

УДК 523.985.355.3

М. Н. Пасечник

Астрономическая обсерватория Киевского университета имени Тараса Шевченко  
04053, Киев-53, ул. Обсерваторная, 3

### Лучевые скорости в фотосфере и хромосфере вспышки и активного флоккула

*Проанализированы изменения лучевых скоростей и направления движения хромосферного и фотосферного вещества активной области перед и во время вспышки и в активном флоккуле. Спектрограммы получены на пике Терскол ( $h = 3100$  м) на большом горизонтальном солнечном телескопе АЦУ-26 Главной астрономической обсерватории НАН Украины. Для исследования был выбран участок спектра  $\lambda\lambda$  654.4—659.4 нм, включающий линию  $H_{\alpha}$  и 10 фраунгоферовых линий, образующихся в разных слоях фотосферы (от  $h = 41$  км до  $h = 416$  км). За два часа до вспышки в активном флоккуле фотосферное вещество опускалось, а хромосферное поднималось. Во время вспышки в хромосфере и фотосфере наблюдался нисходящий поток вещества. Максимальное изменение скорости в хромосфере составляло 3.6 км/с. В верхних и средних слоях фотосферы в начальной фазе развития вспышки лучевая скорость увеличивалась, достигла своего максимального значения вблизи максимума интенсивности вспышки в линии  $H_{\alpha}$ . В главной фазе скорость примерно 7 мин оставалась постоянной, а затем до конца вспышки уменьшалась. В средней фотосфере ниже  $h = 240$  км в начале вспышки выделился слой с особенно большими изменениями скорости, до 2 км/с. В течение вспышки увеличение скорости происходило во все более глубоких слоях фотосферы и достигло самых нижних слоев ( $h = 41$  км) через 7 мин после  $H_{\alpha}$ -максимума вспышки. Вспышечное возбуждение распространялось из верхних слоев в нижние и носило волновой характер. Наблюдаемые изменения скорости движения хромосферного и фотосферного вещества активной области, по-видимому, были вызваны прохождением хромосферной конденсации и волнами, образовавшимися во время вспышки.*

**ПРОМЕНЕВІ ШВИДКОСТІ У ФОТОСФЕРІ ТА ХРОМОСФЕРІ СПАЛАХУ І АКТИВНОГО ФЛОКУЛА, Пасечник М. М.** — Проаналізовано зміни променевих швидкостей і напрямку руху хромосферної та фотосферної речовини активної області перед та під час спалаху і в активному флоккулі. Спектрограми були отримані на піку Терскол ( $h = 3100$  м) на великому горизонтальному сонячному телескопі АЦУ-26 Головної астрономічної обсерваторії НАН України. Для дослідження було обрано спект-

ральну ділянку  $\lambda\lambda$  654.4—659.4 нм, яка містить лінію  $H_{\alpha}$  та 10 фраунгоферових ліній, що утворюються у різних шарах фотосфери (від  $h = 41$  км до  $h = 416$  км). За дві години до спалаху в активному флокулі фотосферна речовина опускалася, а хромосферна — підіймалася. Під час спалаху у хромосфері і фотосфері спостерігався низхідний потік речовини. Максимальні зміни швидкості у хромосфері сягали 3.6 км/с. У верхніх та середніх шарах фотосфери у початковій фазі розвитку спалаху променеві швидкості збільшувались, досягли свого максимального значення біля максимуму інтенсивності спалаху у лінії  $H_{\alpha}$ . У головній фазі приблизно 7 хв швидкості залишались постійними, а потім до кінця спалаху зменшувались. У середній фотосфері нижче  $h = 240$  км на початку спалаху виділився шар з особливо великими змінами швидкості, до 2 км/с. Протягом спалаху збільшення швидкості відбувалось у все глибших шарах фотосфери і досягло найнижчого шару ( $h = 41$  км) через 7 хв після  $H_{\alpha}$ -максимуму спалаху. Спалахове збурення розповсюджувалось з верхніх шарів у нижні і мало хвильовий характер. Зміни швидкості руху хромосферної та фотосферної речовини активної області, ймовірно, були пов'язані з проходженням хромосферної конденсації та хвиль, які утворились під час спалаху.

*THE LINE-OF-SIGHT VELOCITY IN THE PHOTOSPHERE AND CHROMOSPHERE OF A FLARE AND AN ACTIVE PLAGE, by Pasechnik M. N. — The changes in the line-of-sight velocity and in the direction of the motions of chromospheric and photospheric matter in an active region before and during the flare of September 4, 1990 and in an active plage are analysed. The spectrograms were obtained at Terskol Peak ( $h = 3100$  m) with the large horizontal solar telescope ATsU-26 of the Main Astronomical Observatory, NAS of Ukraine. The spectral region  $\lambda\lambda$  654.4—659.4 nm chosen for the investigation includes the chromospheric line  $H_{\alpha}$  and 10 Fraunhofer lines formed in different photospheric layers (from 41 km to 416 km in the quiet photosphere). Two hours before the flare the matter moved downwards in the active plage photosphere and upwards in the chromosphere. A downflow was observed in the photosphere and the chromosphere during the flare. In the chromosphere there were the largest velocity variations of up to 3.6 km/s. The line-of-sight velocities increased during the first flare phase in the upper and middle photospheric layers. The velocity reached its maximum about flare the  $H_{\alpha}$ -maximum. The velocity of downflows was constant over approximately 7 minutes at the main flare phase, and then it gradually decreased by the end of the flare. There was a middle photospheric layer ( $h < 240$  km) with particularly large velocity changes of up to 2 km/s. During the flare the velocity increased in the lower photospheric layers and reached the lowest layer ( $h = 41$  km) 7 minutes after the flare  $H_{\alpha}$ -maximum. The flare disturbance propagated from the upper to the lower layers and had a wave character. The observed line-of-sight velocity changes in the photosphere and chromosphere layers of the active region may be caused by the passage of a chromospheric condensation and by the waves formed during the flare.*

#### ВВЕДЕНИЕ

Во многих работах, посвященных изучению вспышек, подчеркивается, что для понимания этого явления необходимо исследовать изменения структуры поля скоростей на всех уровнях атмосферы Солнца [1, 6, 23]. Из наблюдений было получено, что изменения величины и направления скорости движения плазмы фотосферы происходят за несколько часов до возникновения вспышек [12, 21, 32]. В процессе развития вспышки под влиянием

распространяющихся из области первичного освобождения энергии потоков частиц, тепла и излучения происходит изменение физического состояния вещества атмосферы [1, 3, 35]. Движение плазмы в короне и хромосфере во время вспышек изучалось многими исследователями [25—28]. Было показано, что наблюдаемая во время вспышек красная асимметрия в линии  $H_\alpha$  является следствием движения хромосферного вещества вниз и связана с импульсной фазой освобождения энергии вспышки [26, 33]. Согласно теоретическим работам [23, 29] во время вспышек вещество хромосферы разогревается до корональных температур, что приводит к его испарению и движению вверх, в корону. Численные расчеты модели хромосферного испарения показывают, что при этом в образовавшейся области высокого давления часть плазмы не успевает расшириться, и более быстрый процесс лучистого охлаждения и сжатия приводит к образованию одной или нескольких холодных и плотных конденсаций, которые движутся вниз. Из наблюдений было получено, что в хромосфере во время вспышек вещество опускается. В работах [27, 28] изучались эмиссионные линии  $H_\alpha$ ,  $H_\beta$ ,  $H_\gamma$  и  $K\text{ Ca II}$ ,  $D_2\text{ Na I}$ . Была обнаружена красная асимметрия их профилей во время импульсной фазы вспышки 13 июня 1980 г., что является признаком движения плазмы вниз. Скорость, определенная по бальмеровским линиям, составляла 30 км/с, по  $K\text{ Ca II}$  — 20 км/с и по  $D_2\text{ Na I}$  — 10 км/с, т. е. уменьшалась с глубиной атмосферы. В этой же работе было получено, что на уровне фотосферы вещество двигалось вниз со скоростью 1 км/с.

Как в этой, так и в ряде других работ [9, 10, 13, 32, 37] скорость движения фотосферного вещества во время вспышек определялась по одной или нескольким фотосферным линиям, что не давало возможности выявить характерные особенности в изменении поля скоростей на уровне фотосферы. Первыми работами, в которых были приведены количественные характеристики скорости движения фотосферного вещества в активной области (АО) во время вспышек, были работы [9, 10, 14]. В работе [9] при спектроскопическом исследовании эффекта Эвершеда было обнаружено аномальное повышение, до 2.5 км/с, скорости движения вещества на уровне фотосферы в той части пятна, которая находилась под вспышкой. Скорость, определенная по асимметрии линии  $\lambda\ 292.78\text{ нм}$ , давала еще большую величину — около 10 км/с. В работе [10] по фотоэлектрическим записям лучевых скоростей (сканирование солнечной поверхности проводилось в линии  $\text{Fe I } \lambda\ 525.02\text{ нм}$ ) были выявлены резкие изменения как величины, так и направления скорости в процессе развития вспышки балла  $3^+$ . Если перед вспышкой наблюдался подъем газа со скоростью 0.8 км/с, то через 40 мин после начала вспышки на значительной площади АО преобладало опускание фотосферного вещества со скоростью 2 км/с. Позднее в работе [37] говорилось о движении вещества фотосферы вверх со скоростью 1—2 км/с за 30 мин до вспышки и движение вниз со скоростью 5 км/с во время и после вспышки. В работе [32] высказано предположение, что подъем фотосферного вещества является общей характеристикой предвспышечной ситуации и, вероятно, связан с всплыванием новых магнитных потоков. Было найдено, что за 10—15 мин до начала большинства вспышек лучевая скорость в фотосфере увеличивается от 0.3 до 1 км/с. Максимальное изменение скорости происходит вблизи максимума вспышки, а потом скорость уменьшается. В своих исследованиях авторы использовали линии  $H_\alpha$  и  $\text{Fe I } \lambda\ 656.9\text{ нм}$ . Аналогичный временной ход, но меньшие по величине изменения скорости хромосферного вещества были получены по линии  $H_\alpha$ .

В этой работе, а также в работах [12, 20, 21] было найдено, что вспышки возникают в местах, где лучевая скорость близка к нулю, и что

перед вспышками усиливается встречное движение газа по обе стороны от нулевой линии лучевых скоростей. В работе [38] лучевые скорости движения определялись по смещениям линии Fe I  $\lambda$  648.1875 нм в спектре АО. Получено, что во время вспышки происходил как подъем, так и опускание фотосферного вещества со скоростью 2 км/с. Скорость уменьшалась со временем, и затухание поля скоростей совпало с исчезновением вспышки. В работах [20, 21] было исследовано движение вещества на уровне фотосферы ( $h = 140...300$  км) и было получено, что во время вспышек уменьшается в несколько раз пространственный и временной масштабы движения. До вспышек происходил подъем фотосферного вещества с лучевой скоростью порядка 0.2 км/с, во время вспышек в разных слоях наблюдался как подъем, так и опускание вещества со скоростью 0.7—1.0 км/с. После вспышек поле скоростей становилось таким же, как перед вспышкой. Изменения в характере движения происходили не только в области вспышки, но и в прилегающей к ней области АО. В более поздней работе [19] для исследования изменений скорости движения фотосферного вещества с высотой во время основной фазы развития слабой вспышки был привлечен большой спектральный материал (34 фраунгоферовы линии, с высотами образования от 100 до 500 км). В фотосфере, как и в хромосфере обнаружился нисходящий поток вещества. Наибольшие изменения скорости, до 1.6 км/с, происходили в слое  $h = 180...220$  км. Под влиянием вспышечного возмущения в нижних слоях фотосферы происходило увеличение амплитуды колебаний скорости движения вещества.

Для уточнения и дальнейшей разработки динамической модели особый интерес представляет исследование поля скоростей на всех фазах развития вспышек. В данной работе проанализированы изменения скорости и направления движения хромосферного и фотосферного вещества активной области перед и во время вспышки балла *sf*.

#### НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ, ЕГО ОБРАБОТКА И ТОЧНОСТЬ ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ

Для определения лучевых скоростей движения вещества использованы спектрограммы активной области (АО), полученные 4 сентября 1990 г. Исследуемая АО включала в себя два больших пятна и флоккулярное поле. Один из флоккулов был активным — за время наблюдений ( $\approx 5$  ч) в этом месте возникло три вспышки. АО в день наблюдений находилась в центре солнечного диска,  $\cos\theta = 0.99$ . Спектры флоккула и вспышки балла *sf* были сфотографированы Т. И. Редюк на большом горизонтальном солнечном телескопе АЦУ-26, установленном на Высокогорной наблюдательной базе ГАО НАН Украины «Терскол», Центральный Кавказ. Технические характеристики телескопа и спектрографа, а также возможности, которые он дает для изучения тонкой структуры активных образований на Солнце, описаны в работе [4]. Одновременно с фотографированием спектров вспышек соответствующее  $H_{\alpha}$ -изображение площадки солнечного диска, полученное с помощью  $H_{\alpha}$ -фильтра Halle, записывалось на видеоманитофон [16]. На каждом кадре видеопленки фиксировался момент начала экспозиции. Для определения положения вспышки на щели спектрографа можно вести поккадровый просмотр видеозаписи. Развитие исследуемой в данной работе вспышки зафиксировано в видеопленке полученном А. А. Рожило и В. А. Данилевским.

Исследуемая вспышка балла *sf*, по данным SGD, возникла в  $8^{\text{h}}31^{\text{m}}$  UT и закончилась в  $8^{\text{h}}59^{\text{m}}$  UT, максимум ее интенсивности в линии  $H_{\alpha}$

## Характеристики используемых линий

Номер линии	$\lambda$ , нм	Элемент	EPL, эВ	$d_0$	$h_d$ , км	$h_w$ , км
1	657.27842	Ca I	0.0	0.290	226	208
2	657.42334	Fe I	0.99	0.293	243	224
3	658.02300	Ni I	4.40	0.083	139	128
4	658.12143	Fe I	1.48	0.178	213	201
5	658.36970	Si I	5.95	0.099	116	98
6	658.63193	Ni I	1.95	0.368	241	212
7	658.76253	C I	8.53	0.083	41	31
8	659.13154	Fe I	4.59	0.096	143	132
9	659.25153	Ni I	4.23	0.176	157	141
10	659.38818	Fe I	2.43	0.646	416	306

наблюдался в  $8^{\text{h}}38^{\text{m}}$  UT. Спектры были получены в  $8^{\text{h}}28^{\text{m}}11^{\text{s}}$ ,  $8^{\text{h}}30^{\text{m}}12^{\text{s}}$ ,  $8^{\text{h}}34^{\text{m}}38^{\text{s}}$ ,  $8^{\text{h}}37^{\text{m}}29^{\text{s}}$ ,  $8^{\text{h}}41^{\text{m}}44^{\text{s}}$ ,  $8^{\text{h}}45^{\text{m}}44^{\text{s}}$ ,  $8^{\text{h}}51^{\text{m}}08^{\text{s}}$  и  $8^{\text{h}}57^{\text{m}}10^{\text{s}}$  UT во время начальной и главной фазы ее развития.

Спектрограмма флоккула была получена в  $6^{\text{h}}21^{\text{m}}30^{\text{s}}$  UT, приблизительно за 2 ч до начала в этом месте вспышки.

Фотометрическая обработка спектров производилась на созданном в ГАО НАНУ автоматизированном микрофотометре АМФ2-ZX [19].

Для определения лучевых скоростей движения вещества активной области был использован участок спектра  $\lambda\lambda$  654.4—659.4 нм включающий линию  $H_{\alpha}$  и 10 фотосферных линий Fe I, Si I, Ni I, Ti I, Ca I, C I. Все линии неблендированы и охватывают большую толщину фотосферы. Так, центральная часть линии C I  $\lambda$  658.76 нм образуется на высоте 41 км невозмущенной фотосферы, а линия Fe I  $\lambda$  659.38 — на высоте 416 км.

Список линий и их характеристики приведены в таблице. Длины волн линий взяты из работы [36], а для линий № 2, 3, 8, 10 — из работы [24], потенциал EPL возбуждения нижнего уровня — из работы [34], центральная глубина профиля линии и высоты образования (вычисленные по центральной глубине и эквивалентной ширине) для невозмущенной фотосферы для центра диска — из работы [15].

Фотометрические разрезы спектров вспышки делались в месте максимальной интенсивности линии  $H_{\alpha}$ . Через спектр флоккула, полученный в  $6^{\text{h}}21^{\text{m}}30^{\text{s}}$  UT, было сделано 9 фотометрических разрезов по всей высоте спектра: в месте максимальной интенсивности флоккула в линии  $H_{\alpha}$  и с интервалом в 1 мм по разные стороны от него. Высота щели спектрографа 10 мм соответствует расстоянию на Солнце 8700 км.

Лучевые скорости движения вещества определялись по доплеровским смещениям центров ядер линий в спектрах. Длины волн  $\lambda_i$  исследуемых линий в спектрах АО вычислялись с помощью ближайших теллурических линий  $H_2O$ , методика описана в [18]. Затем находились разности  $\Delta\lambda_i = \lambda_i - \lambda_0$ , где  $\lambda_0$  — длина волны линии в спектре центра невозмущенного Солнца, приведенная в таблице [36]. Вычислялись соответствующие этим смещениям лучевые скорости  $V_i$ . В полученные скорости вносились поправки за счет суточного вращения Земли и годового обращения Земли вокруг Солнца [22]. Первая поправка составляла 0.11—0.02 км/с для наблюдений между  $8^{\text{h}}30^{\text{m}}$  UT и  $9^{\text{h}}40^{\text{m}}$  UT и 0.23 км/с для наблюдения в  $6^{\text{h}}22^{\text{m}}$  UT. Вторая поправка равнялась 0.44 км/с. Таким образом были получены  $\Delta V_r$  — изменения лучевой скорости движения вещества относительно ее значения для невозмущенной атмосферы.

Точность определения  $\Delta V_r$  зависит от фазы вспышки. В спектре активной области до вспышки профили фраунгоферовых линий имеют правильную форму, и точность определения их положения высока — она соответствует точности определения скорости 100 м/с. В спектрах вспышки (особенно в моменты наблюдений, близкие к ее максимуму интенсивности в линии  $H_\alpha$ ) форма профилей линий искажена, а центральная глубина линии  $Si$  уменьшена почти до уровня интенсивности непрерывного спектра в этой области, поэтому точность определения длин волн линий несколько ниже. Соответственно точность определения  $\Delta V_r$  составляет 150—170 м/с.

Положения последних трех линий из таблицы определялись особым способом. Это вызвано тем, что ближайшая хорошо выделяемая теллурическая линия воды  $\lambda$  658.07871 нм находится на большом расстоянии от них, а величина дисперсии заметно изменяется вдоль спектральной дорожки. Поэтому величина шага (расстояние между соседними отсчетами) для определения длин волн этих линий была получена из графиков зависимостей шага от длины волны. Для построения графиков были использованы все теллурические линии исследуемого спектрального участка. Точность определения  $\Delta V_r$  по этим линиям составляет 250 м/с.

#### АКТИВНЫЙ ФЛОККУЛ И ЕГО ОКРЕСТНОСТИ

В работе [20] было получено, что в области спокойного флоккула, наблюдавшегося 24 мая 1979 г., лучевая скорость движения вещества в верхних слоях фотосферы изменена незначительно относительно ее величины для невозмущенной фотосферы, на  $\pm 250$  м/с. Лишь в нижних слоях ( $h = 140$  км) изменения  $\Delta V_r$  доходили до 600 м/с и преобладал подъем вещества.

На рис. 1, а, б приведены полученные в данной работе изменения лучевой скорости с высотой фотосферы в области активного флоккула и его окрестностей примерно за 2 ч до возникновения вспышки. Данные для области максимальной яркости флоккула обозначены звездочками. Пунктирными кривыми представлены изменения  $\Delta V_r$  для области, расположенной справа от флоккула (рис. 1, а), а сплошными кривыми на рис. 1, б — для области слева от него. Кривые, показывающие распределение  $\Delta V_r$  на одинаковых расстояниях, но по разные стороны от флоккула, обозначены одинаковыми значками. Положительные значения  $\Delta V_r$  соответствуют движению вещества от наблюдателя, а отрицательные — к наблюдателю. Значения  $\Delta V_r$ , полученные по смещениям линий, образующихся на близких высотах ( $\sim 20$  км), были усреднены.

Из рис. 1, а, б видно, что в области максимальной яркости активного флоккула фотосферное вещество опускалось. В верхнем слое ( $h = 416$  км) скорость движения вещества была на 0.66 км/с, выше, чем в невозмущенной фотосфере. В среднем слое ( $h = 241$  км) изменение скорости было наименьшим (0.24 км/с), т. е. не превосходило эту же величину для спокойного флоккула. В слоях глубже  $h = 241$  км скорость опускания увеличивалась, и на высоте  $h = 41$  км достигла величины  $\Delta V_r = 1.19$  км/с. В работе [31] также было получено, что в области флоккула фотосферное вещество опускалось со скоростью 0.5 км/с.

Таким образом, основное отличие активного флоккула, исследуемого в данной работе, от спокойного, наблюдавшегося 24 мая 1979 г., состоит в разном направлении движения вещества в нижнем слое фотосферы: в области активного флоккула вещество опускалось, а в области спокойного — поднималось. О том, что отличие активных флоккулов от спокойных

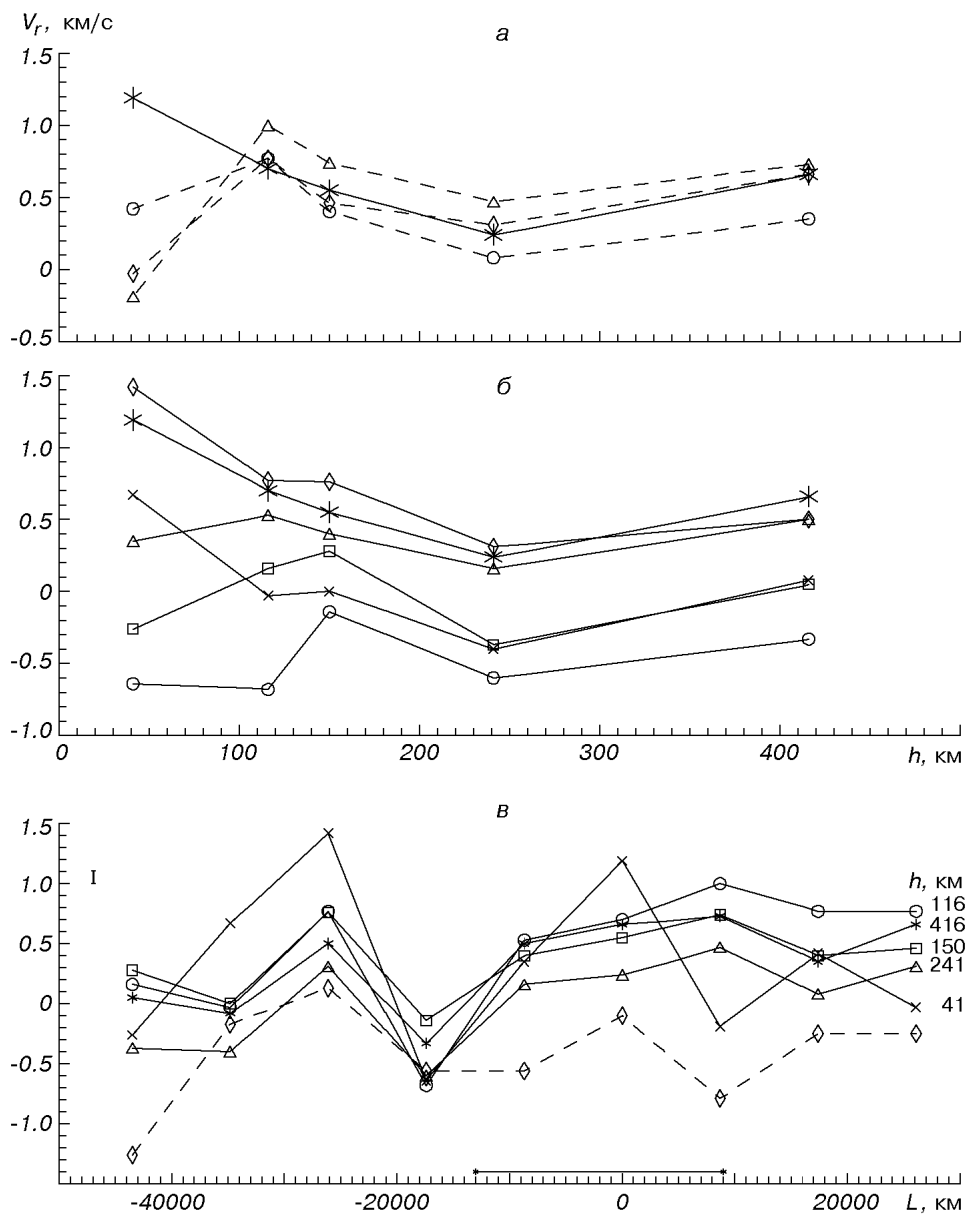


Рис. 1. а, б — изменение  $\Delta V_r$  с высотой фотосферы в активном флоккуле и его окрестностях: звездочки — место максимальной интенсивности флоккула в линии  $H_{\alpha}$ , треугольники — штрихи — на расстоянии 8700 км справа от места максимальной яркости флоккула, сплошная линия — на том же расстоянии, но слева от флоккула; кружочки — то же на расстоянии 17400 км; ромбы — то же на расстоянии 26100 км; крестики — на расстоянии 34800 км слева от флоккула, квадраты — то же на расстоянии 43500 км; в — изменение  $\Delta V_r$  на разных высотах фотосферы вдоль участка АК, вырезанного щелью спектрографа. «Ноль» — место максимальной яркости флоккула. Линия над осью абсцисс — область, занимаемая флоккулом. Штрихи — изменение  $\Delta V_r$  в хромосфере. Вертикальной черточкой представлена ошибка определения  $\Delta V_r$

проявляется задолго до появления вспышек (за 3—10 ч) главным образом в нижней фотосфере подчеркнуто в работе [5], где был проведен сравнительный анализ фраунгоферовых линий в спектрах активных областей перед вспышками и без вспышек.

В области АО, расположенной справа от флоккула (рис. 1, *a*), фотосферное вещество тоже опускалось. Характер зависимостей  $\Delta V_r(h)$  для верхних и средних слоев тот же, что и для области флоккула, а для нижних слоев — противоположный:  $\Delta V_r$  резко уменьшается вглубь фотосферы. В области АО, находящейся слева от флоккула (рис. 1, *b*), наблюдалось как опускание, так и подъем вещества фотосферы. Причем на близких участках происходили резкие изменения скорости и по величине, и по направлению. Так, распределения  $\Delta V_r(h)$  для расстояний от центра флоккула  $L = 8700$  км и  $L = 17400$  км показывают, что вещество тут двигалось в противоположных направлениях. Амплитуда изменения скорости движения вещества в верхних слоях составляла 0.83 км/с, а в нижних доходила до 1.2 км/с.

То, что в фотосфере в месте возникновения вспышек или непосредственно рядом с ним наблюдаются потоки вещества с противоположным направлением, отмечено в работах [11, 12, 21]. В работе [11] подчеркнуто, что изменение знака скорости происходит резко, это указывает на тесное прилегание друг к другу элементов с противоположным направлением скорости. Результаты работы [12] показали, что появлению вспышек предшествует усиление потоков встречных движений газа по обе стороны от линии нулевых лучевых скоростей, в окрестности которой в будущем произойдет вспышка.

Амплитуда изменений  $\Delta V_r$  по площади исследуемого участка АО в верхних и средних слоях фотосферы была одинаковой и составляла 1.1 км/с, а в нижних слоях была в два раза большей.

На рис. 1, *в* приведены изменения скорости движения вещества на разных высотах фотосферы вдоль участка АО, вырезаемого щелью спектрографа. Место, занимаемое флоккулом, отмечено отрезком над осью абсцисс. Точка «ноль» на этой оси соответствует месту максимальной интенсивности флоккула в линии  $H_\alpha$ . Видно, что на левой границе флоккула вещество поднималось, а на правой — опускалось. В целом примерно за 2 ч до вспышки на исследуемом участке АО наблюдалось преимущественно опускание фотосферного вещества. Крупномасштабное опускание вещества в развивающейся активной области было получено по картам фотосферных лучевых скоростей и в работе [17].

Изменения  $\Delta V_r$  по площади АО в верхних и средних слоях фотосферы происходили синхронно. Выделились два элемента движения: один размером 26000 км, а второй размером 40000 км, в него входила область флоккула. В нижнем слое изменения скорости были наибольшими: от  $-0.64$  км/с до 1.40 км/с. В этом слое выделились три элемента движения, размеры которых составляли 26000, 25000 и 18000 км. В работе [11] найдено, что средний размер элементов движения в фотосфере Солнца равен 27000 км. В работе [19] было получено, что размер элементов в фотосфере АО во время вспышки в начале наблюдений составлял порядка 30000 км, а в процессе вспышки уменьшился до 10000—18000 км.

На рис. 1, *г* также приведены изменения скорости движения хромосферного вещества, определенные по смещению ядра линии  $H_\alpha$ . Они отражают ячеистую структуру хромосферы, связанную с супергрануляционной конвекцией [7, 14]. В хромосфере наблюдался подъем вещества с максимальной скоростью на границах флоккула ( $\Delta V_r = -0.8$  км/с).



## ВСПЫШКА

При исследовании поля скоростей в фотосфере АО во время вспышки были дополнительно определены смещения линий Ti I  $\lambda\lambda$  655.60707 и 655.42315 нм. Высоты образования этих линий для невозмущенной фотосферы ( $h = 176$  и  $177$  км соответственно) были вычислены Т. И. Редюк.

На рис. 2 представлены изменения лучевых скоростей движения вещества в разных слоях фотосферы в процессе развития вспышки: для начальной фазы вспышки и для основной фазы. Значения  $\Delta V_r$ , полученные по линиям, образующимся на близких высотах (241 и 243, 213 и 226, 176 и 177, 139 и 143 км), усреднялись.

Видно, что во время вспышки происходило опускание вещества фотосферы во всех слоях и во все моменты наблюдения. По мере развития вспышки скорость движения вещества в верхних и средних слоях увеличилась и достигла максимальных значений к моменту максимума интенсивности вспышки в линии  $H_\alpha$  (рис. 2, а). В средней фотосфере, ниже  $h = 240$  км, в начале вспышки (к моменту  $8^h28^m11^s$  UT) выделился небольшой слой высотой около 50 км, в котором скорость опускания вещества была больше, чем в соседних слоях. В последующие моменты наблюдений этот слой расширялся вглубь фотосферы, и скорость в нем продолжала увеличиваться. К моменту  $H_\alpha$ -максимума вспышки (самая верхняя кривая) толщина его стала  $\sim 120$  км и  $\Delta V_r$  в нем составила 2.1 км/с. Такое постепенное

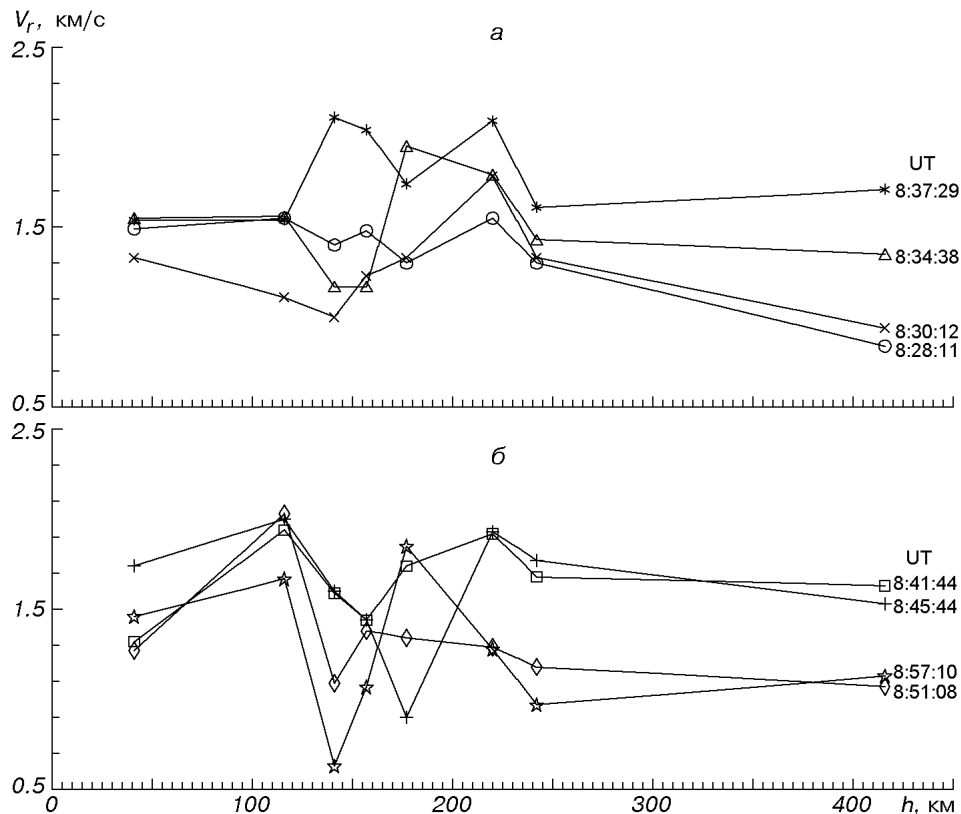


Рис. 2. Изменение  $\Delta V_r$  с высотой фотосферы в процессе развития вспышки: а — начальная фаза, б — основная фаза

увеличение скорости движения вещества во все более глубоких слоях может свидетельствовать о том, что вспышечное возмущение распространялось из верхних слоев вглубь фотосферы. В нижних слоях в это время происходило опускание вещества с постоянной, в пределах ошибки определения, скоростью, на  $\sim 1.5$  км/с большей, чем в невозмущенной фотосфере.

Нужно заметить, что слой с особенно большими и резкими изменениями скорости движения выявлен и в работе [19]. Он является переходным между слоями фотосферы, где сверху преобладает волновой перенос энергии, а снизу — конвективный.

В главной фазе развития вспышки (рис. 2, б), т. е. после максимума ее интенсивности в линии  $H_{\alpha}$ , в верхних и средних слоях фотосферы скорость опускания вещества в течение 7 мин (первые два момента наблюдений  $8^{\text{h}}41^{\text{m}}44^{\text{s}}$  и  $8^{\text{h}}45^{\text{m}}44^{\text{s}}$  UT) была постоянной в пределах ошибки определения, которая для этих моментов наблюдений составляет 0.17 км/с. Лишь на высоте  $h = 116$  км к  $8^{\text{h}}41^{\text{m}}44^{\text{s}}$  UT значение  $\Delta V_r$  увеличилось на 0.45 км/с, а к моменту  $8^{\text{h}}45^{\text{m}}44^{\text{s}}$  UT увеличение скорости на 0.42 км/с произошло и на самой нижней из рассматриваемых высот ( $h = 41$  км). Таким образом, в главной фазе вспышечное возбуждение продолжало распространяться вглубь фотосферы и через 7 мин после  $H_{\alpha}$ -максимума вспышки достигло нижних слоев.

Еще через 6 мин, к  $8^{\text{h}}51^{\text{m}}08^{\text{s}}$  UT, скорость опускания на всех высотах уменьшилась. В целом к концу вспышки скорости движения вещества во всех слоях фотосферы стали меньшими по сравнению с их значениями в момент  $H_{\alpha}$ -максимума вспышки.

На рис. 3 показано изменение  $\Delta V_r$  со временем в хромосфере (пунктирная кривая), а также в верхних (рис. 3, а) и нижних (рис. 3, б) слоях фотосферы. Точка «ноль» на оси абсцисс соответствует  $H_{\alpha}$ -максимуму вспышки. Длительность вспышки по данным SGD отмечена толстой линией над осью. Вертикальная черточка указывает момент времени  $8^{\text{h}}29.8^{\text{m}}$  UT, когда согласно бюллетеню «Солнечные данные» был зафиксирован радиовсплеск III типа.

Рис. 3, а показывает, что в хромосфере, на уровне образования ядра линии  $H_{\alpha}$ , вещество опускалось в течение всего времени развития вспышки. Перед вспышкой в этой области хромосферы происходил подъем вещества (рис. 1, б), значит, за 2 ч, прошедшие между наблюдениями, направление движения изменилось на противоположное. К сожалению, в этой работе не было возможности определить точное время смены направления движения. В хромосфере лучевая скорость опускания вещества достигла максимального значения ( $\Delta V_r = 3.65$  км/с) через несколько минут после  $H_{\alpha}$ -максимума вспышки. После этого происходило резкое уменьшение скорости — примерно за 10 мин она уменьшилась на 2 км/с.

На рис. 3, а представлено изменение  $\Delta V_r$  для трех высот фотосферы  $h = 416$ , 242 и 220 км. Видно, что изменение лучевой скорости в верхних слоях фотосферы коррелируют с изменением скорости движения в хромосфере. Во время начальной фазы вспышки на этих высотах скорость опускания вещества увеличивалась (с большим градиентом на высоте  $h = 416$  км). Вблизи  $H_{\alpha}$ -максимума вспышки скорость движения достигла своего максимального значения, и в главной фазе мало изменялась в течение примерно 7 мин, а затем начала медленно уменьшаться до ее значения, которое она имела перед вспышкой. В процессе вспышки наибольшее увеличение скорости, относительно ее значения для невозмущенной фотосферы, произошло в слое  $h = 220$  км, где величина  $\Delta V_r$  достигла 2.1 км/с.

Распространение вспыхивающего возмущения в средних и нижних слоях фотосферы АО в процессе развития вспышки можно проследить по смещению максимального значения (пика) изменения скорости. Для наглядности над пиками скорости приведены цифры, обозначающие какой высоте фотосферы соответствует данная кривая. Видно, что увеличение скорости происходило во все более глубоких слоях фотосферы и достигло самого нижнего, из рассматриваемых в данной работе слоев —  $h = 41$  км, через 7 мин после  $H_{\alpha}$ -максимума вспышки.

О том, что вспыхивающее возмущение распространяется из верхних слоев атмосферы в нижние свидетельствуют полученные в работах [2, 29, 30] на основе моделирования изменения физического состояния вещества. В работе [2] найдено, что в начальной фазе развития вспышки балла 1В 7 октября 1979 г. в области температурного минимума образовался слой с повышенной температурой. По мере развития вспышки этот слой продвигался вглубь фотосферы.

Постепенный прогрев все более нижних слоев хромосферы и верхней фотосферы показали построенные в работе [30] по линиям  $H_{\alpha}$ ,  $H_{\beta}$ ,  $H$  и  $K$  Ca II модели для восьми моментов развития вспышки балла 2В.

В работе [8] также был сделан вывод о распространении вспыхивающего

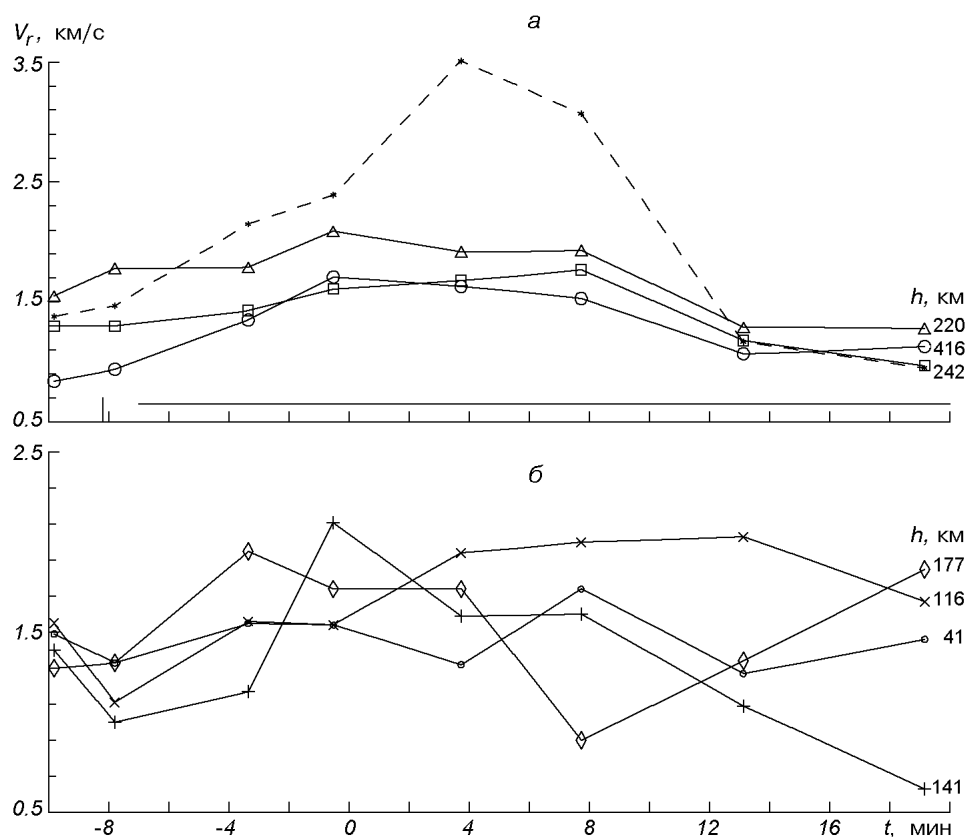


Рис. 3. Изменение  $\Delta V_r$  в процессе развития вспышки: а — в хромосфере и верхних слоях фотосферы, б — в нижних слоях фотосферы. Время отсчитано от момента максимума интенсивности вспышки в линии  $H_{\alpha}$ . Вертикальная черточка указывает момент времени 8h29.8m UT, когда был зафиксирован радиовсплеск III типа. Толстая линия над осью абсцисс — длительность вспышки

возмущения сверху вниз на основе полученных полуэмпирических фотосферных моделей для главной фазы развития слабой вспышки 24 мая 1979 г. Они показали смещение прогретых слоев в глубь фотосферы и преобладание нисходящего движения вещества.

Из рис. 3 видно, что ход изменений  $\Delta V_r$  в верхних слоях фотосферы был более плавным, чем в нижних, где изменения скорости движения вещества во время вспышки носили колебательный характер. Максимальная амплитуда изменений  $\Delta V_r$  со временем как в верхних, так и в нижних слоях составляла примерно 1.0 км/с. Нижняя фотосфера к концу вспышки разбилась на несколько слоев с резко изменяющимися значениями  $\Delta V_r$ . Таким образом, эта область представляла собой ряд слоев опускающегося с различной по величине скоростью вещества.

Как сказано выше, в 8<sup>h</sup>29.8<sup>m</sup> UT был зафиксирован радиовсплеск III типа. Известно, что такой радиовсплеск сопровождает всплеск жесткого рентгеновского излучения и наблюдается в импульсной фазе развития вспышки. Он указывает на наличие в короне потока высокоэнергичных электронов, под действием которых происходит испарение хромосферной плазмы. В это время может сформироваться хромосферная конденсация, которая будет перемещаться вниз. Полученные изменения скорости движения вещества в хромосферных и фотосферных слоях АО во время вспышки, возможно, были вызваны движением такой хромосферной конденсации из места ее образования в нижние слои атмосферы.

## ВЫВОДЫ

1. За два часа до вспышки в области максимальной яркости активного флоккула фотосферное вещество опускалось. Наименьшее изменение скорости  $\Delta V_r$  по сравнению с ее значением для невозмущенной фотосферы было в среднем слое (0.24 км/с), а наибольшее — в нижнем (1.19 км/с).

Основное отличие активного флоккула, исследуемого в данной работе, от спокойного, исследованного в [20], состоит в том, что в нижнем слое фотосферы активного флоккула вещество опускалось, а спокойного — поднималось. В хромосфере наблюдался подъем вещества с максимальной скоростью на границах флоккула, где  $\Delta V_r = -0.8$  км/с.

Изменения  $\Delta V_r$  по площади АО, вырезанной щелью спектрографа, в верхних и средних слоях фотосферы происходили синхронно. Амплитуда изменений  $\Delta V_r$  в этой области фотосферы составляла 1.1 км/с, а в нижних слоях была в два раза больше.

2. Во время вспышки в хромосферных и фотосферных слоях во все моменты ее наблюдения происходило опускание вещества. В верхних и средних слоях фотосферы в начальной фазе развития вспышки скорость движения вещества увеличивалась, достигла своего максимального значения вблизи  $H_\alpha$ -максимума вспышки, а в главной фазе примерно 7 мин оставалась постоянной, затем до конца вспышки уменьшалась.

В средней фотосфере ниже  $h = 240$  км в начале вспышки выделился слой с повышенной скоростью движения, в течение вспышки увеличение скорости происходило во все более глубоких слоях фотосферы. Это свидетельствует о распространении вспышечного возбуждения из верхних слоев в нижние, оно достигло самых нижних слоев ( $h = 41$  км) через 7 мин после  $H_\alpha$ -максимума вспышки. Этот вывод хорошо согласуется с работами [5, 8, 30].

3. Выявленные в работе изменения движения хромосферного и фотосферного вещества АО во время вспышки, по-видимому, явились откликом

атмосферы Солнца на перенос вспышечной энергии хромосферной конденсацией и волнами.

1. Аликаева К. В. Фотосферный отклик в процессе вспышек по данным спектральных наблюдений // Физика солнечной плазмы. — М.: Наука, 1989.—С. 5—13.
2. Аликаева К. В., Барановский Э. А., Кондрашова Н. Н. Временные изменения состояния хромосферного и фотосферного вещества во вспышечной петельной структуре // Тр. VII Симпозиума по солнечно-земной физике России и стран СНГ, Троицк (1998 г.). — 1999.—С. 28—34.
3. Аликаева К. В., Барановский Э. А., Кондрашова Н. Н. и др. Полуэмпирические модели фотосферы солнечного активного комплекса // Кинематика и физика небес. тел.—1995.—11, № 2.—С. 11—24.
4. Аликаева К. В., Бурлов-Васильев К. А., Васильева И. Э. и др. Горизонтальный солнечный телескоп АСУ-26 на Кавказе // Кинематика и физика небес. тел.—1996.—12, № 6.—С. 65—74.
5. Аликаева К. В., Кондрашова Н. Н., Редюк Т. И., Рудникова Е. Г. Нижняя фотосфера активных областей Солнца перед вспышками и без вспышек // Кинематика и физика небес. тел.—1993.—9, № 1.—С. 24—36.
6. Алтынцев А. Т., Банин В. Г., Гопасюк С. И. и др. Активные области и вспышки // Исслед. по геомагнетизму, аэронамии и физике Солнца.—1981.—Вып. 56.—С. 39—56.
7. Банин В. Г. Ячеистые структуры комплекса активности и их влияние на развитие больших солнечных вспышек // Исслед. по геомагнетизму, аэронамии и физике Солнца.—1984.—Вып. 68.—С. 73—83.
8. Барановский Э. О., Кондрашова Н. Н., Пасечник М. Н. Фотосферные слои вспышки и флоккула. IV. Полуэмпирические модели // Кинематика и физика небес. тел.—1999.—16, № 5.—С. 387—399.
9. Бумба В. Результаты исследования эффекта Эвершеда в одиночных солнечных пятнах // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1960.—23.—С. 14—25.
10. Васильева Г. Я. Об условиях развития хромосферной вспышки 12 июля 1961 г. // Солнеч. данные.—1964.—№ 12.—С. 64—72.
11. Гопасюк С. И., Калман Б. О крупномасштабном поле скоростей в фотосфере Солнца // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1972.—44.—С. 52—63.
12. Гопасюк С. И., Лазарева Л. Ф. Поле скоростей и вспышечная активность в группах пятен // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1986.—74.—С. 84—92.
13. Гопасюк С. И., Огирь М. В., Цап Т. Т. О связи фотосферных и хромосферных процессов в активной области во время вспышек // Солнеч. данные.—1963.—№ 4.—С. 77—81.
14. Григорьев В. М., Селиванов В. Л. Структура и динамика конвективных движений в АО во время ее возникновения и развития // Астрон. циркуляр.—1986.—№ 1412.—С. 1—3.
15. Гуртовенко Э. А., Костык Р. И. Фраунгоферов спектр и система солнечных сил осцилляторов. — Киев: Наук. думка, 1989.—200 с.
16. Данилевский В. О., Ёрьомін С. С., Рожило О. О. Инструментальне забезпечення спектральних спостережень активних областей на Сонці // Вісн. Київ. ун-ту. Сер. фіз.-мат. науки.—1992.—Вип. 6.—С. 96—100.
17. Карташова Л. Г., Кожеватов И. Е., Куликова Е. Х. и др. Фотосферные лучевые скорости и тонкая структура  $H_{\alpha}$ -хромосферы в развивающейся активной области СД № 135 // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1987.—76.—С. 110—119.
18. Кондрашова Н. Н., Пасечник М. Н. Фотосферные слои вспышки и флоккула. II. Профили, асимметрия и смещения фраунгоферовых линий в спектрах окрестностей вспышки и флоккула // Кинематика и физика небес. тел.—1998.—14, № 3.—С. 234—244.
19. Кондрашова Н. Н., Пасечник М. Н. Фотосферные слои вспышки и флоккула. III. Поле скоростей // Кинематика и физика небес. тел.—1999.—15, № 4.—С. 310—317.
20. Редюк Т. И. Поле скоростей в фотосфере и вспышки // Солнечно-земная физика: Тез. докл. 5 Симп. КАПГ, Самарканд, 2-6 окт. 1989 г. — М.: Би., 1989.—С. 63.
21. Редюк Т. И. Движение вещества на уровне фотосферы во вспышечно-активных областях // Вестн. Киев. ун-та. Астрономия.—1990.—Вып. 32.—С. 28—35.
22. Салман-заде Р. Х. О поправках лучевых скоростей за счет суточного вращения и годового обращения Земли при наблюдениях Солнца // Вестник ЛГУ. Матем., мех. и астрон.—1961.—Вып. 1.—С. 166—171.
23. Сыроватский С. И., Сомов Б. В. Физика солнечных вспышек. Теория наблюдаемых проявлений вспышек // Итоги науки и техники / ВИНТИ. Астрономия.—1982.—21.—С. 221—237.
24. Allende Prieto C., Garcia Lopez R. J. Fe I line shifts in the optical spectrum of the Sun // Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.—1998.—129, N 1.—P. 41—44.

25. *Antonucci E., Gabriel A. H., Acton L. W., et al.* Impulsive phase of flares in soft X-ray emission // *Solar Phys.*—1982.—78, N 1.—P. 107—123.
26. *Canfield R. C., Zarro D. M., Metcalf T. R., Lemen J. R.* Momentum balance in four solar flares // *Astrophys. J.*—1990.—348, N 1.—P. 333—340.
27. *Cauzzi G., Falchi A., Falciani R., Smaldone L. A.* Coordinated observations of solar activity phenomena. II. The velocity field pattern in an elementary flare // *Astron. and Astrophys.*—1996.—306, N 2.—P. 625—637.
28. *Falchi A., Falciani R., Smaldone L. A.* Analysis of the optical spectra of the solar flares. VI. Velocity field in the 13 June 1980 flare area. // *Astron. and Astrophys.*—1992.—256, N 1.—P. 255—263.
29. *Fisher G. H.* Dynamics of flare-driven chromospheric condensations // *Astrophys. J.*—1989.—346, N 2.—P. 1019—1029.
30. *Gan W.-Q., Fang C.* Time-match semi-empirical models of the chromospheric flare on 3 February, 1983 // *Solar Phys.*—1987.—107, N 2.—P. 311—321.
31. *Giovanelli R. G., Brown N.* Vertical velocity fluctuations in plage-region magnetic points // *Solar Phys.*—1977.—52, N 1.—P. 27—34.
32. *Harvey K. L., Harvey J. W.* A study of the magnetic and velocity fields in an active region // *Solar Phys.*—1976.—47, N 1.—P. 233—246.
33. *Ichimoto K., Kurokawa H.*  $H_{\alpha}$  red asymmetry of solar flares // *Solar Phys.*—1984.—93, N 1.—P. 106—121.
34. *Moore C. E., Minnaert M. G. J., Houtgast J.* The solar spectrum 2935 to 8770 Å. — Washington: National Bureau of Standards, 1966.—349 p.
35. *Nagai F., Emslie A. G.* Gas dynamics in the impulsive phase of solar flares. I // *Astrophys. J.*—1984.—279, N 2.—P. 896—908.
36. *Pierce A. K., Breckinridge J. B.* The Kitt Peak table of photographic solar spectrum wavelengths // *Kitt Peak Contribution.*—1972.—N 559.—43 p.
37. *Rust D. M.* Analysis of the August 7, 1972 white light flare: changes in the magnetic and velocity fields // *Solar Phys.*—1973.—33, N 1.—P. 205—212.
38. *Yoshimura H., Tanaka K., Shimizu M. and Hiei E.* Photospheric mass motions associated with a flare // *Publs Astron. Soc. Jap.*—1971.—23, N 3.—P. 443—448.

Поступила в редакцию 20.02.01