

УДК 523.945

Анализ структуры и развития внепятенных вспышек по цифровым изображениям хромосферы Солнца

П.А. Коняев¹, А.В. Боровик², А.А. Жданов^{2*}

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

²Институт солнечно-земной физики СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126а

Поступила в редакцию 7.05.2015 г.

Для изучения хромосферной активности Солнца в линии H α предложена методика и алгоритмы построения световых кривых внепятенных солнечных вспышек. Разработано программное обеспечение аппаратно-программного комплекса Байкальской астрофизической обсерватории для компьютерного анализа развития вспышек по цифровым изображениям солнечной хромосферы.

Ключевые слова: солнечная хромосфера, внепятенные вспышки, световые кривые; solar chromosphere, off-spot-flashes, light curves.

Введение

Во время вспышек на Солнце выделяется количество энергии порядка $10^{30} - 10^{32}$ эрг в течение времени от нескольких минут до нескольких часов, что соответствует средней за этот период мощности порядка $10^{27} - 10^{29}$ эрг/с. Изучение процессов, приводящих к накоплению и высвобождению энергии во время вспышек, является одной из актуальнейших проблем солнечно-земной физики [1]. Большая часть вспышек происходит в активных областях (АО) с солнечными пятнами, где магнитное поле в ходе эволюции приобретает сложную структуру. Однако для понимания природы и механизмов солнечных вспышек в целом представляют большой интерес также вспышки, возникающие в относительно несложных конфигурациях поля – в спокойных областях без пятен или в факельных площадках с небольшими пятнами, так называемые «внепятенные» вспышки [2].

Процессы активизации хромосферы перед внепятенными вспышками во многом похожи на аналогичные явления в сложных АО с пятнами, поэтому изучение таких вспышек и комплексный совместный анализ полученных данных для различных диапазонов длин волн имеют большое практическое значение. В настоящей статье для выполнения этой задачи использован аппаратно-программный комплекс (АПК) цифровой обработки и анализа изображений хромосферы на телескопе полного диска Солнца Байкальской астрофизической обсерватории (БАО), разработанный в Институте оптики атмосферы

им.В.Е. Зуева СО РАН [3]. В качестве исходного материала использовались цифровые фильтрограммы в линии H α (6562,8 Å) размером 2048 × 2048 пикселей, полученные с помощью цифровой камеры Princeton Instruments 2048В.

Программное обеспечение АПК

Проведение анализа структуры и развития солнечных вспышек по цифровым изображениям хромосферы состоит из следующих этапов.

– Предварительная обработка: сбор материала, его оцифровка (если необходимо), классификация, преобразование файлов изображений из различных стандартных форматов (.spe, .fit, .tif, .gif, .png, .bmp, .jpg) в единый бинарный формат (.bao), автоматическое центрирование (сдвиг), измерение и изменение ориентации (поворот), устранение дефектов и приведение к единому размеру (биннинг, децимация, интерполяция).

– Предварительный анализ: нормировка яркости, автоматическое определение качества изображений, отбор серий кадров для окончательного изучения.

– Собственно анализ: построение световых кривых, предвспышечный анализ, период вспышки, послевспышечный анализ, исследование достоверности измерений.

В программном обеспечении АПК все перечисленные этапы реализованы в виде набора вычислительных алгоритмов и процедур, которые могут выполняться как в автоматическом, так и в ручном режимах. Точность измерений динамики яркости АО в большой степени зависит от точности привязки фрагментов изображений, взятых из разных кадров,

* Петр Алексеевич Коняев (peter@iao.ru); Александр Васильевич Боровик (aborovik@iszf.irk.ru); Антон Александрович Жданов (kick.out@mail.ru).

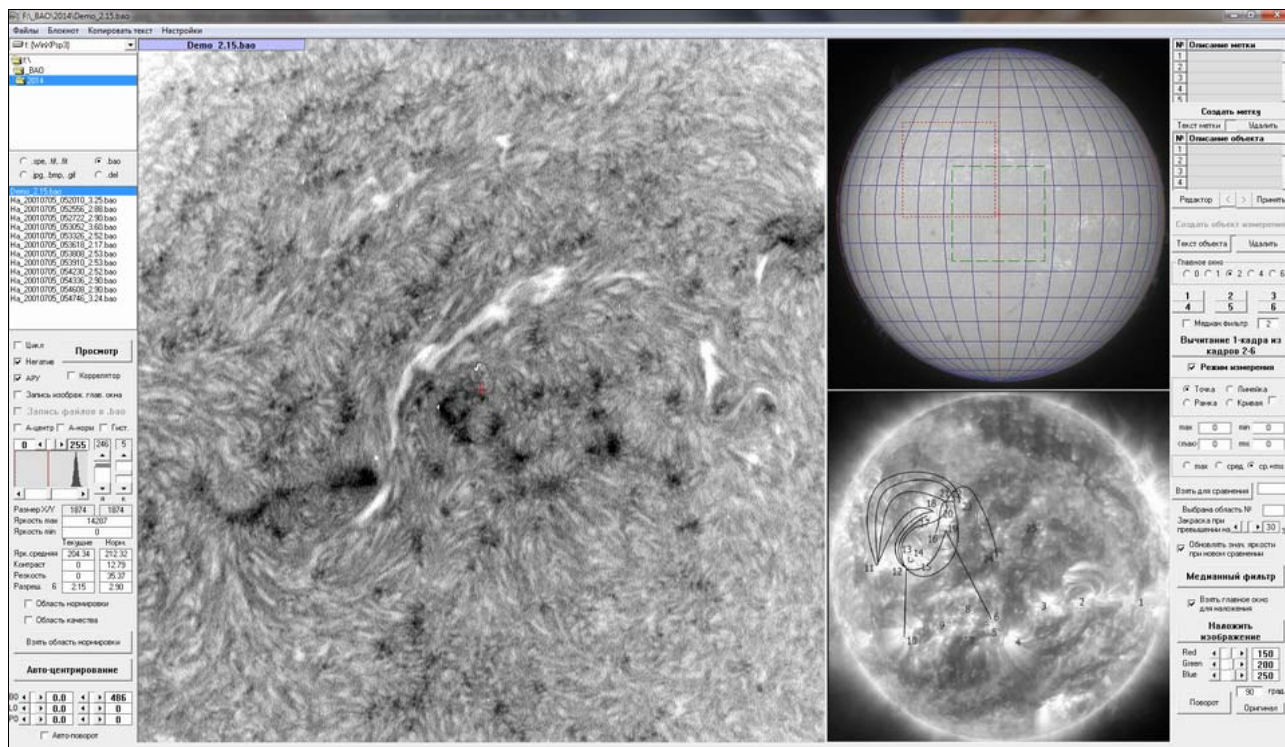


Рис. 1. Интерфейс программы АПК. Слева – окно измерений, справа сверху – «дорожная карта» диска Солнца с цифровой координатной сеткой

снятых в различные моменты времени и при различной их ориентации. В АПК для привязки фрагментов кадров реализован эффективный алгоритм совмещения изображений, основанный на корреляционном датчике сдвига с применением методов параллельного программирования и библиотек функций IPP и MKL Intel Parallel Studio. Для высокоточного определения координат объектов, расстояний между ними, азимутальных углов и т.д. используется виртуальная цифровая координатная сетка, которая накладывается автоматически на цифровое изображение полного диска Солнца, образуя «дорожную карту» (рис. 1).

Автоматическое центрирование изображения солнечного диска осуществляется с помощью алгоритма вычисления координат центра масс:

$$x_c = \left(\sum_{i=1}^{N_i} x_i I_i \right) / \left(\sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} I_{ij} \right),$$

$$y_c = \left(\sum_{j=1}^{N_j} y_j I_j \right) / \left(\sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} I_{ij} \right).$$

Здесь $I_i = \sum_{j=1}^{N_j} I_{ij}$, $I_j = \sum_{i=1}^{N_i} I_{ij}$, I_{ij} – значение яркости пикселя с координатами i, j ; N_i, N_j – число пикселей по горизонтали и вертикали соответственно.

Приведение солнечного диска к единому размеру осуществляется с помощью алгоритма вычисления эффективных размеров изображения:

$$a_x^2 = \left(\sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} i^2 I_{ij} \right) / \left(\sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} I_{ij} \right) - x_c^2,$$

$$a_y^2 = \left(\sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} j^2 I_{ij} \right) / \left(\sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} I_{ij} \right) - y_c^2.$$

Привязка координатной сетки к изображению и фрагментов изображений друг к другу выполняется с точностью до пикселя, что исключает систематические ошибки и дает абсолютную воспроизводимость результата при повторном измерении [4].

Построение световых кривых вспышек

Для исследования активности хромосферы в линии $H\alpha$ была выбрана вспышка F_0 , которая возникла 5 июля 2001 г. в 05:36 UT в области без пятен на расстоянии $\sim 16,4^\circ$ от АО № 263, $\sim 12,3^\circ$ – № 264 и $26,3^\circ$ – № 261. Координаты вспышки S07 E20, балл SF (рис. 2, а).

За время наблюдений вспышка активизировалась трижды, практически на том же месте с интервалом примерно 10–15 мин, т.е. относилась к разряду гомологичных вспышек [1] (рис. 3).

Одним из основных этапов изучения солнечных вспышек является построение световых кривых, которые представляют собой кривые изменения яркости, отражающие режим выделения энергии и особенности поведения источника вспышки. Интенсивность

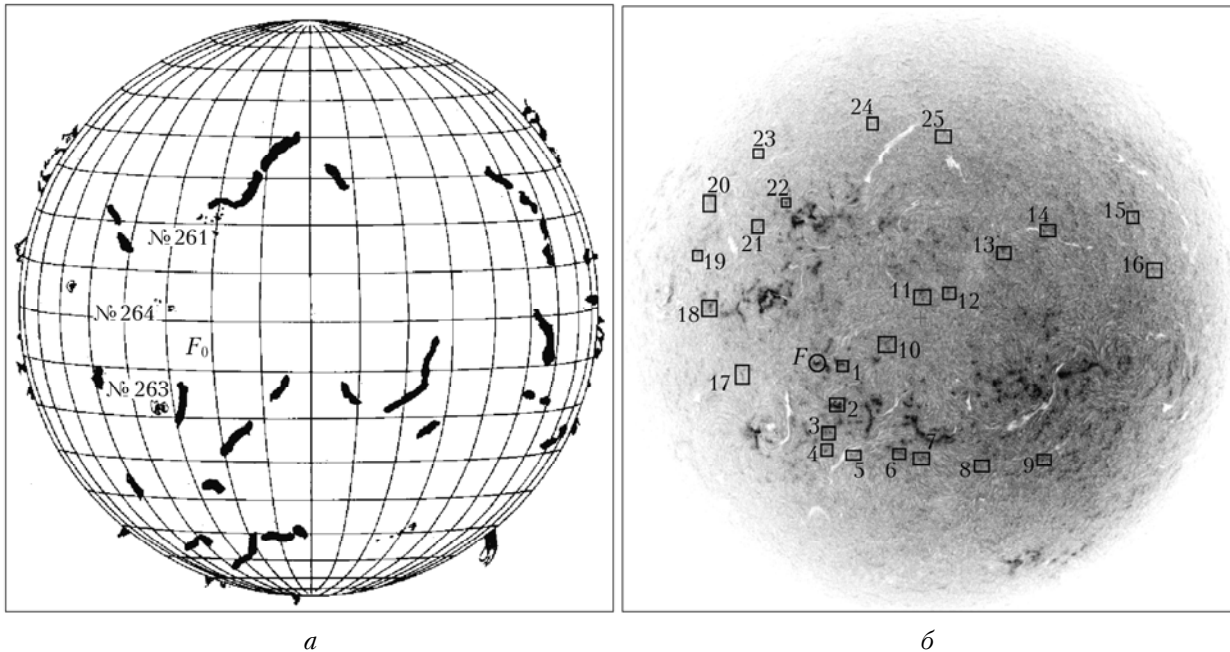


Рис. 2. Местоположение вспышки F_0 (а); карта реперных «кандидатов» (негатив) (б)

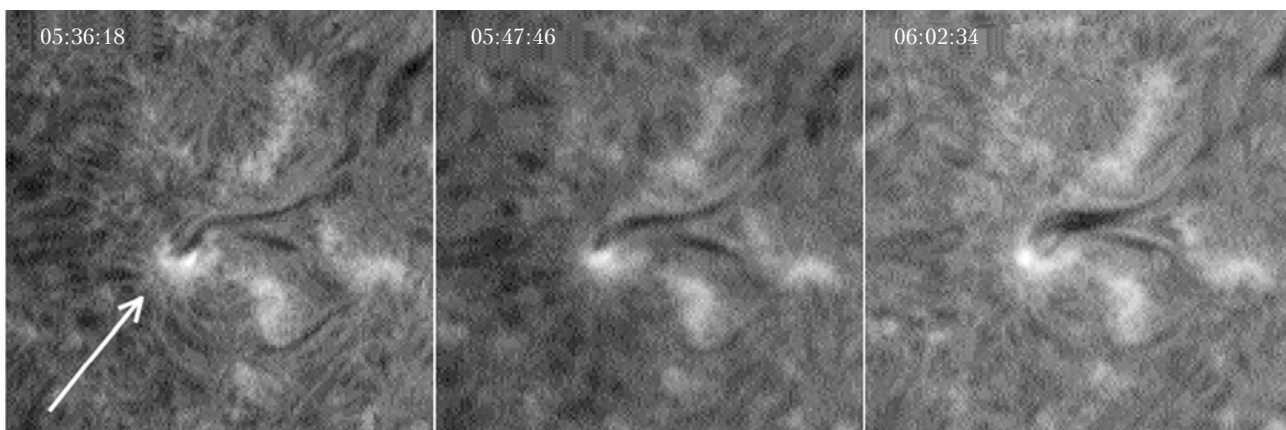


Рис. 3. Три фазы активизации вспышки F_0 . Кадры соответствуют моментам начала возгорания вспышечного узла, который показан стрелкой

вспышки является относительной величиной и выражается в единицах интенсивности невозмущенной хромосферы I_{ch} – «опорного репера». Для выбора реперной области необходимо выбирать участки поверхности, имеющие с АО наименьший коэффициент корреляции, так как отдельные области на Солнце могут быть физически связаны с областью вспышки. На рис. 2, б показаны участки, которые были выбраны для последующего отбора.

«Кандидаты» в реперные области должны также иметь минимальные среднеквадратические отклонения яркости за время наблюдения, т.е. быть участками с минимальной активностью в период вспышки. На рис. 4, а представлена диаграмма распределения коэффициентов корреляции области вспышки с 25 wybranными участками, из которых три отмечены стрелками как удовлетворяющие указанным выше условиям. В итоге была выбрана об-

ласть № 13, имеющая минимальные флуктуации яркости (рис. 4, б).

Для построения световой кривой применялись два варианта измерения яркости вспышки. В первом случае использовалось максимальное значение яркости в области вспышки $I_f = I_{max}$. Расчетное пространственное разрешение хромосферного телескопа полного диска БАО составляет $1''$ (угловую секунду) – на цифровом изображении чуть менее 1 пикселя. Поскольку реальное разрешение наилучшего по качеству изображения данного телескопа находится в диапазоне $1-2''$ [3], то для определения максимальной яркости использовался следующий алгоритм:

$$I_{max} = [I(i_{max}, j_{max}) + I(i_{max} + 1, j_{max}) + I(i_{max} - 1, j_{max}) + I(i_{max}, j_{max} + 1) + I(i_{max}, j_{max} - 1)]/5.$$

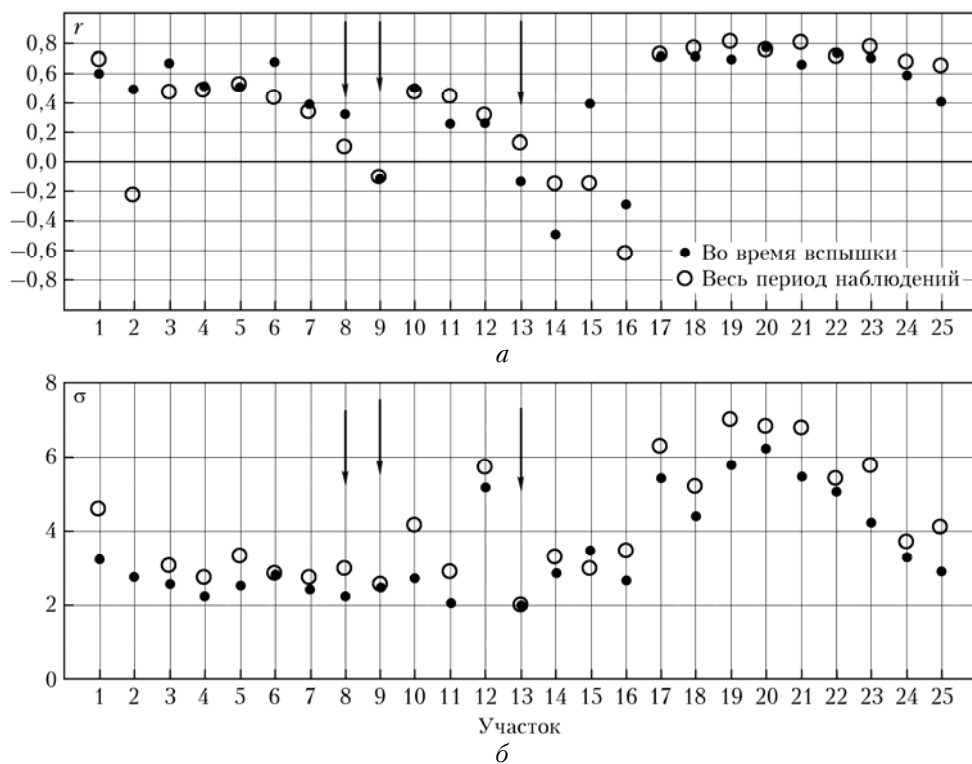


Рис. 4. Диаграмма распределения коэффициентов корреляции r области вспышки с 25 выбранными участками (а); диаграмма среднеквадратических отклонений яркости σ (б)

Здесь i_{\max} , j_{\max} – индексы строки и столбца самого яркого пикселя в области вспышки. Во втором случае для построения световой кривой использовалось среднее значение яркости в области заранее заданно-

го размера $I_f = I_{av}$, где $I_{av} = \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} I(i, j)$.

Из сравнения кривых на рис. 5 можно сделать вывод, что наиболее достоверную картину развития вспышки дают световые кривые, построенные по максимальной яркости вспышки и нормированные к средней яркости реперной области.

Световая кривая вспышки F_0 имеет послевспышечную область (06:13 и позже), яркость которой

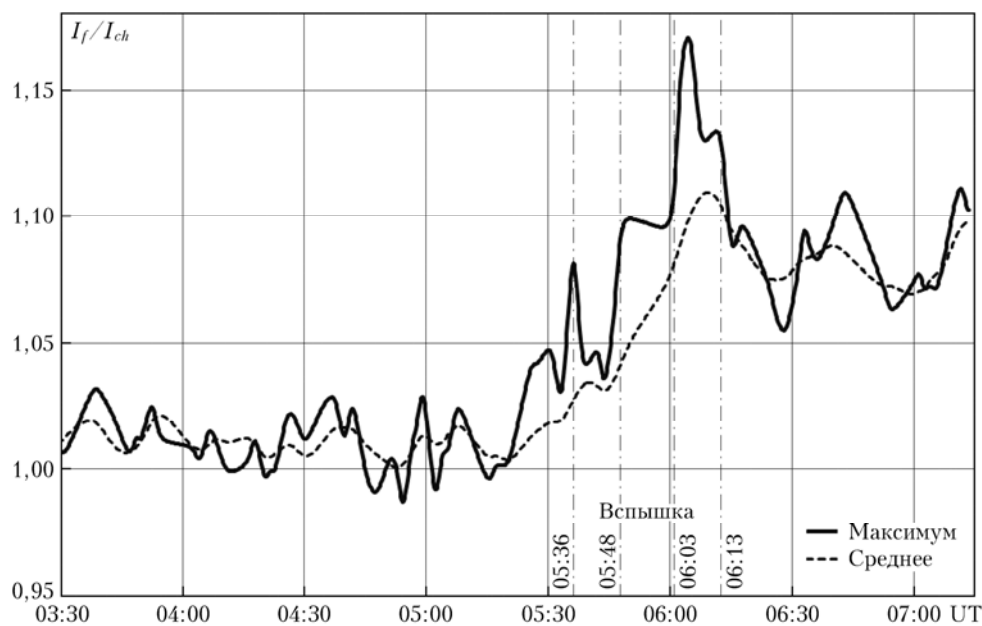


Рис. 5. Световые кривые, построенные по максимальной яркости вспышки (сплошная линия) и ее средней яркости (пунктирная)

	f	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
f	100%	-52%	-17%	-47%	-5%	44%	65%	30%	59%	-22%	69%	77%	67%	53%	67%	66%	74%	72%	71%	79%	70%	70%	69%	74%	35%	-17%	
1	-52%	100%	27%	70%	32%	-23%	-46%	-26%	-46%	25%	-60%	-59%	-60%	-41%	-46%	-71%	-54%	-57%	-56%	-62%	-59%	-44%	-56%	-53%	-16%	21%	
2	-17%	27%	100%	55%	60%	13%	7%	44%	21%	24%	1%	-3%	15%	1%	-23%	2%	7%	3%	-4%	9%	10%	5%	-3%	19%	49%		
3	-47%	70%	55%	100%	62%	8%	-15%	19%	-13%	42%	-34%	-40%	-22%	-34%	-35%	-56%	-34%	-34%	-32%	-41%	-31%	-19%	-30%	-32%	14%	39%	
4	-5%	32%	60%	62%	100%	30%	25%	47%	28%	27%	9%	15%	25%	-4%	8%	-14%	22%	24%	23%	10%	18%	29%	20%	16%	30%	40%	
5	44%	-23%	13%	8%	30%	100%	75%	59%	71%	5%	54%	52%	54%	49%	54%	49%	57%	57%	54%	65%	55%	54%	62%	59%	57%	11%	
6	65%	-46%	7%	-15%	25%	75%	100%	52%	77%	-13%	67%	68%	71%	59%	70%	71%	78%	72%	70%	82%	72%	68%	77%	76%	55%	14%	
7	30%	-26%	44%	19%	47%	59%	52%	100%	66%	24%	62%	44%	71%	21%	32%	24%	53%	50%	54%	53%	57%	52%	58%	47%	48%	36%	
8	59%	-46%	21%	-13%	28%	71%	77%	66%	100%	-4%	68%	70%	78%	53%	61%	65%	72%	74%	68%	80%	77%	72%	80%	71%	50%	14%	
9	-22%	25%	24%	42%	27%	5%	-13%	24%	-4%	100%	7%	-24%	-6%	-33%	-24%	-40%	-20%	-24%	-17%	-17%	-15%	-25%	-18%	-24%	9%	4%	
10	69%	-60%	1%	-34%	9%	54%	70%	68%	7%	100%	70%	80%	34%	49%	60%	73%	71%	72%	79%	73%	71%	72%	68%	77%	76%	49%	9%
11	77%	-59%	-3%	-40%	15%	52%	68%	44%	70%	-24%	70%	100%	77%	58%	67%	78%	79%	85%	80%	80%	77%	83%	82%	83%	47%	-1%	
12	67%	-60%	15%	-22%	25%	54%	71%	71%	78%	-6%	80%	77%	100%	51%	60%	65%	79%	80%	80%	81%	81%	76%	82%	74%	55%	16%	
13	53%	-41%	-3%	-34%	-4%	49%	59%	21%	53%	-33%	34%	58%	51%	100%	87%	68%	61%	66%	56%	67%	57%	60%	61%	57%	37%	0%	
14	67%	-46%	1%	-35%	8%	54%	70%	32%	61%	-24%	49%	67%	60%	87%	100%	64%	69%	72%	65%	78%	73%	67%	66%	68%	40%	-3%	
15	66%	-71%	-23%	-56%	-14%	49%	71%	24%	65%	-40%	60%	78%	65%	68%	64%	100%	73%	79%	70%	77%	71%	68%	75%	74%	37%	-9%	
16	74%	-54%	2%	-34%	22%	57%	78%	53%	72%	-20%	73%	79%	79%	61%	69%	73%	100%	86%	84%	88%	83%	80%	84%	84%	51%	12%	
17	72%	-57%	7%	-34%	24%	57%	72%	50%	74%	-24%	71%	85%	80%	66%	72%	79%	86%	100%	84%	84%	82%	84%	83%	85%	55%	4%	
18	71%	-56%	3%	-32%	23%	54%	70%	54%	68%	-17%	72%	80%	80%	56%	65%	70%	84%	84%	100%	83%	79%	82%	80%	80%	52%	12%	
19	79%	-62%	-4%	-41%	10%	65%	82%	53%	80%	-17%	79%	80%	81%	67%	78%	77%	88%	84%	83%	100%	83%	77%	85%	83%	52%	5%	
20	70%	-59%	9%	-31%	18%	55%	72%	57%	77%	-15%	76%	77%	81%	57%	67%	71%	83%	82%	78%	83%	100%	81%	79%	82%	47%	13%	
21	70%	-44%	10%	-19%	29%	54%	68%	52%	72%	-25%	64%	83%	76%	60%	67%	68%	80%	84%	82%	77%	81%	100%	81%	80%	50%	15%	
22	69%	-56%	5%	-30%	23%	62%	77%	58%	80%	-18%	76%	82%	82%	61%	66%	75%	84%	83%	80%	85%	79%	81%	100%	81%	55%	6%	
23	74%	-53%	-3%	-32%	16%	59%	76%	47%	71%	-24%	72%	83%	74%	57%	68%	74%	84%	85%	80%	83%	82%	80%	81%	100%	49%	1%	
24	35%	-16%	19%	14%	30%	57%	55%	48%	50%	9%	49%	47%	55%	37%	40%	37%	51%	55%	52%	52%	47%	50%	55%	49%	100%	27%	
25	-17%	21%	49%	39%	40%	11%	14%	36%	14%	4%	9%	-1%	16%	0%	-3%	-9%	12%	4%	12%	5%	13%	15%	6%	1%	27%	100%	

Рис. 6. Матрица корреляций между выделенными областями

в данном случае превышает довыспешечные значения, что может означать сохранение активности. Подобные явления довольно часто наблюдаются во время крупных солнечных вспышек. Статистика показывает, что в 9% случаях яркость вспышечной области приходит к своему первоначальному состоянию, в 54% случаев она имеет повышенную яркость, в 37% — опускается ниже первоначального уровня [5].

Колебания яркости вспышек могут дать представление об особенностях протекания вспышечного процесса и возможных связях вспышки с другими явлениями и событиями на Солнце, в том числе удаленными от нее на значительные расстояния. Анализ

световых кривых и построение матрицы корреляций (рис. 6) между активными областями позволяют получить данные о синфазности, сопряженности очагов вспышки и едином источнике энергоснабжения.

Обнаруженные в процессе исследования корреляции между отдельными участками хромосферы могут свидетельствовать о взаимосвязи областей посредством петельных структур.

Петельные структуры на Солнце наблюдаются в широком диапазоне длин волн как в эмиссии, так и в поглощении. Места их локализации указывают на связь явлений, происходящих в верхних слоях атмосферы Солнца, с процессами на поверхности и в нижних слоях хромосферы (рис. 7).

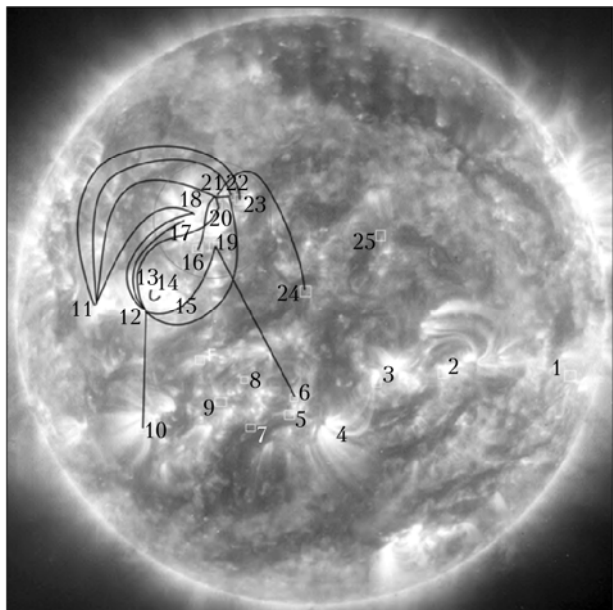


Рис. 7. Области сильных корреляций на фильтрограмме в линии 171 Å

Заключение

На основе алгоритмов аппаратно-программного комплекса Байкальской астрофизической обсерватории разработано эффективное программное обеспечение, позволяющее производить анализ динамики солнечных вспышек путем высокоточных измерений яркости изображений хромосферы Солнца. Результаты проведенных исследований показали, что для построения световых кривых солнечных вспышек очень важное значение имеет нормировка измеряемой яркости путем правильного выбора участков невозмущенной хромосферы в качестве реперных областей.

Установлено, что наиболее достоверную картину динамики вспышек дают световые кривые, построенные по максимальной яркости активной области, нормированной к средней яркости невозмущенной хромосферы. Предложенный способ построения световых кривых может быть применен для исследования структуры и развития солнечных вспышек всех баллов.

1. *Fletcher L., Dennis B.R., Hudson H.S., Krucher S., Phillips K., Veronig A., Battaglia M., Bone L., Caspi A., Chen Q., Gallagher P., Grigis P.T., Ji H., Liu W., Milligan R.O., Temmer M.* An observational overview of solar flares // *Space Sci. Rev.* 2011. V. 159. P. 19–106.
2. *Боровик А.В., Мячин Д.Ю., Томозов В.М.* Наблюдения внепятенных солнечных вспышек в Байкальской астрофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН и их интерпретация // *Изв. Иркутского гос. ун-та. Серия: Науки о Земле. Иркутск.* 2014. № 7. С. 23–45.
3. *Коняев П.А., Боровик А.В.* Изучение астроклимата Байкальской астрофизической обсерватории оптическими методами // *Оптика атмосф. и океана.* 2013. Т. 26, № 12. С. 1041–1044.
4. *Боровик А.В., Коняев П.А.* Астроклимат Байкальской астрофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН // *Изв. Иркутского гос. ун-та. Серия: Науки о Земле. Иркутск.* 2014. № 8. С. 25–34.
5. *Размадзе Т.С.* Фотометрия хромосферных вспышек // *Бюл. Абастуманской астрофизич. обсерватории.* 1962. № 29. С. 3–27.

P.A. Konyayev, A.V. Borovik, A.A. Zhdanov. **Spotless flares structure and development analysis using digital images of solar chromosphere.**

A methodology and algorithms for measuring the light curves of spotless solar flares is proposed for study the chromospheres activity in H-alpha line. Software for a hardware system of the Baikal astrophysical observatory is developed for computer analysis of flares development using digital images of solar chromosphere.