

УДК 523.945-62.520.86

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

Астрономическая обсерватория Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина
61022 Харьков, ул. Сумская 35**Структура и эмиссия солнечной хромосферы в линии D_3 He I по наблюдениям полных солнечных затмений**

Приводятся карты распределения поверхностной яркости хромосферы в линии D_3 гелия в зависимости от гелиографической широты и высоты над лимбом, построенные по материалам кинематографических наблюдений полных солнечных затмений 10 июля 1972 г. и 31 июля 1981 г. Свечение наблюдается преимущественно в обособленных образованиях с характерным размером 20—30 тыс. км вдоль лимба, что соответствует размеру ячеек супергрануляции. Эти образования концентрируются на высоте около 1400 км и наблюдаются до 3—4 тыс. км. Наблюдается также второй дополнительный максимум их концентрации у самого основания хромосферы на высоте около 250 км. Энергия излучения хромосферы в районе нижнего максимума составляет 5 % для затмения 1972 г. и 10 % для затмения 1981 г. от всей энергии в линии. Интегральная яркость невозмущенной гелиевой хромосферы во время затмения 1981 г. оказалась в два раза больше, чем во время затмения 1972 г. Это различие связано с тем, что наблюдения относятся к разным фазам цикла солнечной активности. Показано, что в случае неоднородной хромосферы свечение гелия в области температурного минимума может быть вызвано проникновением до этих высот коронального излучения с $\lambda < 6$ нм.

СТРУКТУРА ТА ЕМІСІЯ СОНЯЧНОЇ ХРОМОСФЕРИ В ЛІНІЇ D_3 He I ЗА СПОСТЕРЕЖЕННЯМИ ПОВНИХ СОНЯЧНИХ ЗАТЕМНЕНЬ, Акімов Л. О., Белкіна І. Л., Белецький С. О., Дятел Н. П. — Наведені карти поверхневої яскравості хромосфери в лінії D_3 гелію в залежності від геліографічної широти та висоти над лимбом, побудовані за матеріалами кінематографічних спостережень повних сонячних затемнень 10 липня 1972 р. та 31 липня 1981 р. Світіння спостерігається переважно у відокремлених утвореннях, характерний розмір яких складає 20—30 тис. км вздовж лимба, що відповідає розміру супергрануляції. Ці утворення сконцентровані на висоті біля 1400 км і спостерігаються до 3-4 тис. км. Спостерігається також другий, додатковий максимум їхньої концентрації на висоті близько 250 км. Енергія випромінювання хромосфери поблизу нижнього максимуму складає 5 % для затемнення 1972 р. і 10 % для

затемнення 1981 р. від усієї енергії в лінії. Інтегральна яскравість незбуреної гелієвої хромосфери під час затемнення 1981 р. виявилась вдвічі більшою, ніж під час затемнення 1972 р. Така різниця пов'язана з тим, що спостереження відносяться до різних фаз циклу сонячної активності. Показано, що для неоднорідної хромосфери світіння гелію в області температурного мінімуму може бути викликане проникненням до цих висот коронального випромінювання з $\lambda < 6$ нм.

STRUCTURE AND EMISSION OF THE SOLAR CHROMOSPHERE IN THE HELIUM D_3 LINE FROM OBSERVATIONS OF TOTAL SOLAR ECLIPSES, by Akimov L. A., Belkina I. L., Beletsky S. A., Dyatel N. P. — Maps of the chromospheric emission in the helium D_3 line as functions of heliographic latitude and height obtained from cinematographic observations of the total solar eclipses 1972 July 10 and 1981 July 31 are presented. The helium emission is found to be observed in separate features with a characteristic supergranule size of 20000—30000 km along the limb mainly. The features are concentrated at a height of about 1400 km but can be observed at heights up to 3000—4000 km. These are also present at the base of the chromosphere, and the height distribution of surface brightness reveals two peaks at heights of about 1400 and 250 km. The energy emitted by the chromosphere over the height range of the lower maximum is about 5 % and 10 % of the total energy emitted by the chromosphere in the D_3 line for the eclipses of 1972 and 1981, respectively. It is found that the integral brightness of the quiet chromosphere for the eclipse of 1981 was twice that of the 1972 eclipse. This difference is connected with the fact that the eclipses occurred at different phases of sunspot cycle. It is shown that the helium emission at the height range of the temperature minimum in an the inhomogeneous chromosphere can be explained by the penetration of the coronal radiation with $\lambda < 6$ nm to these heights.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие осознание того факта, что эмиссионные свойства хромосферы в значительной мере определяются ее структурой, инициировало многочисленные исследования в этом направлении. Совершенствование наблюдательной техники, применение спутников для получения изображений Солнца с высоким пространственным разрешением, в том числе в крайней УФ- и рентгеновской областях, позволили судить о сверхтонкой структуре магнитных полей, о тонкой, волокнистой структуре петель в переходной области между хромосферой и короной.

В нашей работе мы изучаем структурные особенности нижней и средней хромосферы и ее эмиссионные свойства по материалам полных солнечных затмений 1972 и 1981 гг. Ранее в работах [1, 12] мы исследовали особенности свечения хромосферы в линии D_3 He I для затмения 1981 г.

В работах [1, 4] описана принципиально новая методика фотометрии бесчелевых спектрограмм солнечного затмения с помощью быстродействующего микрофотометра с выводом информации непосредственно в память ЭВМ, методика обработки результатов измерения и построения изображений хромосферы в спектральной линии или в континууме в окрестности линии. С помощью этой методики мы получили полную картину распределения эмиссии хромосферы в линии D_3 вдоль широты в зависимости от высоты, что позволяет судить о структурных неоднородностях вдоль всей исследуемой части лимба, о связи интенсивности излучения с эмиссией короны над исследуемой хромосферой и с нижележащими фотосферными образованиями и позволяет изучать интегральные эмиссионные характери-

стики хромосферы в целом.

Линии гелия интересны тем, что потенциал ионизации атомов достаточно высок, и в случае ионизации при столкновительных процессах необходима температура выше 12 500 К, которая характерна для переходной области между хромосферой и короной. В переходной области резко изменяются характеристики солнечной атмосферы, а процессы обмена энергией между фотосферой и короной изучены еще недостаточно.

Наблюдения [5, 12—14, 16, 18—22] показывают, что основное излучение в линии D_3 сосредоточено на высотах от 1100 до 1800 км. Ряд исследований [8, 11, 17, 18, 23] посвящен разработке механизма ионизации гелия коротковолновым излучением короны, который достаточно хорошо описывает наблюдаемые интенсивности и высоты свечения линии гелия. Этот механизм взят нами за основу при интерпретации полученных данных.

По кинематографическим наблюдениям полных солнечных затмений 1968, 1972 и 1981 гг., проведенным с высоким разрешением по высоте [2, 4, 18], мы получили также данные о наличии близфотосферного свечения гелия. Такое свечение наблюдается преимущественно в экваториальной зоне и в активных областях, концентрируясь в среднем на высотах около 250 км. Механизм свечения гелия на этих высотах не был разработан ранее, и мы рассмотрим его здесь.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ СНИМКОВ ХРОМОСФЕРЫ

Приведем результаты обработки кинематографических наблюдений хромосферных серпов в линии D_3 He I (585.6 нм), полученные во время полного солнечного затмения 10 июля 1972 г. экспедицией АО ХГУ на Чукотке, и сравним их с полученными ранее результатами по затмению 31 июля 1981 г., опубликованными раньше [1, 12]. Для наблюдений применялся бесщелевой спектрограф с дифракционной решеткой (600 штрих/мм, 100×100 мм и объективом камеры $D = 10$ см, $F = 0.8$ м) Киносъемка осуществлялась вблизи второго и третьего контактов затмения в первом порядке решетки. Дисперсия на пленке 1.8 нм/мм. Частота съемки изменялась в процессе затмения от 10 до 26 кадров в секунду, что соответствует сдвигу 35 и 12 км на диске Солнца в направлении движения Луны. Установка была смонтирована так, что хромосферные серпы на восточном лимбе были расположены перпендикулярно к направлению дисперсии. Наблюдения проходили при очень хороших атмосферных условиях. Более подробное описание наблюдений и метода стандартизации снимков приведено в работе [1].

Структура хромосферы. Изображения хромосферы в линии D_3 в зависимости от широты и высоты для восточного лимба затмения 1972 г. и западного лимба затмения 1981 г. представлены на рис. 1. Высоты на картах, как и всегда для затменных данных, отсчитываются от точки перегиба распределения яркости континуума, которая отстоит от точки с оптической глубиной, равной единице, на 320 км. Рис. 1 показывает, что хромосфера весьма неоднородна как в вертикальном, так и в горизонтальном направлении. Размеры и форму отдельных гелиевых структур по рис. 1 определить трудно, поскольку масштаб (в километрах) в горизонтальном и радиальном направлениях отличается в 100 раз, что приводит к подчеркиванию вытянутости структур в радиальном направлении. На карте распределения поверхностной яркости гелиевой хромосферы 1972 г., представленной на рис. 2 в другом масштабе (по обеим координатам — километры), хорошо заметно, что свечение наблюдается в обособленных

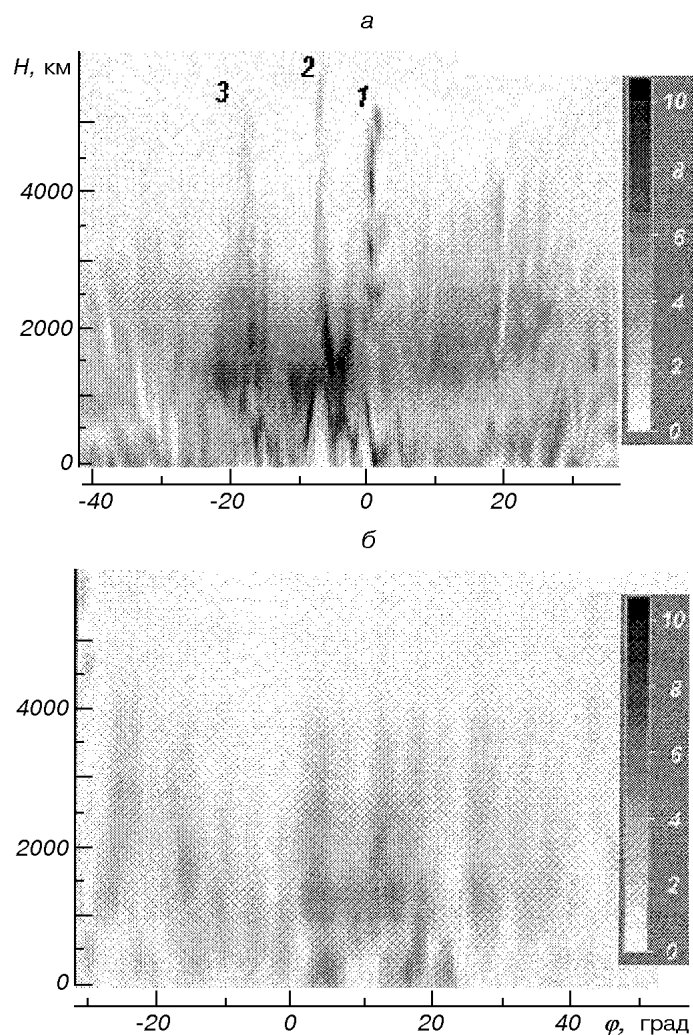


Рис. 1. Карты распределения поверхностной яркости хромосферы в линии D_3 гелия на моменты затмений 10.07.1972 (а) и 31.07.1981 (б) (негатив). Цифрами обозначены протуберанцы

(типа облачных) образованиях, придающих изображению пятнистый характер. Эти образования, имея максимум концентрации вблизи 1400 км, наблюдаются до высот 3—4 тыс. км, а их вершины простираются до шести тысяч километров. Разбросаны они случайно, о чем косвенно свидетельствует и удовлетворительное представление интегральной светимости хромосферы с высотой нормальным законом [12]. Размер образований составляет от 200 до 1000 км по высоте и 20—30 тыс. км вдоль лимба, что соответствует характерному размеру супергранул. Эмиссионные структуры в ряде участков солнечного лимба отделены от фотосферы узкой полосой ослабленного излучения шириной около 200 км. Но многие структуры начинаются прямо от фотосферы. Особенно это характерно для экваториальной зоны ($0-25^\circ$ N) — зоны повышенной эмиссии, в которой можно выделить два основных максимума излучения: на высоте 1400 км и вблизи фотосферы на высоте 250 км. Заметно, что излучение хромосферы имеет ярко выраженную широтную зависимость, о чем более подробно будет

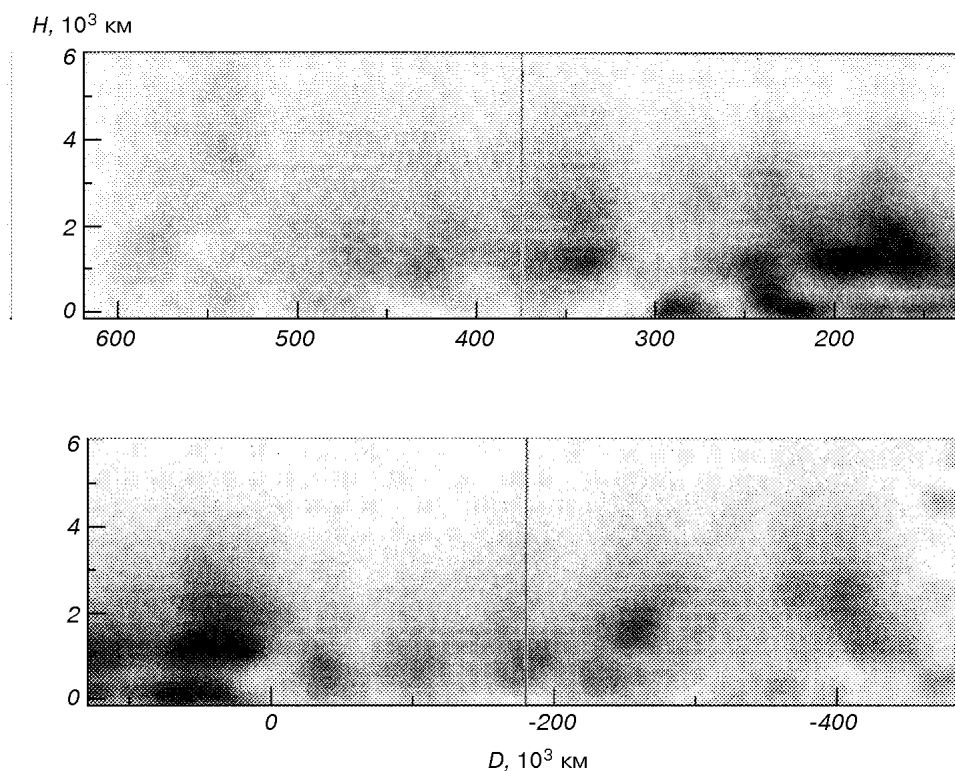


Рис. 2. Эмиссия хромосферы на восточном лимбе затмения 1972 г. (негатив). Масштаб в горизонтальном направлении в 25 раз больше, чем в радиальном

сказано ниже. Рассмотрим связь излучения в линии D_3 с активностью вблизи солнечного лимба. Восточный лимб на момент затмения 10 июля 1972 г. был свободен от активных областей, но за лимбом к северу от экватора находилась активная область Mc Math 11936. В последующие дни эта область развивалась, и 12 июля она проявилась на долготе лимба затмения. В красной и зеленой линиях короны в районе гелиографической широты 6° N авторы [10] наблюдали слабую корональную конденсацию.

Из рис. 1 и 2 видно, что наиболее интенсивно хромосфера светится в пределах двадцати градусов к северу от экватора. Объяснение этому мы видим в возможном усилении магнитного поля и яркости рентгеновских структур еще до появления признаков активности в фотосфере и хромосфере в виде факелов и флоккулов. В данном случае можно говорить о D_3 -эмиссии в хромосфере как об индикаторе рентгеновского излучения короны.

Протуберанцы на восточном лимбе были немногочисленны. Заслуживает внимания большой южный протуберанец на широте 30° N. Он состоит из ряда облачных структур (петель), размер которых составляет 20—30 тыс. км вдоль лимба и 500 км по высоте.

Мы не можем судить о тонкой структуре хромосферы в горизонтальном направлении, но специфика затменных наблюдений позволяет изучить с большим разрешением особенности эмиссионных структур в радиальном направлении, и что существенно, — от самого основания хромосферы. Начиная с высоты 4000 км преобладают структуры, вытянутые вдоль радиуса, по-видимому, соответствующие кустам спикул. Они, как правило, более протяженны на широтах вне экваториальной зоны. Протяженность

хромосферы минимальна в районе широты 10° S и максимальна в районе широт 45° N, 25° S. В среднем же, если исключить влияние протуберанцев, протяженность хромосферы на высоких широтах больше, чем на низких. На рис. 2 хорошо выделяются структуры, соответствующие нижнему максимуму, расположенному вблизи фотосферы.

Сравнительный анализ гелиевой эмиссии хромосферы 1972 и 1981 гг. позволяет выделить как общие, так и отличительные черты эмиссионных свойств хромосферы. Эмиссионная картина хромосферы 1981 г. заметно отличается от картины 1972 г. Западный лимб во время затмения 1981 г. был сильно возмущен: на нем располагались активные области, пятна, старые флоккульные поля и протуберанцы. Активность концентрировалась в экваториальной зоне (25° N — 25° S). Причем на юге находились яркие флоккулы с пятнами, видимыми и на K_3 CaII-спектрогелиограммах, а в северной зоне активность была существенно ниже и определялась в основном старыми и слабыми флоккулами. Этим, по-видимому, и объясняется большая разница между значениями поверхностной яркости в северной и южной экваториальных зонах.

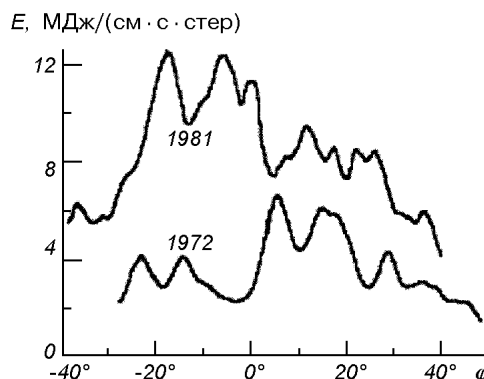
Для обоих затмений характерный размер эмиссионных структур соответствует размеру супергрануляционной ячейки. Дисперсия, наблюдаемая в высотном распределении эмиссионных структур, свидетельствует о том, что ионизирующее излучение из короны достигает различных высот в зависимости от локальных структурных особенностей хромосферы и короны. Близфотосферное свечение наблюдается как в 1972 г. так и в 1981 г., но в 1981 г. оно имеет более регулярный характер и наблюдается почти на всех широтах. Гелиевая хромосфера во время затмения 1981 г. более яркая, чем в 1972 г., но протяженность хромосферы больше в 1972 г.. Эти различия вызваны структурными особенностями атмосферы Солнца, находящегося на разных стадиях цикла солнечной активности: 1972 г. — предминимальный год, среднемесячное число Вольфа $W = 76.5$, а 1981 г. — постмаксимальный год, $W = 151.3$.

Структура хромосферы 1972 г. более простая, в ней преобладают радиальные элементы, а горизонтальных, петельных структур больше в хромосфере 1981 г. Большая протяженность хромосферы в 1972 г. по сравнению с 1981 г. может быть следствием этих структурных различий аналогично тому, что имеет место и для короны.

Более регулярный характер близфотосферного свечения в 1981 г. по сравнению с 1972 г. можно связать с более равномерным излучением короны 1981 г., а повышенную яркость хромосферы 1981 г. — с усилением потока корональной ионизирующей радиации.

Распределение эмиссии вдоль широты. На рис. 3 представлены

Рис. 3. Абсолютные значения интегральной яркости хромосферы в зависимости от широты для двух затмений



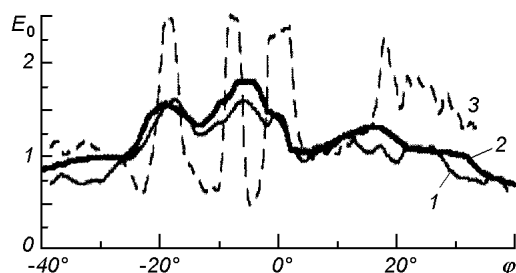


Рис. 4. Сравнение относительной интегральной яркости гелиевой хромосферы 31.7.81 г. с высот 0 км (тонкая линия), 3000 км (штриховая линия) с яркостью короны в линии Fe XIV 503.3 нм (жирная линия). За единицу принята яркость на широте 5° N.

абсолютные значения интегральной яркости хромосферы в линии D_3 He I в зависимости от широты для двух затмений. Абсолютная привязка осуществлялась по методике, одинаковой для обоих затмений.

Средняя интенсивность излучения в 1981 г. более чем вдвое превышает излучение 1972 г. Излучение в активных широтах 1972 г. едва достигает величины, характерной для спокойных областей. 1981 г. Величина интегральной светимости более чем вдвое изменяется вдоль лимба для обоих затмений. При этом средняя яркость невозмущенной хромосферы в 1981 г. оказалась в два раза выше, чем яркость невозмущенной хромосферы 1972 г. Отсюда можно сделать вывод, что интегральная яркость невозмущенной хромосферы увеличивается от минимума к максимуму солнечной активности. Отметим, однако, что начиная с высоты 3500 км поверхностная яркость хромосферы 1972 г. становится больше, чем хромосферы 1981 г., т. е. наблюдается антикорреляция с фазой цикла.

Рассмотрим широтное распределение светимости, проинтегрированной с некоторой высоты над поверхностью. На рис. 4 для затмения 1981 г. представлено сравнение относительного распределения по лимбу интегральной светимости с высоты 0 и 3000 км. Здесь мы видим, что на больших высотах излучение в активных областях становится даже меньше, чем в спокойных. Излучение на высотах сверх 3000 км в спокойных широтах более чем втрое превышает излучение в активных. Это означает, что хромосфера в активных областях как бы прижата к фотосфере, что, по-видимому, связано с различием значений и конфигурации магнитных полей в спокойных и активных областях (открытая или петельная структура).

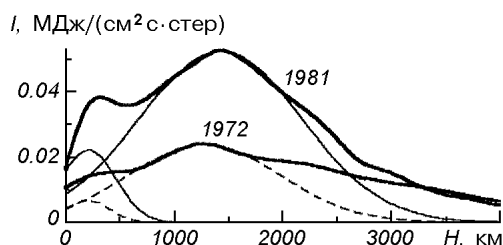
На рис. 4 представлено также относительное распределение по лимбу интенсивности зеленой линии короны. Значения интенсивности короны взяты из Solar Geophysical Data. Для активного лимба 1981 г. видна тесная корреляция полного интегрального излучения в линии гелия (для нулевой высоты) с излучением короны. Начиная с высоты 1500 км [12] эта корреляция уменьшается, а для высот более 3000 км наблюдается антикорреляция (места расположения протуберанцев во внимание не принимались).

Для затмения 1972 г. картина подобная [2], хотя корреляция для полного интегрального излучения несколько меньшая. Это, по-видимому, связано с тем, что излучение короны идет от активной области, которая находилась за лимбом (на 10—15°). В 1981 г. активные области располагались на лимбе.

Распределение эмиссии вдоль радиуса. Выше мы уже отмечали пятнистый характер излучения как в горизонтальном, так и в вертикальном направлении. Эти облачные образования имеют сравнительно резкую границу со стороны фотосферы и более размытую и протяженную в противоположном направлении.

На рис. 5 представлены распределения поверхностной яркости хромосферы, усредненной вдоль лимба, в зависимости от высоты. Для обоих затмений в усредненной картине уверенно проявляется нижний максимум,

Рис. 5. Изменение с высотой поверхностной яркости хромосферы, усредненной по всем наблюдаемым широтам для двух затмений (жирные кривые). Тонкие и пунктирные кривые — результат представления данных в виде суммы двух гауссиан, описывающих излучение в нижнем и верхнем максимуме для высот меньше 2000 км



расположенный вблизи фотосферы на высотах 200—300 км., т. е. в области температурного минимума. Мы считаем, что нижний максимум является реальным. В принципе нельзя отрицать, что отдельные близфотосферные структуры могут быть следствием наложения по лучу зрения излучения от более высоко расположенных образований. Однако протяженность по высоте у близфотосферных структур, как правило, меньше, чем у структур верхнего максимума, и они отделены от эмиссии в средней хромосфере полосой ослабленного излучения. Поэтому наличие нижнего максимума в интегральной характеристике исключает его интерпретацию случайным наложением по лучу зрения структур верхнего максимума.

Интенсивности верхних максимумов для обоих затмений различается в 2.2 раза, а средняя энергия всей хромосферы — вдвое.

Выше 2500 км наблюдается экспоненциальный спад интенсивности для обоих затмений, но с разным градиентом. Градиент изменения яркости после максимума в четыре раза больше для затмения 1981 г., так что выше 3500 км интенсивность эмиссии в 1972 г. несколько больше, чем в 1981 г.

Для уточнения положений верхнего и нижнего максимума и относительной доли энергии в них мы представили распределение яркости в радиальном направлении до высот ниже 2000 км суммой двух гауссиан:

$$I(h) = \frac{I_1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(h-h_1)^2}{2\sigma_1^2}\right] + \frac{I_2}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(h-h_2)^2}{2\sigma_2^2}\right], \quad (1)$$

где h_1 , I_1 и σ_1 характеризуют нижний максимум, а h_2 , I_2 и σ_2 — верхний. Насколько хорошо такое представление описывает наблюдаемые распределения, можно судить по рис. 5. Оказалось, что верхний максимум для затмения 1981 г. наблюдается на высоте 1425 км, а для 1972 г. — на высоте 1300 км; высоты нижнего максимума равны 225 и 215 км для 1972 и 1981 гг. соответственно. Отношение энергии верхнего к энергии нижнего максимумов равно 13 и 7 для 1972 и 1981 гг. Расчет энергий производился только по параметрам гауссиан.

СВЕЧЕНИЕ ХРОМОСФЕРЫ В ЛИНИИ D_3 В ОБЛАСТИ ТЕМПЕРАТУРНОГО МИНИМУМА

Механизм свечения гелия в верхнем максимуме анализируется в ряде работ [8, 11, 17, 18, 23 и др.], в которых показано, что основная роль в процессах возбуждения атомов гелия принадлежит коротковолновому излучению короны. В работах [15, 20] учитывается также вклад высокотемпературной ионизации в переходном слое между хромосферой и короной. В работе [15] принимается в расчет и амбиполярная диффузия ионов гелия из короны. Последние механизмы существенны для высот более 1800 км

Наличие гелиевой эмиссии в области температурного минимума представлялось проблематичным, и в цитируемых работах в расчет не принималось. Эту эмиссию объясняли или наложением по лучу зрения структур,

достаточно удаленных от лимба или ошибками наблюдений. Наши исследования свидетельствуют о реальности близфотосферного свечения и заставляют искать физические механизмы, объясняющие природу этого явления.

Поиски причин такого свечения привели нас к заключению, что ионизация гелия на таких высотах осуществляется рентгеновской ($\lambda < 6$ нм) радиацией из короны, проникающей в область температурного минимума.

Оценим глубины проникновения коротковолнового излучения короны с $\lambda < 50.4$ нм в хромосферу Солнца. Для этого мы использовали значения коэффициентов атомного поглощения излучения α , приведенные в [3]. Для водорода

$$\alpha_{\text{H}} (\text{см}^2) = 7.9 \cdot 10^{-18} (\lambda/\lambda_1)^3, \quad (2)$$

где $\lambda_1 = 91.2$ нм. Для атомов гелия за границей его серии Лаймана имеем

$$\alpha_{\text{He}} (\text{см}^2) = 7.6 \cdot 10^{-18} (\lambda/\lambda_2)^2, \quad (3)$$

где $\lambda_2 = 50.4$ нм. Суммарный коэффициент атомного поглощения атмосферы с учетом того, что атомов гелия в десять раз меньше, чем атомов водорода, равен

$$\alpha_{\Sigma} = 0.91\alpha_{\text{H}} + 0.09\alpha_{\text{He}}. \quad (4)$$

Оптическая глубина, на которую проникнет фотон при движении вдоль радиуса, равна

$$\tau = \alpha_{\Sigma} N(h),$$

где $N(h)$ — полное число атомов над фиксированным уровнем h в атмосфере [3].

Результаты расчетов приведены в таблице. Длины волн коронального излучения были выбраны из следующих соображений. Квант с $\lambda = 50.4$ нм однократно ионизирует атом гелия; излучение $\lambda = 30.4$ нм (линия Лайман-альфа He II) является самым интенсивным в области длин волн короче 50 нм, оно активно участвует в ионизации гелия; фотон с $\lambda = 22.8$ нм соответствует пределу серии Лаймана He II; в окрестности $\lambda = 9.1$ нм располагается область минимума коронального излучения, а вблизи 1.5 нм — область максимума рентгеновского излучения короны, где проявляется тепловое излучение корональных конденсаций и излучение в линиях Fe XVII и O VIII.

Анализируя представленные в таблице результаты, можно сделать вывод, что для излучения с $\lambda = 50.4$ нм основным поглотителем фотонов является водород. Он поглощает в три раза больше фотонов, чем гелий. Для длин волн $\lambda = 30.4$ и 22.8 нм водород и гелий выступают равноправными поглотителями. Для $\lambda < 10$ нм гелий поглощает большую часть излучения, а на $\lambda = 1.5$ нм гелий поглощает в 20 раз эффективнее, чем водород.

Коэффициенты атомного поглощения и высоты, до которых может проникнуть корональное излучение с разными длинами волн

λ , нм	$\alpha_{\text{H}} \cdot 10^{-21} \text{ см}^2$	$\alpha_{\text{He}} \cdot 10^{-21} \text{ см}^2$	$\alpha_{\Sigma} \cdot 10^{-21} \text{ см}^2$	h , км	$h(0.3)$, км	$h(0.1)$, км
50.4	2420	7600	2880	2180	1680	1300
30.4	292	2760	514	1440	1200	1020
22.8	123	1550	252	1270	1090	930
9.1	7.90	247	29.4	950	810	640
3.0	0.282	26.9	2.68	650	520	350
1.5	0.035	6.73	0.638	470	330	240

В пятой графе таблицы представлены высоты h , до которых доходит около 40 % излучения короны для однородной модели хромосферы. На этой высоте оптическая толщина для коронального излучения $\tau = \alpha_{\lambda} N(h) = 1$. Значения h отсчитываются от основания хромосферы.

Следует заметить, что основная масса энергичных фотонов сосредоточена в области λ от 40 до 20 нм [6]. Эти фотоны формируют верхний максимум излучения в линии D_3 . Рентгеновское излучение на этих высотах практически не поглощается.

Известно, что хромосфера весьма неоднородна. Размер неоднородностей меняется в широких пределах — от размера супергранул до тонких трубок диаметром около 40 км. Наличие мелкомасштабных неоднородностей следует, в частности, и из измерений соотношения интенсивностей компонентов триплета инфракрасной линии гелия λ 1083 нм [9]. Глубина линии мала — около 2 % от интенсивности континуума. Для малой оптической толщины поглощающего слоя сумма интенсивностей двух более длинноволновых компонентов триплета, имеющих почти одну и ту же длину волны, в восемь раз больше интенсивности третьего.

В работе [9] приведены результаты многочисленных измерений отношений центральных глубин сильного и слабого компонентов для спокойных и возмущенных областей на разных расстояниях от центра диска. Показано, что по отношению центральных глубин компонентов оптическая толщина сильного компонента изменяется от 0.7 до 2.5, что свидетельствует о значительном самопоглощении в линии, соответствующем большой оптической толщине. Противоречие можно устранить, если предположить, что излучение формируется в плотных образованиях, покрывающих малую часть видимой площади хромосферы.

С учетом этого обстоятельства мы рассчитали глубины проникновения коронального излучения при различных значениях фактора заполнения видимой площади излучающими элементами. В двух последних графах таблицы приведены результаты вычисления глубины проникновения излучения для фактора заполнения 0.3 и 0.1, которые показывают, что в неоднородной хромосфере с такими факторами заполнения площади излучающими элементами, рентгеновское излучение проникает в область температурного минимума.

В областях, где число частиц над фиксированным уровнем увеличивается, нижний максимум сдвигается вверх, например, под протуберанцами на карте излучения хромосферы в 1981 г.

В работе [9] предлагается двухкомпонентная модель хромосферы, неоднородная в горизонтальном направлении. Хромосфера со значительной скважностью заполнена тонкими замагниченными, преимущественно вертикальными, трубками с повышенной концентрацией плазмы. На больших высотах эти структуры окружены облаком проникающих из трубки атомов, имеющих высокий потенциал ионизации, что приводит к увеличению площади излучающих элементов. По нашему мнению, к дополнительному увеличению фактора заполнения в активных областях могут приводить и преимущественно горизонтальные структуры магнитного поля в них.

Необходимо заметить, что данные [9] относятся к высотам 1000—1600 км, где сосредоточено основное излучение в линии, и где практически не поглощается рентгеновское излучение. На более низких высотах коэффициент заполнения может быть и меньше. Увеличение фактора заполнения с высотой приводит к увеличению высоты формирования верхнего максимума гелиевой эмиссии.

Как указывалось выше, расчет высот проведен для излучения, падающего вертикально на слой хромосферы. Учет наклонных пучков показывает,

что 75 % энергии, упавшей на единичную горизонтальную площадку, заключено в конусе с углом раствора 120° . Эта энергия поглощается в пределах шкалы высот около 100 км для нижнего максимума и около 200 км для верхнего. Если структуры хромосферы преимущественно вертикальные, начинающиеся у основания хромосферы, то в нижние слои будет приходить излучение из конуса с меньшим углом раствора (эффект затенения), подобно тому, что имеет место в задаче рассеяния света шероховатыми поверхностями безатмосферных тел Солнечной системы.

Для спокойного Солнца [7] энергия излучения для волн короче 6 нм составляет около 5 % от количества энергии за пределом серии Лаймана для гелия. В годы максимума средняя энергия коротковолнового излучения увеличивается: для $\lambda < 40$ нм — в 1.5–2 раза, $\lambda < 6$ нм — в пять раз, а для $\lambda < 2$ нм — в 15 раз. Для активных областей с высокотемпературными корональными конденсациями последняя величина может изменяться в десятки раз. Это объясняет, тот факт, что нижний максимум гелиевого излучения проявляется преимущественно в активных областях и свидетельствует об интенсивном излучении короны в рентгеновской области спектра.

Следует заметить, что электроны, оторванные от атома рентгеновским излучением, имеют большую скорость. Они испытывают торможение в потенциальном поле атомов и становятся источником рентгеновского тормозного излучения, которое целиком поглощается в нижней хромосфере.

Согласно [3] в распределении энергии с учетом теплового излучения короны и спектральных линий в области длин волн $\lambda = 6$ –17 нм наблюдается провал. Это приводит к некоторому ослаблению излучения гелиевой хромосферы между верхним и нижним максимумом. Механизм формирования нижнего максимума сходен с механизмом формирования слоя *D* в ионосфере Земли.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Карты поверхностной яркости хромосферы в линии D_3 He, построенные для всего наблюдаемого лимба по материалам полных солнечных затмений 1972 и 1981 гг., показали высокую степень неоднородности хромосферы как в горизонтальном так и в вертикальном направлении. Выявлены следующие особенности структурных и энергетических характеристик гелиевой хромосферы:

- размер структур вдоль лимба соответствует размеру супергранул; эти образования, концентрируясь вблизи высот 1300–1500 км, простираются до 3–4 тыс. км по высоте и наблюдаются вблизи фотосферы;
- интенсивность излучения в активных областях в 2–3 раза больше, чем в спокойных;
- интегральная яркость невозмущенной хромосферы в 1981 г. в два раза превышает яркость спокойной хромосферы 1972 г., что, по-видимому, связано с общим усилением фонового коротковолнового излучения короны в годы максимума солнечной активности;
- гелиевое излучение, проинтегрированное по всем высотам в зависимости от гелиографической широты, хорошо коррелирует с интенсивностью зеленой линии короны; корреляция уменьшается для интегралов с высот более 1500 км и переходит в антикорреляцию для излучения, проинтегрированного с высот более 3000 км;
- хромосфера в активных областях прижата к фотосфере, что особенно заметно по материалам затмения 1981 г., когда активные области располагались на лимбе;
- в распределении с высотой поверхностной яркости хромосферы, проин-

тегрированной по всем широтам, имеется два максимума на высотах 1400—1500 км и 200—300 км;

- энергия излучения хромосферы в районе нижнего максимума составляет 5 % для 1972 г. и 10 % для 1981 г. от всей энергии в линии.

Проведенные нами оценки показали, что рентгеновское излучение короны с $\lambda < 6$ нм проникает в нижние слои хромосферы, чему способствует весьма неоднородный характер строения хромосферы, возможность прохождения энергичных квантов между сгустками хромосферной плазмы. Наблюдательные данные подтверждают наше предположение об определяющей роли коронального излучения в появлении нижнего максимума в высотном распределении гелиевой эмиссии. Так, нижний максимум гелиевого излучения проявляется преимущественно в активных областях, его величина, как и интенсивность излучения короны в рентгеновской области спектра, существенно варьирует в зависимости от фазы цикла солнечной активности. По-видимому, нижнего максимума не будет в корональных дырах.

Некоторое ослабление гелиевого излучения между верхним и нижним максимумами связано с дефицитом ионизирующего коронального излучения в области длин волн $\lambda\lambda = 6—17$ нм.

Таким образом, нижний максимум в высотном распределении гелиевого излучения может служить индикатором рентгеновского излучения короны.

В заключение отметим, что предложенный нами механизм образования нижнего максимума гелиевого излучения нуждается в дальнейшей теоретической разработке.

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., Дятел Н. П. Особенности свечения гелия в линии D_3 в нижней и средней хромосфере // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1998.—94.—С. 154—160.
3. Аллен К. У. Астрофизические величины. — М.: Мир, 1977.—446 с.
4. Белецкий С. А. Результаты исследований солнечной хромосферы в линиях гелия D_3 и 1083 нм: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. — Харьков, 2000.—157 с.—Машинопись.
5. Белкина И. Л., Дятел Н. П. Исследование хромосферы в линии D_3 гелия во время затмения 22 сентября 1968 г. // Астрон. журн.—1972.—49, № 3.—С. 588—594.
6. Брюнелли Б. Е., Намагаладзе А. А. Физика ионосферы. — М.: Наука, 1988.—528 с.
7. Иванов-Холодный Г. С., Никольский Г. М. Солнце и ионосфера. — М.: Наука, 1969.—455 с.
8. Никольская К. И. Возбуждение линий гелия в хромосферных спикулах // Астрон. журн.—1966.—43, № 5.—С. 936—941.
9. Сомов Б. В., Козлова Л. М. О тонкой структуре солнечной хромосферы по наблюдениям ИК-линии He I // Астрон. журн.—1998.—75, № 6.—С. 926—934.
10. Шилова Н. С. Спектрофотометрия солнечной хромосферы по наблюдениям во время полного солнечного затмения 10 июля 1972 г. // Солнеч. данные.—1973.—2.—С. 92—98.
11. Шкловский И. С. Ионизация хромосферы и протуберанцев и проблема распределения плотности в хромосфере // Тр. ГАИШ.—1951.—20.—С. 5—25.
12. Akimov L. A., Beletsky S. A., Dyatel N. P. The Chromospheric D_3 Helium Emission During the Total Solar Eclipse of July 31, 1981 // Astron. and Astrophys. Transactions.—1999.—18, N 2.—P. 253—259.
13. Athay R. G., Menzel D. H. A Model of the Chromosphere from the Helium and Continuum Emission // Astrophys. J.—1956.—123, N 2.—P. 285—298.
14. Avret E. H., Koutchmy S. New Observations and Analyses of the Helium D_3 Shell Above the Limb // Bull. Amer. Astron. Soc.—1989.—24.—P. 828—832.
15. Fontenla J. M., Avret E. N. and Loeser R. Energy Balance in the Solar Transition Region. III. Helium Emission in Hydrostatic, Constant-abundance models with Diffusion // Astrophys. J.—1993.—406 N 1.—P. 319—345.
16. Gulyaev R. A. The Intensity Distribution of the D_3 Helium Line Near the Solar Limb // Solar Phys.—1971.—18, N 3.—P. 410—416.

17. *Gulyaev R. A.* On the Temperature of the Helium Emission Regions in the Solar Atmosphere // *Solar Phys.*—1972.—**24**, N 1.—P. 72—78.
18. *Livshits M. A., Akimov L. A., Belkina I. L., Dyatel N. P.* Helium Emission in the Middle Chromosphere // *Solar Phys.*—1976.—**49**, N 3.—P. 315—327.
19. *Marsh K. A.* D3 Spicules and the Slower Chromosphere // *Solar Phys.*—1978.—**57**, N 1.—P. 37—48.
20. *Milkey R. W., Heasley J. H., Beebe H. A.* Helium Exutation in the Solar Chromosphere: He I in a Homogeneous Chromosphere // *Astrophys. J.*—1973.—**186**, N 3.—P. 1043—1051.
21. *Pope T., and Shalman S. A.* Height of Helium Emission in the Chromosphere // *Solar Phys.*—1975.—**42**, N 1.—P. 47—51.
22. *White O. R.* A He (D3) Emission Shell in the Solar Chromosphere // *Astrophys. J.*—1963.—**138**, N 4.—P. 1316—1317.
23. *Zirin H.* The Helium Chromosphere, Coronal Holes, and Stellar X-rays // *Astrophys. J.*—1975.—**199**, N 1.—P. 63—66.

Поступила в редакцию 21.12.01