

УДК 523.945-62:520.86

## **Хромосфера Солнца в линии $D_3$ He I по наблюдениям полных солнечных затмений. Методика построения изображений**

**Л. А. Акимов, И. Л. Белкина, С. А. Белецкий, Н. П. Дятел**

Астрономическая обсерватория Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина  
61022, г. Харьков, ул. Сумская, 35

*Описана методика построения изображений хромосферы в линии  $D_3$  гелия по 350 спектрограммам западного лимба Солнца, полученным во время полного солнечного затмения 31 июля 1981 г. Описывается автоматический микрофотометр для скоростного сканирования снимков. Вдоль всего полученного изображения в линии  $D_3$  обнаружен дополнительный максимум поверхностной яркости на высотах около 300 км.*

*ХРОМОСФЕРА СОНЦЯ В ЛІНІЇ  $D_3$  He I ЗА СПОСТЕРЕЖЕННЯМИ ПОВНИХ СОНЯЧНИХ ЗАТЕМНЕНЬ. МЕТОДИКА ПОБУДОВИ ЗОБРАЖЕНЬ, Акімов Л. О., Белкіна І. Л., Белецький С. О., Дятел Н. П. — Описана методика побудови зображень хромосфери в лінії  $D_3$  гелію за 350 спектрограмами західного лимба Сонця, одержаними під час повного сонячного затемнення 31 липня 1981 р. Описується автоматичний мікрофотометр для швидкісного сканування знімків. Уздовж всього одержаного зображення в лінії  $D_3$  виявлено додатковий максимум поверхневої яскравості на висотах близько 300 км.*

*SOLAR CHROMOSPHERE IN THE  $D_3$  He I LINE FROM OBSERVATIONS OF TOTAL ECLIPSES. TECHNIQUE FOR IMAGE CONSTRUCTION, by Akimov L. A., Belkina I. L., Beletskiy S. A., Dyatel N. P. — The image of the chromosphere in the helium  $D_3$  line is constructed with the use of 350 spectrograms of the Sun's west limb acquired during the total eclipse on 31 Juli 1981. An automatic photometer for high-speed scanning of plates is described. The processing technique used in the image construction is given. An additional surface brightness maximum at heights of about 300 km is found along the entire image in the  $D_3$  line.*

### **ВВЕДЕНИЕ**

Кинематографические наблюдения бесщелевых спектров хромосферы («спектра вспышки») во время полных солнечных затмений дают ценную информацию о физических условиях в атмосфере Солнца, в частности в нижней хромосфере и переходной области между фотосферой и хромосферой, прямые наблюдения которых затруднены из-за сильного влияния фотосферного излучения, рассеянного земной атмосферой и прибором. Кроме того, подобные наблюдения дают возможность получить высокое разрешение по высоте. Так, при частоте съемки спектров 20—25 кадров в

секунду на бесщелевом спектрографе мы достигаем разрешения 15—20 км по радиусу в атмосфере Солнца.

В настоящее время представляется возможным усовершенствовать обработку наблюдений спектров хромосферы. При традиционном способе обработки спектров хромосферы измерения проводятся в четках Бейли, соответствующих впадинам лунного лимба. Таких точек обычно около десятка, и они не всегда расположены в тех местах на Солнце, которые хотелось бы изучить. В нашей работе для фотометрии, ввода и обработки больших массивов информации мы использовали быстродействующую технику. Это позволило получить изображение хромосферы в спектральных линиях или фотосферы в континууме вдоль всего лимба Солнца.

В последующих разделах будут описаны быстродействующий фотометр, на котором производились измерения спектрограмм, методика обработки измерений на ПЭВМ и методика построения изображения хромосферы по затменным данным.

#### НАБЛЮДЕНИЯ

Кинематографические наблюдения спектра вспышки в районе линии  $D_3$  He I были проведены тремя экспедициями Астрономической обсерватории Харьковского госуниверситета во время полных солнечных затмений 10 июля 1972 г. на Чукотке и 22 сентября 1968 г. и 31 июля 1981 г. в Казахстане. Атмосферные условия во время всех трех затмений были достаточно

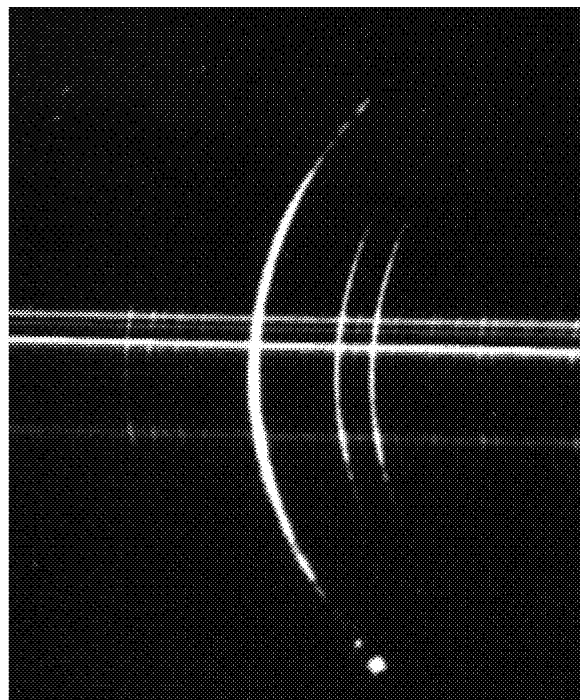


Рис. 1. Спектр вспышки в районе линий  $D_3$  He I и  $D_1, D_2$  Na, полученный за 0.61 с до второго контакта затмения 10 июля 1972 г. Север вверху

высокого качества. Один из лучших снимков, полученный в затмение 1972 г., приведен на рис. 1.

Для наблюдений применялся бесщелевой спектрограф. В 1981 г. затменный спектрограф состоял из целостатного и дополнительного зеркал  $D = 23.5$  см, дифракционной решетки 600 штрих/мм размером  $100 \times 100$  мм и объектива камеры  $D = 10$  см,  $F = 1$  м. Спектры фотографировались кинокамерой на 35-мм пленку КН-2 с частотой съемки 20 кадр/с. При этом

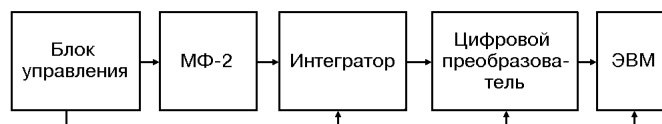
разрешение по высоте между кадрами составляло вдоль направления движения Луны в среднем 20 км. Момент съемки каждого кадра вместе с сигналами хронометра фиксировался на шлейфном осциллографе. Описание наблюдений затмений 1968 и 1972 гг., а также инструмента приведено в работах [1, 3, 6]. Для построения характеристической кривой пленки и абсолютной привязки наблюдений фотографировался спектр центральной области Солнца, вырезаемый щелью. Щель с девятиступенчатым ослабителем устанавливалась в фокусе телескопической системы, расположенной между целостатным зеркалом и решеткой. Привязка производилась до и после затмения. Для учета изменения прозрачности земной атмосферы проводились фотоэлектрические измерения поверхностной яркости солнечного диска на протяжении частных фаз затмения.

Наблюдения 1968 и 1972 гг. были обработаны по традиционной методике. Измерения интенсивности свечений хромосферы и фотосферы производились в местах, соответствующих центрам четок Бейли. Ниже описан метод получения интенсивности свечения хромосферы в линии в зависимости от высоты и гелиографической широты по всему наблюдаемому лимбу Солнца. Приведены также результаты измерения поверхностной яркости хромосферы в линии  $D_3$  по материалам третьего контакта затмения 1981 г.

#### ФОТОМЕТР И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ

Для того чтобы получить полную картину свечения хромосферы в той или иной линии спектра вспышки, необходимо профотометрировать от 300 до 1000 снимков для каждого контакта затмения с шагом, меньшим или равным пространственному разрешению (около 1" в нашем случае). Поэтому микрофотометр должен обеспечивать высокую скорость измерений, динамический диапазон около трех порядков по яркости, соседние измерения должны быть некоррелированными. Этим требованиям удовлетворяет микрофотометр, созданный одним из авторов статьи (Л. А. Акимов) на базе серийного прибора МФ-2 (рис. 2). Движение каретки с фотометрируемым снимком осуществляется шаговым двигателем ДШГ561ВА1-87. Шаг сканирования составляет 10 мкм по обеим координатам, что соответствует около 1" на Солнце. Размер щели микрофотометра 10×20 мкм. Частота измерений составляет 750 шагов/с и задается кварцевым генератором. При такой скорости (7.5 мм/с) возможны пропуски шагов при разгоне каретки. Чтобы их не допустить, на шаговый двигатель при разгоне подается пакет импульсов частотой 375 Гц, после чего осуществляется переход на номинальную частоту 750 Гц.

Рис. 2. Блок-схема фотометра



Пучок света, прошедший через снимок и щель фотометра, поступает на катод ФЭУ-15 (фотоумножитель с диодами жалюзного типа, специально разработан для стабильного измерения больших световых потоков). Сигнал с ФЭУ поступает на интегратор, собранный на широкополосном операционном усилителе типа КР140УД8А. Время интегрирования задается кварцевым генератором. После интегратора сигнал поступает на 14-разрядный двоичный преобразователь аналог-код типа М2ПВЦ4581 и записывается в оперативную память ЭВМ. Во время разгона каретки микрофотометра данные копируются на жесткий диск.

Накопление фототока на интеграторе длится 0.67 мс, что соответствует времени прохождения измеряемой точкой половины размера щели. Времена накопления, считывания сигнала и разряда интегратора задаются блоком управления. Ключами служат полевые транзисторы. Использование интегратора на широкополосном усилителе позволяет достичь полной независимости сигналов от соседних точек, даже если сигналы по величине различаются на порядок. Это важно при фотометрировании спектров хромосферы, представляющих собой тонкие серпы линий с резкими краями (см. рис. 1).

14-разрядный двоичный цифровой преобразователь позволяет фиксировать сигнал в диапазоне отсчетов от 16 до 16383, т. е. охватывает три порядка (это важно при фотометрировании спектров затмения, отличающихся большим перепадом плотностей почернения фотопленки). Влияние квантованности отсчетов на точность при малых значениях (16—30) уменьшается из-за шума зернистости пленки, обычно составляющего 7—10 %.

Длина строки устанавливается заранее в диапазоне от 8 до 120 мм. Шаг сканирования микрофотометра составляет 10, 20 и 40 мкм (при сканировании снимков затмения мы устанавливали шаг в 10 мкм, что давало ширину линии 10—40 точек). Количество строк произвольное и при сканировании снимков затмения составляет 400—1200. Каждая строка записывается в оперативную память ЭВМ и затем в буферный сектор на жестком диске. На микрофотометре можно измерять любые снимки размером до 120×100 мм. Программа управления записью сигнала на ЭВМ и его просмотра разработана В. В. Корохиным [5] и использовалась для наблюдения Солнца и Луны с ПЗС-фотометром.

Записанный в ЭВМ прямоугольный кадр в дальнейшем обрезался окном с границами, параллельными хромосферным серпам (рис. 1). Границы формировались так, чтобы в каждой строке захватывать линии  $D_1$ ,  $D_2$  натрия,  $D_3$  гелия и по 20—30 точек фона с обеих сторон. После такой процедуры удаления избыточной информации файл с изображением уменьшался в 3—4 раза. Чтобы первоначальную геометрию изображения можно было восстановить, сохранялось также положение границ окна. Используя описанный фотометр и методику, мы профотометрировали 350 спектров для третьего контакта затмения 31 июля 1981 г.

#### ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Восстановление изображений хромосферы в избранной линии производилось на ПК IBM 386DX 40 MHz. Обработка включала в себя шесть этапов.

**1. Перевод плотностей почернения в интенсивность.** Для этой процедуры используется построенная заранее характеристическая кривая, связывающая  $\lg((P_0 - P_T)/(P_n - P_T))$  с  $\lg(I_n)$ , где  $P_0$  — отсчет фотометра для незасвеченного участка пленки,  $P_T$  — отсчет при закрытой щели (темновой ток),  $P_n$  — отсчет для измеряемого участка,  $I_n$  — интенсивность излучения в измеряемой точке,  $n$  — номер измеряемой точки на строке. Поскольку величины  $P_0$  и  $P_T$  были постоянными, то перевод в интенсивность осуществлялся с помощью таблицы  $I_n(P_n)$ . В области недодержек при значениях сигнала, близких к значениям для незасвеченного фона, характеристическая кривая представлялась прямой линией в координатах «значение отсчета — интенсивность». Такая процедура необходима, поскольку из-за большой зернистости пленки (средний квадратичный шум достигает 7 %) значения отсчета для отдельных точек бывает меньше значений для фона.

**2. Определение границ спектральных линий и получение интегральной интенсивности.** Измерения показали, что после перехода от плотностей почернения пленки к интенсивностям засветку фона и фотосфе-

ры для каждой строки с достаточной точностью можно представить линейной функцией от номера точки на строке. Параметры функции вычислялись по 10 точкам у обеих границ вырезаемого окна. При дальнейшей обработке использовались разности между измеренными интенсивностями и величиной фона для каждой точки. Далее по значениям интенсивности на строке отыскивается точка с максимальным значением, которая заведомо принадлежит наиболее яркой линии —  $D_3$  (см. рис. 1). Справа и слева от этой точки отыскиваются координаты ( $n_1$  и  $n_2$ ) первых попавшихся точек, интенсивность которых меньше 0.1 от максимальной. Практика показала, что линия  $D_3$  полностью лежит между границами  $n_1 - 5$  и  $n_2 + 5$ . Суммирование интенсивностей точек в пределах этих границ дает величину  $E$ , пропорциональную интегральной интенсивности хромосферы. Интегрирование ведется вдоль направления дисперсии; область интегрирования является отрезок, размер которого пропорционален секансу угла  $\beta$  между направлением радиуса Солнца в данной точке и направлением дисперсии спектрографа. Таким образом, интегральная интенсивность вдоль радиуса равна

$$E_r = E \cos \beta, \quad (1)$$

где  $E$  — измеренная интенсивность. Координаты начала и конца линий натрия можно получить сдвигом координат линии гелия на известную величину.

**3. Совмещение кадров.** Конечной целью дальнейшей обработки является получение изображения фотосферы или хромосферы в данной линии спектра. Мы измеряем интегральную интенсивность (поверхностная яркость, проинтегрированная радиально над краем Луны) для каждой строки, на каждом кадре, и затем путем дифференцирования по высоте находим поверхностную яркость. Высота нижней границы выступающей атмосферы определяется по моменту съемки и зависит от положения точки на лимбе и конфигурации лунного края.

При фотометрии каждого кадра направление строк устанавливается параллельно направлению дисперсии. В перпендикулярном направлении фиксируется номер строки с произвольным началом координат на снимке. Дальнейшая обработка требует для каждого кадра связать номер строки с координатой, неподвижной относительно Луны, или, что равносильно, относительно одного какого-либо кадра. В нашем случае сдвиг номеров строки определялся относительно среднего кадра по максимуму функции корреляции для зависимости интегральной интенсивности от номера строки.

**4. Учет экспозиции и сглаживание интегральных интенсивностей.** Средняя скорость съемки составляла 20—25 кадров в секунду. После включения камеры разгон продолжался около половины секунды. Моменты съемки фиксировались на шлейфном осциллографе, куда, помимо импульсов от контакта кинокамеры и хронометра, подавался синусоидальный сигнал частотой 100 Гц. Полученная интегральная интенсивность делилась на продолжительность экспозиции, определяемой по записи на шлейфном осциллографе.

Поскольку из-за зернистости эмульсии и мерцания изображения [2] каждое отдельное измерение обременено значительным шумом, то перед процедурой дифференцирования по высоте необходимо сгладить полученные результаты измерений. Сглаживание производилось с весовой функцией Гаусса, полуширина которой составляла около 100 км (5 кадров). Сглаживался натуральный логарифм интегральной интенсивности, поскольку его величина изменяется с высотой по закону, близкому к линейному.

**5. Учет скорости изменения высот для разных точек лимба и получение поверхностной яркости.** Скорость изменения высоты нижней

границы атмосферы Солнца, выступающей над лимбом Луны, зависит от целого ряда обстоятельств затмения [1]: от географических координат места, где наблюдается затмение, значений угловых радиусов Луны ( $r_l$ ) и Солнца ( $r_c$ , позиционных углов внутренних контактов ( $P_2$  и  $P_3$ ), скорости движения Луны по отношению к Солнцу  $V_0$ , расстояния  $\Delta$  между центром Солнца и видимым на диске Солнца центром Луны. Это расстояние в прямоугольной системе координат с началом в центре Солнца и осью  $X$  вдоль направления движения Луны относительно Солнца можно выразить через координаты  $x$  и  $y$ .  $\Delta^2 = x^2 + y^2$ . Тогда для высоты мы получаем величину

$$h = (x \cos \alpha + y \sin \alpha) \pm \sqrt{(r_l^2 - \Delta^2) + (x \cos \alpha + y \sin \alpha)^2} - r_c,$$

а для скорости  $V = \frac{dh}{dx} \cdot \frac{dx}{dt}$  имеем

$$V = V_0 \left[ \cos \alpha \pm \frac{(x \cos \alpha + y \sin \alpha) \cos \alpha - x}{\sqrt{(r_l^2 - \Delta^2) + (x \cos \alpha + y \sin \alpha)^2}} \right]. \quad (2)$$

где  $\alpha$  — угол между радиусом-вектором данной точки с позиционным углом  $P$  и осью  $X$ ,  $\alpha = P - (P_2 + P_3 + 180)/2$ . Заметим, что рельеф Луны слабо влияет на скорость изменения высоты солнечного края в данной точке.

Таким образом, чтобы получить скорость изменения интегральной интенсивности в данной точке вдоль радиуса, т. е. поверхностную яркость  $F(h, \alpha)$ , необходимо величину  $E_r(t, \alpha)$  продифференцировать по времени и разделить на скорость, определяемую по формуле (2):

$$F(h, \alpha) = \frac{dE_r(t, \alpha)}{dt} \frac{dt}{dh} = \frac{1}{V} \frac{dE_r(t, \alpha)}{dt}. \quad (3)$$

**6. Определение нуль-пункта высот.** Поскольку точный профиль лунного края неизвестен, то задача не может быть решена чисто геометрически. Однако необходимую информацию с достаточной степенью точности можно получить из измерений яркости фотосферы на спектрограммах. Обычно за нуль-пункт шкалы высот принимают точку перегиба зависимости поверхностной яркости от высоты. Ее определяют по максимуму производной. Такая процедура предполагает двукратное дифференцирование наблюдаемых величин, обремененных значительными шумами, что приводит к большим ошибкам случайного характера.

Чтобы уменьшить эти ошибки, сначала определялись нуль-пункты по максимуму второй производной, затем была найдена средняя поверхностная яркость на этих высотах. В дальнейшем предполагалось, что в нуль-пунктах высот во всех точках поверхностная яркость равна найденной величине. Факелы на краю, вариации распределения яркости на лимбе, и форма впадин лунного края [4] вносят ошибки в результаты вычисления высоты данным методом. Однако метод устойчив, достаточно строго определен и, по нашим оценкам, его средняя квадратичная ошибка не превышает 50 км. Заметим, что при изменении высоты на такую величину поверхностная яркость фотосферы вблизи нуль-пункта изменяется на 30—50 %.

**7. Построение изображения хромосферы.** После нахождения поверхностной яркости и нуль-пунктов высот для каждой строки было проведено сглаживание яркости вдоль лимба с весовой функцией Гаусса, полуширина которой составляла 1 строку. Затем был построен двумерный массив распределения поверхностной яркости в зависимости от высоты и гелиографической широты. Для этого необходимо каждой точке в прямоугольной системе координат поставить в соответствие гелиографическую широту в сферической системе. Это можно сделать, используя в качестве опорных

Рис. 3. Изображение хромосферы в линии  $D_3$ , полученное для западного лимба Солнца во время затмения 31 июля 1981 г. В интервале широт  $20^\circ$  N ...  $-20^\circ$  S находятся активные области. 1, 2, 3 — протуберанцы. Темные места на рисунке соответствуют более интенсивному свечению

точек протуберанцы на Солнце или впадины на Луне. На рис. 3 приведено изображение хромосферы Солнца в линии  $D_3$  гелия для третьего контакта затмения 31 июля 1981 г. Разрешение по высоте составляет около 150 км, разрешение по широте  $0.5^\circ$ .

**ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ**

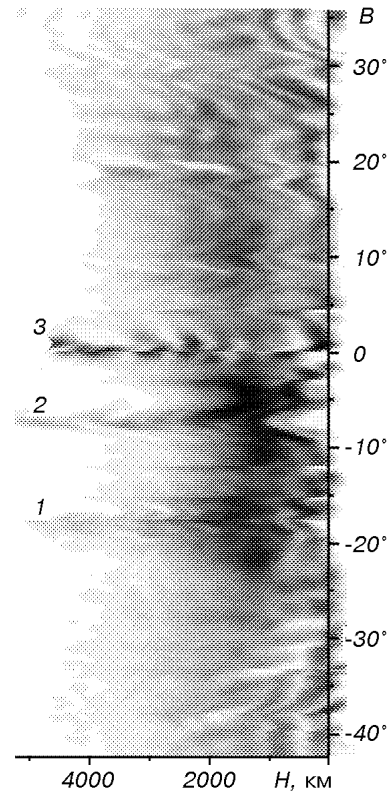
Для реализации алгоритмов обработки результатов фотометрии был создан пакет программ на языках Borland Pascal 7.0 и Borland Delphi 2.0 для IBM-совместимых ПК. Алгоритмы имеют самостоятельную ценность при обработке подобных изображений и различных массивов числовых данных. Они включают в себя: а) оригинальный компрессор изображений с размером элемента два байта; б) визуализацию данных, представленных в FITS-формате; в) выделение части изображения для уменьшения объема полезных данных на магнитном носителе; г) совмещение соседних изображений в последовательном ряду по функции, описывающей их края; д) дифференцирование, интерполяцию, сглаживание изображений; е) различные геометрические трансформации изображений.

**ОБСУЖДЕНИЕ**

Несколько слов о недостатках примененного метода обработки.

Измерения проводятся вдоль всего солнечного лимба, и значит, результаты измерений подвержены влиянию лунного рельефа: горок, впадин, склонов. В [4] показано, что влияние лунного рельефа проявляется в изменении кривых поверхностной яркости и в смещении нуль-пункта шкалы высот. Такое смещение возможно, например, при сильной изрезанности дна впадины, или для узких расширяющихся впадин. Усреднение поверхностной яркости вдоль лимба сглаживает подобные искажения, так что смещение нуль-пункта шкалы высот в основном не превышает приведенную нами точность 50 км, а разрешение по высоте на полученных сглаженных изображениях составляет около 150 км.

Мерцания света от источников малых угловых размеров (например, впадин на Луне [2]) также могут исказить кривые поверхностной яркости на отдельных участках. Однако после усреднения кривых интегральной и поверхностной яркости влияние мерцаний в значительной мере ослабляется. При рассмотрении колебаний интегральной яркости хромосферы с фазой цикла солнечной активности, при изучении особенностей свечения хромосферы над активными и спокойными областями или при изучении широтной



зависимости интенсивности свечения (т. е. при исследованиях, когда рассматривается хромосфера в целом или ее значительная часть) влиянием мерцаний и локальных форм лунного рельефа можно пренебречь.

В целом проведенные исследования и измерения показали, что предложенный метод построения изображения хромосферы (или фотосферы) по кинематографическим снимкам, полученным с бесщелевым спектрографом во время полных солнечных затмений, является вполне приемлемым и результативным. Данный метод был использован для обработки результатов наблюдений линии  $D_3$  He I. Линия интересна тем, что излучение в ней связано с физическим состоянием вышележащей короны. Из рис. 3 видно, что свечение гелия в хромосфере весьма неоднородно. Максимум поверхностной яркости находится на высотах 1100—1700 км. Излучение усиливается над активными областями, сосредоточенными в приэкваториальных широтах, но высота максимума излучения больше в спокойных широтах. Наряду с основным свечением в средней хромосфере наблюдается дополнительное излучение вблизи фотосферы на высотах около 300 км. Анализ этого и других изображений будет посвящена следующая работа.

1. Акимов Л. А., Белкина И. Л., Дятел Н. П. Яркость фотосферы и факелов на лимбе по затменным наблюдениям // Астрон. журн.—1982.—59, № 3.—С. 552—562.
2. Акимов Л. А., Белкина И. Л., Дятел Н. П., Марченко Г. П. О влиянии мерцаний на распределение яркости фотосферы Солнца вблизи лимба по затменным наблюдениям // Кинематика и физика небес. тел.—1992.—8, № 3.—С. 63—68.
3. Белкина И. Л., Дятел Н. П. Исследование хромосферы в линии  $D_3$  He во время затмения 22 сентября 1968 г. // Астрон. журн.—1972.—49, № 3.—С. 588—594.
4. Белкина И. Л., Дятел Н. П., Поспергелис М. М. О возможности уточнения яркости фотосферы вблизи лимба по затменным наблюдениям // Кинематика и физика небес. тел.—1990.—6, № 2.—С. 53—60.
5. Корохин В. В., Акимов Л. А., Марченко Г. П., Стародубцева О. М. Наблюдения Юпитера, Луны и Солнца с помощью линейного ПЗС-приемника // Астрон. вестн.—1993.—27, № 3.—С. 56—64.
6. Livshits M. A., Akimov L. A., Belkina I. L., Dyatel N. P. Helium emission in the middle chromosphere // Solar Phys.—1976.—49, N 1.—P. 315—327.

Поступила в редакцию 07.12.99