.* Meridional flow in the solar wind // J. Geophys. Res., 1996, v. 101, p. 19995–20002
7. *Smith E.J.* The heliospheric current sheet // J. Geophys. Res., 2001, v. 106, p. 15819–15831

КИНЕМАТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ ХРОМОСФЕРНЫХ ВСПЫШЕК В АКТИВНЫХ КОМПЛЕКСАХ И ПРОБЛЕМА ВНЕШНЕГО ИСТОЧНИКА ЭНЕРГИИ ВО ВСПЫШКАХ

Имеется ряд работ, прямо или косвенно указывающих на связь вспышечных явлений с волновыми процессами в хромосфере. Квазипериодические колебания наклона спектра радиоизлучения перед сильными вспышками с периодами 30–60 мин наблюдались в НИРФИ [6]. Для вспышечно-активных областей характерно существование осцилляций рентгеновского излучения с периодами 5–11 ч. На возможность связи звукового поля скоростей с триггером вспышки указывалось в работе [3]. В работе [1] была обнаружена модуляция 5 – минутных колебаний периодами 20, 30, 40 и 60 минут, причиной которых являются крупномасштабные периодические движения над фотосферой, отражающие присутствие g – мод хромосферы. Прямая попытка выявить низкочастотные колебания в параметрах вспышек в диапазоне 3–100 мин была предпринята в работе [7]. Анализ 50-ти активных областей показал, что в параметрах вспышек (длительность, площади) усилены периодические компоненты в области 20–30 минут, в согласии с [6].

О возможности прямых наблюдений g – мод колебаний хромосферы указывалось в работе [8], где выделены колебания с периодами 20–40 минут и длиной волны $\lambda \sim 30000$ км. В работе [5] было показано, что нижняя хромосфера и внутренняя корона являются неустойчивыми в отношении внутренних гравитационных колебаний. Волны с периодами 30 мин и более можно рассматривать как чисто гравитационные колебания хромосферы. Мы будем принимать следующий «сценарий» вспышечного процесса. Гравитацион-

* Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, 664074, Чернышевского 15

ные колебания хромосферы (g – моды, внутренние волны) взаимодействуют с магнитной структурой группы пятен. Волновой процесс носит стохастический характер. В случае достаточной амплитуды волны (эффект нелинейности) это взаимодействие провоцирует вспышку.

Известно, что 10% вспышек в группах пятен являются «симпатическими», то есть причинно-связанными некоторым «сигналом». В работе принята «симпатическая модель» вспышечного процесса. Принимается, что все вспышки в данной активной области (АО) являются «симпатическими», то есть вызванными некоторым единым «агентом». Таким агентом могут быть низкочастотные пульсации (колебания) хромосферы, которые несут достаточно энергии, чтобы служить подходящими триггерами вспышек. Если это так, то характеристики «агента» должны прямо или косвенно проявляться в кинематических элементах вспышек, таких как скорости и ускорения.

Задачей данной работы является проиллюстрировать тот факт, что кинематические элементы вспышек, выводимые из координатных измерений положений вспышек, не противоречат, а органически подтверждают роль волновых процессов (сигналов) в общем сценарии вспышек в соответствии с работами [1, 3, 5–8].

ДААННЫЕ И МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе [4] нами был предложен координатный метод точной привязки вспышек к центру групп пятен с привлечением данных каталогов координат вспышек мировой сети (QBSA, SGD) [10, 11]. С этой целью, долготы вспышек в системе центрального меридиана λ (сmp) по [10, 11] приводились к системе координат центра группы при заданной угловой скорости вращения группы пятен $\omega(\varphi)$ на широте φ . При этом долготное и широтное собственные положения i -й вспышки в системе координат центра группы пятен находятся по формулам:

$$\Delta\varphi_i = \varphi_i - \varphi$$

$$\Delta\lambda_i = \lambda_i(\text{сmp}) - \omega(\varphi, t_i)(t_i - t_{\text{сmp}})$$

$$\Delta r_i = (\Delta\varphi_i + \Delta\lambda_i)^{1/2}, \quad (1)$$

где λ_i (сmp) – долгота вспышки от центрального меридиана, $\omega(\varphi, t_i)$ – угловая скорость группы на момент вспышки t_i , $t_{\text{сmp}}$ – момент прохождения группой центрального меридиана (сmp), r_i – модуль радиус-вектора вспышки от центра собственной группы пятен. Здесь $\Delta\varphi_i$ и $\Delta\lambda_i$ – широтное и долготное положение вспышки – группоцентрические координаты вспышек.

Как видно из системы уравнений (1) в долготное положение вспышки входит угловая скорость группы, которая может выбираться стандартной (формула Ньютона – Нанна) или рассчитывается по исходным данным. В работе [5] предложена методика определения «мгновенной» угловой скорости группы по вспышкам как хромосферным трассерам.

Зная группо-центрические координаты (1), можно рассчитать следующие кинематические элементы вспышек: $\Delta\varphi_i/\Delta t$ – скорость вспышечного «агента» по широте, $\Delta\lambda_i/\Delta t$ – скорость агента по долготе, $\Delta r_i/\Delta t$ – абсолютная скорость по радиус-вектору, где $\Delta t = t_i - t_{i-1}$ – разность моментов двух соседних вспышек (моментов максимумов). С целью избежания выбросов скоростей для близких времен вспышек ($\Delta t \sim 0$) применялось среднее значение по всем разностям $\langle \Delta t \rangle$ – средний промежуток времени между двумя соседними вспышками.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты расчетов кинематических элементов для трех активных областей (АО) по QB [10] и 4-х АО по SGD [11] приведены в табл. 1. По столбцам даны: 1 – номер (оборот) активной области (АО), 2 – число вспышек (N), 3 – средняя угловая скорость, 4 – средний интервал между вспышками (доли суток), 5 – скорость вспышечного агента по долготе, 6 – скорость вспышечного агента по широте, 7 – модуль скорости, 8 – расчетное ускорение свободного падения на Солнце по кинематическим элементам вспышек (см. ниже).

Таблица
Результаты расчета кинематических элементов вспышек (7 АО)

АО (QB - SGD)	N всп.	$\langle \omega \rangle$ °/сут	$\langle \Delta t \rangle$ сут.	V_L km / s	V_ϕ km / s	V , km / s	g ускорение km / s ²
1701_44	216	12,96	0,059	8,5±0,5	4,8±0,3	10,5±0,5	0,260 ± 0, 03
1701_01	128	13,38	0,104			5,23±0,2	0,297 ± 0, 07
1701_14	48	14,83	0,156			1,77±0,2	0,276 ± 0, 02
5533sgd	118	12,28	0,097	5,3±0,5	1,9±0,3	5,65±0,2	0,259 ± 0, 04
5528sgd	136			5,0±0,5	3,1±0,3	5,84±0,2	0,299 ± 0, 04
5521sgd	102			2,3±0,5	1,8±0,3	2,90±0,2	0,213 ± 0, 03
5555sgd	83			2,9±0,5	1,6±0,3	3,28±0,2	0,221 ± 0, 04
Всего АО 7	831			$\langle v \rangle$ 4,8±0,5	$\langle v \rangle$ 2,6±0,3	$\langle v \rangle$ 5,02±0,2	$\langle g \rangle$ 0,261 ± 0,04

На *рис.1* приведено распределение положений вспышек и перемещений (линии) «вспышечного агента» по долготе и широте в группе N 5533, S19°. Цифры – градусы гелиографической долготы (по горизонтали) и широты (по вертикали). Показана прямая и уравнение регрессии.



Рис.1. Распределение положений (точки) и смещений (линии) вспышек в системе координат центра группы 5533 SDG по долготе и широте

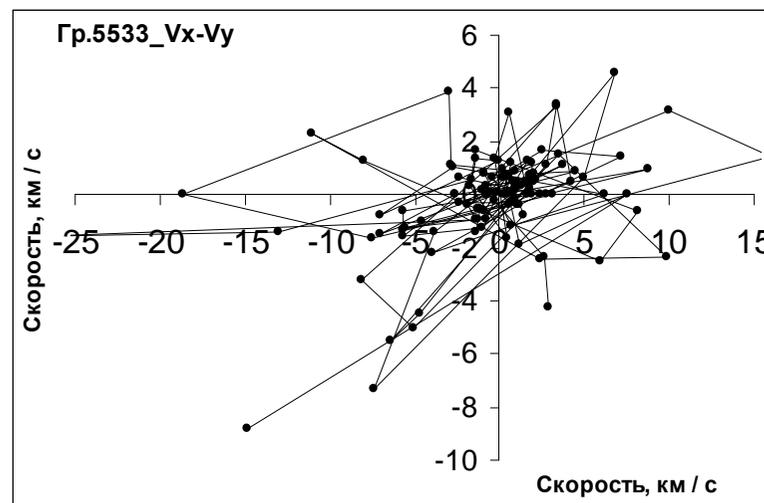


Рис. 2. Распределение кинематических элементов скоростей вспышечного агента по долготе и широте для группы N5533, S19°

На *рис.2* приведено распределение кинематического элемента «скорость вспышечного агента» (км / с) по долготе (V_x) и по широте (V_y) – группа N° 5533, широта S19°. Видна заметная анизотропия – скорости по долготе больше скоростей по широте. Показана прямая и уравнение регрессии.

Таблица и *рис.1, 2* выявляют прежде всего заметную анизотропию скоростей вспышечного агента. В долготном направлении скорости агента систематически выше чем в широтном. Эта анизотропия легко объясняется анизотропией магнитного поля группы пятен. По долготе (V_L) скорость направлена вдоль магнитной оси (магнитной трубки), в то время как скорость по широте, V_ϕ , носит «поперечный» характер в отношении магнитного поля группы. Различие в скоростях такое же как различие между быстрыми (альвовенскими) и медленными (магнитозвуковыми) волнами.

Другой важный факт – модуль скорости не превышает скорости магнитного звука в хромосфере –10 км/с и даже в фотосфере (скорость звука 7 км/с). Это говорит о том, что волновой (триггер-

ный) агент вспышек мало чем отличается от фазовых скоростей $p - g$ мод колебаний хромосферы.

При исследовании кинематики вспышек важным представляется получение величины с размерностью ускорения $-(\text{км}/\text{с}^2)$. Примем волновую модель – гравитационные колебания хромосферы. Конкретно - модель хромосферы – океана, в которой распространяются волны с длиной $\lambda \gg h$ много больше толщины h хромосферы. Примем гипотезу, предложенную в работе [9], по которой вспышка есть эффект столкновения длинной гравитационной волны с магнитным полем группы пятен. Скорость распространения синусоидальных волн как известно $c = \sqrt{g \lambda / 2\pi}$, откуда раскрывая, получим оценку ускорения свободного падения на Солнце ($\lambda = cT$):

$$g = \frac{2\pi\lambda}{T^2}. \quad (2)$$

Во второй части формулы (2) подставлялись следующие кинематические элементы вспышек: $\lambda \approx |\Delta r|$ – модуль радиус-вектора вспышки в системе координат группы, и $T = t_E - t_O$ – длительность вспышки (разность моментов начала и конца вспышки) по данным [3,6]. Результаты расчетов ускорения свободного падения на Солнце по каждой группе пятен приведены в последнем столбце таблицы. Как видно из расчетов ускорения g , оценки по разным группам с разным числом вспышек близки друг к другу, а среднее ускорение в пределах точности хорошо совпадает с ускорением свободного падения на Солнце $g = 0,274 \text{ км}/\text{с}^2$. Такое хорошее совпадение при относительно простой модели (поверхностные гравитационные волны в океане) говорит о большой вероятности рассматриваемого сценария вспышки.

Таким образом, модель гравитационных волн хромосферы и гидравлического скачка, предложенная в [2], а также модель волнцунами, предложенная в [9] для объяснения всего комплекса нестационарных явлений вспышки получает свое количественное подтверждение в модели симпатических вспышек и расчетов их кинематических элементов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дружинин С.А., Кобанов Н.Н., Никонова М.В. Исследования по геомагнетизму, аэронамии и физ. Солнца. Вып.10. М: Наука, 1981. С 51–54.
2. Касинский В.В. Грануляция, волны и нестационарные процессы в атмосфере Солнца // В кн: Результаты наблюдений и исследований в период МГСС, Сибирь и Дальний Восток. М.: Наука, 1967, вып.4, С. 44–60.
3. Касинский В.В. О возможной квазизвуковой природе механизма глобального возбуждения вспышек в 11-летних циклах Солнца // Солнечные данные. 1986. № 8. С.99–104.
4. Касинский В.В. К методике определения угловой скорости вращения Солнца по вспышкам как хромосферным трассерам // Исследования по геомагнетизму, аэронамии и физ. Солнца. Вып.95. М: Наука, 1991. С.113–121.
5. Касинский В.В., Редкобородый Ю.Н. К вопросу о ВГВ неустойчивости солнечной атмосферы... // Исследования по геомагнетизму, аэронамии и физике Солнца. Вып.91. М: Наука, 1990. С. 46–54.
6. Кобрин М.М., Кориунов А.И. Снегирев С.Д. и др. Солнечные данные. 1973. №10. С.79–85.
7. Кравчук П.Ф., Касинский В.В. Колебания параметров вспышек в активных областях в диапазоне 3-100 мин и диагностика сильных вспышек // Исслед. по геомагнетизму, аэронамии и физике Солнца. Вып.94. Новосибирск, 1992. С80–89.
8. Меркуленко В.Е. Исследования по геомагнетизму, аэронамии и физ. Солнца. Вып. 27. М: Наука, 1989. С. 171–183.
9. Kasinsky V. V., Krat V. A. On the solar tsunamy // Solar Physics, 1973. v.31. p. 219–228.
10. Quarterly Bulletin on Solar Activity, IAU. Nov. 1980.
11. Solar Geophys. Data, NGDC. Boulder. Colorado. 1989. N 544–PII.