

УДК 523:945-355:520.86

**Г. П. Марченко, Л. А. Акимов,  
И. Л. Белкина, Ю. И. Великодский**

Научно-исследовательский институт астрономии  
Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина  
61022 Харьков, ул. Сумская 35  
e-mail: mag@astron.kharkov.ua

### **Солнечная хромосфера в линии гелия D<sub>3</sub> по спектрам затмения 29 марта 2006 г.**

*Приведены результаты обработки бесцелевых спектров хромосферы в линии гелия D<sub>3</sub>, полученных во время затмения 29 марта 2006 г. Для наблюдений использован матричный ПЗС-фотоприемник «Cascade-Photometrics 650» с частотой 16 кадр/с. Построена карта высотного распределения абсолютных значений яркости гелиевой хромосферы в интервале широт 30N—10S на западном лимбе. Подтверждена зависимость абсолютных значений яркости гелиевой хромосферы от фазы солнечного цикла. Обнаружено, что высотное распределение свечения гелия имеет один максимум на высоте порядка 2000 км. Свечение гелия в нижней хромосфере не наблюдается. Это подтверждает наше предположение об отсутствии дополнительного максимума на высотах 300 км в распределении яркости линии гелия D<sub>3</sub> в хромосфере в период минимальной солнечной активности. Полученные результаты подтверждают также, что механизмом возбуждения гелия в нижней хромосфере является корональное рентгеновское излучение с  $\lambda < 6$  нм.*

*СОНЯЧНА ХРОМОСФЕРА В ЛІНІЇ ГЕЛІЮ D<sub>3</sub> ЗА СПЕКТРАМИ ЗАТЕМНЕННЯ 29 БЕРЕЗНЯ 2006 Р., Марченко Г. П., Акімов Л. О., Белкіна І. Л., Великодський Ю. І. — Наведено результати обробки безцільових спектрів хромосфери в лінії гелію D<sub>3</sub>, одержаних під час затемнення 29 березня 2006 р. Для спостережень використано матричний ПЗС-фотоприймач «Cascade-Photometrics 650», що працював з частотою 16 кадр/с. Побудована карта висотного розподілу абсолютних значень яскравості гелієвої хромосфери в інтервалі широт 30N — 10S на західному лімбі. Підтверджено залежність абсолютних значень яскравості гелієвої хромосфери від фази сонячного циклу. Виявлено, що висотний розподіл світіння гелію має один максимум на*

висоті порядку 2000 км. Світіння гелію в нижній хромосфері не спостерігається. Це підтверджує наше передбачення про відсутність додаткового максимуму на висотах 300 км у розподілі яскравості лінії гелію  $D_3$  в хромосфері в період мінімальної сонячної активності. Одержані результати підтверджують також, що механізмом збудження гелію в нижній хромосфері є корональне рентгенівське випромінювання з  $\lambda < 6$  нм.

*SOLAR CHROMOSPHERE IN  $D_3$  HELIUM LINE FROM THE SPECTRA OF THE ECLIPSE ON 29 MARCH 2006, by Marchenko G. P., Akimov L. A., Belkina I. L., Velikodsky Yu. I. — We present our results of the processing of the slitless spectra of chromosphere in  $D_3$  helium line obtained during the solar eclipse on 29 March 2006. The CCD matrix «Cascade-Photometrics 650» with a frequency of 16 frames/s was used for the observations. The map of the height distribution of absolute values of surface brightness of helium chromosphere is constructed for the latitude interval 30N—10S at the west limb. A relationship between absolute values of surface brightness of chromosphere in  $D_3$  helium line and the solar cycle phase is confirmed. It is found that the height distribution of surface brightness of helium chromosphere has one maximum at a height of about 2000 km. In the lower chromosphere,  $D_3$  helium line emission was not detected. This confirms our assumption on the absence of additional maximum at a height of about 300 km in the distribution of the  $D_3$  helium line surface brightness during solar minimum period. Moreover, our results confirm that X-ray coronal radiation with  $\lambda < 6$  nm is the source of helium excitation in the lower chromosphere.*

## ВВЕДЕНИЕ

Ранее [2, 10] по материалам трех затмений было показано, что наблюдаемый высотный ход интенсивности свечения линии гелия  $D_3$  в нижней и средней хромосфере имеет бимодальный характер: главный максимум на высотах 1300—1800 км и дополнительный (нижний) максимум на высотах около 250 км, в области температурного минимума. Свечение гелия в области температурного минимума является интересной особенностью, которую невозможно обнаружить при наземных внезатменных наблюдениях. Выявлено, что интенсивность свечения гелия как в основном, так и в нижнем максимуме увеличивается с увеличением солнечной активности. В работе [2] показано также, что причиной появления нижнего максимума может быть ионизирующее корональное излучение с  $\lambda < 6$  нм, при достаточной скважности солнечной хромосферы проникающее до высот температурного минимума. Если это так, то нижний максимум в высотном распределении излучения гелия должен существенно изменяться с фазой цикла солнечной активности, поскольку циклические изменения

рентгеновского потока из короны очень существенны. Отметим, что полученные ранее данные относились к периодам высокой или умеренной солнечной активности. Для подтверждения предложенного механизма возбуждения нижнего максимума интересно получить высотное распределение свечения гелия по данным затмений, относящихся к периодам минимальной солнечной активности. Мы предполагаем, что во время минимума солнечной активности нижний максимум в высотном распределении излучения гелия в линии D<sub>3</sub> может вообще отсутствовать. Данная работа посвящена проверке высказанного предположения по материалам затмения 2006 г.

Во время полного солнечного затмения 29 марта 2006 г. экспедицией НИИ астрономии на бесщелевом спектрографе с ПЗС-камерой получена серия спектров хромосферы в линии D<sub>3</sub> He I с высоким временным разрешением. Информация с ПЗС-матрицы записана в память ПЭВМ. Такие спектральные наблюдения во время полных солнечных затмений ранее не проводились. В данной работе приводятся результаты обработки этих наблюдений с целью получения карты зависимости яркости хромосферы в линии D<sub>3</sub> на западном лимбе Солнца 29 марта 2006 г. от высоты и широты.

## НАБЛЮДЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Наблюдения вблизи полной фазы затмения 29 марта 2006 г. были проведены на территории Горной астрономической обсерватории ГАО РАН вблизи г. Кисловодска. Географические координаты пункта наблюдений  $\lambda = 43^{\circ}44'$ ,  $\phi = 42^{\circ}32'$ , высота над уровнем моря 2130 м. Отсутствие облаков позволило провести наблюдения серпов в линии гелия D<sub>3</sub> вблизи II и III контактов затмения. Однако состояние земной атмосферы было нестабильным, поскольку облака рассеялись всего за несколько минут до начала полной фазы затмения. Как мы увидим ниже, это сказалось на качестве полученных спектров.

Экспедиционный спектрограф состоял из целостатной установки с дополнительным зеркалом, плоской дифракционной решетки 10 × 10 см, 600 штр/мм, и объектива камеры с  $d = 80$  мм и  $f = 400$  мм, который фокусировал изображение спектра в участке 585...590 нм на ПЗС-матрицу камеры «Cascade-Photometrics 650». Часовое движение целостата осуществлялось с помощью шагового двигателя с электронной регулировкой. Относительное расположение целостатного и дополнительного зеркал выбрано так, чтобы получаемые изображения хромосферных серпов были ориентированы перпендикулярно к направлению дисперсии.

ПЗС-матрица камеры имеет размер 4.9 × 3.7 мм (652 × 492 пкл). Для записи изображений участка спектра в память ПЭВМ Е. В. Шальгин разработал программное обеспечение, которое позволило управлять камерой, в реальном времени вводить серии изображений в ПЭВМ и

сохранять их в виде файлов в формате FITS. Во время записи изображений спектра камера работала в режиме с охлаждением до  $32\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Дисперсия на изображении составила  $34.25\text{ пкл/нм}$ , или  $29\text{ пм/пкл}$ . Экспозиции кадров составляли  $25\text{ мс}$ , период следования кадров —  $62.38\text{ мс}$ . Такой режим записи соответствует частоте съемки около  $16\text{ кадр/с}$ . Для места затмения скорость движения Луны относительно Солнца составляла  $0.447\text{ /с}$ , а расстояние между кадрами —  $16.7\text{ км}$  вдоль направления движения Луны. Всего было получено около  $3800$  кадров вблизи полной фазы затмения. В данной работе мы приводим результаты примерно для  $600$  кадров западного лимба Солнца в линии  $D_3$  вблизи III контакта затмения.

Для фотометрических исследований гелиевой хромосферы было проведено изучение фотометрических характеристик ПЗС-камеры в спектральном диапазоне вблизи  $\lambda = 590\text{ нм}$ . Было измерено плоское поле и исследована линейность прибора. Плоское поле было получено на затменном спектрографе путём измерения дневного неба. Оказалось, что средний квадратичный разброс чувствительности элементов матрицы составляет около  $1.5\%$ . Измерение линейности ПЗС-камеры было проведено на оптической установке с точечным стабилизированным источником излучения. Интенсивность света, падающего на матрицу, варьировалась путём изменения расстояния от источника и измерялась при разных экспозициях. Диапазон экспозиций — от  $5$  до  $50\text{ мс}$ .

На рис. 1 представлена общая зависимость отсчетов от энергии упавшего на матрицу света. Видно, что для отсчетов  $N \approx 12000$  линейность отклика матрицы на падающее излучение нарушается. Известно, что диапазон интенсивностей в бесщелевых спектрах гелиевой хромосферы изменяется больше чем на три порядка. Рис. 1 показывает, что данная матрица позволяет измерять с достаточной точностью интегральную интенсивность линии  $D_3$ , если отсчеты вблизи фотосферных высот составляют менее  $14000$ . В интервале отсчетов  $12000$ — $14000$  мы вводили поправки к измеренным отсчетам, используя данные рис. 1. Общий вывод исследования матрицы следующий: при правильно выбранных экспозициях кадров камера «Cascade-Photometrics 650» позволяет измерить высотные изменения интегральной интенсивности линии гелия в интервале высот от фотосфер-

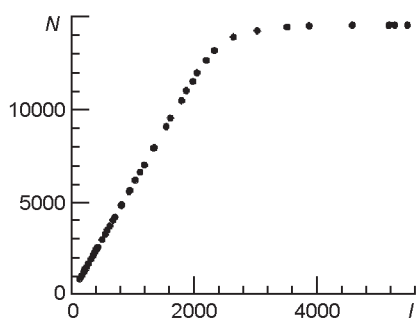


Рис. 1. Зависимость количества  $N$  отсчетов ПЗС-камеры от интенсивности  $I$  падающего света

ных (100 км) до 8000—10000 км в хромосфере с точностью около 2 %.

Для абсолютной привязки значений яркости гелиевой хромосферы в линии D<sub>3</sub> были использованы данные наблюдаемой кривой высотного хода яркости фотосферы. Согласно данным затменных наблюдений [7] яркость фотосферы  $I_{h_0}$  в точке перегиба этой кривой (для  $h = 0$ ) в среднем составляет 0.18 от интенсивности непрерывного спектра центра Солнца  $I_0$  на длине волны линии D<sub>3</sub>. Значение  $I_0$  взято из работы [5].

На рис. 2, а представлен ход логарифмов абсолютных значений интегральной яркости хромосферы в линии D<sub>3</sub> в центре четки Бейли, имеющей гелиографическую широту +10°. Для каждого кадра была вычислена интегральная интенсивность хромосферы как

$$E(h) = \int_h I(r) \sec \theta dr, \quad (1)$$

где  $h$  — минимальная высота данного кадра в этой выбранной четке,  $r$  — расстояние проекции края лунного диска от края солнечного диска,  $\theta$  — угол между направлением дисперсии и радиусом Солнца.

Нуль-пункт шкалы высот определялся как точка перегиба кривой поверхностной яркости фотосферы в четке. Видно, что разброс интегральных значений довольно значительный, что связано с нестабильностью атмосферных условий при наблюдениях. Тем не менее, сглаженная кривая по этим данным строится достаточно надежно. Дифференцируя эту кривую по высоте, мы получаем высотный ход поверхностной яркости в этой же четке, представленный на рис. 2, б. Полученная кривая имеет один максимум на высоте порядка 2000 км. Нижний максимум в высотном ходе кривой яркости гелиевой хромосферы отсутствует. Для того чтобы проверить, является ли такой ход

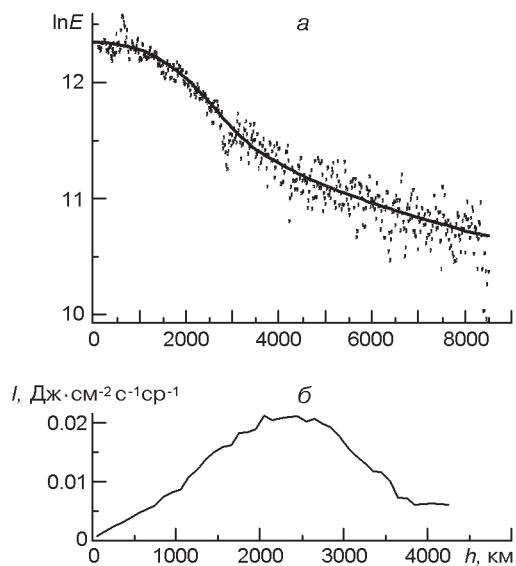


Рис. 2. Распределение с высотой: а — интегральной яркости, б — яркости хромосферы в линии D<sub>3</sub> гелия на западном лимбе 29 марта 2006 г. в четке с +10°

случайным, необходимо изучить зависимость яркости гелиевой хромосферы от высоты для всего видимого лимба, т. е. получить карту распределения яркости линии  $D_3$  в зависимости от широты и высоты.

#### **РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЯРКОСТИ ХРОМОСФЕРЫ ВДОЛЬ ЗАПАДНОГО ЛИМБА 29 МАРТА 2006 Г.**

Проанализируем сначала активность на западном лимбе Солнца во время затмения. В период с 24 по 26 марта 2006 г. вблизи западного лимба находились три небольшие активные области: 10861, 10862 и 10863 NOAA/USAF. Первые две из них находились в южном полушарии, активная область 10863 — в северном. Меридиан западного лимба на момент затмения располагался больше чем на  $20^\circ$  восточнее этих активных областей. Поэтому можно утверждать, что весь западный лимб на момент затмения был невозмущенным. Однако следует иметь в виду, что по данным предыдущих затмений [2, 10] было получено, что положение и величина основного максимума свечения гелия даже для невозмущенной хромосферы различаются для высокоширотных областей и области активных широт ( $\pm 15^\circ$ ).

Для восстановления распределения яркости хромосферы с высотой над поверхностью Солнца обработка спектров хромосферы проводилась по следующему алгоритму.

Сначала были учтены темновые токи и плоское поле. Затем для каждого кадра и для каждой точки лимба было проведено суммирование интенсивностей вдоль направления дисперсии. Полученные величины интегральной яркости хромосферы в линии на высотах каждого кадра обозначим  $E_d(k)$ , где  $k$  — номер кадра.

На рис. 3, *a* показаны серпы в линии  $D_3$  на некоторых исходных спектрах, а на рис. 3, *б* — значения  $E_d(k)$ , сведенные в одно результирующее изображение. На рис. 3, *б* хорошо заметно, что полосы разной яркости в распределении  $E_d(k)$  связаны с номером кадра. Эти полосы, несомненно, связаны с ошибками наблюдений и атмосферными помехами. Ошибки наблюдений могут вызываться сбоями в работе АЦП-камеры, а атмосферные помехи — нестабильностью прозрачности атмосферы, в которой продолжали таять остатки облаков, и мерцаниями. Ранее в работе [4] было показано, что мерцания могут вносить существенные искажения в значения поверхностной яркости хромосферы и фотосферы, получаемые при затменных наблюдениях. Поскольку обнаруженные флуктуации интегральной интенсивности, связанные с номером кадра, при дифференцировании данных для получения зависимости яркости от высоты, могут привести к еще большим ошибкам, необходимо минимизировать ошибки кадров.

Поэтому следующим этапом обработки было исправление ошибок, связанных с номером кадра. Для определения коэффициентов коррекции использовался суммарный ход яркости по кадрам, полу-



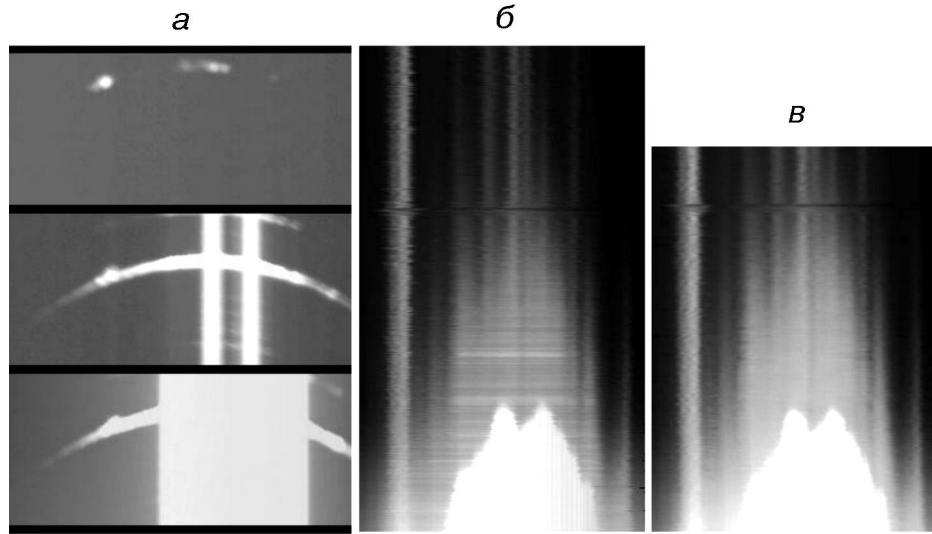


Рис. 3. Изображения серпов в линии D<sub>3</sub> на разных кадрах (а), полученное распределение  $E_d(k)$  вдоль лимба (по оси абсцисс) в зависимости от номера кадра  $k$  (по оси ординат) (б) и исправленный за кадровые ошибки ход интегральной яркости хромосферы  $E_d(k)$  вдоль лимба (в)

ченный путём усреднения яркости в каждой строке рис. 3, б вдоль лимба. Поскольку на разных участках одного кадра находятся яркости, относящиеся к разным высотам, мы исходили из предположения, что ход кривой интегральной яркости должен быть гладким, а высокочастотные вариации яркости вызваны атмосферными и другими ошибками. Для суммарного хода интегральной яркости по кадрам подбиралась аппроксимация в виде полиномов пятой степени. По этим кривым и были вычислены коэффициенты коррекции для каждого кадра как относительные отклонения от аппроксимации. На рис. 4 показан суммарный ход яркости по кадрам, полученный путём усреднения яркости в каждой строке вдоль лимба, и его аппроксимация. Полученный в результате исправлений ход интегральной яркости хромосферы в зависимости от номера кадра представлен на рис. 3, в.

В зависимости от места наблюдений и обстоятельств затмения высоты  $h$ , которые открываются над поверхностью Солнца, изменяются с разной скоростью для разных частей солнечного лимба. Для

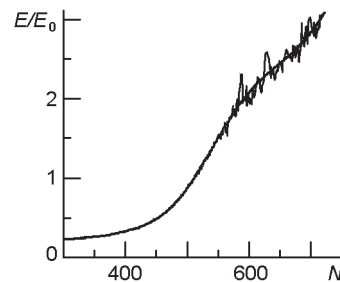


Рис. 4. Зависимость интегральной яркости  $E$  от номера кадра  $N$  и ее аппроксимация

перехода к равномерной шкале высот были сделаны координатные преобразования [3] по формулам

$$h = \left\{ (x_l \cos \gamma - y_l \sin \gamma)^2 + (r_l^2 - r_s^2) + (x_l \cos \gamma - y_l \sin \gamma)^2 \right\}^{1/2} r_s, \quad (2)$$

$$V = V_0 \cos \frac{(x_l \cos \gamma - y_l \sin \gamma) \cos \gamma}{\left\{ (r_l^2 - r_s^2) + (x_l \cos \gamma - y_l \sin \gamma)^2 \right\}^{1/2}}, \quad (3)$$

$$P = (P_{II} - P_{III} - 180) / 2. \quad (4)$$

Здесь  $\gamma$  — угол между радиусом-вектором точки с позиционным углом  $P$  и направлением движения Луны (осью  $x$ ),  $P_{II}$ ;  $P_{III}$  — позиционные углы внутренних контактов,  $V$  — скорость изменения высот на разных позиционных углах,  $x_l$ ;  $y_l$  — координаты Луны в системе координат с началом в центре Солнца и осью абсцисс вдоль направления движения Луны ( $y_l = \text{const}$ ),  $r_l^2 = x_l^2 + y_l^2$  — расстояние между центрами Солнца и Луны,  $r_l$ ;  $r_s$  — топоцентрические радиусы Луны и Солнца,  $V_0$  — скорость движения центра Луны по отношению к Солнцу. Величины  $P_{II}$ ,  $P_{III}$ ,  $\gamma$ ,  $r_l$ ,  $r_s$  и  $V_0$  мы рассчитали по бесселевым элементам для моментов и места затмения.

Результат координатного преобразования данных по формулам (2)—(4) представлен на рис. 5. На этом рисунке нуль-пункты высот для каждой точки лимба еще не определены.

Следующими этапом обработки были переход к интегрированию вдоль радиуса-вектора и приведение данных к одним высотам. Как и в случае отдельной чётки, переход к интегрированию по радиусу сделан с учетом угла  $\gamma$  между направлением дисперсии и радиусом Солнца (см. формулу (1)). Методика приведения к одним высотам также описана выше: за нуль-пункт для каждой точки серпа принималась точка перегиба кривой яркости фотосферы в данном месте лимба.

Поскольку  $I(h) = \frac{dE(h)}{dh}$ , высотное распределение яркости мы

получали путем численного дифференцирования по высоте сглаженных значений интегральной яркости хромосферы в линии  $D_3$ .

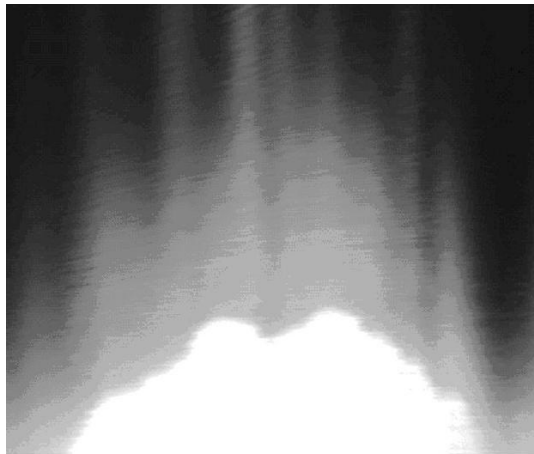
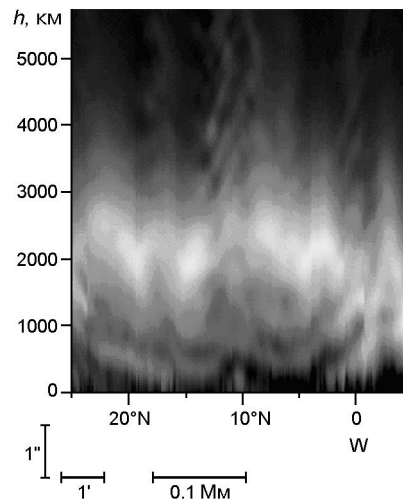


Рис. 5. Ход интегральной интенсивности линии  $D_3$  гелия с высотой после координатных преобразований (нуль-пункты шкалы высот не совмещены)



Рис. 6. Карта распределения яркости хромосферы в линии D<sub>3</sub> гелия на западном лимбе 29 марта 2006 г. вдоль высоты и широты



На рис. 6 показано полученное распределение яркости хромосферы в линии D<sub>3</sub> гелия на западном лимбе 29 марта 2006 г. по высоте и широте. Переход к гелиографическим широтам осуществлялся с учетом координат протуберанцев по данным из Solar-Geophysical Data. Анализ карты на рис. 6 показывает, что практически на всем лимбе максимум свечения гелия расположен на некотором расстоянии от фотосферы на высотах вблизи 2000 км. Излучение вблизи фотосферы практически отсутствует. Также на рис. 6 видно, что в хромосфере есть неоднородности яркости вдоль лимба. Можно показать, что размер этих неоднородностей приблизительно совпадает с размерами супергрануляции.

Для оценки точности полученной карты (рис. 6) следует отметить, что измерения были проведены вдоль участка солнечного лимба, имеющего протяженность 30°, поэтому на результаты существенно влияет лунный рельеф: горки, впадины, склоны. В работе [6] показано, что влияние лунного рельефа проявляется в изменении кривых яркости фотосферы и в смещении нуля-пункта шкалы высот. Такое смещение возможно, например, при сильной изрезанности дна впадины, или для узких расширяющихся впадин. Для уменьшения подобных искажений мы провели сглаживание поверхностной яркости вдоль лимба по методике [1]. Можно показать, что смещение нуля-пункта шкалы высот не превышает приведенную в работе [1] оценку 50 км. Кроме того, для уменьшения шумов, возникающих после численного дифференцирования, было проведено сглаживание значений яркости вдоль высоты, так что разрешение по высоте на полученном изображении составляет около 150 км.

Отсутствие нижнего максимума по данным затмения 2006 г. можно подтвердить ходом с высотой яркости хромосферы, средней вдоль всего видимого лимба.

На рис. 7 показана средняя зависимость абсолютных значений яркости хромосферы в линии D<sub>3</sub> гелия от высоты по сравнению с анало-

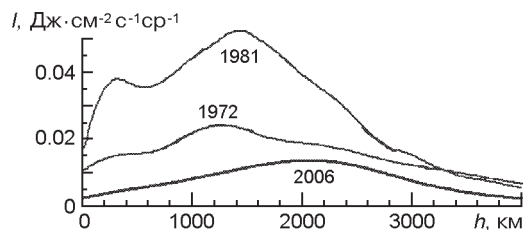


Рис. 7. Распределение с высотой абсолютных значений средней яркости  $I$  хромосферы в линии гелия  $D_3$  для трёх затмений

гичными данными для западного лимба Солнца 31 июля 1981 г. и восточного лимба 10 июля 1972 г. Видно, что абсолютные значения кривой для затмения 2006 г. оказались примерно в четыре раза меньшими, чем в 1981 г.. Кроме того, в отличие от данных предыдущих затмений, кривая для западного лимба затмения 29 марта 2006 г. не имеет нижнего максимума. Отметим также, что основной максимум этой кривой расположен существенно выше, чем в предыдущих затмениях (примерно на высоте 2000 км).

Таким образом, полученные результаты подтверждают наше предположение о возможном отсутствии нижнего максимума в высотном распределении хромосферы в линии гелия  $D_3$ .

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ. ВЫВОДЫ

В данной работе приведены результаты спектральных наблюдений хромосферы в линии гелия  $D_3$ , полученных с высоким временным разрешением во время затмения 29 марта 2006 г. с ПЗС-матрицей в качестве приемника излучения. Разработаны и осуществлены программно алгоритмы обработки такого нового вида наблюдений.

Построена карта высотного распределения абсолютных значений яркости хромосферы в линии гелия  $D_3$   $I(h)$  в интервале широт  $30N$  —  $10S$  на западном лимбе. Показано, что в отличие от результатов предыдущих затмений,  $I(h)$  имеет один основной максимум, расположенный на высоте  $h \approx 2000$  км. Абсолютные значения яркости в максимуме для затмения 29 марта 2006 г. оказались почти в четыре раза меньшими, чем для затмения 31 июля 1981 г. и в два раза меньшими, чем для затмения 10 июля 1972 г. Полученный результат качественно подтверждает обнаруженную ранее тенденцию прямой зависимости абсолютной яркости гелиевой хромосферы в основном максимуме от фазы солнечного цикла [2]. Необходимо отметить, что методика абсолютных привязок для данного затмения и для предыдущих затмений была разной: раньше использовалась дополнительная оптическая система с учетом всех необходимых редукиций [1], а данные затмения 29 марта 2006 г. абсолютизированы по значениям яркости фотосферы в точке перегиба высотного хода кривой. Поэтому при сравнении абсолютных значений яркости в линии гелия нужно учитывать, что точность абсолютных привязок составляет около 20 %.

Важными являются полученные в работе результаты о высоте основного максимума в распределении яркости линии D<sub>3</sub> и о корреляции кривых интегральной яркости гелиевой хромосферы и яркости короны. Они подтверждают, что источник возбуждения гелия в средней хромосфере находится в солнечной короне.

Высота основного максимума яркости линий гелия согласно [16] соответствует средней глубине эффективного проникновения корональной ионизирующей радиации в хромосферу. Полученное в данной работе значение высоты основного максимума ( $h \approx 2000$  км) может означать, что в фазе минимума солнечной активности корональное излучение проникает в среднем только до таких высот. Согласно данным предыдущих затмений, относящихся к фазам высокой или средней солнечной активности, высота основного максимума составляла 1300—1800 км. Изменение глубины проникновения коронального излучения связано, по-видимому, с разными циклическими изменениями его энергии для разных участков спектра.

Теоретические исследования [9, 11, 13] связывают характер высотного распределения свечения гелия с определяющей ролью коронального EUV-излучения в ионизации атомов гелия в средней хромосфере, где температура недостаточна для возбуждения гелия электронным ударом. В работах [11, 13] для высот, больших 2000 км, учитывается также вклад амбиполярной диффузии ионизированного гелия из короны и высокотемпературной ионизации в переходном слое между хромосферой и короной. Несмотря на то что наблюдения во время затмений [2, 10] доказали реальность свечения гелия в нижней хромосфере, в работах, посвященных механизмам возбуждения атомов гелия в хромосфере коротковолновым корональным излучением, этот факт в расчет не принимался. Предполагалось, что нижний максимум в распределении гелия обусловлен наложением по лучу зрения отдельных неоднородностей, принадлежащих более высоким слоям хромосферы [14, 15]. Подчеркнем, что нижний максимум в распределении гелия в линии D<sub>3</sub> был обнаружен в периоды высокой или умеренной корональной активности. В данной работе обнаружено, что в спокойной хромосфере в период вблизи минимума солнечной активности нижний максимум в распределении гелия отсутствует.

Недавно в работе [12] была исследована зависимость излучения хромосферы в триплетных линиях гелия D<sub>3</sub> и 1083 нм на лимбе от EUV-излучения из короны на основе нескольких современных полупырических моделей хромосферы и модели атома гелия с 53 энергетическими уровнями. Показано, что при среднем уровне коронального излучения максимум излучения хромосферы в линии D<sub>3</sub> должен быть расположен на высоте 2023 км (от уровня  $\tau = 1$ ), или 1780 км от основания хромосферы [5]. Ширина полосы свечения гелия вокруг максимума составляет 1600 км, излучение вблизи фотосферы отсутствует. Этот модельный результат удовлетворительно согласуется с нашими данными наблюдений затмения 29 марта 2006 г. Согласно

расчетам [12] при увеличении потока из короны теория дает существенное увеличение интенсивности линии  $D_3$ , начиная с высоты  $h$  750 км. Возможность наличия нижнего максимума в работе [12] не рассматривалась, поскольку учитывалось только EUV-излучение из короны с  $\lambda > 15$  нм.

Как показано в работе [2], свечение гелия в нижнем максимуме также может быть объяснено радиацией из короны, проникающей до основания хромосферы. Однако проникнуть до основания хромосферы может только рентгеновское излучение с  $\lambda < 6$  нм.

Известно, что для спокойного Солнца [8] энергия излучения для волн  $\lambda < 6$  нм составляет около 5 % от количества энергии за пределом серии Лаймана для гелия. По-видимому, в фазе солнечного минимума энергии коронального излучения с  $\lambda < 6$  нм недостаточно для ионизации гелия на высотах 200—300 км. В годы вблизи максимума активности средняя энергия коротковолнового излучения увеличивается: для  $\lambda < 40$  нм — в 1.5—2 раза, а для  $\lambda < 6$  нм — в 5—15 раз. Таким образом, отсутствие нижнего максимума в высотном распределении яркости линии гелия  $D_3$  во время затмения 29 марта 2006 г. служит аргументом в пользу того, что механизмом возбуждения гелия в нижней хромосфере является корональное излучение с  $\lambda < 6$  нм.

1. Акимов Л. А., Белкина И. Л., Белецкий С. А., Дятел Н. П. Хромосфера Солнца в линии  $D_3$  He I по наблюдениям полных солнечных затмений. Методика построения изображений // Кинематика и физика небес. тел.—2000.—**16**, № 2.—С. 145—152.
2. Акимов Л. А., Белкина И. Л., Белецкий С. А., Дятел Н. П. Структура и эмиссия солнечной хромосферы в линии  $D_3$  по наблюдениям полных солнечных затмений // Кинематика и физика небес. тел.—2002.—**18**, № 2.—С. 136—148.
3. Акимов Л. Л., Белкина И. Л., Дятел Н. П. Высоты факелов над фотосферой по наблюдению затмения 31 июля 1981 г. // Астрон. журн.—1984.—**61**, вып. 3.—С. 530—534.
4. 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.
5. Аллен К. У. Астрофизические величины. — М.: Мир, 1977.—448 с.
6. Белкина И. Л., Дятел Н. П., Поспергелис М. М. О возможности уточнения распределения яркости фотосферы вблизи лимба по затменным наблюдениям // Кинематика и физика небес. тел.—1990.—**6**, № 2.—С. 53—58.
7. *Вариации* глобальных характеристик Солнца. — Киев: Наук. думка, 1992.—304 с.
8. Иванов-Холодный Г. С., Никольский Г. М. Солнце и ионосфера. — М.: Наука, 1969.—455 с.
9. Шкловский И. С. Ионизация хромосферы и протуберанцев и проблема распределения плотности в хромосфере // Тр. Гос. астрон. ин-та им. П. К. Штернберга.—1951.—**20**.—С. 5—25.
10. Akimov L. A., Beletsky S. A., Dyatel N. P. The chromospheric  $D_3$  helium emission observed at the total solar eclipse of July 31, 1981 // Astron. and Astrophys. Transactions.—1999.—**18**(1).—P. 253—260.

11. *Avret E. H., Koutchmy S.* New observations and analyses of the Helium D<sub>3</sub> shell above the limb // *Bull. Amer. Astron. Soc.*—1989.—**24**.—P. 828—832.
12. *Centeno R., Trujillo Bueno J., Uitenbroek H., Collados M.* The influence of coronal EUV irradiance on the emission in the He I 10830 C and D<sub>3</sub> multiplets // *Astrophys. J.*—2008.—**677**, N 1.—P. 742—750.
13. *Fontenla J., Avret E., Loeser R.* Energy balance in the solar transition region. III // *Astrophys. J.*—1993.—**18**, N 1.—P. 319—345.
14. *Gulyaev R. A.* The intensity distribution of the D<sub>3</sub> Helium line near the solar limb // *Solar Phys.*—1971.—**18**, N 3.—P. 410—416.
15. *Gulyaev R. A.* The brightness of the helium D<sub>3</sub> line in the undisturbed chromosphere from eclipse observations // *Solar Phys.*—1975.—**44**, N 3.—P. 410—416.
16. *Pope T., Schoolman S. A.* Height of helium emission in the chromosphere // *Solar Phys.*—1975.—**42**, N 1.—P. 47—51.

Поступила в редакцию 26.12.09