

УДК 523.985.355.3

**Н. Н. Кондрашова**

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

### **Лучевые скорости движения фотосферного вещества в слабой и мощной солнечных вспышках**

*Приведены зависимости лучевой скорости движения фотосферного вещества от высоты для четырех моментов наблюдения главной фазы слабой вспышки и для мощной двухленточной вспышки на разных стадиях ее развития: за 30 мин до вспышки, в начальной и главной фазах. В главной фазе слабой вспышки наблюдалось опускание фотосферного вещества. Нисходящий поток, возможно, был откликом фотосферы на прохождение хромосферной конденсации. В мощной вспышке происходил выход нового магнитного потока. Фотосферное вещество поднималось со скоростью 1–4 км/с.*

*ПРОМЕНЕВІ ШВИДКОСТІ РУХІВ ФОТОСФЕРНОЇ РЕЧОВИНИ У СЛАБКОМУ ТА ПОТУЖНОМУ СОНЯЧНИХ СПАЛАХАХ, Кондрашова Н. М. — Наведено залежності променевої швидкості руху фотосферної речовини від висоти для чотирьох моментів спостереження головної фази слабкого спалаху та для потужного двострічкового спалаху на різних стадіях його розвитку: за 30 хв до спалаху, у початковій і головній фазах. У головній фазі слабкого спалаху спостерігалось опускання фотосферної речовини. Низхідний потік, можливо, був відгуком фотосфери на проходження хромосферної конденсації. У потужному спалаху відбувався вихід нового магнітного потоку. Фотосферна речовина підіймалася зі швидкістю 1–4 км/с.*

*THE LINE-OF-SIGHT VELOCITIES OF THE PHOTOSPHERIC MATERIAL MOTIONS IN A WEAK AND LARGE SOLAR FLARES, by Kondrashova N. N. — The dependencies of the line-of-sight velocities of the photospheric material motion on height are given for four moments of the observation of the gradual phase of a weak flare and for a large two-ribbon flare at different stages of its evolution: 30 minutes before the flare, in the impulsive and gradual phases. A downward motion of the photospheric material was observed in the gradual phase of the weak flare. Possibly, the downflow was a response to the chromospheric condensation. A new magnetic flux emerge occurred in the large flare. The velocity of the upward motion of the photospheric material was equal to 1–4 km/s.*

## ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на многочисленные исследования солнечных вспышек, до сих пор остается нерешенной проблема освобождения и переноса их энергии. Окончательно не выяснена и роль фотосферы во вспышечном процессе. В ряде теоретических моделей предполагается, что источник энергии вспышки находится в короне. После освобождения энергия переносится в хромосферу, вызывая ее прогрев и свечение. В других моделях энергия из конвективной зоны через фотосферу переносится в корону. В третьих считается, что по всему объему солнечной атмосферы от короны до фотосферы происходят магнитные пересоединения в мелких масштабах, приводящие к развитию вспышек. Изучение движений фотосферного вещества перед вспышкой и во время вспышки, их скорости и направления, возможно, позволит прояснить вопрос об участии фотосферы.

Для построения моделей солнечных вспышек необходимы сведения о движениях вещества на всех уровнях атмосферы Солнца, включая фотосферные слои. В работах [7, 8] приведены изменения лучевой скорости  $\Delta V_{\text{луч}}$  в фотосфере слабой вспышки 24 мая 1979 г. и мощной двухленточной вспышки 3 июня 1979 г. относительно ее значений для невозмущенной фотосферы. Для непосредственного использования в расчетах моделей нужны абсолютные значения скоростей. Они определены и представлены в настоящей работе.

## НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ

Спектры слабой вспышки 24 мая 1979 г. и мощной вспышки 3 июня 1979 г. были получены на горизонтальном солнечном телескопе АЦУ-5 Главной астрономической обсерватории НАН Украины в Киеве (наблюдатели — К. В. Аликаева, Н. Н. Кондрашова, Т. И. Редюк). Для сравнения были сфотографированы также спектры невозмущенных участков фотосферы на том же расстоянии, что и вспышки. Подробная методика обработки дана в [6]. Разрезы спектра делались в местах максимальной интенсивности в линии  $H_{\alpha}$ . Лучевые скорости движения вещества определялись по доплеровским смещениям линий в спектрах. В качестве вспомогательных использовались теллурические линии, длины волн которых брались из [20]. Точность измерения лучевой скорости составляла 0.17 км/с. Для определения абсолютных значений лучевых скоростей взято 12 фраунгоферовых линий железа и титана на участке  $\lambda\lambda$  587—593 нм. Их характеристики даны в таблице. В ней приведены длины волн линий, элемент [20], центральная

## Характеристики использованных линий

$\lambda$ , нм	Элемент	$d_0$	EPL, эВ	$h_d$ , км	$h_w$ , км
587.32142	Fe I	0.167	4.26	152	138
588.00236	Fe I	0.117	4.56	140	128
588.02726	Ti I	0.066	1.05	183	177
588.12822	Fe I	0.146	4.61	143	129
589.92972	Ti I	0.326	1.05	220	200
590.24755	Fe I	0.143	4.59	143	129
590.33194	Ti I	0.049	1.07	182	175
591.62535	Fe I	0.555	2.45	294	238
592.21145	Ti I	0.200	1.05	200	187
592.77919	Fe I	0.410	4.65	199	160
592.96802	Fe I	0.387	4.55	193	158
593.01894	Fe I	0.669	4.65	357	224

глубина  $d_0$  линий для центра солнечного диска [4], потенциал возбуждения нижнего уровня  $EPL$  [18] и высоты образования для центра диска, вычисленные по центральным глубинам профилей линий, наблюдаемых в спектре невозмущенной фотосферы [4].

#### ЛУЧЕВЫЕ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ВЕЩЕСТВА В НЕВОЗМУЩЕННОЙ ФОТОСФЕРЕ

Для определения лучевых скоростей движения вещества в невозмущенной фотосфере использовались длины волн фраунгоферовых линий Fe I для центра солнечного диска из [11]. Лабораторные длины волн брались из [19]. Лучевые скорости в зависимости от высоты образования линий  $h$  и в зависимости от центральных глубин профилей линий  $d_0$  приведены на рис. 1. Высоты образования линий и центральные глубины взяты в книге [4]. Видно, что почти все значения радиальной лучевой скорости отрицательные, что соответствует движению вещества к наблюдателю. Эти значения скоростей — усредненные по площади и времени из-за низкого пространственного разрешения. В реальности конвективные движения в гранулах и межгранульных промежутках вызывают смещения линий в разные стороны спектра. Значения  $\Delta V_{\text{луч}}$ , полученные по сильным линиям, образующимся в верхних слоях фотосферы, ближе к нулю и имеют значительно меньший разброс, что можно объяснить отсутствием конвективных движений в этих слоях.

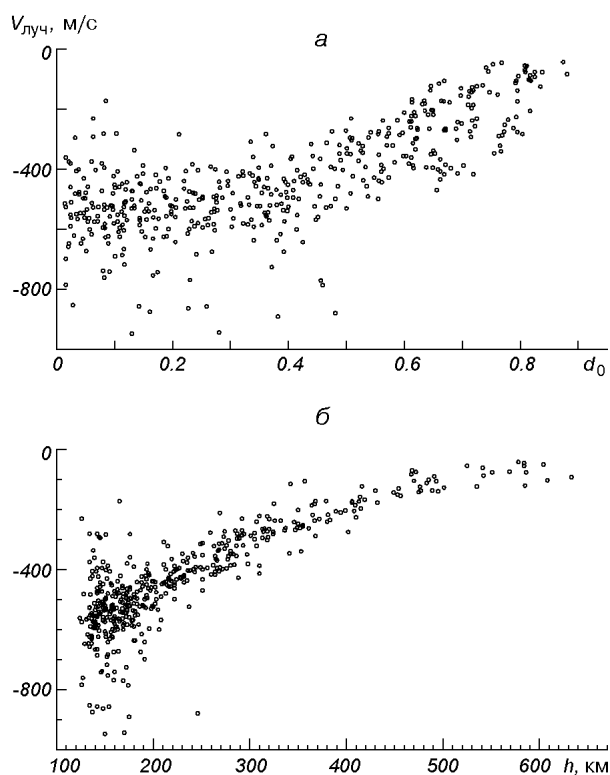


Рис. 1. Зависимости лучевой скорости движения вещества в невозмущенной фотосфере для центра солнечного диска [11] от высоты и центральной глубины профилей фраунгоферовых линий Fe I [4]

ЛУЧЕВЫЕ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ВЕЩЕСТВА  
В СЛАБОЙ ВСПЫШКЕ

Вспышка 24 мая 1979 г. балла sf возникла вблизи центра диска в  $12^{\text{h}}56^{\text{m}}$  UT. Она продолжалась 33 мин, максимум ее интенсивности в линии  $H_{\alpha}$  зарегистрирован в  $13^{\text{h}}02^{\text{m}}$ . Повышения потока рентгеновского излучения во время вспышки не наблюдалось. Фотографии спектров были сделаны в главной фазе вспышки в  $13^{\text{h}}05.7^{\text{m}}$ ,  $13^{\text{h}}17.6^{\text{m}}$ ,  $13^{\text{h}}20.6^{\text{m}}$  и в  $13^{\text{h}}27.5^{\text{m}}$  UT.

На рис. 2 приведены зависимости лучевой скорости от высоты для этих моментов наблюдения. Пунктиром дано распределение скорости для невозмущенной фотосферы. Оно получено следующим образом. По доплеровским смещениям приведенных в таблице линий в спектре невозмущенной фотосферы относительно их положений в спектре лабораторного источника излучения находились значения лучевой скорости, которые затем были усреднены для близких высот и аппроксимированы полиномом второй степени. Длины волн линий титана в спектре Солнца брались из [20], а лабораторные длины волн — из [21].

Движения фотосферного вещества во время исследуемой вспышки имели иной характер, чем в невозмущенной области Солнца (рис. 2). Через 4 мин после максимума интенсивности в линии  $H_{\alpha}$  в фотосфере происходило преимущественное опускание вещества со скоростью примерно 0.15—0.4 км/с. Наибольшими (0.4—0.7 км/с) за время наблюдений скорости были через 16 мин после максимума вспышки. Еще через 3 мин они уменьшились на 0.2—0.4 км/с, а к концу вспышки увеличился разброс значений лучевой скорости. В хромосферных слоях вспышки также наблюдались нисходящие потоки. Согласно [7] лучевая скорость, найденная по смещениям ядра линии  $H_{\alpha}$ , составляла 4—6 км/с.

Движения вещества во вспышках подобного типа исследовались также в работах [2, 9, 12, 16]. Обобщая их результаты и данные, полученные в настоящей работе, можно описать следующую картину изменения поля скоростей. В хромосферных и фотосферных слоях в течение главной фазы изученных вспышек происходило опускание вещества. В хромосфере скорости были от нескольких до 20—30 км/с, а в фотосфере — примерно 0.2—2 км/с. Вспышечное возмущение распространялось из верхних слоев солнечной атмосферы вниз и постепенно охватывало нижние слои фотосферы. Оно имело волновой характер. К концу вспышек, как правило, скорости во всех слоях уменьшались.

Как предсказано в работах [13, 17, 23 и др.], после магнитных пересоединений в верхней атмосфере Солнца под воздействием пучков нетепловых электронов и тепловых потоков в хромосфере может образовываться холодная и плотная конденсация, движущаяся вниз. Полученные изменения скорости во время вспышек могут быть проявлением отклика

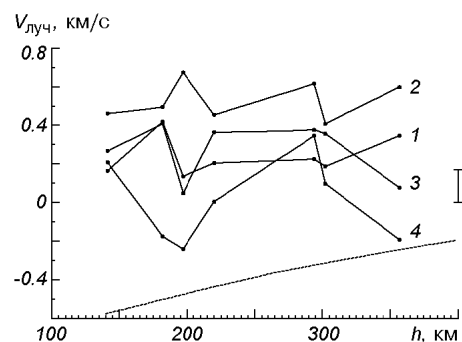


Рис. 2. Зависимости лучевой скорости движения фотосферного вещества в слабой вспышке 24.05.79 г. от высоты для моментов наблюдения: 1 —  $13^{\text{h}}05.7^{\text{m}}$ , 2 —  $13^{\text{h}}17.6^{\text{m}}$ , 3 —  $13^{\text{h}}20.6^{\text{m}}$  и 4 —  $13^{\text{h}}27.5^{\text{m}}$  UT. Пунктир — лучевая скорость в невозмущенной фотосфере. Вертикальной чертой отмечена ошибка измерения скорости

фотосферы на прохождение такой конденсации. Согласно [13] она должна представлять собой тонкий слой, внутри которого скорость постоянна. Перед движущимся фронтом скорость вещества должна быть равна нулю. Время существования конденсации — около 1 мин. Данные наблюдений свидетельствуют о том, что нисходящим движением во время вспышек охвачены не только хромосферные, но и фотосферные слои. Нисходящие потоки наблюдаются в течение нескольких минут до самого конца вспышек. Неизвестна природа волн, проходящих через фотосферу. Ударные волны, сопровождающие конденсацию, диссипируют в хромосфере, а альвеновские волны в этих слоях должны иметь значительно более высокие скорости (порядка 10 км/с).

#### ЛУЧЕВЫЕ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ВЕЩЕСТВА В МОЩНОЙ ВСПЫШКЕ

Двухленточная вспышка 3 июня 1979 г. балла 2N возникла в активной области McMath 16051 в  $08^{\text{h}}42^{\text{m}}$  UT и продолжалась около двух с половиной часов. Ее координаты были: N18 E39. Она имела два максимума интенсивности в линии  $H_{\alpha}$  в  $09^{\text{h}}05^{\text{m}}$  и  $09^{\text{h}}37^{\text{m}}$  UT и закончилась в  $11^{\text{h}}13^{\text{m}}$  UT. Вспышка сопровождалась всплеском мягкого рентгеновского излучения балла M2. Спектры одной из лент были получены примерно за полчаса до вспышки в  $08^{\text{h}}09.6^{\text{m}}$  UT, в начальной фазе вспышки в  $08^{\text{h}}52.2^{\text{m}}$  UT и в главной ее фазе — в  $09^{\text{h}}46.0^{\text{m}}$ ,  $10^{\text{h}}11.8^{\text{m}}$ ,  $10^{\text{h}}30.1^{\text{m}}$  UT. Вид активной области и вспышки через  $H_{\alpha}$ -фильтр и положение щели спектрографа приведены в работе [8]. В первые два момента наблюдений в щель спектрографа попадали два ярких узла А и Б этой ленты. В главной фазе вспышки фотографировалось сечение В, близкое к первому и пересекающее яркий узел посередине ленты. Положение вспышки на Солнце соответствовало  $\cos\Theta = 0.74$ . По программе SPANSAT для этого положения были рассчитаны высоты образования рассматриваемых линий. На рис. 3 приведены лучевые скорости движения фотосферного вещества в узлах вспышки А, Б (слева) и В (справа) в зависимости от высот образования линий. Пунктиром нанесено распределение лучевой скорости в невозмущенной фотосфере. Эта зависимость — аппроксимация значений скорости, полученных по доплеровским смещениям используемых линий в спектре невозмущенной фотосферы. Поправка за годичное обращение Земли вокруг Солнца и суточное вращение составляла 0.15 км/с. Все значения скорости для предвспышечной, начальной и главной фаз вспышки — отрицательные, происходил подъем фотосферного вещества, тогда как в невозмущенной фотосфере вещество преимущественно двигалось от наблюдателя. Перед вспышкой скорости в узлах А и Б находились в пределах 0.5—2 км/с, причем во внутреннем узле ленты Б, близком к волокну, они были меньше, чем в узле А. В начальной фазе вспышки в верхних слоях фотосферы в узле А скорости уменьшились на 0.3—0.7 км/с по сравнению с их значениями для предвспышечной фазы. Во внутреннем же узле они по всей толще фотосферы увеличились, достигнув в нижних слоях 3—4.5 км/с. Согласно [8] в хромосфере перед вспышкой и в ее начальной фазе также происходил подъем вещества со скоростью 1—2 км/с.

В главной фазе вспышки в узле В наблюдался восходящий поток фотосферного вещества со скоростями 1—2 км/с (рис. 3). Скорость была наибольшей в верхних слоях фотосферы в первый момент наблюдений главной фазы вспышки в  $09^{\text{h}}46^{\text{m}}$  UT. Следует отметить, что в хромосфере в  $09^{\text{h}}45^{\text{m}}$  UT скорость подъема составляла 25.6 км/с, что могло быть вызвано испарением хромосферного вещества, а затем уменьшилась до 2—7 км/с [8].

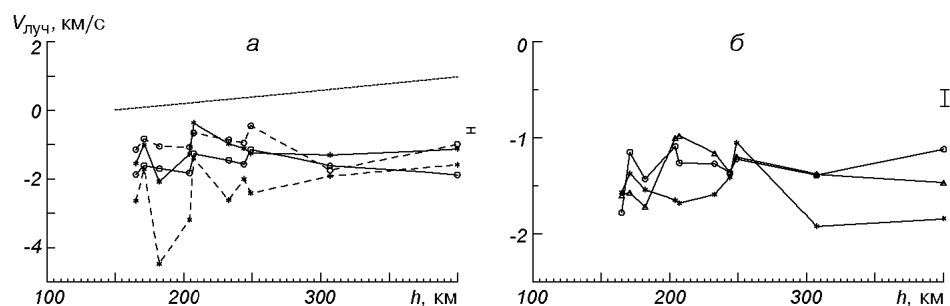


Рис. 3. Зависимости лучевой скорости движения фотосферного вещества в мощной вспышке 3 июня 1979 г. от высоты: *a* — в узлах А (сплошные линии) и Б (штриховые линии) для моментов наблюдения:  $08^{\text{h}}09.6^{\text{m}}$  (кружки),  $08^{\text{h}}52.2^{\text{m}}$  (звездочки); *б* — в узле В для моментов наблюдения:  $09^{\text{h}}46.0^{\text{m}}$  (звездочки),  $10^{\text{h}}11.8^{\text{m}}$  (кружочки),  $10^{\text{h}}30.1^{\text{m}}$  (треугольники). Пунктир — лучевая скорость в невозмущенной фотосфере. Вертикальной чертой отмечена ошибка измерения скорости

Во все моменты наблюдений вспышки в разных ее узлах регистрировался подъем фотосферного вещества, который мог быть связан с выходом нового магнитного потока из-под фотосферных слоев. Как показано в работе [14], в исследуемой активной области 3 июня отмечен значительный разбаланс магнитных потоков: преобладал поток N-полярности. В течение дня происходил быстрый рост потока S-полярности и уменьшение потока N-полярности, разбаланс уменьшался, что свидетельствует о быстрых изменениях крупномасштабного магнитного поля. Этот процесс сопровождался появлением мощных вспышек в рассматриваемой активной области.

В работах [15, 22] сообщается о восходящих потоках фотосферного вещества, наблюдавшихся за 10—25 мин до вспышек. В начальной фазе ряда вспышек были выявлены смещения фраунгоферовых линий в коротковолновую часть спектра [10, 12, 24], что свидетельствует о преобладании поднимающегося вещества. В течение мощной двухленточной вспышки 7 октября 1979 г. в фотосфере также происходил подъем вещества со скоростью примерно 2 км/с [1, 5]. Необходимо дальнейшее накопление информации о движениях фотосферного вещества во время вспышек.

#### ВЫВОДЫ

1. Лучевые скорости движения фотосферного вещества в слабой вспышке 24 мая 1979 г. и мощной 3 июня 1979 г. отличались по величине и по направлению от скоростей в невозмущенной фотосфере Солнца.

2. В главной фазе слабой вспышки на всех уровнях фотосферы наблюдалось опускание фотосферного вещества со скоростью 0.2—0.7 км/с, что могло быть проявлением отклика фотосферы на прохождение хромосферной конденсации.

3. Во все моменты наблюдения мощной вспышки происходил подъем фотосферного вещества. Перед вспышкой примерно за полчаса до ее начала в двух ее узлах А и Б, скорости составляли 0.5—2 км/с. В начальной фазе вспышки во внутреннем, близком к волокну узле Б они увеличились, достигнув в нижних слоях 3—4.5 км/с. В главной фазе вспышки в узле В скорость движения фотосферного вещества была 1—2 км/с. Подъем вещества мог быть связан с выходом нового магнитного потока из под фотосферных слоев активной области.

1. 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, 1999 г. — Троицк: ИЗМИРАН, 1999.—С. 28—34.
2. Аликаева К. В., Черногор С. Н. Состояние хромосферного и фотосферного вещества слабой солнечной вспышки. I. Лучевые скорости // Кинематика и физика небес. тел.—2000.—16, № 6.—С. 541—550.
3. Гадун А. С., Шеминова В. А. SPANSAT: программа расчета профилей спектральных линий поглощения в звездных атмосферах в ЛТР приближении. — Киев, 1988.—37 с.—(Препринт / АН УССР. Ин-т теор. физики; № 87Р).
4. Гуртовенко Э. А., Костык Р. И. Фраунгоферов спектр и система солнечных сил осцилляторов. — Киев, 1989.—200 с.
5. Кондрашова Н. Н. Изменение асимметрии линий в процессе солнечной вспышки 7 октября 1979 г. // Кинематика и физика небес. тел.—1988.—4, № 4.—С. 23—28.
6. Кондрашова Н. Н., Пасечник М. Н. Фотосферные слои вспышки и флоккула. I. Профили, асимметрия и смещения фраунгоферовых линий // Кинематика и физика небес. тел.—1997.—13, № 4.—С. 61—75.
7. 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.
8. Кондрашова Н. Н., Рудникова Е. Г., Пасечник М. Н. Движения хромосферного и фотосферного вещества в двухленточной солнечной вспышке // Кинематика и физика небес. тел.—2001.—17, № 6.—С. 485—495.
9. Пасечник М. Н. Лучевые скорости в фотосфере и хромосфере вспышки и активного флоккула // Кинематика и физика небес. тел.—2001.—17, № 2.—С. 99—112.
10. Редюк Т. И. Движение вещества на уровне фотосферы во вспышечно-активных областях // Вестн. Киев. ун-та. Астрономия.—1990.—№ 32.—С. 28—35.
11. 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.
12. 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.
13. Fisher G. H. Dynamics of flare-driven chromospheric condensations // *Astrophys. J.*—1989.—346, N 2.—P. 1019—1029.
14. Golovko A. A., Kotrc P. On some peculiarities in the evolution of the McMath 16051 flare active region on 2—7 June, 1979 // *Solar Phys.*—1992.—142, N 1.—P. 67—86.
15. 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.
16. Kosovichev A. G., Zharkova V. V. X-ray flare sparks quake inside Sun // *Nature.*—1998.—393.—P. 317—318.
17. Livshits M. A., Badalyan O. G., Kosovichev A. G., Katsova M. M. The optical continuum of solar and stellar flares // *Solar Phys.*—1981.—73, N 2.—P. 269—288.
18. Moore C. E., Minnaert M. G. J., Houtgast J. The solar spectrum 2935 to 8770 Å. — Washington: National Bureau of Standards, 1966.—349 p.
19. Nave G., Johansson S., Learner R. C. M., et al. A new multiplet table for Fe I // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1994.—94, N 1.—P. 221—459.
20. Pierce A. K., Breckinridge J. B. The Kitt Peak table of photographic solar spectrum wavelengths // *Kitt Peak Contribution.*—1972.—N 559.—43 p.
21. Piskunov N. E., Kupka F., Ryabchikova T. A., et al. VALD: the Vienna atomic line data base // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1995.—112, N 3.—P. 525—535.
22. 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.
23. Somov B. V., Syrovatskii S. I., Spektor A. R. Hydrodynamic response of the solar chromosphere to an elementary flare burst. I. Heating by accelerated electrons // *Solar Phys.*—1981.—73, N 1.—P. 145—155.
24. Yoshimura H., Tanaka K., Shimizu M., Hiei E. Photospheric mass motions associated with a flare // *Publs Astron. Soc. Jap.*—1971.—23, N 3.—P. 443—448.

Поступила в редакцию 26.11.02