

УДК 523.985.3—837

Изменение асимметрии линий в процессе солнечной вспышки 7 октября 1979 г.

Н. Н. Кондрашова

Приведены результаты изучения тонкой структуры фраунгоферовых линий во время солнечной вспышки 7 октября 1979 г. Асимметрия линий изменялась в зависимости от высоты их образования и стадии развития вспышки. Наблюдаемые изменения можно объяснить увеличением скорости подъема вещества в фотосферных и хромосферных слоях в начальной фазе вспышки и его последующим опусканием.

THE VARIATION OF LINE ASYMMETRY DURING THE SOLAR FLARE ON THE 7th OF OCTOBER, 1979, by Kondrashova N. N.—An analysis is made of the asymmetry of Fraunhofer lines observed during the flare on the 7th of October, 1979. The line asymmetry depends on the formation depth of the line and on the flare phase. The variations may be explained by an increased velocity of the matter rise in the initial phase of the flare. At maximum and postmaximum phases the downward motion of the matter is dominated.

Введение. Неоднородность структуры фотосферы Солнца, динамические процессы, происходящие в ней, обуславливают асимметричность фраунгоферовых линий. К настоящему времени исследована тонкая структура нескольких сотен фраунгоферовых линий, наблюдаемых в невозмущенной фотосфере. Полученные закономерности поведения бисекторов линий положены в основу неоднородных моделей фотосферы.

Изучение асимметрии фраунгоферовых линий в активных областях (АО) начато сравнительно недавно. В работах [11, 15—17] установлено, что формы бисектора линий, наблюдаемых в АО и невозмущенной фотосфере, различны. Однако данные разных авторов о величине асимметрии и смещении линий, наблюдаемых в АО, противоречивы. В [11, 16, 17] обнаружено смещение линий в сторону длинных, а в [15] — в сторону коротких волн относительно их положения в спектре невозмущенной фотосферы. Согласно [11], при переходе от центра к краю диска форма бисектора линий и его смещение в АО и невозмущенной фотосфере изменяются по-разному: в АО изменения меньше. Сдвиги линий, как и для невозмущенной фотосферы, уменьшаются не пропорционально $\cos \theta$. Обнаружено увеличение «красного» смещения верхней части бисектора линий с увеличением напряженности магнитного поля.

В зависимости от полученных результатов авторы упомянутых работ интерпретируют изменения асимметрии линий в АО по-разному. В [15] сделан вывод о том, что конвективный поток или волны в АО переносят энергию в более высокие слои фотосферы. В [11, 17] обнаруженное уменьшение асимметрии линий в АО объяснено подавлением конвекции магнитным полем. В [16] не исключается, что возросший конвективный поток замаскирован нисходящим потоком вещества из верхних слоев АО.

Совершенно не исследовано поведение асимметрии фраунгоферовых линий в АО во время вспышек. Авторы [23] наблюдали большие искажения формы линий поглощения в спектре одного из узлов небольшой вспышки в момент ее максимума и на стадии затухания. Эти искажения они объясняли крупномасштабными движениями вещества в фотосфере и нижней хромосфере. Лучевая скорость, измеренная по доплеровским сдвигам исследованных в [23] линий, в максимуме вспышки достигала 1—2 км/с и уменьшалась с высотой и со временем. В [3, 4, 8, 13] зарегистрированы быстрые изменения скорости фотосферного вещества во время вспышек. В большинстве случаев в начальной фазе вспышек увеличивается скорость поднимающихся потоков, а в стадии затухания преобладают опускающиеся потоки. В хромосферных слоях АО также наблюдаются резкие изменения лучевых скоростей, связанные с появлением вспышек. Так, перед серией вспышек 6 октября 1979 г. произошло внезапное увеличение скорости подъема вещества [7]. Авторы [7] предположили, что возмущения, вызывающие изме-

нения скорости, распространяются из-под фотосферных слоев вдоль магнитных трубок. Согласно многочисленным работам (например, [14, 19, 22]), во время вспышек преобладает «красная» асимметрия и сдвиги линии H_{α} в длинноволновую сторону спектра, что свидетельствует о преимущественном опускании вещества. Однако отмечались случаи, когда в начальной фазе вспышек наблюдалась «синяя» асимметрия водородных линий [9, 21]. Для более полного понимания механизма вспышек важно исследовать взаимосвязь динамических процессов, происходящих в хромосферных и фотосферных слоях. В настоящей работе рассматриваются изменения тонкой структуры линий, наблюдавшихся в АО 7 октября 1979 г. в процессе вспышки балла 1В.

Характеристики линий

| λ , нм | Элемент | EPL , эВ | Фактор Ланде | Высота образования, км | Центральная глубина |
|----------------|---------|------------|--------------|------------------------|---------------------|
| 543.4534 | Fe I | 1.01 | 0 | 785 | 0.887 |
| 617.3341 | Fe I | 2.22 | 2.50 | 277 | 0.595 |
| 539.8287 | Fe I | 4.44 | 0.30 | 256 | 0.658 |
| 543.5866 | Ni I | 1.99 | 0.50 | 234 | 0.553 |
| 618.0209 | Fe I | 2.73 | 0.62 | 230 | 0.489 |
| 539.5222 | Fe I | 4.44 | 0.50 | 152 | 0.273 |
| 614.5020 | Si I | 5.61 | — | 144 | 0.297 |
| 614.9249 | Fe II | 3.89 | 1.33 | 140 | 0.330 |

Наблюдения. Выбор линий. Активная область с боулдеровским номером AR 2030, содержащая биполярную группу пятен (СД 461), входила в комплекс вспышечноактивных областей, в котором за время его прохождения по диску Солнца произошло много вспышек, в том числе гомологических [1]. Рассматриваемая вспышка возникла в 0755 UT вблизи линии раздела полярностей [20]; ее максимум зафиксирован в 0810. Она сопровождалась выбросом, скорость распространения которого в 0810 достигала 130 км/с.

Спектрограммы получены с помощью горизонтального солнечного телескопа АЦУ-5 ГАО АН УССР в одном и том же сечении на протяжении всего развития вспышки, начиная с 0801. На том же расстоянии от центра солнечного диска, что и вспышка, сфотографированы спектры невозмущенной фотосферы. Наблюдения велись в четвертом и пятом порядках спектра. Дисперсия спектрографа составляет соответственно 22.8 и 40.2 мм/нм. При фотографировании спектров применялись пластинки ORWO WP-3 и WO-3, имеющие мелкозернистую эмульсию. Время экспозиции — несколько секунд.

Полученный материал позволяет рассмотреть поведение линий фраунгоферова спектра на разных стадиях вспышки: в начале (0801—0806), максимуме (0810.6—0815.2) и в конце (0839.8—0845.8), а также для сравнения — в невозмущенной фотосфере. Для изучения асимметрии с помощью таблиц [18] отобраны наименее блендированные линии, образующиеся в разных слоях фотосферы, преимущественно малочувствительные к магнитному полю, с факторами Ланде $g < 1$. Для сопоставления условий на фотосферном и хромосферном уровнях в число рассматриваемых включена линия H_{α} . Для исследования влияния магнитного поля добавлены линии $\lambda\lambda$ 614.9 и 617.3 нм с сильной магнитной чувствительностью. Список линий и их характеристики приведены в таблице. Факторы Ланде взяты из работы [10]. Высоты образования линий рассчитаны с использованием модели Холвегера—Мюллер по программе В. А. Шеминой. При этом использована методика, описанная в [6]. Ядра выбранных линий формируются в большом интервале высот — от 140 до 785 км.

Обработка наблюдательного материала. Фотометрия спектрограмм проводилась с помощью измерительного комплекса (созданного сотрудниками ГАО АН УССР С. И. Приходько, В. Л. Карбовским, Л. И. Федоренко), который включает автоматизированный микрофотометр АМФ-2. Информация выводилась на перфолену с шагом 0.15 пм по длине волны. Разрезы спектра делались через место вспышки на спектрограмме (определенное по линии H_{α}) и по обеим сторонам от него на расстоянии 1 мм, что соответствует 8700 км на Солнце. Боковые разрезы относятся также к АО. Влияние инструментального профиля [2, 12] учитывалось методом, предложенным в [5].

Средняя ошибка усредненного по трем—четырем записям профиля составляет 0.25—0.5 % интенсивности непрерывного спектра. Средняя относительная ошибка одного измерения полуширины профиля 0.5—2 %.

Бисекторы профилей линий находились по серединам хорд, соединяющих точки профиля с одинаковой интенсивностью. Положение центра линии определялось на участке профиля от $0.8 d_0$ до d_0 (центральная глубина), на котором линии симметричны с погрешностью до 0.1—0.2 пм. Бисекторы линий, наблюдаемых в невозмущенной

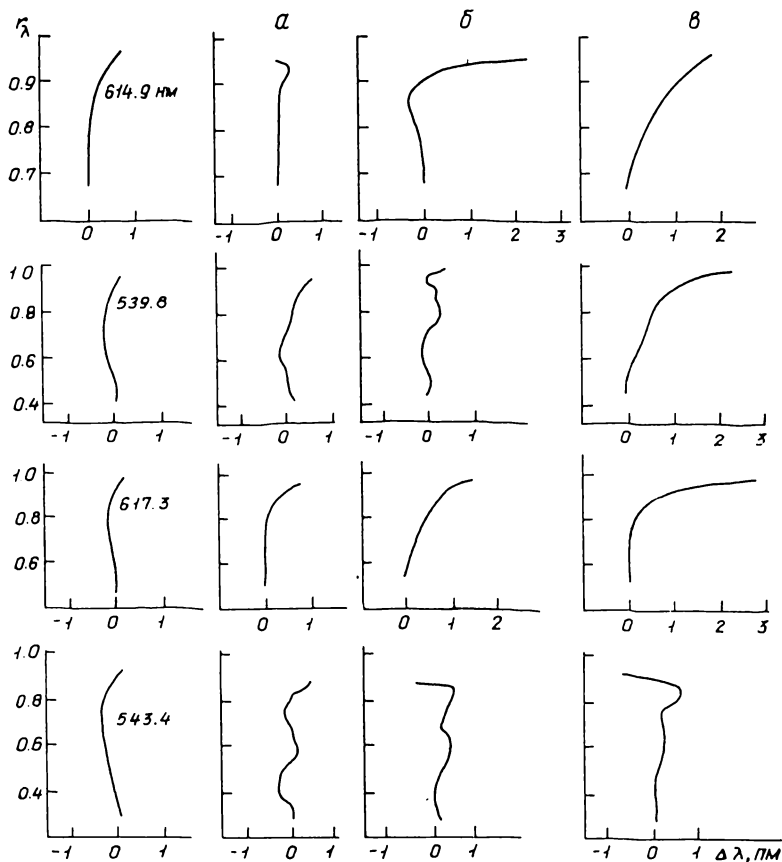


Рис. 1. Бисекторы профилей линий, наблюдавшихся в невозмущенной фотосфере и активных областях (здесь и на других рисунках: а — начало, б — максимум, в — затухание вспышки 07.10.79)

фотосфере, усреднены по нескольким записям. Максимальное отклонение отдельного бисектора от среднего составляет 0.2—0.3 пм. В далеких крыльях ошибка увеличивается.

Изменения асимметрии фраунгоферовых линий в процессе вспышки. На рис. 1 для примера приведены бисекторы профилей нескольких избранных линий, образующихся в разных слоях фотосферы, для моментов времени, соответствующих началу, максимуму и стадии затухания вспышки 07.10.79. Слева на рисунке для сравнения даны бисекторы профилей линий, наблюдаемых в невозмущенной фотосфере, имеющие типичную форму буквы *с*. В начальной стадии вспышки форма бисектора профилей рассматриваемых линий в целом изменяется мало по сравнению с их формой в невозмущенной фотосфере. Можно отметить лишь небольшое (в пределах 0.5 пм) относительное смещение средних и верхних частей бисекторов линий, образующихся на высотах $h < 250$ км, в коротковолновую, а линий с $h > 250$ км в длинноволновую области спектра. Смещение верхней части бисектора линий, образующихся в верхних слоях фотосферы, в красную сторону становится еще более выраженным в период максимума вспышки, а на стадии затухания оно наблюдается практически во всех рассматриваемых

мых линиях. Это смещение намного больше значения, полученного по наблюдениям АО вне вспышек [11, 15]. Исключение представляет линия Ni I λ 543.5 нм, бисектор которой на протяжении вспышки изменяется очень мало (в пределах ошибки). Поведение бисектора линий, образующихся примерно на одних и тех же высотах фотосферы, но по-разному чувствительных к магнитному полю ($\lambda\lambda$ 614.9 и 539.5 нм, $\lambda\lambda$ 617.3 и 539.8 нм), одинаково. Характерные особенности бисекторов профилей, полученных при

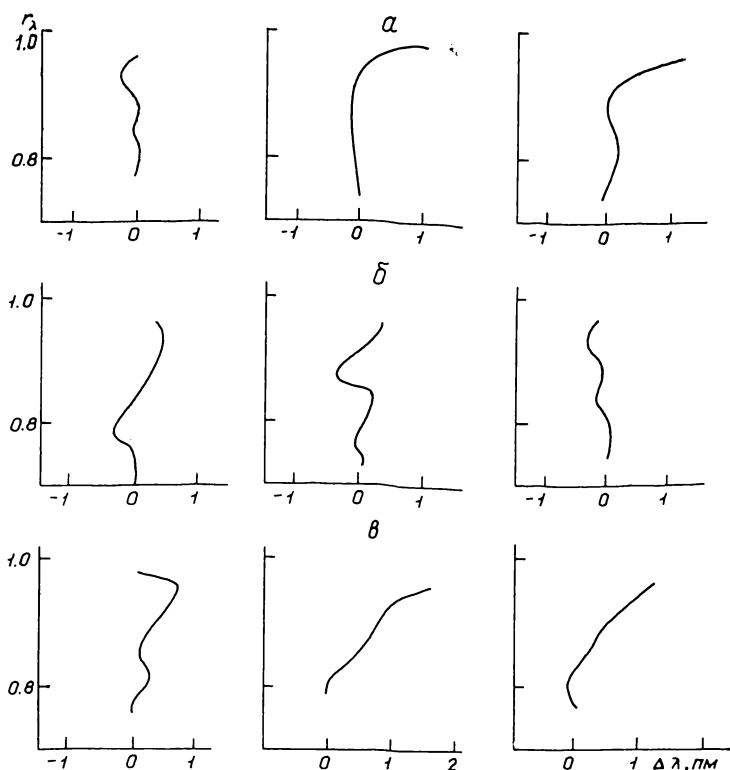


Рис. 2. Бисекторы профилей линии λ 539.5 нм, соответствующие разрезам спектра на месте вспышки (посредине) и по обе стороны от нее

разрезах спектра на месте вспышки и по обе стороны от нее, одни и те же. На рис. 2 для примера даны бисекторы линии Fe I λ 539.5 нм для трех основных стадий вспышки.

Изменения профилей линий в течение вспышки. Для сравнения изменений параметров профилей во время вспышки к используемым линиям добавлены еще пять линий с большей магнитной чувствительностью. На рисунках 3, 4 показаны относительные уклонения центральных глубин (δd_0) и полуширин ($\delta \Delta \lambda_{1/2}$) профилей линий в зависимости от высоты их образования для трех разных стадий вспышки. В начале вспышки линии несколько ослаблены, а их полуширины изменились мало. В максимуме вспышки все рассматриваемые линии в разной степени ослаблены и расширены. На стадии затухания уклонения центральных глубин в основном малы, а полуширины ведут себя по-разному: одни линии расширены, другие сужены. Линия λ 543.4 нм, образующаяся в самых верхних слоях фотосферы, ослаблена ($\delta d_0 = -0.08 \dots -0.1$) и расширена ($\delta \Delta \lambda_{1/2} = 0.2$) на всем протяжении вспышки. Уклонения параметров профилей линий во всех трех разрезах спектра близки, их различие не превышает 5%.

Сравнивая поведение по-разному чувствительных к магнитному полю линий, можно отметить, что их центральные глубины в течение всей вспышки изменяются одинаково. В максимуме вспышки полуширины линий изменяются по-разному, но какой-либо тенденции к их изменению в зависимости от чувствительности линий к магнитному полю не отмечается. На стадии затухания такая тенденция намечается: линии, имеющие фактор Ланде $g > 1$, стали уже.

Оценка физических условий в фотосферных слоях активной области. Поскольку зависимости δd_0 от магнитной чувствительности линий не обнаружено, то при оценке физических условий, по-видимому, можно не учитывать влияние магнитного поля на центральные глубины линий. Для определения температуры и давления отобраны две группы линий с высотами образования 140—150 и 230—250 км. Величины T и P_0 находились путем сравнения наблюдаемых и вычисленных центральных глубин избран-

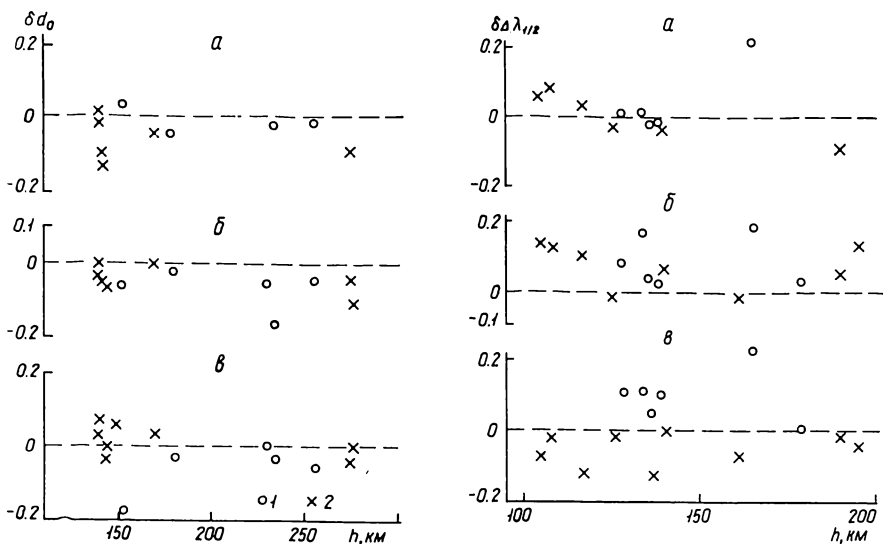


Рис. 3. Относительные уклонения центральных глубин профилей линий для разных стадий вспышки: 1 — данные для малочувствительных, 2 — для сильночувствительных к магнитному полю линий

Рис. 4. Относительные уклонения полуширин профилей линий для разных стадий вспышки. Обозначения см. на рис. 3

ных линий. При расчетах центральных глубин линий для невозмущенной фотосферы использовалась модель Холвегера—Мюллер. Теоретические уклонения δd_0 вычислялись для ряда моделей, получаемых путем изменений температуры и газового давления. В целом изменения температуры в фотосферных слоях АО во время вспышки не превышают 200 К, а газовое давление увеличено на 10—30%. В начальной стадии вспышки температура и давление на высоте 140 км увеличились, а на высоте 230 км остались без изменения. На стадии затухания температура и давление на высоте 230 км увеличились.

Путем сравнения вычисленных и наблюдаемых полуширин слабых линий сделаны оценки амплитуды общего поля скоростей на высотах 100—140 км. В начале вспышки скорость увеличилась в среднем на 0.3 км/с, в момент максимума — на 0.5 км/с.

Изменение линии H_{α} в процессе вспышки. В начальной фазе вспышки наблюдались небольшой сдвиг линии H_{α} в синюю сторону спектра и ее усиление. Линии металлов в крыльях H_{α} также смещены в синюю сторону относительно их положения в спектре невозмущенной области. В максимуме вспышки полная протяженность эмиссии в шкале длин волн составила 0.28 нм. Красное крыло линии H_{α} значительно шире синего. Смещение линии H_{α} и линий металлов в ее крыльях уменьшилось почти в два раза. Профили линии H_{α} для разрезов спектра, отстоящих на 1 мм по обе стороны от места вспышки на спектрограмме, мало отличаются от профиля линии в невозмущенной области. На стадии затухания линия H_{α} лишь немного усилена.

Основные результаты и выводы. Во время вспышки асимметрия фраунгоферовых линий изменялась по-разному в зависимости от высоты их образования и стадии развития вспышки. Зависимости асимметрии линий от их чувствительности к магнитному полю не обнаружено. В начальной стадии вспышки изменения профилей линий и их бисекторов малы. Верхняя часть бисектора линий, образующихся ниже 250 км, смещена в синюю сторону относительно его положения в спектре невозмущенной фотосферы. Бисектор линий, образующихся выше 250 км, расположен в длинноволновой

части контура. Линия H_{α} и линии металлов в ее крыльях смещены в синюю сторону относительно их положения в спектре невозмущенной области. В максимуме вспышки все рассматриваемые линии ослаблены и уширены. Верхние части их би-секторов больше смещены в красную сторону спектра. Наблюдалась «красная» асимметрия эмиссии в линии H_{α} . Сдвиг линий в синюю сторону уменьшился. На стадии затухания почти все линии имели «красную» асимметрию.

Наблюдаемые изменения линий и их асимметрия свидетельствуют об увеличении скорости подъема вещества в фотосферных и хромосферных слоях в начальной фазе вспышки. Следует отметить, что 6 октября 1979 г. в рассматриваемой АО наблюдалось резкое увеличение скорости подъема газа на уровне хромосферы, связанное с началом вспышек [7]. Появление «красной» асимметрии эмиссии в линии H_{α} в максимуме вспышки, по-видимому, связано с опусканием светящегося вещества. К концу вспышки преимущественное опускание вещества охватывает всю фотосферу до нижних слоев.

1. Бхатнагар А., Джайн Р. М., Шелке Р. Н. Гомологические вспышки во время интервала СЕРФ 4—9 октября 1979 // Год солнечного максимума.— М.: ИЗМИРАН, 1981.— Т. 2.— С. 90—96.
2. Ганджа С. И. Инструментальный контур V порядка солнечного спектрографа ГАО АН УССР // Астрометрия и астрофизика.— 1984.— Вып. 52.— С. 49—52.
3. Гопасюк С. И. О движении вещества на различных уровнях солнечной атмосферы в активных областях во время вспышек // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.— 1964.— 32.— С. 14—25.
4. Гопасюк С. И., Огирь М. Б., Цап Т. Т. О связи фотосферных и хромосферных процессов в активной области во время вспышек // Солнеч. данные.— 1963.— № 4.
5. Гуртовенко Э. А. Об исправлении профилей спектральных линий за ошибку инструментального контура с помощью цифровой вычислительной машины // Астрон. журн.— 1966.— 43, вып. 3.— С. 659—669.
6. Гуртовенко Э. А., Шелмина В. А. Еще раз о глубине образования фраунгоферовых линий // Там же.— 1983.— 60, вып. 5.— С. 982—994.
7. Меркуленко В. Е., Паламарчук Л. Э., Поляков В. И. Синфазность колебаний хромосферы в пределах комплекса активности и динамические процессы в волокне во время вспышек 6 октября 1979 г. // Исслед. по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца.— 1983.— Вып. 65.— С. 172—190.
8. Редюк Т. И. Движение и физическое состояние вещества во вспышечно-активной фотосфере // Пробл. космич. физики.— 1985.— Вып. 20.— С. 24—30.
9. Alikaeva K. V., Nikulin I. F., Polupan P. N. Variation of H_{α} and H_{β} profiles during May 16, 1981 flare // Publ. Debrecen Observ.— 1983.— 5.— P. 217—222.
10. Beckers J. M. A table of Zeeman multiplets // Phys. Sci. Res. Papers.— 1969.— N 371.— 193 p.
11. Cavallini F., Ceppatelli G., Righini A. Asymmetry and shift of three Fe I photospheric lines in solar active regions // Astron. and Astrophys.— 1985.— 143, N 1.— P. 116—121.
12. Gurtovenko E. A., Fedorenko L. I. The use of a laser beam for investigation the instrumental profile of a double-pass solar spectrograph // Solar Phys.— 1969.— 6, N 3.
13. Harvey K. L., Harvey J. W. A study of the magnetic and velocity fields in an active region // Ibid.— 1976.— 47, N 1.— P. 233—246.
14. Ichimoto K., Kurokawa H. H_{α} red asymmetry of solar flares // Ibid.— 1984.— 93, N 1.— P. 105—121.
15. Kaisig M., Schroter E. H. The asymmetry of photospheric absorption lines. II // Astron. and Astrophys.— 1983.— 117, N 2.— P. 305—313.
16. Koch A. Plasma motion in umbrae and the surrounding photosphere derived from spectroscopic Doppler measurements and tracer measurements of spots // Solar Phys.— 1984.— 93, N 1.— P. 53—72.
17. Livingston W. C. Magnetic fields, convection and solar luminosity variability // Nature.— 1982.— 297, N 5863.— P. 208—209.
18. Moore C. E., Minnaert M. G. J., Houtgast J. The solar spectrum 2935 Å to 8770 Å.— Washington, 1966.— 345 p.
19. Schoolman S. A., Ganz E. D. H_{α} flare spectra // Solar Phys.— 1981.— 70, N 2.— P. 363—374.
20. Solar-Geophysical Data.— 1979.— N 424.— Part 1.— P. 62.
21. Svestka Z. Solar flares.— Dordrecht: Reidel, 1976.— 399 p.
22. Tang F. Flare asymmetry as seen in offband H_{α} filtergrams // Solar Phys.— 1983.— 83, N 1.— P. 15—25.
23. Yoshimura H., Tanaka K., Shimizu M., Hiei E. Photospheric mass motions associated with a flare // Publ. Astron. Soc. Jap.— 1971.— 23, N 3.— P. 443—448.