

УДК 523.985.3

МОДУЛИРОВАННЫЕ ВСПЫШКОЙ 3- И 5-МИНУТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ КАК СРЕДСТВО ЗОНДИРОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ АТМОСФЕРЫ

© 2020 г. А. А. Челпанов^{1,*}, Н. И. Кобанов¹

¹ Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

* E-mail: chelpanov@iszf.irk.ru

Поступила в редакцию 09.08.2019 г.

После доработки 22.11.2019 г.

Принята к публикации 22.11.2019 г.

Мы применяем новый подход для измерения временных задержек магнитогидродинамических волн, распространяющихся в солнечной атмосфере. Малая вспышка в факельной области послужила модулятором уже существующих в хромосфере 3- и 5-минутных колебаний. Амплитуда этих колебаний увеличилась в несколько раз, что сделало возможным легко фиксировать образовавшийся волновой цуг при его распространении вверх через слои солнечной атмосферы. Такой кратковременный и хорошо выраженный волновой цуг служит удобным инструментом для определения скорости распространяющихся магнитогидродинамических волн, поскольку он позволяет избежать неопределенностей в измерении фазового сдвига, которые возникают в обычных условиях. Преимущество использования амплитудной модуляции от малой вспышки состоит в том, что это дает возможность исследовать атмосферу Солнца в условиях, приближенных к условиям в невозмущенной атмосфере.

DOI: 10.31857/S0004629920030020

1. ВВЕДЕНИЕ

Один из способов измерить или оценить характеристики отдельных магнитогидродинамических (МГД) волн, распространяющихся вверх и вниз, заключается в сравнении колебаний в сигналах, измеренных на разных высотах солнечной атмосферы. Суть метода, который уже давно известен и достаточно широко используется [1–4], состоит в том, что сигналы, вызванные излучением, формирующемся на разных высотах, сравниваются между собой по фазе для определения временной задержки. Расстояние между уровнями формирования линий делится на полученную задержку, и таким образом однозначно вычисляется скорость распространения волны. Знак задержки указывает на направление распространения. Обычно перед таким сравнением проводится узкополосная фильтрация исходных сырых сигналов в интересующем частотном диапазоне [5–8]. Далее, исходя из измеренной скорости, можно анализировать, например, какие моды магнитогидродинамических волн наблюдаются в анализируемом участке атмосферы Солнца и делать выводы о физических условиях, существующих там.

Ранее проблемы измерения фазовых разностей, в том числе измерения амплитудных изменений с высотой обсуждались в работах [9, 10].

Однако при анализе данных часто возникают вопросы, связанные с неопределенностью фазового сдвига. Такие вопросы может помочь разрешить диагностика, основанная на наблюдениях реакции колебаний на небольшие вспышки.

В случаях мощных вспышек — а именно такие вспышки исследуются в подавляющем большинстве работ, посвященных наблюдениям вспышек — пересоединение магнитных линий происходит в верхних слоях солнечной атмосферы, и после этого эффект от вспышки распространяется как в верхние, так и в нижние слои в виде излучения, МГД волн и потоков частиц. Практически во всех работах, посвященных волнам, распространяющимся во вспышечных событиях, изучается распространение волн сверху вниз в среде, радикально возмущенной мощной вспышкой. Но здесь мы предлагаем несколько другой подход, дополняющий и расширяющий возможности волновой диагностики.

Малые вспышки происходят значительно чаще и не вызывают резких и длительных изменений физических условий среды. Тем не менее они сопровождаются четко выраженной во времени амплитудной модуляцией амплитуды колебаний, уже существующих в нижних слоях [11]. Последнее свойство можно использовать при изучении

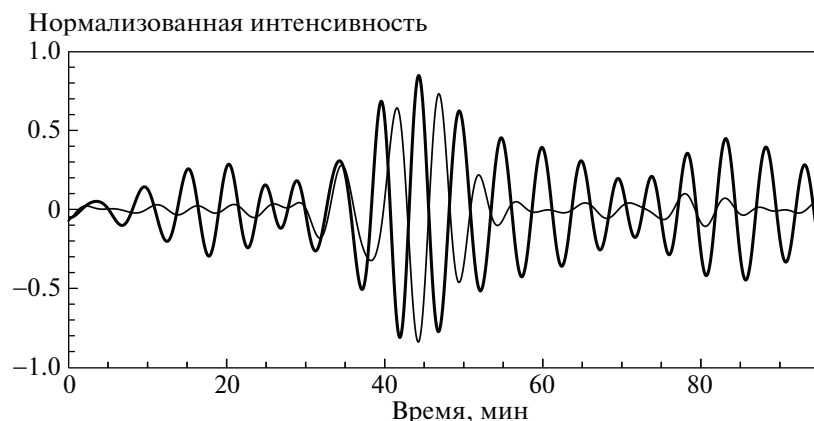


Рис. 1. Пример из наблюдений факела. Фильтрованные сигналы в линиях Si I 10827 Å и He I 10830 Å, записанных в одной пространственной точке. Разность фаз двух колебаний в цуге близка к половине периода.

распространения колебаний из нижних слоев атмосферы в переходную зону и корону.

2. ИНСТРУМЕНТЫ И ДАННЫЕ

Наблюдательный материал был получен на Автоматизированном солнечном телескопе Саянской солнечной обсерватории [12]. Обсерватория расположена на высоте 2000 м над уровнем моря. Диаметр главного зеркала составляет 90 см, фокусное расстояние — 20 м. Фотоэлектронная гидрирующая система компенсирует вращение Солнца и стабилизирует наблюдаемый объект с точностью до одной угловой секунды. Разрешающая способность инструмента ограничивается атмосферными условиями и близка к одной угловой секунде.

Спектральные наблюдения проводились одновременно в трех линиях: Si I 10827 Å (фотосфера), He I 10830 Å и H α (хромосфера). Длина щели соответствует 60" на поверхности Солнца. Спектральное разрешение составляет от 5 до 16 mÅ для различных линий. В анализе использовались полученные из спектральных данных сигналы интенсивности и сигналы лучевой скорости, полученные с использованием методов, описанных в статьях [12, 13].

Кроме данных, полученных на наземном телескопе, мы использовали данные космической обсерватории Solar Dynamics Observatory (SDO) [14, 15]. Обсерватория предоставляет полнодисковые изображения Солнца в нескольких спектральных каналах, получаемые с высокой частотой — от 12 до 45 с для разных каналов.

Также использовались сигналы рентгеновского излучения спутникового инструмента Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager

(RHESSI) [16]. Кроме этого, по данным RHESSI было определено время начала вспышки.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ДИСКУССИЯ

В реальных данных сигналы часто показывают чередующиеся умеренные ослабления и усиления амплитуды — т.н. цуги. Один цуг обычно охватывает несколько периодов колебаний. Однако, когда дело доходит до анализа реальных данных, часто возникают проблемы в точном определении сдвига фазы колебаний между разными сигналами. Фаза может меняться как от цуга к цугу, так и внутри одного цуга; цуги могут не соответствовать друг другу в двух сигналах или быть очень плохо выраженными. И, кроме этого, в таких ситуациях часто возникает важный вопрос, на который, тем не менее, необходимо дать ответ для решения задачи: сколько целых периодов лежит в реальной разности фаз анализируемых сигналов?

Например, по сигналам на рис. 1 сложно сказать, как именно нужно измерять задержку. Разность фаз между сигналами составляет примерно половину периода. Значит ли это, что первый сигнал отстает от второго на половину периода? Или второй отстает от первого? Это можно оценить, если принять условие, что сигналы распространяются от нижних слоев к верхним, но на деле это не всегда так. Такие обратные случаи зафиксированы в достаточно большом количестве исследований [8, 17, 18]. Или может быть между сигналами вообще полтора периода? Это сложно оценить при достаточно слабо выраженной цуговой структуре.

Проводя спектральные наблюдения в факелах, мы наблюдали небольшую вспышку. Вспышка произошла в беспятенной факельной области NOAA 11573 21 сентября 2012 года в 02:19 UT.

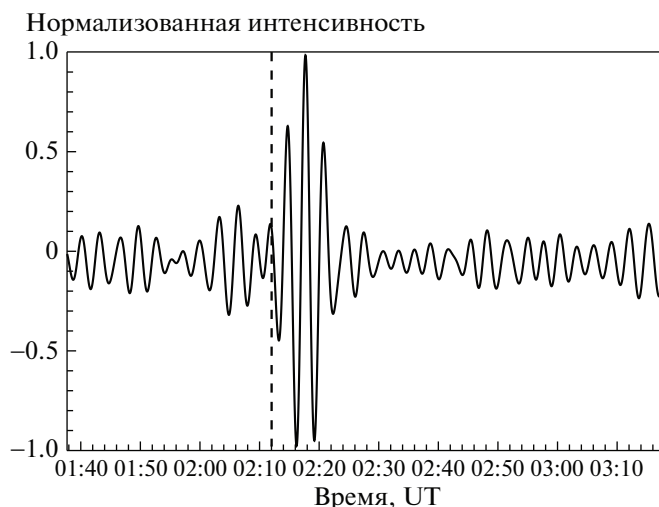


Рис. 2. Фильтрованный в частотном диапазоне 5.1–5.9 мГц (трехминутные колебания) сигнал лучевой скорости в линии He I 10830 Å в месте возникновения вспышки.

Класс мощности вспышки не превышал В2. Во время вспышки активная область располагалась недалеко от центрального меридиана (координаты на диске N19°E13°). Полное подробное описание вспышки содержится в работе [19]. В работе [20] мы описали колебания, сопровождающие эту вспышку. При анализе колебаний, наблюдавшихся во время и сразу после вспышки, были обнаружены значимые колебания на всех исследуемых уровнях солнечной атмосферы, от короны до верхней хромосферы. Кроме этого, наблюдалось значительное единовременное усиление колебаний в диапазонах трех- и пятиминутных колебаний. Пик мощности колебаний в нижних слоях приходился на фазу спада вспышки.

Такая амплитудная модуляция небольшой непродолжительной вспышкой дает удобную возможность, чтоб преодолеть трудности, связанные с неопределенностью фазового сдвига между сигналами, потому что в таких случаях цуг, во-первых, достаточно кратковременный, у него хорошо прослеживаются начало и окончание, и за это время разность фаз между сигналами не успевает значительно измениться; во-вторых, цуг очень хорошо выражен из-за значительного усиления амплитуды колебаний над общим фоном [11]. Действительно на рис. 2 показаны хромосферные трехминутные колебания в месте вспышки, отфильтрованные из сигнала линии He I 10830 Å. Видно, что до вспышки колебания существуют в своем обычном режиме, а в результате вспышки образовывается цуг с амплитудами, увеличенными примерно в пять раз по сравнению с пред-

вспышечными значениями, затем снова восстанавливается нормальный режим колебаний.

На рис. 3 на левой панели показаны сигналы интенсивности излучения после узкополосной фильтрации в диапазоне двухминутных периодов. Графики расположены в порядке уменьшения высоты формирования сигналов в солнечной атмосфере. Вертикальной линией показано время начала вспышки, определенное по рентгеновскому излучению в диапазоне 6–12 кэВ.

Видно, что по мере уменьшения высоты от точки возникновения вспышки к хромосфере цуг двухминутных колебаний проявляется все позже, а значит, эти колебания распространяются сверху вниз — от места первого возникновения вспышки к нижним слоям атмосферы.

Однако если посмотреть на колебания интенсивности с более длинными периодами — 3 мин и 5 мин, то будет наблюдаться противоположная картина — колебания распространяются вверх (рис. 3, центральная и правая панели). В случае пятиминутных колебаний в анализ включена фотосферная линия Si I 10827 Å. Двух- и трехминутные колебания плохо проявляются в этой линии; возможно, это следствие того, что они нетипичны для фотосферы факелов.

Наиболее четко цуговая структура сигнала выражена в каналах 304 Å и 171 Å; по сигналам этих каналов определялись начало и конец цуга. За первый период колебаний в цуге принимался период, в котором размах амплитуды “peak-to-peak” превышает не менее чем в три раза аналогичный параметр в предшествующем периоде. Этот же критерий использовался для определения конца цуга по отношению к последующему сигналу. За-

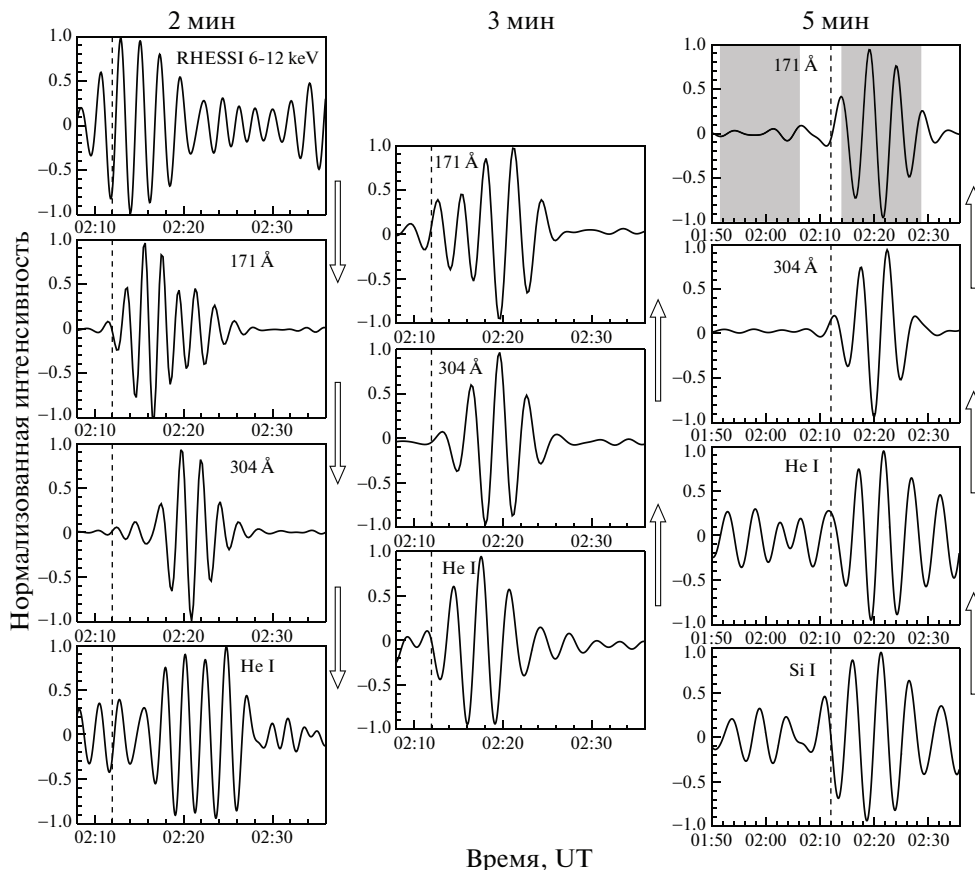


Рис. 3. Фильтрованные 2-, 3- и 5-минутные колебания в сигналах интенсивности в месте возникновения вспышки в линии He I 10830 Å, над которым распространялись колебания. Вертикальная пунктирная линия показывает время начала вспышки по данным рентгеновского излучения в диапазоне 6–12 кэВ. Рисунок наглядно показывает, в каких случаях колебания распространяются вверх или вниз.

тем характерные детали, связанные с началом цуга, определялись в начале сигналов Si I и He I, при этом рассматривалось такое же число периодов, как в каналах 304 Å и 171 Å.

Согласно рис. 3 трехминутные колебания максимально усилились в канале 304 Å на 125 с позже, чем в линии He I 10830 Å, а в канале 171 Å – на 105 с позже, чем в канале 304 Å. Заметим, что изменение формы цуга трехминутных колебаний в канале 171 Å на средней панели рис. 3, возможно, связано с вкладом близких по периодам двухминутных колебаний, распространяющихся сверху.

Процесс усиления трех- и пятиминутных колебаний в хромосфере начинается немного позже, чем происходит вспышка, в то время, как двухминутные колебания в верхних слоях появляются уже вместе с началом вспышки. Таким образом, можно сделать вывод, что вспышка является генератором двухминутных колебаний в короне и модулятором 3- и 5-минутных колебаний интенсивности в хромосфере [11]. Когда возмущение от вспышки достигает нижних слоев, там

продолжаются колебания с типичными для нижних слоев частотами, а возмущение служит толчком, который усиливает эти собственные колебания. Можно усмотреть грубую аналогию с ударом по натянутой струне, который заставляет ее громче звучать на собственной частоте, вне зависимости от того, какую форму принял удар, и какие частоты в нем содержались. Далее это усиленное колебание легко отследить по мере распространения его вверх через солнечную атмосферу.

Такой вывод подтверждается и временем возникновения цугов: вместе со вспышкой возникает и начинает распространяться вниз цуг двухминутных колебаний, которые в обычных условиях несвойственны для атмосферы факелов. И только после того, как влияние вспышки достигает нижних слоев, в них формируются резко усиленные цуги трехминутных и пятиминутных колебаний. Эти колебания практически всегда существуют в атмосфере факелов, но имеют заметно меньшую амплитуду. Предлагаемый подход можно приме-

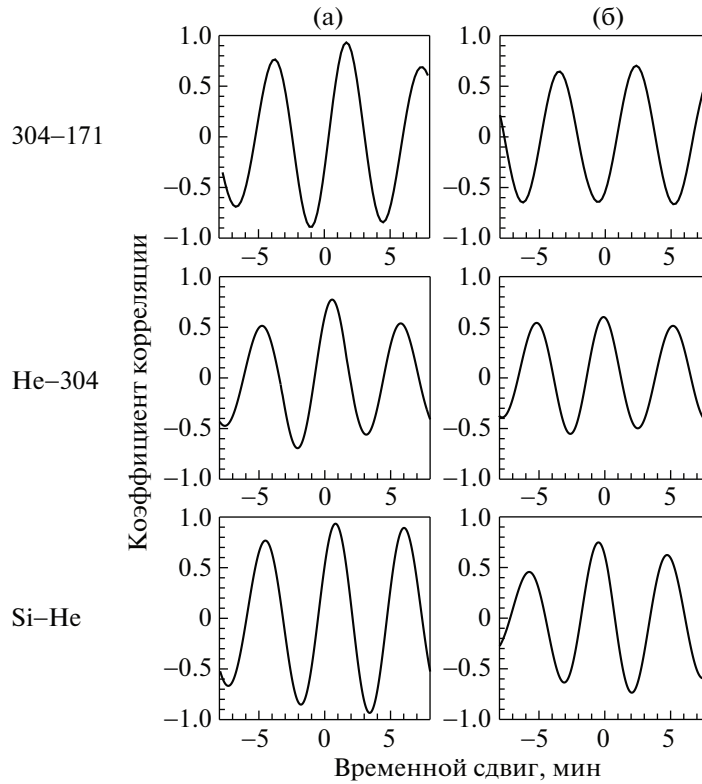


Рис. 4. Кривые взаимной корреляции пар сигналов а) соответствующих времени цуга; б) для аналогичных по продолжительности отрезков сигналов, предшествующим появлению цуга. Используемые временные отрезки отмечены на рис. 3 серым фоном.

нять для измерения фазовой скорости распространяющихся вверх колебаний.

В табл. 1 приведены результаты прямых измерений фазового сдвига для пятиминутных коле-

Таблица 1. Задержки в распространении пятиминутных колебаний в цуге и их средние значения для трех пар высот. Задержки рассчитаны по положению нулевых значений сигналов на оси времени. В скобках указаны аналогичные значения, рассчитанные по положению экстремумов сигналов

Si I/He I	He I/304 Å	304 Å/171 Å
Δt , с	Δt , с	Δt , с
88 (84)	14 (19)	96 (96)
60 (68)	32 (35)	104 (108)
42 (42)	39 (45)	110 (106)
25 (28)	53 (55)	107 (106)
29 (26)	54 (53)	96 (88)
$\overline{\Delta t} = 49 \pm 25$ (50 \pm 25)	$\overline{\Delta t} = 38 \pm 16$ (41 \pm 15)	$\overline{\Delta t} = 103 \pm 6$ (101 \pm 8)

баний на протяжении цуга. Для определения этого сдвига у сигналов сравнивались значения времени, в которые кривые пересекают нулевой уровень. В скобках добавлены аналогичные значения, измеренные по положению экстремумов сигналов. Средние значения для пар сигналов Si I–He I, He I–304 Å и 304 Å–171 Å составляют 49 ± 25 с, 38 ± 16 с и 103 ± 6 с соответственно. Большой разброс значений в двух первых парах обусловлен тем, что в фотосферном и хромосферном сигналах период менялся на протяжении цуга. Подобная ситуация ранее была отмечена в работах [11, 21].

На рис. 4а показаны кривые взаимной корреляции для цуга в трех парах сигналов. В табл. 2

Таблица 2. Задержки в распространении пятиминутных колебаний Δt в цуге, рассчитанные по максимальному коэффициенту корреляции c_{\max}

Si I/He I	He I/304 Å	304 Å/171 Å
$\Delta t = 49 \pm 7$	$\Delta t = 34 \pm 6$	$\Delta t = 100 \pm 4$
$c_{\max} = 0.93$	$c_{\max} = 0.78$	$c_{\max} = 0.94$

приведены значения временных сдвигов, для которых достигается максимальное значение коэффициента корреляции. Для расчета ошибок корреляционного анализа применялась кросс-корреляция пар симулированных сигналов, состоящих из исходных сигналов с добавлением случайной шумовой компоненты. Оценки сдвигов, полученные с помощью корреляционного анализа, мало отличаются от оценок, полученных путем прямого сравнения кривых.

Для сравнения на рис. 4б приведены кривые взаимной корреляции для сигналов этих же каналов за такой же по продолжительности период времени, предшествующий цугу. В этом случае коэффициент корреляции достигает заметно меньших значений, чем для цуга; для верхних слоев пики корреляции практически равны по высоте, что затрудняет адекватную оценку сдвига, а для пары фотосфера хромосфера наибольшая корреляция достигается при отрицательном сдвиге по времени. Из-за значительных отличий в форме сигналов и непостоянства периода эти сигналы невозможно сравнивать между собой для прямой оценки фазового сдвига.

4. ВЫВОДЫ

В работе на примере анализа колебаний, сопровождающих вспышку с мощностью B2, описан новый подход к измерению запаздывания при распространении магнитогидродинамических волн в вертикальном направлении с использованием возмущения, возникающего в солнечной атмосфере после небольшой вспышки. Малая вспышка служит модулятором постоянно существующих в хромосфере трех- и пятиминутных колебаний, увеличивая амплитуду этих колебаний в несколько раз. Образовавшийся волновой цуг уверенно прослеживается при его распространении в верхние слои солнечной атмосферы. Это позволяет избежать неопределенностей при измерении фазовых сдвигов сигналов в переходной зоне и короне, которые возникают в обычных условиях. При этом солнечная атмосфера не претерпевает существенных изменений, какие, например, наблюдаются в результате вспышек высоких спектральных классов. Таким образом, по мнению авторов, метод может быть полезен для исследования свойств атмосферы Солнца в состоянии, максимально приближенном к невозмущенному.

Еще одно преимущество этого метода заключается в том, что использующиеся в нем небольшие вспышки намного более распространены, чем крупные вспышки. Это представляет более

широкие возможности для исследования волн в атмосфере различных объектов при различных условиях.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-32-70076 и в рамках базового Проекта П.16.3.2 ИСЗФ СО РАН.

БЛАГОДАРНОСТИ

Спектральные данные были получены на оборудовании Центра коллективного пользования ИСЗФ СО РАН “Ангара”. Мы благодарны научным группам NASA/SDO и RHESSI за предоставленные данные. Мы выражаем благодарность анонимному рецензенту и редакции за полезные замечания, которые помогли усовершенствовать статью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *R. G. Giovanelli, J. W. Harvey, and W. C. Livingston*, *Solar Phys.* **58**, 347 (1978).
2. *M. von Uexküll, F. Kneer, and W. Mattig*, *Astron. and Astrophys.* **123**, 263 (1983).
3. *B. W. Lites*, *Astrophys. J.* **277**, 874 (1984).
4. *B. W. Lites and J. H. Thomas*, *Astrophys. J.* **294**, 682 (1985).
5. *N. I. Kobanov, D. Y. Kolobov, and D. V. Makarchik*, *Solar Phys.* **238**, 231 (2006).
6. *R. Centeno, M. Collados, and J. Trujillo Bueno*, **692**, 1211 (2009), 0810.3613.
7. *N. I. Kobanov and V. A. Pulyaev*, *Solar Phys.* **268**, 329 (2011), 1110.1444.
8. *N. Kobanov, D. Kolobov, A. Kustov, S. Chupin, and A. Chelpanov*, *Solar Phys.* **284**, 379 (2013), 1302.5164.
9. *G. B. Gelfreikh, Y. T. Tsap, Y. G. Kopylova, T. B. Goldvarg, Y. A. Nagovitsyn, and L. I. Tsvetkov*, *Astronomy Letters* **30**, 489 (2004).
10. *Y. T. Tsap, A. V. Stepanov, and Y. G. Kopylova*, *Solar Phys.* **291**, 3349 (2016).
11. *A. A. Chelpanov and N. I. Kobanov*, *Solar Phys.* **293**, 157 (2018), 1810.10153.
12. *N. I. Kobanov*, *Instruments and Experimental Techniques* **44**, 524 (2001).
13. *J. Rayrole*, *Annales d’Astrophysique* **30**, 257 (1967).
14. *J. R. Lemen, A. M. Title, D. J. Akin, P. F. Boerner, C. Chou, J. F. Drake, D. W. Duncan, C. G. Edwards*,

- F. M. Friedlaender, G. F. Heyman, et al.*, *Solar Phys.* **275**, 17 (2012).
15. *P. H. Scherrer, J. Schou, R. I. Bush, A. G. Kosovichev, R. S. Bogart, J. T. Hoeksema, Y. Liu, T. L. Duvall, J. Zhao, A. M. Title, et al.*, *Solar Phys.* **275**, 207 (2012).
16. *R. P. Lin, B. R. Dennis, G. J. Hurford, D. M. Smith, A. Zehnder, P. R. Harvey, D. W. Curtis, D. Pankow, P. Turin, M. Bester, et al.*, *Solar Phys.* **210**, 3 (2002).
17. *V. M. Nakariakov, E. Verwichte, D. Berghmans, and E. Robbrecht*, *Astron. and Astrophys.* **362**, 1151 (2000).
18. *E. O'Shea, K. Muglach, and B. Fleck*, *Astron. and Astrophys.* **387**, 642 (2002).
19. *N. Kobanov, A. Chelpanov, and V. Pulyaev*, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* **173**, 50 (2018), 1712.10117.
20. *N. I. Kobanov and A. A. Chelpanov*, *Solar Phys.* **294**, 58 (2019), 1904.11142.
21. *H. Kwak, J. Chae, D. Song, Y.-H. Kim, E.-K. Lim, and M. S. Madjarska*, *Astrophys. J. Lett.* **821**, L30 (2016), 1604.02252.