

УДК 523.985.3

**С. Н. Черногор**

Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины  
03680, ГСП, Киев-127, Голосиив

### **Влияние высотного градиента скоростей на профили фраунгоферовых линий**

*Проанализировано влияние высотного градиента скоростей в фотосфере на профили фраунгоферовых линий. Найдено, что только по смещению фраунгоферовых линий можно однозначно судить о направлении и величине лучевой скорости в слое образования ядра спектральной линии. Интерпретация асимметрии фраунгоферовых линий во вспышках требует более осторожного подхода, так как красная (синяя) асимметрия может возникать как при нисходящих, так и при восходящих потоках вещества.*

*ВПЛИВ ВИСОТНОГО ГРАДІЄНТА ШВИДКОСТЕЙ НА ПРОФІЛІ ФРАУНГОФЕРОВИХ ЛІНІЙ, Черногор С. М. — Проаналізовано вплив висотного градієнта швидкостей в фотосфері на профілі фраунгоферових ліній. Виявлено, що лише за зсувом фраунгоферових ліній можна зробити висновок про напрямок та величину променевих швидкостей в шарі формування ядра лінії. Інтерпретація асиметрії фраунгоферових ліній у спалахах вимагає більш обережного підходу, бо червона (синя) асиметрія може виникати як при низхідних, так і при висхідних потоках речовини.*

*THE INFLUENCE OF THE HEIGHT VELOCITY GRADIENT ON THE PROFILES OF FRAUNHOFER LINES, by Chornogor S. N. — The influence of the height velocity gradient in the photosphere on the profiles of Fraunhofer lines was analyzed. It was found that only the data about line shifts gives a possibility to make a conclusion on the direction and magnitude of the line-of-sight velocities in the layer where the cores of spectral lines are formed. The interpretation of the asymmetry of Fraunhofer lines in flares requires a more careful approach because red (blue) asymmetry may appear with in the descending and the ascending flows of matter.*

#### **ВВЕДЕНИЕ**

Об асимметрии как хромосферных, так и фотосферных линий в солнечных вспышках, которая указывает на неоднородности структуры атмосферы Солнца и динамические процессы в ней, известно давно. Однако данные о величине асимметрии и смещении линий противоречивы.

Изучение асимметрии фраунгоферовых линий как в невозмущенной фотосфере, так и в активных областях происходит на основе исследования

их бисекторов. В невозмущенной фотосфере бисекторы, как правило, имеют С-образную форму. Форма бисекторов обусловлена конвективными движениями в фотосфере Солнца. Для расчета теоретических бисекторов линий использовались многокомпонентные модели (см. обзоры [1, 17]).

Активные области (факельные площадки, флоккулы) являются местом концентрации мелкомасштабных магнитных элементов. Приведенные в [10] магнитогидродинамические модели показали, что в центре магнитной трубки вертикальные скорости близки к нулю, а максимум скоростей находится на расстояниях 100 км от центра магнитной трубки. По мере увеличения напряженности магнитного поля синяя асимметрия ослабляется [1, 2, 17]. Влияние конвекции частично подавлено.

В солнечных пятнах при наличии больших магнитных полей мелкомасштабная конвекция в значительной мере подавлена, а форма бисекторов отличается от С-образной. Часто бисекторы имеют S-образную форму [17, 22].

Что касается солнечных вспышек, то наиболее изученной является асимметрия линий, образующихся в хромосфере ( $H_{\alpha}$ ,  $H$  и  $K$  Ca,  $D$  Na). В работе [28] по 244 спектрам  $H_{\alpha}$  и Ca 92 вспышек обнаружено, что в 80 % вспышек линии имели красную асимметрию и в 32 % — синюю. Только 5 % вспышек показали исключительно синюю асимметрию. В работе [27] изучены фотометрические  $H_{\alpha}$ -профили 24 вспышек класса 1 или ярче, записанные на многоканальном спектрографе. Асимметрия проявлялась или как явное смещение всей эмиссии, или просто как преобладание одного эмиссионного пика над другим в профиле с самообращением. Все изученные профили, которые показывают существенные сдвиги, смещены в длинноволновую сторону спектра. У многих профилей с неравными эмиссионными пиками интенсивности также преобладают красные пики, хотя есть несколько примеров, когда синий пик ярче.

В работе [29] обсуждается асимметрия, выявленная при изучении узкополосных  $H_{\alpha}$ -фильтрограмм 60 вспышек, полученных с высоким временным разрешением. В 92 % изученных вспышек профиль линии  $H_{\alpha}$  имел красную асимметрию, в 5 % — синюю, тогда как 3 % не дали явной красной асимметрии во время некоторых стадий развития вспышки. В отличие от данных [28], где сообщается о часто наблюдаемой синей асимметрии в начале вспышки, в работе [29] на ранней стадии некоторых вспышек наблюдалась синяя асимметрия в местах, не совпадающих с основными вспышечными ядрами. Для последних характерна только красная асимметрия. Возможно, что наблюдаемая в [28] синяя асимметрия соответствует менее энергичным частям вспышки.

В работе [20] получена серия  $H_{\alpha}$ -спектров ядра вспышки от ее начала до поздних стадий для четырех типичных вспышек. Обнаружена красная асимметрия в импульсной фазе, которая исчезла через 1 мин. Авторы предположили, что асимметрия была вызвана хромосферным нисходящим потоком. Максимальная скорость нисходящих движений в одной из вспышек оказалась равной 100 км/с. Авторы также предположили, что эти нисходящие потоки являются проявлением движения вниз хромосферной конденсации, которая образовалась в результате хромосферного испарения. Полученные значения скоростей согласуются с несколькими опубликованными численными моделями хромосферного испарения.

В исследованиях [15] использована техника щелевого сканирования и получены  $H_{\alpha}$ -спектры для пяти вспышек. В двух случаях обнаружено небольшое синее смещение линии  $H_{\alpha}$ . В работе [26] непосредственно перед импульсной фазой трех больших двухленточных вспышек зарегистрировано

смещение профиля линии  $H_{\alpha}$  в коротковолновую сторону спектра, что было отождествлено с поднимающимися потоками хромосферного вещества во вспышечных лентах со скоростями 0.5—10 км/с. По наблюдениям вспышки с высоким временным разрешением в работе [32] сообщается о синей асимметрии  $H_{\alpha}$  на ранней стадии импульсной фазы и резком переходе от синей асимметрии к красной непосредственно перед максимумом в жестком рентгене.

В работе [11] описывается, как в процессе развития мощной двухленточной вспышки и предшествующей ей субвспышке 16 мая 1981 г. изменялись величина и характер асимметрии, протяженность крыльев, относительная интенсивность синего и красного пиков двухвершинных профилей  $H_{\alpha}$ . Хотя вспышки возникли в разных местах одной активной области, но характер профилей был одинаковым (двухвершинные профили, превышение синего пика в начальной стадии вспышек и красного — в максимуме и на стадии спада). Уже за 25 мин до мощной вспышки в месте ее возникновения наблюдалось небольшое смещение линии  $H_{\alpha}$  в синюю сторону спектра, но сами профили были симметричными. В соседнем флоккулярном узле, не затронутом позже вспышкой, профиль  $H_{\alpha}$  был симметричным и не смещенным по длине волны. В начальной фазе в обеих вспышечных лентах наблюдалось усиление синего крыла и пика, что, как считают авторы, говорит о преобладании восходящих движений на фотосферном и хромосферном уровнях. Через 3—4 мин при более интенсивном синем пике явно наблюдалось увеличение интенсивности и протяженности красного крыла. В импульсной фазе произошла резкая (в течение 1 мин) смена знака асимметрии. В максимуме и на стадии затухания вспышки наблюдалась только красная асимметрия, которую связывают с нисходящими потоками вещества в хромосфере. Начальная фаза вспышек, когда наблюдается синяя асимметрия, непродолжительна. Это может быть причиной того, что синяя асимметрия регистрируется реже, чем красная.

Аналогичный вывод о быстрой смене знака скорости в начальной стадии вспышек сделан в работе [23] на основе  $H_{\alpha}$ -фильтрограмм со смещением полосы пропускания фильтра на  $\pm 0.15$  нм. Период наблюдений 6 октября 1979 г. охватывал 3 субвспышки, 1 вспышку балла 1В и 2 вспышки балла 2N. На протяжении всего наблюдательного периода имели место изменения направления движения вещества на значительной части активного комплекса.

В работах [16, 18] наблюдалось красное смещение сильных фраунгоферовых линий после всплесков жесткого рентгеновского излучения, которое свидетельствует об опускании хромосферного вещества, причем наблюдалось уменьшение лучевой скорости вглубь атмосферы (по бальмеровским линиям была получена скорость около 30 км/с,  $K$  Ca II — 20 км/с,  $D_2$  Na — 10 км/с). Скорость нисходящего движения вещества в верхней фотосфере составляла 1 км/с [18].

Для вспышек асимметрия фраунгоферовых линий, образующихся в фотосфере, изучена недостаточно. В ряде работ (например [21]) анализировалась асимметрия линий в активных областях без связи со вспышками. В фотосфере вспышечной области асимметрия и смещения фраунгоферовых линий имеют специфический характер. Непосредственно во вспышках форма бисекторов ряда линий, образующихся на разных высотах фотосферы, изучалась в работах [4—6]. Бисекторы часто имеют сложную форму, которая меняется в процессе развития вспышки. В работе [4] отмечено смещение верхней части бисекторов в коротковолновую сторону спектра, что может указывать, по мнению автора, на преобладание восходящих

потоков вещества. Изменение асимметрии и смещений линий происходит уже за 1—2 ч перед вспышками.

Вопрос о природе асимметрии фраунгоферовых линий во вспышках остается открытым. Так как вспышки — процесс нестационарный, задача эта весьма сложная. В случае вспышек (в начальной стадии) имеет место всплытие достаточно сильного магнитного потока [14]. Это дает основание для предположения, что конвективные движения в значительной мере подавлены. Кроме того, наблюдения показывают, что:

1) вспышки преимущественно возникают в области восходящих движений или вблизи нулевой линии лучевых скоростей [9];

2) уже за 1.5—2 ч перед вспышками наблюдаются крупномасштабные структуры (~1.5—2 супергранул) со скоростями, превышающими скорости конвективных элементов в невозмущенной фотосфере. Во время вспышки происходит дробление этих элементов в 2—3 раза, сопровождаемое увеличением амплитуды скорости [8];

3) сложная форма бисекторов фраунгоферовых линий [5, 6] свидетельствует о наличии неоднородностей (по направлению или по градиенту скорости) поля скоростей на луче зрения;

4) вспышки возникают в местах сильных поперечных магнитных полей [7].

Общей чертой исследований асимметрии линий является то, что красная асимметрия трактуется как преобладание нисходящих движений вещества, а синяя — восходящих. Однако в работе [19] на основе моделирования хромосферной части вспышек показано, что движущаяся вниз из короны хромосферная конденсация может быть причиной как красной, так и синей асимметрии линии  $H_{\alpha}$  в зависимости от параметров конденсации.

Сказанное выше позволяет предположить, что сложный характер асимметрии фраунгоферовых линий во вспышках может быть обусловлен не только движениями мелкомасштабных элементов, но и наличием на луче зрения неоднородностей (например, проявление спиральной структуры магнитного поля [24] или волнового процесса [25, 30]).

Цель настоящей работы — проанализировать влияние на асимметрию и смещение фраунгоферовых линий высотного градиента скоростей и определить, являются ли они указателем направления движения. Так как магнитогидродинамических моделей мелкомасштабных магнитных элементов нет, мы решили ограничиться рассмотрением влияния высотного градиента лучевых скоростей на асимметрию линии в рамках однокомпонентной модели.

## РАСЧЕТЫ И ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Основой для исследования асимметрии и смещений служили несколько фраунгоферовых линий (таблица). Выбраны неблендированные линии, профили которых мало подвержены воздействию магнитного поля (за исключением линии  $\lambda$  614.92 нм), а высоты их образования охватывают разные слои

Характеристики линий

$\lambda$ , нм	Элемент	$h_{\text{ниж}}$ , эВ	N	$\xi_{\text{эф}}$	$d_0$	$h_d$ , км	$h_w$ , км
539.828	Fe I	4.44	1145	0.33	0.671	315	212
581.191	Fe I	4.14	1022	0.5	0.119	147	135
614.925	Fe II	3.89	74	1.33	0.347	164	132
615.678	O I	10.74	10	—	0.039	10	4

фотосферы. Наряду с линией нейтрального железа  $\lambda$  581.19 нм для сравнения была взята линия ионизованного железа  $\lambda$  614.92 нм, образующаяся практически на той же высоте. В таблице приведены длины волн, элемент, потенциал возбуждения нижнего уровня, номер мультиплета, эффективный фактор Ланде [13], центральная глубина профиля линии и высоты образования (вычисленные по центральной глубине и эквивалентной ширине) в невозмущенной фотосфере в центре диска [3].

Расчет теоретических профилей проводился по программе Барановского с использованием модели VAL-C [31]. Методика вычислений изложена в работе [12]. На большом интервале высот задавалось поле скоростей (от 0 до 3 км/с) отдельно для восходящих и нисходящих движений. Расчеты велись для положительного и отрицательного высотного градиента скоростей  $d|v|/dz$ , где  $z$  — высота от основания фотосферы ( $\tau_5 = 1$ ). Не ставилась задача воспроизведения реальных физических условий в слое атмосферы, где формируются исследуемые линии. Исследовалось влияние хода лучевой скорости с высотой на характер асимметрии.

Как и ожидалось, и для отрицательного, и для положительного высотного градиента скоростей получены синие сдвиги ядер линий при восходящих движениях и красные — при нисходящих (рис. 1). Величина сдвига зависит от скорости вещества в слое образования ядра линии. Однако характер высотного распределения скоростей сказывается главным образом на асимметрии линий.

Только в случае, когда скорость движения вещества уменьшалась с высотой в фотосфере ( $d|v|/dz < 0$ ), при восходящих движениях синий сдвиг сопровождался синей асимметрией для всех линий, а при нисходящих — профили линий имеют красную асимметрию при красном сдвиге ядра линий (рис. 2, а). Если же скорость увеличивалась с высотой ( $d|v|/dz > 0$ ), то при восходящих движениях наблюдалась красная асимметрия, в то время как

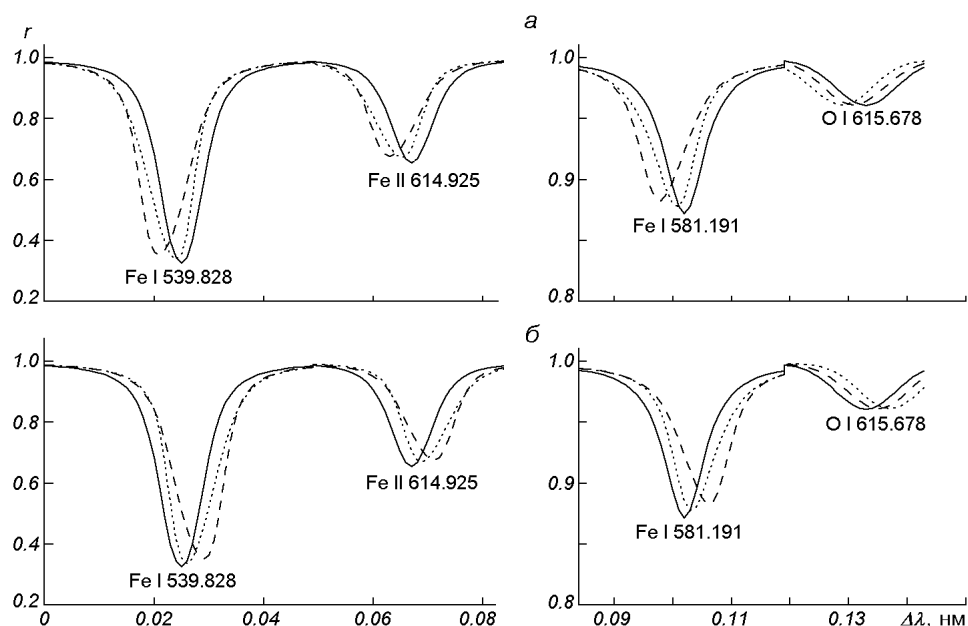


Рис. 1. Профили фраунгоферовых линий: а — для восходящих движений вещества, б — для нисходящих; сплошная линия — лучевые скорости  $v = 0$  км/с, штриховая —  $d|v|/dz > 0$ , пунктирная —  $d|v|/dz < 0$

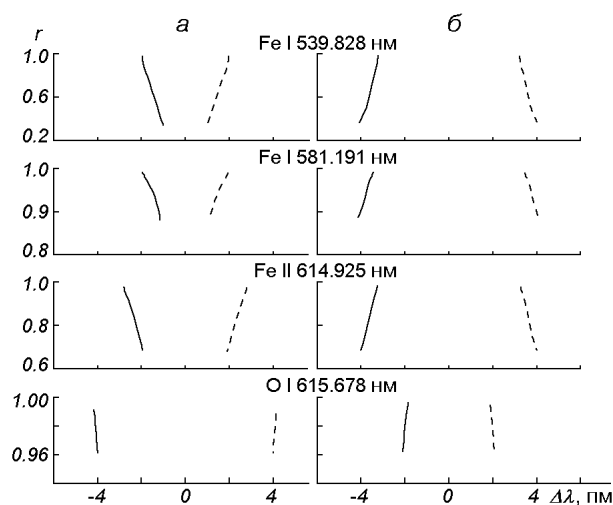


Рис. 2. Бисекторы фраунгоферовых линий: *a* — для  $d|v|/dz < 0$ , *б* — для  $d|v|/dz > 0$ ; сплошная линия — для восходящих движений, штриховая — для нисходящих

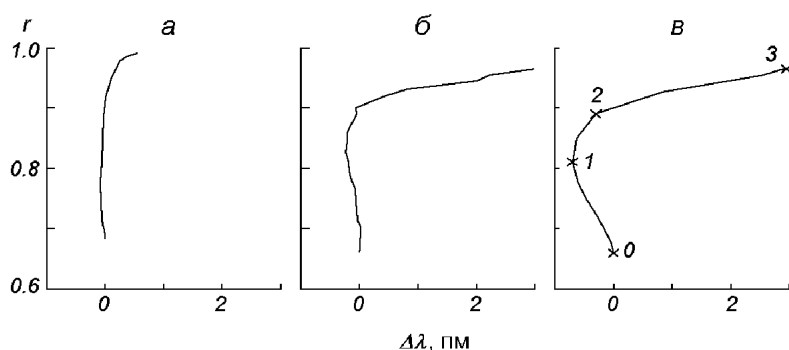


Рис. 3. Бисекторы профилей линии  $\lambda$  614.9 нм: *a* — в невозмущенной фотосфере, *б* — в максимуме вспышки 07.10.79, *в* — рассчитанный с учетом градиента скоростей

при нисходящих профили имеют синюю асимметрию (рис. 2, *б*). Такая картина наблюдалась для всех линий независимо от высоты их образования и силы линии.

Таким образом, красная (синяя) асимметрия может возникать как при нисходящих, так и при восходящих потоках вещества. Поэтому к интерпретации асимметрии следует подходить более осторожно. Особенно это касается вспышек.

Сложная форма бисекторов фраунгоферовых линий, представленных на рис. 1 в работе [5], свидетельствует о наличии неоднородностей поля скоростей. Попытаемся воспроизвести форму бисектора линии, используя приведенные выше особенности влияния градиента скоростей на асимметрию профилей. На рис. 3 для линии  $\lambda$  614.9 нм, наблюдавшейся в максимуме вспышки 07.10.79, показаны: типичная S-образная форма бисектора для фраунгоферовых линий в невозмущенной фотосфере; бисектор профиля линии в максимуме вспышки; бисектор, рассчитанный с учетом градиента скоростей. Рассчитанный бисектор можно рассматривать как результат одного из возможных вариантов распределения скоростей вдоль луча зрения.

На рис. 3, *в* на участке 0—1 (ядро профиля линии) форма бисектора соответствует случаю, когда  $d|v|/dz < 0$  при восходящих движениях. Это обусловило синюю асимметрию. На участке 1—2 также преобладали восходящие движения, но уже с положительным градиентом скоростей  $d|v|/dz > 0$ , что повлекло за собой красную асимметрию средней части профиля исследуемой линии. На участке 2—3, т. е. в глубоких слоях фотосферы, скорости значительно увеличились и изменили направление. Это стало причиной сильной красной асимметрии. Разнонаправленные скорости в области формирования линии могут быть следствием спиралевидной структуры магнитного поля, когда на луч зрения попадают различные участки спирали.

Таким образом, сложная форма бисекторов во вспышках может быть объяснена наличием различных по знаку и величине градиентов скоростей в слое атмосферы, где формируется линия.

#### ВЫВОДЫ

Исходя из сделанных расчетов, можно сделать вывод, что только по смещению фраунгоферовых линий можно однозначно судить о направлении и величине лучевой скорости в слое образования ядра спектральной линии. Интерпретация асимметрии фраунгоферовых линий во вспышках требует более осторожного подхода, так как различный характер градиента лучевых скоростей в слое формирования линий может привести к неоднозначным выводам.

Автор искренне благодарит К. В. Аликаеву за полезное обсуждение результатов и рецензента за ценные замечания и советы.

1. *Атрощенко И. Н., Гадун А. С., Костык Р. И.* Асимметрия и абсолютные смещения фотосферных линий // Вариации глобальных характеристик Солнца. — Киев: Наук. думка, 1992.—С. 182—231.
2. *Брандт П. Н., Гадун А. С., Шеминова В. А.* Абсолютные смещения спектральных линий Fe I и Fe II в активных областях Солнца (центр диска) // Кинематика и физика небес. тел.—1997.—13, № 5.—С. 75—86.
3. *Гуртовенко Э. А., Костык Р. И.* Фраунгоферов спектр и система солнечных сил осцилляторов. — Киев: Наук. думка, 1989.—200 с.
4. *Кондрашова Н. Н.* Асимметрия фраунгоферовых линий по наблюдениям во время вспышек // Вестн. Киев. ун-та. Астрономия.—1987.—29.—С.27—33.
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. *Огирь М. Б., Цап Т. Т.* Структура магнитного поля и вспышечная активность в области McMath 9740 (октябрь 1968 г.) // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1981.—63.—С. 46—65.
8. *Редюк Т. И.* Поле скоростей в фотосфере и вспышки // Солн.-зем. физ.: 5 симп. КАПГ, Самарканд, 2-6 октября 1989: Тез. докл. — М., 1989.—С. 63.
9. *Редюк Т. И.* Движение вещества на уровне фотосферы во вспышечно-активных областях // Вестн. Киев. ун-та. Сер. Астрономия.—1990.—32.—С. 28—35.
10. *Шеминова В. А.* Двумерные МГД-модели солнечной магнитогрануляции. Тестирование моделей и методов стокс-диагностики // Кинематика и физика небес. тел.—1999.—15, № 5.—С. 398—412.
11. *Alikaeva K. V., Baranovsky E. A., Polupan P. N.* Variation in physical conditions of the material in the course of the flare of May 16, 1981 // Solar Maximum Analysis: Additional Issue: Proc. Intern. Workshop, Irkutsk. — Novosibirsk: Nauka, 1988.—P. 84—87.
12. *Baranovsky E. A.* Semiempirical LTE modelling of solar photospheric layers. I. Theoretical background // Contrib. Astron. Obs. Skalnaté Pleso.—1993.—23.—P. 1—8.
13. *Beckers J. M.* A table of Zeeman multiplets // Phys. Sci. Res. Papers.—1969.—N 371.—193 p.
14. *Borovik V. N., Drake N. A., Golovko A. A.* "Perestrojka" of magnetic field in active region

- before the great flare and its manifestation in the radiorange // Solar Photosphere: struct. convect. and magn. fields. — 1989.—P. 139.
15. *Canfield R. C., Kiplinger A. L., Penn M. J., Wulser J. P.* H $\alpha$ -spectra of dynamic chromospheric processes in five well-observed X-ray flares // *Astrophys. J.*—1990.—**363**, N 1.—P. 318—325.
  16. *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**.—P. 625—637.
  17. *Dravins D.* Photospheric spectrum line asymmetries and wavelength shifts // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*—1982.—**20**.—P. 61—89.
  18. *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.
  19. *Gan W. Q., Rieger E., Fang C.* Semiempirical flare models with chromospheric condensation // *Astrophys. J.*—1993.—**416**, N 2.—P. 886—892.
  20. *Ichimoto K., Kurokawa H.* H $\alpha$  red asymmetry of solar flares // *Solar Phys.*—1984.—**93**, N 1.—P. 105—121.
  21. *Kaisig M., Schroter E. H.* The asymmetry of photospheric absorption lines // *Astron. and Astrophys.*—1983.—**117**, N 2.—P. 305—313.
  22. *Ludmany A.* Asymmetry of non-splitting spectral lines in sunspots // *Publ. Debr. Heliophys. Obser.*—1983.—N 5, p. 2.—P. 575—579.
  23. *Merkulenko V. E., Palamarchuk L. B., Polyakov V. I.* Phase-coherence of chromospheric oscillations within an activity complex and dynamic processes in a filament during the flares on 6 October 1979 // *Publ. Debr. Heliophys. Obser.*—1983.—N 5, p. 1.—P. 293—315.
  24. *Ohman Y., Hosinsky G., Kusoffsky U.* Possible effects of rotation in flares and prominences // *Mass motions in solar flares and related phenomena / Nobel Symp. 9.*—1968.—P. 95—107.
  25. *Ruderman M. S., Goosens M., Ballester J. L., Oliver R.* Resonant Alfvén waves in coronal arcades driven by footpoint motions // *Astron. and Astrophys.*—1997.—**328**.—P. 361—370.
  26. *Schmieder B., Forbes T. G., Malherbe J. M., Machado M. E.* Evidence for gentle chromospheric evaporation during the gradual phase of large solar flares // *Astrophys. J.*—1987.—**317**, N 2.—P. 956—963.
  27. *Shoolman S. A., Ganz E. D.* H $\alpha$  flare spectra // *Solar Phys.*—1981.—**70**, N 2.—P. 363—374.
  28. *Svestka Z., Kopecky M., Blaha M.* Qualitative discussion of 244 flare spectra. II. Line asymmetry and helium lines // *Bull. Astron. Inst. Czech.*—1962.—**13**.—P. 37—41.
  29. *Tang F.* Flare asymmetry as seen in offband H $\alpha$ -filtergrams // *Solar Phys.*—1981.—**83**, N 1.—P. 15—25.
  30. *Titov V. S., Demoulin P.* Basic topology of twisted magnetic configurations in solar flares // *Astron. and Astrophys.*—1999.—**351**.—P. 707—720.
  31. *Vernazza J. E., Avrett E. H., Loeser R.* Structure of the solar chromosphere. III. Models of the EUV brightness components of the quiet Sun // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1981.—**45**, N 4.—P. 635—725.
  32. *Wulser J. P.* H $\alpha$  line profile observations of solar flares with high temporal resolution // *Solar Phys.*—1987.—**114**, N 1.—P. 115—126.

Поступила в редакцию 05.03.01