

ОБНАРУЖЕНИЕ УДАРНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ ЛИНИИ $\text{H}\alpha$ ВО ВСПЫШКЕ, НАБЛЮДАВШЕЙСЯ НА БОЛЬШОМ СОЛНЕЧНОМ ВАКУУМНОМ ТЕЛЕСКОПЕ 23 ИЮЛЯ 2002 Г.

Н.М. Фирстова, В.И. Поляков, А.В. Фирстова

DETECTION OF IMPACT LINEAR POLARIZATION OF THE $\text{H}\alpha$ LINE OBSERVED IN THE FLARE OF 23 JULY 2002 WITH THE LARGE SOLAR VACUUM TELESCOPE

N.M. Firstova, V.I. Polyakov, A.V. Firstova

Проведено исследование параметров Стокса в протонной вспышке балла 2B/X4.8, наблюдавшейся на Большом солнечном вакуумном телескопе (БСВТ) 23 июля 2002 г. В большинстве разрезов, сделанных вдоль дисперсии, не обнаружено свидетельств линейной поляризации в линии $\text{H}\alpha$. Только в некоторых случаях (78 из 664) в начале вспышки наблюдаются кратковременные (десятки секунд) мелкомасштабные (2–4'') случаи ненулевых значений параметров Стокса Q/I и U/I (2–6 %). Ориентация линейной поляризации радиальная и проявляется она обычно в узлах с самопоглощением в центре линии $\text{H}\alpha$. На первых двух спектрограммах, полученных через 4 мин после начала рентгеновской вспышки, поляризация имеет как радиальное, так и тангенциальное направления с максимальным значением $P \sim 13\text{--}14\%$. Наблюдавшаяся линейная поляризация интерпретируется как ударная поляризация, вызванная бомбардировкой хромосферы пучками электронов во время вспышки.

We have studied Stokes parameters in the 2B/X4.8 proton flare observed with the Large Solar Vacuum Telescope (LSVT) on 23 July 2002. In most sections along the dispersion, we have found no evidence for linear polarization in the $\text{H}\alpha$ line. Short-term (tens of seconds), small-scale (2–4'') regions with nonzero Stokes parameters Q/I and U/I (2–6 %) are only observed at the flare initiation in 78 out of 664 sections. Orientation of linear polarization is radial and is usually apparent in self-absorption nodes in the core of the $\text{H}\alpha$ line. Polarization directions on the first two spectrograms (obtained 4 minutes after the X-ray flare initiation) are both radial and tangential, with the maximum $P \sim 13\text{--}14\%$. The observed linear polarization is interpreted as an impact polarization caused by bombardment of the chromosphere by electron beams during the flare.

Введение

Солнечные вспышки – это события, которые проявляются в широкой области электромагнитного спектра. В настоящее время вспышки представляются как высокоэнергетические процессы, происходящие в короне, однако хромосферный отклик очень важен, поскольку энергия, излучаемая из нижней хромосферы, формирует большую часть бюджета вспышки. Вместе с тем остается невыясненным вопрос о переносе энергии из корональной части вспышек в хромосферу. Рассматриваются различные механизмы переноса энергии и нагрева хромосферы во время солнечных вспышек, среди которых поток ускоренных частиц (электронов и протонов), рентгеновское и ультрафиолетовое излучение, теплопроводность, ударные волны. Относительная эффективность этих механизмов до конца не выяснена, и, возможно, она различна для разных вспышек и стадий их развития. Многие теоретические модели солнечных вспышек предполагают, что во время вспышки хромосфера частично или полностью нагревается вследствие ее бомбардировки пучками энергичных частиц [Сыроватский, Шмелева, 1972; Brown, 1973; Canfield, 1974; Brown et al., 1978; Heinzel, 2003].

Относительное влияние пучков ускоренных электронов на нагрев хромосферы во время солнечной вспышки может быть оценено по исследованию ударной линейной поляризации водородных линий, которая возникает из-за анизотропного воздействия пучков частиц на атомы водорода [Hénoux, Semel, 1981; Hénoux, Chambe, 1990; Fletcher, Brown, 1995; Vogt et al., 1997; Emslie et al., 2000]. Таким образом, исследование линейной поляризации во вспышках является независимым способом изучения поведения ускоренных частиц в солнечной атмосфере.

Инициатором и пионером наблюдений ударной поляризации в солнечных вспышках является Эну (J.C. Hénoux). Линейная поляризация во вспышках была обнаружена по фильтрограммам, покрывающим всю вспышку [Hénoux, Semel, 1981; Emslie et al., 1996; Vogt et al., 2000], исследовалась в хромосферной линии UV [Vogt, Hénoux, 1996; 1999], а также по спектральным наблюдениям, полученным на телескопе THEMIS [Hénoux, Carlicky, 2003; Hénoux et al., 2004; Xu et al., 2005].

На Большом солнечном вакуумном телескопе (БСВТ) в Байкальской астрофизической обсерватории [Skomorovsky, Firstova, 1996] в течение нескольких лет проводятся наблюдения линейной поляризации водородных линий во вспышках, в результате чего в нескольких вспышках были получены свидетельства ударной поляризации [Firstova, Boulatov, 1996; Firstova et al., 1997; Firstova, Kleshchikova, 2002].

Таким образом, разными исследователями на разных телескопах получены доказательства существования линейной поляризации в солнечных вспышках, хотя они малочисленны. В то же время в результате наблюдения 30 вспышек с помощью высокоточного поляриметра [Bianda et al., 2005] ударная поляризация не была обнаружена.

Возможности БСВТ позволяют проводить наблюдения линейной поляризации с высоким пространственным, временным и спектральным разрешением. 23 июля 2002 г. нам удалось подробно проанализировать вспышку балла 2B/X4.8. Предварительная обработка спектрограмм показала, что по крайней мере в начале вспышки ударная поляризация существует [Firstova et al., 2003]. Затем мы более подробно обработали около половины из 250 спектрограмм этой вспышки, и полученные результаты

опубликовали в работе [Firstova et al., 2008]. В этой работе были представлены свидетельства существования ударной поляризации с необычайно высокой степенью, распределение параметров Стокса в пространстве и другие характеристики.

К сожалению, обширные данные, полученные в этой работе, имели одну систематическую ошибку, которая привела к тому, что все результаты оказались неверными. Оказалось, что сопоставление двух спектров в обыкновенном и необыкновенном лучах было сделано с ошибкой в два пикселя. Несмотря на то, что два пикселя составляют $0.34''$ на Солнце, а реальное разрешение во время наблюдения вспышки $1-1.5''$, при высоких наблюдаемых в этой вспышке градиентах интенсивности такая ошибка привела к появлению ложной поляризации. Первичная выборочная проверка при правильном сопоставлении положений двух спектров привела к выводу, что поляризация в данной вспышке скорее отсутствует. Однако мы решили исследовать заново данные наблюдений, поскольку собственно полученный материал спектрополяриметрических наблюдений интересной солнечной вспышки довольно обширен, и им не стоит пренебрегать.

В разделе 1 кратко описаны инструментарий и метод спектрополяриметрических наблюдений вспышек. В разделе 2 проведен небольшой анализ наших ошибок из работы [Firstova et al., 2008], рассматривается возникновение ложного значения параметров Стокса при неточном отождествлении солнечных объектов по пространству, особенно в случае высокого градиента интенсивности. В разделе 3 приведена методика использования фотометрических разрезов вдоль щели спектрографа, которая позволила если не обнаружить, то, по крайней мере, оценить возможность обнаружения свидетельств линейной поляризации. Этот метод использовался для всех спектрограмм, хотя понятно, что в затухающей части вспышки маловероятно обнаружить поляризацию. В разделе 4 проводились разрезы вдоль дисперсии, по несколько разрезов в каждом вспышечном узле. Раздел 5 посвящен обсуждению результатов и выводам.

1. Метод спектрополяриметрических наблюдений вспышек на БСВТ

Кратко повторим условия наблюдения вспышки. Теоретическое пространственное разрешение БСВТ составляет $0.3''$; в зависимости от атмосферных условий эта величина в реальности колеблется в пределах $1-3''$. Размер изображения Солнца на щели спектрографа составляет 400 мм, следовательно, 1 мм на щели соответствует $\sim 5''$. Ширина щели при исследовании вспышек была равна $0.35''$. Спектрополяриметрические наблюдения проводились с помощью ПЗС-камеры TEK 512×512 производства Princeton Instruments в линии $\text{H}\alpha$. В одном пикселе ПЗС-камеры содержится $0.17''$ и 0.0197 \AA .

Во время наблюдения вспышки, обсуждаемой в этой статье, слежение за процессом вспышки производилось визуально по изображению Солнца, полу-

ченному от зеркальной щели через интерференционно-поляризационный фильтр в линии $\text{H}\alpha$ с полосой пропускания 0.5 \AA .

За щелью спектрографа был установлен ромбоэдр, разводящий обычный и необычный лучи и позволяющий одновременно регистрировать солнечный спектр в двух взаимно ортогональных поляризациях. Во время наблюдения на щель спектрографа помещались наиболее интересные (часто просто более яркие) участки вспышки, и производилось несколько экспозиций поочередно для двух положений $\lambda/2$ пластиинки (0 и 22.5°). В первом случае определялся параметр Стокса Q . В верхней полоске спектра регистрировалось излучение, поляризованное вдоль щели спектрографа, а в нижней – поперек щели (вдоль дисперсии). Во втором случае в верхней и нижней полосках спектра регистрируется излучение, поляризованное соответственно под углами $\pm 45^\circ$, что давало возможность определить параметр Стокса U . Обычно временной интервал между спектрограммами (нечетными для определения параметра Q и четными для U) составлял 6–10 с.

На рис. 1 показано положение щели спектрографа по отношению к направлению на центр солнечного диска. Можно видеть, что при наличии линейной поляризации во время наблюдения данной вспышки значения Q и U могут быть близки друг другу. Кроме того, если линейная поляризация совпадает с проекцией вертикально падающего пучка заряженных частиц, то направление поляризации будет радиальным. В нашем случае значения Q и U будут отрицательными. Радиальное направление поляризации принято соотносить с положительными значениями параметров Стокса, а перпендикулярное – с отрицательными. Поэтому мы поменяли знаки параметров Стокса, полученных нами из наблюдений. Заметим, что радиальная поляризация возникает при малых значениях энергии частиц падающего пучка, а поляризация, перпендикулярная этому направлению (тангенциальная), – при высоких.

2. Влияние градиента интенсивности при определении параметров Стокса спектрополяриметрическим методом

В настоящем разделе показано, как неаккуратное совмещение положения одного участка Солнца в двух спектрах ($I+S$) и ($I-S$) привело к значительным ошибкам в работе [Firstova et al., 2008].

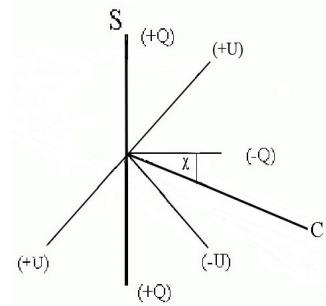


Рис. 1. Определение ориентации плоскостей поляризации в системе спектрографа БСВТ: S – положение щели спектрографа, C – направление на центр солнечного диска.

Поскольку в солнечном спектре, полученном с помощью матрицы Princeton Instruments, один пиксель составляет $0.17''$, а реальное разрешение $\approx 1.5''$, можно предположить, что погрешность в совмещении участков вспышки, равная приблизительно $\pm 1-2$ пикселя, не должна привести к возникновению ложного сигнала поляризации. При обработке спектрограмм перед проведением разрезов вдоль дисперсии измерялось расстояние между двумя спектрами, поскольку границы спектров были более резкими и содержали меньше пикселей, чем границы солнечных деталей. Естественно, для всей серии снимков, полученных во время наблюдения одной вспышки, положение матрицы не менялось, поэтому такие измерения были проведены всего несколько раз, а не для каждой спектрограммы.

В настоящей работе, чтобы проверить точность совмещения двух спектров, мы провели фотометрический разрез, усредненный по семи пикселям (0.059 \AA) в центре линии $\text{H}\alpha$ и в удаленном крыле линии (рис. 2). Значения интенсивности по оси ординат зарегистрированы на ПЗС-камере.

Наш метод минимизации инструментальной поляризации спектрополяриметрических исследований состоит в том, что интенсивность в центре линии нормируется на интенсивность непрерывного спектра в каждом спектре:

$$I_{\text{up}} = I_{\text{up}}^{\text{H}\alpha} / I_{\text{up}}^{\text{con}}; I_{\text{down}} = I_{\text{down}}^{\text{H}\alpha} / I_{\text{down}}^{\text{con}}. \quad (1)$$

Пример нормировки и совмещения положения солнечных объектов на двух спектрах, показанных на рис. 2, представлен на рис. 3. По оси ординат представлена интенсивность в центре линии, нормированная на интенсивность непрерывного спектра (относительная интенсивность в центре линии).

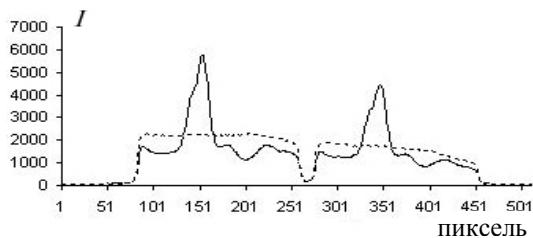


Рис. 2. Ход интенсивности $I_{\text{up}}^{\text{H}\alpha}$ и $I_{\text{down}}^{\text{H}\alpha}$ вдоль щели спектрографа в центре линии $\text{H}\alpha$ (сплошная линия) и в удаленном крыле $I_{\text{up}}^{\text{con}}$ и $I_{\text{down}}^{\text{con}}$ (штриховая линия).

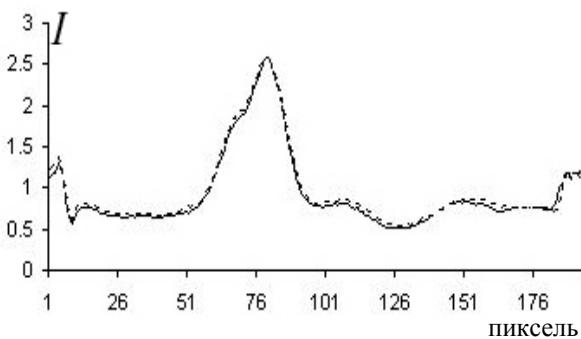


Рис. 3. Ход интенсивности вдоль щели спектрографа (сплошная линия) I_{up} и I_{down} (штриховая линия).

При наилучшем совмещении расстояние между спектрами составило 193 пикселя, ранее это расстояние считалось равным 195 пикселям [Сыроватский, Шмелева, 1972]. На следующих рисунках показано, каким образом ошибка в два пикселя при совмещении приводит к ложному результату поляризации. Исходными данными послужили фотометрические разрезы, представленные на рис. 2, 3.

На рис. 4 показано, что при одном и том же значении I_{down} значения I_{up} существенно различаются и зависят от того, насколько сдвинуты спектры друг относительно друга. Это приводит к ложному значению параметра Стокса Q/I . Так, в левой части вспышечного узла при совмещении через 195 пикселей в точке пересечения двух прямых $Q/I=-10.8 \%$, а при совмещении через 191 пиксель $Q/I=+6.1 \%$.

Можно заметить, что при низких и при максимальных значениях интенсивности градиент интенсивности невысок. В этом случае различие между I_{up} и I_{down} гораздо меньше, следовательно, ошибка при определении параметра Стокса также будет значительно меньше. Это объясняет некоторые ошибочные закономерности, которые были получены в предыдущей работе. Так, например, из-за того что было проведено совмещение спектров на расстоянии 195 пикселей вместо 193, максимальные значения параметра Стокса регулярно во всех вспышечных узлах были сдвинуты в левую часть от максимальной интенсивности в узле.

Как видно из рис. 4, коэффициент корреляции между I_{up} и I_{down} можно использовать для точного определения расстояния между положениями двух спектров. Мы полагаем, что линейная поляризация солнечного происхождения отсутствует на спектрограммах, подобных представленным на рис. 2. Следовательно, полученная из наблюдений [Firsov et al., 2008] поляризация является ложной. Вслед за авторами [Xu et al., 2005] запишем для ложного сигнала:

$$S_g = \frac{(I + S) - (I - S)}{(I + S) + (I - S)} = \frac{I_{\text{up}} - I_{\text{down}}}{I_{\text{up}} + I_{\text{down}}}. \quad (2)$$

Выбирая минимальный ложный сигнал S_g , мы определили верное положение смещения второго спектра относительно первого, равного 193 пикселям (рис. 5). Так, средняя по кадру ложная поляризация $S_g=0.048 \%$ при совмещении двух спектров через 193 пикселя, $S_g=0.941 \%$ при смещении на 195 пикселях. Небольшой ложный сигнал поляризации объясняется, по-видимому, двумя причинами.

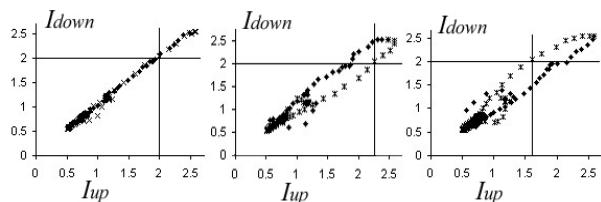


Рис. 4. Соотношение I_{up} и I_{down} при расстоянии между двумя спектрами, равном 193, 195 и 191 пикселям. Ромбами отмечены значения интенсивности в правой части вспышечного узла (на рис. 3), а звездочками – в левой части.

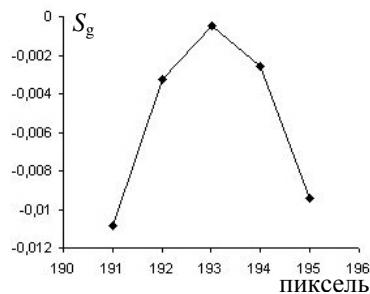


Рис. 5. Зависимость степени ложной поляризации S_g от величины смещения второго спектра относительно первого.

Первая состоит в недоучете инструментальной поляризации. Нормировкой профилей к непрерывному спектру мы исключаем инструментальное влияние параметра I на Q и U , но не влияние Q и U друг на друга. Вторая причина связана с высоким градиентом интенсивности, который наблюдается на многих спектрограммах, а точное различие положений двух спектров, по-видимому, составляет нецелое количество пикселей.

Мы проверили, как ошибки совмещения (выраженные в пикселях или в дуговых секундах) меняются в зависимости от градиента интенсивности при заданной погрешности ΔQ . $\Delta Q=1-2\%$ соответствует $\Delta I=I_{\text{up}}-I_{\text{down}}=\pm 0.07$ для реальных значений и градиентов интенсивности в этой вспышке. Было использовано 18 спектрограмм вспышки. Оказалось, что при небольших градиентах интенсивности ошибка при совмещении в два и даже три пикселя не выйдет за пределы ΔQ . На рис. 6 по оси абсцисс отложены значения градиента интенсивности, а по оси ординат – погрешность p при совмещении, выраженная в пикселях. Несмотря на большой разброс, зависимость совмещения от градиента интенсивности четко видна. Кроме того, поскольку при $p=0$ и $p=1$ значения градиента интенсивности примерно совпадают, наиболее верное совмещение, вероятно, было бы не через 193 пикселя, а через значение между 193 и 194 пикселями.

3. Поиск свидетельств линейной поляризации по фотометрическим разрезам вдоль щели спектрографа

Метод определения линейной поляризации, примененный в работе [Firstova et al., 2008], состоит в том,

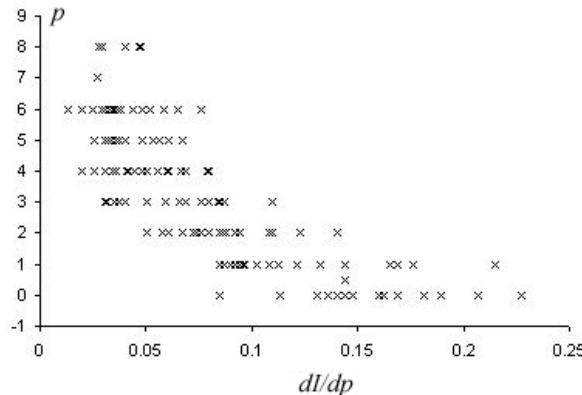


Рис. 6. Зависимость погрешности от градиента интенсивности при совмещении двух полосок спектра.

что на каждой спектрограмме выполняется по 10–12 разрезов вдоль дисперсии. Учитывая то, что в этой вспышке получено 250 спектрограмм, а также то, что все случайно выбранные спектрограммы дали отрицательный результат, вначале было проведено несколько процедур, по которым оценили некоторую вероятность наличия поляризации на отдельных спектрограммах.

Согласно рис. 3 и 4, коэффициент корреляции между I_{up} и I_{down} на спектрограмме, где нет линейной поляризации, близок единице и уменьшается при наличии поляризации. На рис. 7, где представлены коэффициенты корреляции по всем спектрограммам, видно, что в самом начале наблюдения вспышки можно ожидать отличные от нуля значения линейной поляризации.

Нами применен также другой способ выбора спектрограмм, на которых ожидаются признаки линейной поляризации. Для каждого кадра было получено среднее значение $Q(U)$ по формуле (2). Напомним, что при регистрации спектров данной вспышки направление на центр Солнца таково, что наблюдавшиеся значения Q и U при наличии линейной поляризации должны быть приблизительно равны. Каждая точка на рис. 8 означает среднее по кадру значение параметров Стокса. Сплошной прямой отмечено значение среднего по всем кадрам, штриховой – значения $\pm 1\sigma$ от среднего.

Как отмечалось, при наблюдениях щель спектрографа устанавливалась на какой-либо яркий участок вспышки, и в этом участке производилось несколько экспозиций. За время наблюдения вспышки на 258 спектрограммах было зарегистрировано 23 узла. На рис. 9 даны фотометрические разрезы двух узлов, полученных на нескольких спектрограммах, экспонированных последовательно.

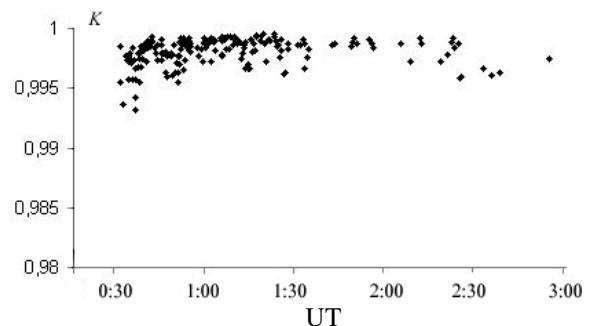


Рис. 7. Коэффициенты корреляции между I_{up} и I_{down} .

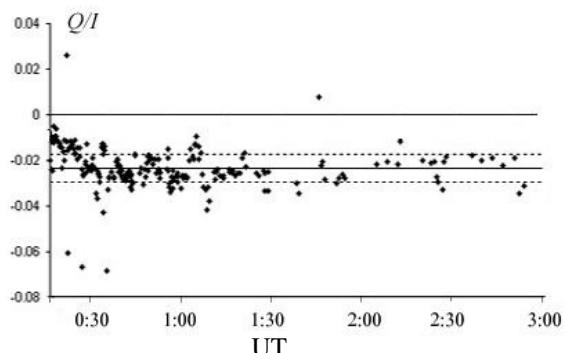


Рис. 8. Средние по кадру значения параметров Стокса в зависимости от времени наблюдения.

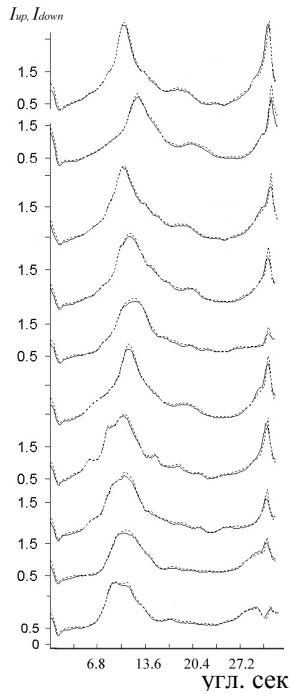


Рис. 9. Фотометрические разрезы узла вспышки, наблюдавшегося в течение 1 мин 50 с.

Для каждого узла мы рассмотрели зависимость полученных из наблюдений $I_{\text{up}} - I_{\text{down}}$ от $I_{\text{up}} + I_{\text{down}}$. На рис. 10 показаны примеры такой зависимости для двух узлов. Прямые линии построены по формуле

$$I_{\text{up}} - I_{\text{down}} = (I_{\text{up}} - I_{\text{down}})(Q/I \pm 3\sigma), \quad (3)$$

где Q/I – среднее значение параметров Стокса, полученных по всем кадрам, равное -0.02409 . Узел, показанный на левой панели, получен на стадии затухания вспышки на 30 мин позднее, чем узел на правой панели. Если для какого-либо узла точки выходят за рамки $\pm 3\sigma$, в этих узлах, можно надеяться, есть линейная поляризация. На правом рисунке видно, что довольно много точек выходит за пределы $\pm 3\sigma$.

Для всех узлов были посчитаны отношения R количества точек, вышедших за пределы коридора, к общему количеству точек. Эти результаты представлены на рис. 11.

Таким образом, исследование параметров Стокса по фотометрическим разрезам показало, что возможно наличие линейной поляризации в самые начальные моменты наблюдения вспышки. Поскольку фотометрические разрезы захватывали только очень узкую центральную часть линии Нα (7 пикселей ≈ 0.14 Å), в следующей главе проводится поиск линейной поляризации по сопоставлению разрезов, сделанных вдоль дисперсии в двух ортогонально поляризованных полосах спектра.

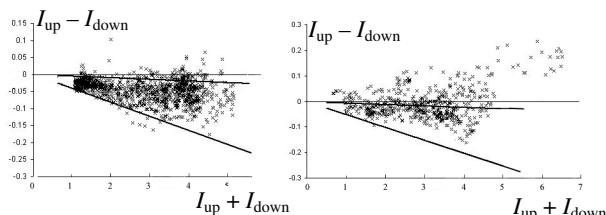


Рис. 10. Зависимость $I_{\text{up}} - I_{\text{down}}$ от $I_{\text{up}} + I_{\text{down}}$ для двух узлов вспышки.

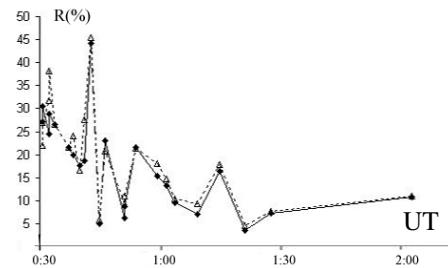


Рис. 11. Временной ход отношения R . Сплошной линией показаны результаты, полученные при использовании спектрограмм с нечетными номерами (Q), штриховой линией – с четными номерами (U).

4. Поиск свидетельств линейной поляризации по разрезам вдоль дисперсии

Разрезы вдоль дисперсии проводились аналогично тому, как это делалось в работе [Firsov et al., 2008], но при этом расстояние между полосами спектра принималось равным 193 пикселям. На каждом кадре в обоих спектрах было проведено в среднем по 12 разрезов с шагом 5 пикселей (0.85"), усреднение вдоль щели проводилось также по 5 пикселям. Обработка спектрограмм проводилась с помощью интерактивной программы IDL. Вначале в каждом разрезе определялись значения интенсивности в непрерывном спектре $I_{\text{up}}^{\text{con}}$ и $I_{\text{down}}^{\text{con}}$, затем записывался ход интенсивности в линии Нα I_{up}^{λ} и $I_{\text{down}}^{\lambda}$. В результате определялся ход параметров Стокса I , Q/I и U/I вдоль дисперсии:

$$I = 1/2 \left(I_{\text{up}}^{\lambda} / I_{\text{up}}^{\text{con}} + I_{\text{down}}^{\lambda} / I_{\text{down}}^{\text{con}} \right), \quad (4)$$

$$Q/I = U/I = \\ = \left(I_{\text{up}}^{\lambda} / I_{\text{up}}^{\text{con}} - I_{\text{down}}^{\lambda} / I_{\text{down}}^{\text{con}} \right) / \left(I_{\text{up}}^{\lambda} / I_{\text{up}}^{\text{con}} + I_{\text{down}}^{\lambda} / I_{\text{down}}^{\text{con}} \right).$$

На рис. 12 показаны значения $I_{\text{up}}^{\lambda} / I_{\text{up}}^{\text{con}}$ и $I_{\text{down}}^{\lambda} / I_{\text{down}}^{\text{con}}$, а также параметров Стокса Q/I вдоль дисперсии в двух участках вспышки. Справа показан пример отсутствия линейной поляризации в данном участке вспышки. Следует заметить, что в отличие от работы [Firsov et al., 2008], в подавляющем большинстве разрезов, полученных по спектрограммам в течение вспышки, наблюдалась именно такая ситуация, т. е. отсутствие линейной поляризации.

Как было отмечено выше, изображение вспышки передвигалось по щели от одного узла к другому в зависимости от того, где эмиссия была, как нам казалось, выше и развитие вспышки интенсивнее. Так, через 1 мин 50 с после начала наблюдения изображение несколько переместили. Прежде всего, это было связано с тем, что в ИПФ был виден только один узел, несмотря на то, что на экране камеры мы видели спектры двух узлов вспышки. Следовательно, в одном из узлов в центральной части линии Нα было самообращение. После обработки оказалось, что первые 12 кадров, полученные в первые моменты наблюдений за 1 мин 50 с, т. е. там, где было центральное обращение линии, явились чуть ли не единственными, дающими основание говорить о существовании линейной поляризации в этой вспышке.

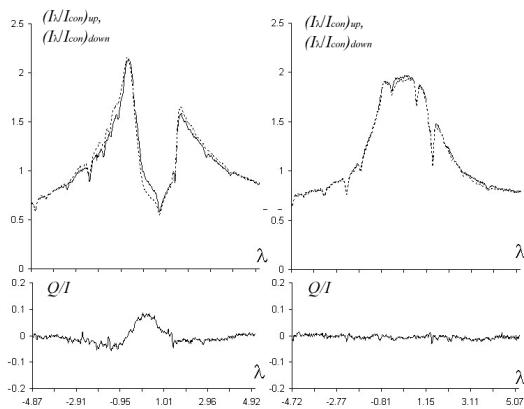


Рис. 12. На верхнем графике показаны значения $I_{\text{up}}^{\lambda} / I_{\text{up}}^{\text{con}}$ (сплошная линия) и $I_{\text{down}}^{\lambda} / I_{\text{down}}^{\text{con}}$ вдоль дисперсии в двух участках вспышки. На нижнем графике – параметр Стокса Q/I .

В связи с этим остановимся на первых 12 кадрах, а более подробно – на первых двух, информация о которых представлена на рис. 13.

Первые 12 спектрограмм получены без установки $\lambda/2$ пластиинки, т. е. определялся только параметр Стокса Q . Как видно, отличные от нуля значения параметра Стокса наблюдаются только в узле с сильным центральным самообращением. В ярком эмиссионном узле поляризация отсутствует. На рис. 14 представлены графики, подобные нижним рисункам на рис. 13 для всех оставшихся спектрограмм, полученных в первые минуты наблюдения.

Различие между отдельными графиками вызвано, по-видимому, двумя причинами: собственным быстрым развитием вспышки и дрожанием изображения. Из-за дрожания изображение немного смещается, в результате чего меняется картина центрального само-

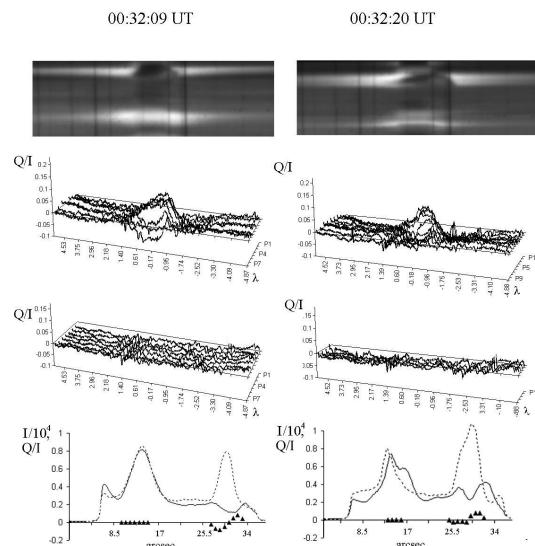


Рис. 13. В верхней части показан спектр в области $\text{H}\alpha$ в 0:32:09 и 0:32:20 UT (только один спектр ($S+I$)). Ниже даны значения Q/I последовательно для узла с центральным самообращением и эмиссионного узла. На нижних графиках представлены результаты фотометрических разрезов вдоль щели: сплошной линией – интенсивность вдоль центра линии $\text{H}\alpha$, пунктиром – интенсивность вдоль крыла на расстоянии $\sim 1 \text{ \AA}$ от центра $\text{H}\alpha$, треугольниками – значения Q/I .

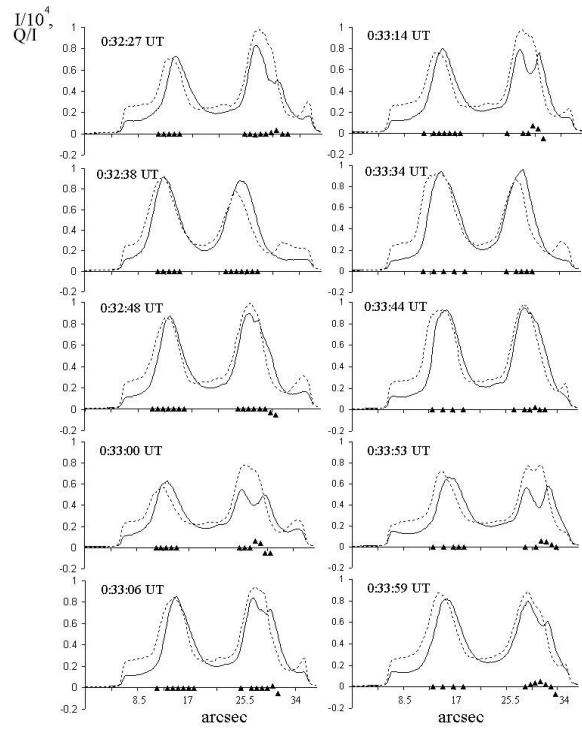


Рис. 14. Фотометрические разрезы вдоль щели: сплошные линии – интенсивность в центре линии $\text{H}\alpha$, пунктиры – интенсивность крыла на расстоянии $\sim 1 \text{ \AA}$ от центра линии $\text{H}\alpha$, треугольники – значения Q/I .

обращения и поляризации. Так, мы видим, что на спектрограмме, полученной через 30 с после первой, самообращение, как и поляризация, отсутствуют, а затем вновь появляются. Более подробно ход относительной интенсивности центрального самообращения и параметра Стокса Q/I вдоль щели на этих спектрограммах представлен на рис. 15. Сплошной жирной линией показаны значения для момента 0:32:09 UT, тонкой сплошной линией – для момента

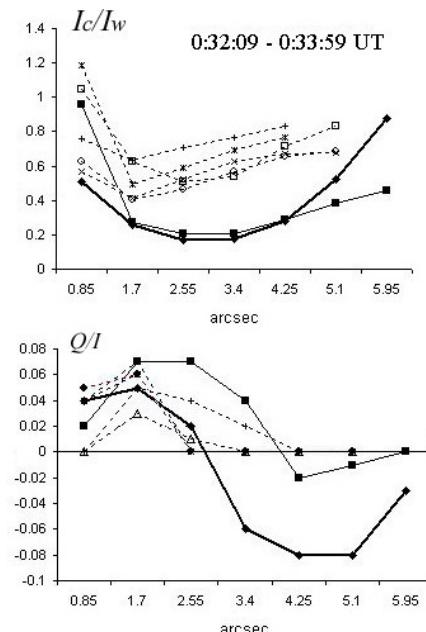


Рис. 15. Отношение интенсивности в центре линии к интенсивности в крыле вдоль щели спектрографа для всех спектрограмм узла (верхняя панель); Q/I в тех же точках (нижняя панель).

0:32:20 UT, штриховой – для остальных моментов.

Можно видеть, что за две минуты картина существенно изменилась, это касается как глубины центрального самообращения, так и поведения параметра Стокса Q/I . В первый момент времени наблюдалась также отрицательная поляризация, чего не было на последующих спектрограммах.

Как оказалось, первые две спектрограммы являются наиболее интересными с точки зрения линейной поляризации, поэтому они были повторно обработаны. Разрезы производились через 3 пикселя ($0.51''$) с усреднением также по трем пикселям. На рис. 16 показан ход Q/I вдоль щели с шагом $0.51''$ для первых двух спектрограмм. Кроме того, используя положение щели относительно направления на центр Солнца (см. рис. 1), можно приблизительно получить значение степени поляризации по данным Q/I :

$$P = \frac{Q/I}{\cos 2\chi} \quad (6)$$

или, если считать, что $Q/I \approx U/I$, то

$$P = \sqrt{(Q/I)^2 + (U/I)^2} \approx \sqrt{2} Q/I. \quad (7)$$

Таким образом, на рис. 16 представлены максимальная радиальная степень поляризации, достигающая на одном из разрезов 14 %, и максимальная тангенциальная степень поляризации $\approx 13\%$ в первые минуты наблюдения этой вспышки.

Кроме этого короткого периода наблюдения было получено еще несколько спектрограмм, на которых также были обнаружены свидетельства линейной поляризации. Следующий случай ненулевого значения Q/I был зарегистрирован на одном из разрезов в 0:36:49 UT (рис. 17, левая панель). Через определенный промежуток времени (в 0:38:13 UT) зарегистрирована значительная величина степени поляризации (рис. 17, правая панель), причем на этой спектрограмме ненулевое значение Q/I было отмечено еще на четырех разрезах. Во всех случаях, как это видно на рис. 17, появление центрального самообращения совпадает со значительными величинами параметра Стокса Q/I .

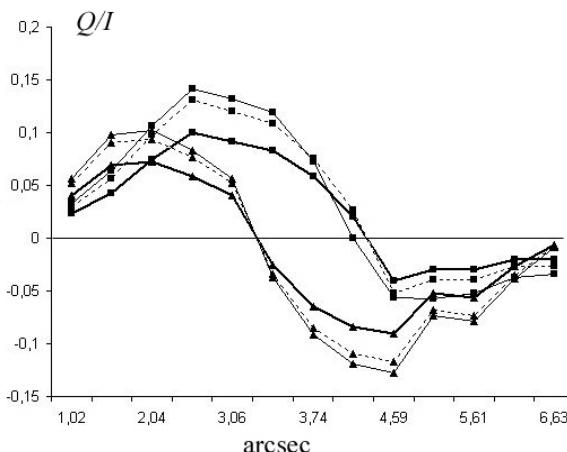


Рис. 16. Ход значений Q/I (толстая линия) вдоль щели спектрографа для первого кадра (треугольники) и для второго (квадраты). Штриховая линия – значения P , вычисленные по формуле (6), сплошная тонкая линия – по формуле (7).

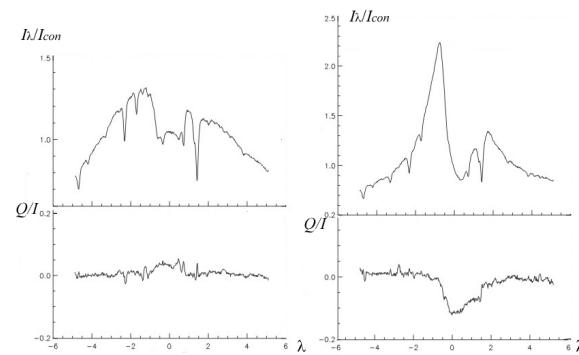


Рис. 17. Поведение параметров Стокса I и Q/I вдоль дисперсии в 0:36:49 (слева) и 0:38:13 UT (справа).

Ниже представлена таблица случаев обнаружения линейной поляризации во вспышке помимо первых 12 спектрограмм, полученных в начальные моменты наблюдения вспышки. Из таблицы видно, что из 16 разрезов (0:36:49 UT) поперек узла вспышки только в четырех имеются свидетельства поляризации. Значения в последнем столбце получались умножением числа разрезов на расстояние между ними. Как выше объяснялось, знаки перед параметрами Стокса в таблице обратны полученным из наблюдений.

Номер спектрограммы	Момент наблюдения (UT)	Полное число разрезов	Число разрезов с $Q/I \neq 0, U/I \neq 0$	$Q/I, U/I$	Размер области с поляризацией
30	0:36:49	16	4	$Q/I = -0.04$	$3.4''$
36	0:38:13	7	4	$Q/I_{\max} = +0.12$	$3.4''$
43	0:39:24	17	4	$U/I_{\max} = +0.07$	$3.4''$
62	0:44:14	9	1	$Q/I_{\max} = +0.03$	$0.85''$
63	0:44:22	9	3	$U/I_{\max} = +0.04$	$2.55''$
64	0:44:28	11	4	$Q/I_{\max} = +0.04$	$3.4''$
65	0:44:36	11	3	$U/I_{\max} = +0.04$	$2.55''$

Отсутствие в таблице соседних кадров означает, что там не обнаружено свидетельств линейной поляризации, при том, что на кадрах 35 и 37, например, контуры интенсивности очень похожи на такие на кадре 36. Обнаружено, что самая высокая степень поляризации присутствует на кадре 36, т. е. через 10 мин после начала вспышки.

Как было сказано выше, эта вспышка уже обрабатывалась [Firsova et al., 2003] еще до подробного анализа [Firsova et al., 2008]. Тогда не проводилось столько разрезов на каждой спектрограмме, как на этот раз. Однако тогда тоже были получены свидетельства линейной поляризации на нескольких кадрах в первые моменты наблюдения, а также на 43-м кадре. Во всех случаях линейной поляризации в [Firsova et al., 2003] также наблюдалось центральное самообращение в линии Na .

Всего в настоящем исследовании было обработано 53 спектрограммы, полученные в начальной стадии вспышки, в которых было проведено 664 разреза вдоль дисперсии. В отличие от результатов

[Firstova et al., 2008], только в 78 разрезах были получены отличные от нуля значения параметров Стокса; это составляет примерно 12 % от всех выполненных разрезов. С другой стороны, поляризация была обнаружена на 16 спектрограммах из полученных 250 спектрограмм этой вспышки, что составляет всего 6 %.

На рис. 18 показаны гистограммы, дающие представление о том, какие значения параметров Стокса наблюдались в этой вспышке, и показан наиболее характерный размер участков вспышки, в которых локализовалась поляризация.

5. Заключение и выводы

Главной задачей настоящей работы было выяснить, существуют ли проявления линейной поляризации в солнечных вспышках, поскольку единого мнения по этому вопросу нет. Кроме того, нам нужно было проверить данные по поляризации в этой конкретной вспышке, поскольку ранее была допущена ошибка при обработке спектрограмм. Показано, что в начальные моменты вспышки поляризация существует, и она обычно происходит одновременно с кратковременным появлением самопоглощения в центре линии $\text{H}\alpha$. Ранее Xu Z. и др. [Xu et al., 2005] также отметили, что поляризация появляется обычно в том случае, когда наблюдается центральное самообращение линий. Заметим также, что Каспарова и др. [Kasparova et al., 2005] показали, что источники жесткого рентгена располагаются на внешних краях $\text{H}\alpha$ -эмиссии, а не в самой яркой части вспышки. Но если сопоставлять ядра в рентгене с изображением вспышки в центре линии $\text{H}\alpha$ (с полосой пропускания фильтра 0.5\AA), то это участки с сильным центральным провалом (см. рис. 13) и максимальной поляризацией. Появление центрального провала является вторым свидетельством воздействия потока ускоренных электронов на хромосферу во время вспышки. Правда, теоретический расчет профилей $\text{H}\alpha$ при использовании разных моделей хромосферы вспышки с учетом влияния нетепловых электронов [Canfield, 1974; Kostiuk, 1976; Brown et al., 1978; Canfield, 1983; Ricchiazzi, Canfield, 1984; Fang et al., 1993] часто приводит к большим центральным провалам.

Кроме того, имеются и другие, менее важные свидетельства влияния пучков электронов на хромосферу во время этой вспышки: это кратковременность проявления обоих эффектов в центре линии $\text{H}\alpha$ (поляризация и сильное центральное самопоглощение) и размеры области, где они происходят. На рис. 19 показано временное развитие рентгеновских

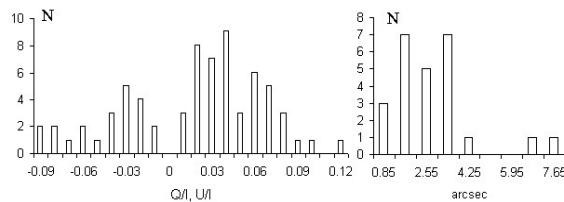


Рис. 18. Полное количество наблюдаемых параметров Стокса с учетом их величины (левая панель); наиболее характерные размеры расположения поляризации (правая панель).

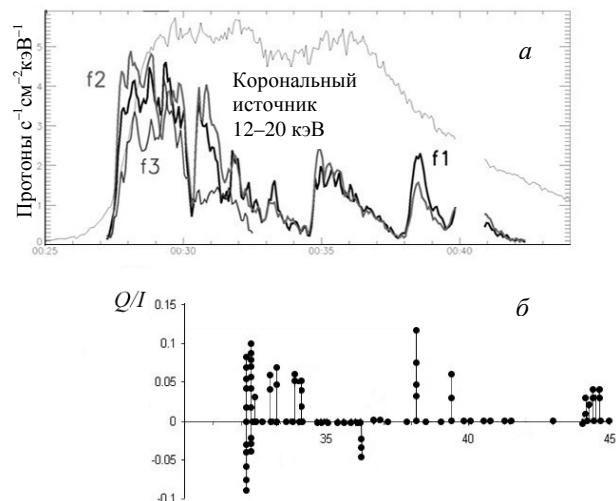


Рис. 19. Данные RHESSI о развитии вспышки (а) и временной ход параметра Стокса (б).

ядер, полученное по данным RHESSI [Krucker et al., 2003].

Здесь же представлен временной ход параметра Стокса во время начальной стадии вспышки, полученный по нашим наблюдениям. Заметим, что на каждой спектрограмме с нулевой поляризацией было выполнено несколько разрезов.

На спектрограммах (кроме первых двух) все параметры Q/I положительны, т. е. поляризация имеет радиальное направление. Это говорит о низкой энергии электронов, т. е. энергия большинства электронов, достигших хромосферу, не превышает 200 эВ ([Hénoüx et al., 2004], см. рис. 1). Исключение составляют первые две спектрограммы, полученные с интервалом 11 с. На каждой из них направление поляризации меняется поперек вспышечного узла от $Q/I = -10\%$ ($P_{\parallel} \approx 14\%$) до $Q/I = +9\%$ ($P_{\perp} \approx 14\%$). Можно предположить, что в момент получения этих спектрограмм в пучке присутствовали электроны с энергией от нескольких десятков эВ до 1 кэВ и более.

Исследование линейной поляризации на БСВТ можно проводить с высоким пространственным и спектральным разрешением. Недостаток наблюдения состоит в том, что поляризационная оптика при спектральных наблюдениях не покрывает всю вспышку, и о наличии поляризации мы можем судить только по тем узлам вспышки, которые попадают на щель спектрографа. Поэтому мы не можем говорить об эволюции поляризации, как, например, [Xu et al., 2005], и сопоставлять ее развитие с данными о вспышке, полученными в других длинах волн. Однако даже такие эпизодически полученные данные позволяют обнаружить линейную поляризацию во вспышке и найти некоторые характерные особенности поляризации и сопутствующие ей явления. На основании подробного анализа спектрополяриметрических наблюдений протонной вспышки в линии $\text{H}\alpha$ сделаны следующие выводы.

1. В большинстве разрезов, сделанных вдоль дисперсии, не обнаружено свидетельств линейной поляризации в линии $\text{H}\alpha$.
2. В некоторых случаях (78 из 664) в самом начале вспышки наблюдаются кратковременные (десятки

секунд), мелкомасштабные (2–4'') случаи ненулевых значений параметров Стокса Q/I и U/I (2–6 %).

3. Проявления линейной поляризации обычно происходят в узлах с самопоглощением в центре линии $\text{H}\alpha$.

4. Всего на трех из 250 спектрограмм есть разрезы, где $Q/I \geq 10\%$, в этом случае $P_{\perp} \approx 15\%$. При этом на первых двух спектрограммах (00:32:09 и 00:32:20 UT) поляризация с такими высокими значениями имеет как радиальное, так и тангенциальное направление. Размер участков во вспышечном узле, где располагались профили $\text{H}\alpha$ с самопоглощением, больше, чем во всех других случаях, и составляет 5–6''.

5. Учитывая сказанное во Введении и разделах 1–3, можно понять сложность обнаружения линейной поляризации во вспышках. В этом случае легче сделать вывод об отсутствии этого явления, чем о его наличии. По-видимому, немаловажное значение имеет пространственное разрешение телескопа, поскольку размеры участков вспышки, где возникает поляризация, очень малы. Также очень важно зарегистрировать момент начала вспышки.

6. Наблюдавшаяся линейная поляризация интерпретируется как ударная поляризация, вызванная бомбардировкой хромосферы пучками электронов во время вспышки. Степень максимальной радиальной и тангенциальной поляризации на первых двух спектрограммах позволяет предположить, что энергия электронов, достигших хромосферы, росла от нескольких десятков электронвольт до 1 кэВ и более.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Сыроватский С.Т., Шмелева О.П. Нагрев плазмы быстрыми электронами и нетепловое рентгеновское излучение при солнечных вспышках // Астрон. журн. 1972. Т. 49, Вып. 2. С. 334–347.

Bianda M., Benz A.O., Stenflo J.O., et al. Absence of linear polarization in $\text{H}\alpha$ emission of solar flares // Astron. Astrophys. 2005. V. 434. P. 1183–1189.

Brown J.C. The temperature structure of chromospheric flares heated by non-thermal electrons // Solar Phys. 1973. V. 31. P. 143–170.

Brown J.C., Canfield R.C., Robertson M.N. $\text{H}\alpha$ profiles from electron-heated solar flares // Ibid. 1978. V. 57. P. 399–408.

Canfield R.C. Theoretical chromospheric flare spectra // Ibid. 1974. V. 34. P. 339–348.

Canfield R.C., Gunkler T.A. $\text{H}\alpha$ spectral signatures of solar flare nonthermal electrons, conductive flux, and coronal pressure // Astrophys. J. 1984. V. 282. P. 296–307.

Emslie A.G., Miller J.A., Vogt E., et al. $\text{H}\alpha$ -polarization during a well-observed solar flare: Proton energetics and implications for particle acceleration processes // Ibid. 2000. V. 542. P. 513–520.

Fang C., Hénoux J. C., Gan W.Q. Diagnostics of non-thermal processes in chromospheric flares. I. $\text{H}\alpha$ and CaII K line profiles of an atmosphere bombarded by 10–500 keV electrons // Astron. Astrophys. 1993. V. 274. P. 917–922.

Firstova N.M., Boulatov A.V. Characteristics of the linear polarization observed in the 16 May 1991 solar flare // Solar Phys. 1996. V. 164. P. 361–372.

Firstova N.M., Hénoux J.-C., Kazantsev S.A., Bulatov A.V. Spectropolarimetric sensing of energy deposition into the chromosphere during solar flare. I. Observations // Ibid. 1997. V. 171. P. 123–174.

Firstova N.M., Kashapova L.K. Observation of the linear polarization in the flare with a powerful surge // Astron. Astrophys. 2002. V. 388. P. L17.

Firstova N.M., Xu Z., Fang C. $\text{H}\alpha$ line polarization in the major solar flare of 2002 July 23. I. Observations and data analysis // Astrophys. J. 2003. V. 595. P. L131–L133.

Firstova N.M., Polyakov V.I., Firstova A.V. Impact linear polarization of the $\text{H}\alpha$ line observed in a proton flare with the Irkutsk Large Solar Vacuum Telescope // Solar Phys. 2008. V. 249. P. 53–73.

Fletcher L., Brown J.C. Solar flare $\text{H}\alpha$ impact polarization from high energy electrons? // Astron. Astrophys. 1995. V. 294. P. 260–269.

Heinzel P. Understanding solar flares from optical observations: How do particle beams affect the lower atmosphere? // Adv. Space Res. 2003. V. 32. P. 2393–2402.

Hénoux J.-C., Semel M. $\text{H}\alpha$ linear polarization diagnostic for chromospheric heating in solar flares // God Soln. Maksimuma. 1981. V. 1. P. 207–210 (in Russian).

Hénoux J.-C., Chambe G., Semel M., et al. Impact linear polarization observed in a UV chromospheric line during a solar flare // Astrophys. J. 1983. V. 265. P. 1066–1075.

Hénoux J.-C., Chambe G. $\text{H}\alpha$ impact polarization observed in solar flares as a diagnostic of energy transport mechanisms // J. Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer. 1990. V. 44, N 1. P. 193–201.

Hénoux J.-C., Karlicky M. First detection of return currents in solar flares by $I_{\text{down}}^{\lambda} / I_{\text{down}}^{\text{con}}$ spectropolarimetry with THEMIS // Astron. Astrophys. 2003. V. 407. P. 1103–1113.

Hénoux J.-C., Vogt E., Chambe G., Briand C. THEMIS as particle detector: spectropolarimetry of solar flares // Il Nuovo Cimento. 2004. V. 25, N 5–6. P. 1103–1113.

Kasparova J., Karlicky M., Kontar E.P., et al. Multi-wavelength analysis of high-energy electrons in solar flares: A case study of the August 20, 2002 flare // Solar Phys. 2005. V. 232. P. 63–86.

Kostiuk N.D. Gas-dynamic models of solar flares // Astronomicheskii Zhurnal. 1975. V. 52, July-Aug. P. 752–762.

Krucker S., Hurford G.J., Lin R.P. Hard X-ray source motions in the 2002 July 23 gamma-ray flare // Astrophys. J. 2003. V. 595. P. L103–L106.

Ricchiazzi P.J., Canfield R. C. A static model of chromospheric heating in solar flares // Astrophys. J. 1983. V. 272. P. 739–755.

Skomorovsky V.I., Firstova N.M. The Large Solar Vacuum Telescope: The optical system and first results of observations // Solar Phys. 1996. V. 163. P. 209–222.

Vogt E., Sahal-Brechot S., Hénoux J.-C. Polarization of the hydrogen Halpha line in solar flares: contribution of the different radiative and collisional processes // Astron. Astrophys. 1997. V. 324. P. 1211–1221.

Vogt E., Hénoux J.-C. Polarimetry radiation of a solar flares // Solar Phys. 1996. V. 164. P. 345–359.

Vogt E., Hénoux J.-C. Observations of linear polarization in $\text{H}\alpha$ line during two solar flares // Astron. Astrophys. 1999. V. 349. P. 283–294.

Xu Z., Hénoux J.-C., Chambe G., et al. Multiwavelength analysis of the impact polarization of 2001 June 15 solar flare // Astrophys. J. 2005. V. 631. P. 618–627.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск