

УДК 523.945

Распределение ионизованного стронция и скорость нетепловых движений в нижней хромосфере по затменным наблюдениям резонансного дублета Sr II

И. Л. Белкина, Р. А. Гуляев, Н. П. Дятел, Г. П. Марченко

Представлены результаты измерений интенсивности линий резонансного дублета Sr II в нижней хромосфере по бесщелевым спектрограммам, полученным во время полного солнечного затмения 31 июля 1981 г. В распределении поверхностной яркости линий дублета Sr II с высотой имеется плато на высотах около 1000 км. С учетом самопоглощения получено распределение количества ионов Sr II по лучу зрения с высотой в активной и спокойной хромосфере. Показано, что средняя скорость нетепловых движений на высотах 900—1200 км в невозмущенной хромосфере составляет 5—6 км/с. Этот результат не подтверждает большое значение нетепловой скорости ионов Sr II, полученное в [6]. Отмечена тенденция к некоторому уменьшению скорости нетепловых движений в активных областях по сравнению с невозмущенной хромосферой.

DISTRIBUTION OF IONIZED STRONTIUM AND NON-THERMAL MOTION VELOCITY IN THE LOWER CHROMOSPHERE FROM ECLIPSE OBSERVATIONS OF THE RESONANCE DOUBLET OF Sr II, by Belkina I. L., Gulyaev R. A., Dyatel N. P., Marchenko G. P.—The results of the measurements of the Sr II resonance doublet integrated intensity in the lower chromosphere on the basis of slitless spectrograms obtained during the total solar eclipse on July 31, 1981 are presented. The surface brightness distribution reveals a plateau at the height of ~ 1000 km. The height distributions of Sr II ions along the line of sight was obtained for active as well as for quiet chromosphere accounting for the self-absorption. The mean velocity of non-thermal motions is found to be within the range of 5—6 km/s at heights of 900—1200 km. The result does not confirm the high value of the Sr II ions velocity obtained by Landman [6]. It is also stated that there is tendency of turbulent velocities decreasing in active regions as compared with the quiet chromosphere.

Введение. Настоящая работа посвящена исследованию нижней хромосферы по бесщелевым спектральным наблюдениям солнечного затмения 31 июля 1981 г. в линиях резонансного дублета Sr II λ 407.8 и λ 421.6 нм ($5^2S_{1/2} - 5^2P_{3/2, 1/2}$).

Известно, что атомы тяжелых элементов являются хорошими индикаторами турбулентности в хромосфере Солнца. При температурах, характерных для нижней хромосферы, даже сравнительно небольшие турбулентные скорости (примерно 2 км/с) более чем в два раза превышают тепловую скорость, например, ионов Sr II. В работе [6] на основании изучения распределений интенсивности линий Na I, Sr II и Ba II, полученных в [5] по материалам затмения 1962 г., найдено, что на высоте 1500 км в хромосфере значения нетепловых скоростей по линиям Sr II, Ba II (11 км/с) существенно превышают скорость атомов Na I (5 км/с). Для объяснения подобных различий автор [6] приходит к необходимости введения частично или полностью двухкомпонентных моделей хромосферы с разными условиями свечения нейтральных атомов и ионов. Однако сам факт существования больших различий в нетепловых скоростях нейтральных атомов и ионов необходимо проверить по независимому наблюдательному материалу.

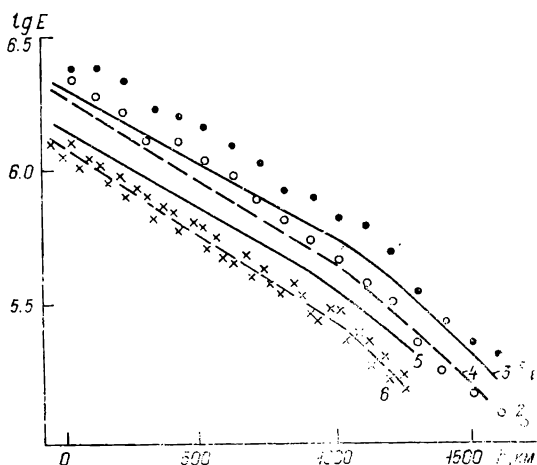
В [1] определены нетепловые скорости в хромосфере по бесщелевым спектральным наблюдениям резонансного дублета Na I. Для Na I получены значения нетепловых скоростей примерно 5 км/с, что хорошо согласуется с результатами [6]. Мы применили такую же методику для определения нетепловых скоростей в областях свечения Sr II.

Наблюдения. Результаты обработки. Бесщелевые спектрограммы хромосферы получены во время полного солнечного затмения 31 июля 1981 г. экспедицией Астрономической обсерватории Харьковского уни-

верситета в пос. Амангельды Казахской ССР. Описание спектрографа приведено в [2]. Участок спектра с линиями $\lambda\lambda$ 407.8 и 421.6 нм фотографировался кинокамерой Конвас-автомат на пленку КН-2 с частотой примерно 11 кадров в секунду, что соответствует пространственному разрешению на Солнце около 30 км в направлении движения Луны. При дисперсии на пленке приблизительно 2 нм/мм обе линии дублета помещались на одном снимке.

Фотометрические измерения серпов выполнены на микрофотометре МФ-4 при высоте измерительной щели, соответствующей примерно 3000 км на Солнце. Обработано 95 кадров в трех точках на западном лимбе Солнца вблизи III контакта затмения. Разрезы проводились через центры четок Бейли. Гелиоцентрические широты измеренных точек: 1) $+4.7^\circ$; 2) -6.5° ; 3) -12.0° .

Рис. 1. Распределение с высотой интегральной интенсивности линий резонансного дублета Sr II: 1 — данные из [5], линия λ 407.8 нм; 2 — данные из [5], линия λ 421.6 нм; 3 — линия λ 407.8 нм, активная четка 2; 4 — линия λ 421.6 нм, четка 2; 5 — линия λ 407.8 нм, невозмущенная четка 1; 6 — линия λ 421.6 нм, невозмущенная четка 1



Анализ активности западного лимба Солнца дан в [2]. Отметим, что высокая активность западного лимба позволила провести измерения невозмущенной хромосферы только в четке 1. Другие четки, относящиеся к невозмущенной хромосфере, расположены так, что в них направление дисперсии и направление движения Луны составляют значительный угол, поэтому измерения в них не проводились. Четки 2 и 3 относятся к весьма активным участкам западного лимба.

В результате обработки получены значения интегральной интенсивности хромосферы в линиях λ 407.8 и λ 421.6 нм: $E(h) = \int_h^\infty I(x) dx$, где I — поверхностная яркость хромосферы в соответствующих линиях; h — расстояние от лимба Солнца до края лунного диска. Величины $E(h)$ получены в абсолютных единицах ($\text{Вт} \cdot \text{см}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$). Абсолютная привязка проведена относительно центра диска Солнца с учетом изменения прозрачности земной атмосферы и введением других необходимых редуций. Нуль-пункт шкалы высот, как обычно, определялся по измерениям непрерывного спектра четок как точка перегиба кривой поверхностной яркости фотосферного излучения.

На рис. 1 показано распределение с высотой интегральной интенсивности линий резонансного дублета Sr II для двух четок. Косые крестики, соответствующие измеренным значениям, нанесены только для одной четки, чтобы не загромождать рисунок и дать представление о разбросе измеренных значений. Из рис. 1 следует: 1) существенное расхождение абсолютных значений $E(h)$ наших измерений по сравнению с данными [5], что частично может быть связано с точностью абсолютной привязки; 2) относительный ход интегральной интенсивности с высотой показывает характерный излом на высотах примерно 1000 км. Подобный излом наблюдается и в распределении интенсивности линий дублета Na I [1, 3]; 3) интенсивности линий Sr II в активных четках выше, чем в невозмущенной четке; 4) отношение полных интенсивностей

$E_{407.8}/E_{421.6}$ линий дублета Sr II в активных четках меньше, чем в невозмущенной.

Путем графического дифференцирования сглаженных интегральных кривых $E(h)$ получено распределение с высотой поверхностной яркости хромосферы в линиях дублета Sr II. Оказалось, что в распределении поверхностной яркости хромосферы в линиях дублета Sr II во всех исследуемых четках имеется плато на высоте приблизительно 1000 км. В [1, 3] отмечена подобная особенность в распределении поверхностной яркости в линиях D_1, D_2 Na I. По-видимому, эта особенность отражает реальные структурные закономерности нижней хромосферы [4].

Для дальнейших исследований существенно отношение интенсивностей $I_{407.8}/I_{421.6}$ линий дублета Sr II. С помощью данных [5] мы получили: в нижней хромосфере это отношение монотонно увеличивается от 1.1 вблизи $h=0$ до 1.45 вблизи $h=1500$ км. Измерения по нашим наблюдениям дают для невозмущенной четки значения, достаточно близкие к значениям из [5]. В активных четках это отношение существенно меньше до $h=1200$ км, а затем резко увеличивается. В таблице приведено высотное распределение $I_{407.8}$ и $I_{407.8}/I_{421.6}$ для невозмущенной и активной областей.

Расчет кривых роста. При отсутствии самопоглощения по распределению поверхностной яркости хромосферы с высотой можно получить высотное распределение концентрации Sr II на нижнем уровне, которое близко к общему числу ионов Sr II. Однако поскольку для нижней хромосферы самопоглощением пренебрегать нельзя, воспользуемся методикой кривых роста.

Распределение поверхностной яркости линии λ 407,8 нм и отношения интенсивностей линий дублета Sr II для невозмущенной и активной областей

Высота h , км	Область				Высота h , км	Область			
	Невозмущенная		Активная			Невозмущенная		Активная	
	$I_{407.8} \cdot 10^{-2} \text{ Вт} \times \times \text{см}^{-2} \times \times \text{ср}^{-2}$	$I_{407.8}/I_{421.6}$	$I_{407.8} \cdot 10^{-2} \text{ Вт} \times \times \text{см}^{-2} \times \times \text{ср}^{-1}$	$I_{407.8}/I_{421.6}$		$I_{407.8} \cdot 10^{-2} \text{ Вт} \times \times \text{см}^{-2} \times \times \text{ср}^{-1}$	$I_{407.8}/I_{421.6}$	$I_{407.8} \cdot 10^{-2} \text{ Вт} \times \times \text{см}^{-2} \times \times \text{ср}^{-1}$	$I_{407.8}/I_{421.6}$
100	1.679	1.053	2.046	0.979	900	0.614	1.232	0.748	1.110
200	1.503	1.109	1.811	1.004	1000	0.587	1.249	0.692	1.130
300	1.318	1.146	1.596	1.026	1100	0.574	1.265	0.658	1.158
400	1.130	1.175	1.393	1.045	1200	0.511	1.295	0.628	1.195
500	0.979	1.190	1.222	1.062	1300	—	—	0.564	1.242
600	0.849	1.205	1.076	1.076	1400	—	—	0.485	1.292
700	0.748	1.214	0.944	1.087	1500	—	—	0.405	1.351
800	0.673	1.220	0.830	1.097	1600	—	—	0.328	1.413

Если функция источника S не зависит от частоты внутри линий, то наблюдаемая поверхностная яркость связана с числом атомов N_i в нижнем (i -м) состоянии в столбе единичного сечения по лучу зрения следующей формулой:

$$I(h) = S \int_0^{\infty} \{1 - \exp[-k_\nu N_i(h)]\} dv, \quad (1)$$

где k_ν — коэффициент поглощения, рассчитанный на один атом. Примем далее, что коэффициент поглощения k_ν — чисто доплеровский. Тогда

$$k_\nu = \frac{\sqrt{\pi}}{m_e} \frac{e^2}{c} \frac{f_{ik}}{\Delta\nu_D} \exp\left[-\left(\frac{\nu - \nu_0}{\Delta\nu_D}\right)^2\right]. \quad (2)$$

В (2) все обозначения общеприняты; Δv_D связана с температурой T и скоростью нетепловых движений v_t такой формулой:

$$\Delta v_D = (v_0/c) \sqrt{v_t^2 + 2kT/m}. \quad (3)$$

Функция источника определяется отношением концентраций атомов в верхнем и нижнем состояниях n_k и n_i и статистическими весами уровней g_k и g_i :

$$S = \frac{2hv^3}{c^2} \frac{g_i}{g_k} \frac{n_k}{n_i}. \quad (4)$$

Известно, что возбуждение линий Sr II в условиях невозмущенной хромосферы определяется излучением фотосферы. При рассеянии фотосферного излучения, содержащего фраунгоферовы линии, и при максвелловском распределении скоростей рассеивающих атомов имеем

$$\frac{n_k}{n_i} = \frac{B_{ik}}{A_{ki}} \frac{dI_0}{\sqrt{\pi}\Delta\lambda_D} \int_0^\infty r_\lambda \exp\left[-\left(\frac{\lambda-\lambda_0}{\Delta\lambda_D}\right)^2\right] d\lambda, \quad (5)$$

где A_{ki} и B_{ik} — эйнштейновские коэффициенты радиационных переходов; d — фактор дилуции излучения; I_0 — средняя по диску интенсивность непрерывного излучения фотосферы в частоте линии; r_λ — остаточные интенсивности фраунгоферовой линии поглощения; $\Delta\lambda_D$ — доплеровская полуширина линии, определяемая скоростью нетепловых движений и температурой аналогично (3).

С помощью формул (1)–(5) можно рассчитать интенсивности линий λ 407.8 и λ 421.6 нм при разных значениях T и v_t . При расчете функции источника по формулам (4) и (5) необходимо знать профили линий поглощения λ 407.8 и λ 421.6 нм. Мы использовали данные из [7]. Отметим, что поскольку коротковолновое крыло линии 421.6 нм блендировано линией железа, контур фраунгоферовой линии поглощения несимметричен. Входящий в формулу (5) фактор дилуции излучения принят, как и в [1], равным 1/2. Кривые роста (зависимость $I(N_i)$) рассчитаны для ряда значений нетепловой скорости от 2 до 16 км/с при N_i , изменяющемся от 10^9 до 10^{16} см $^{-2}$, и значений $T=5000$ К (для невозмущенной области), $T=6500$ и $T=8000$ К (для активных областей). Расчеты проводились численно на ЭВМ «Наури К».

На рис. 2, а представлены кривые роста для линий λ 407.8 нм при $T=5000$ К и v_t , равном 4, 8, 12 км/с. Используя вычисленные значения интенсивности линии λ 421.6 нм, можно построить теоретический ход отношения интенсивностей $I_{407.8}/I_{421.6}$ хромосферных линий дублета Sr II в зависимости от числа атомов в столбе сечением 1 см 2 вдоль луча зрения при разных T и v_t . Кривые отношения интенсивностей для линии дублета Sr II при тех же T и v_t представлены на рис. 2, б.

Видно, что при $N_i > 10^{14}$ см $^{-2}$ должна происходить инверсия интенсивностей линий дублета Sr II: линия λ 407.8 нм становится слабее линии λ 421.6 нм. При $N_i < 10^{11}$ см $^{-2}$ отношение интенсивностей линий $I_{407.8}/I_{421.6}$ приближается к 1.75. Пересечение расчетных кривых отношения интенсивностей линий дублета Sr II при разных v_t обусловлено несимметричностью фотосферной линии поглощения λ 421.6 нм. Из таблицы видно, что в интервале высот 100–1200 км наблюдаемые значения $I_{407.8}/I_{421.6}$ находятся в пределах 1.05–1.29, т. е. попадают на прямолинейную часть кривых (рис. 2, б).

Определение средней скорости нетепловых движений. Чтобы найти распределение N_i с высотой, мы использовали полученные из наблюдений значения поверхностной яркости линии λ 407.8 нм, а также наблюдаемый высотный ход отношения интенсивностей линии $I_{407.8}/I_{421.6}$ (таблица).

С помощью семейства кривых роста для линии λ 407.8 нм можно построить по наблюдаемым значениям $\lg I(h)$ семейство кривых $\lg N_i(h)$ при разных v_t . Величины $\lg N_i(h)$ можно также определить из семейства кривых на рис. 2, б по наблюдаемому отношению интенсивностей линий дублета Sr II. Очевидно, что при правильном выборе v_t оба способа определения N_i должны давать близкие результаты.

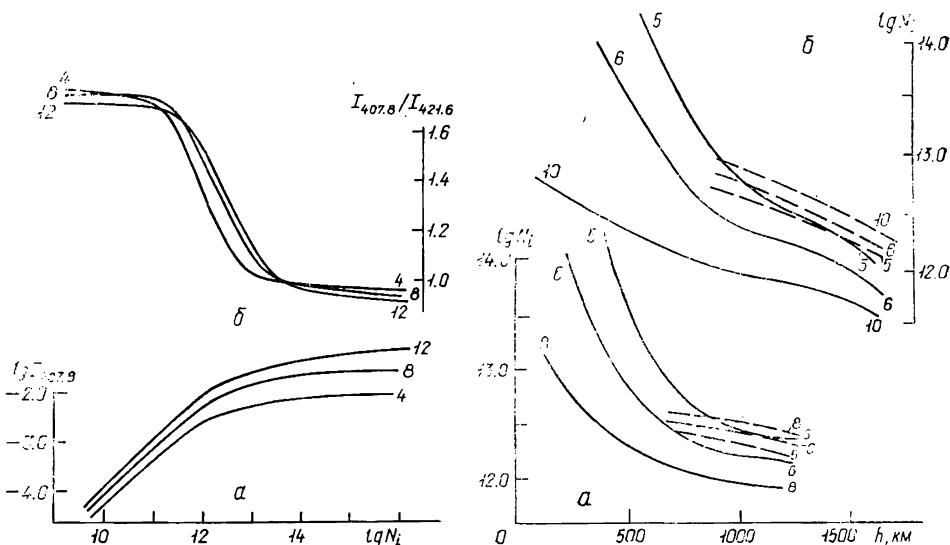


Рис. 2. Кривые роста для хромосферной линии Sr II λ 407.8 нм (а) и теоретическое отношение интенсивностей хромосферных линий резонансного дублета Sr II (б) в зависимости от числа ионов Sr II в столбе сечением 1 см^2 вдоль луча зрения. Расчеты выполнены для $T=5000 \text{ К}$ при разных скоростях нетепловых движений. Цифры возле кривых — принятые значения скорости, км/с

Рис. 3. Распределение с высотой в хромосфере количества ионов Sr II в столбе сечением 1 см^2 вдоль луча зрения. Сплошные линии получены по кривым роста для линии λ 407.8 нм, штриховые — по отношению интенсивностей линий дублета Sr II λ 407.8 и λ 421.6 нм. Цифры возле кривых — принятые значения скорости нетепловых движений, км/с; а — невозмущенная хромосфера; б — активная область

При этом необходимо отметить следующее. Расчеты выполнены при условии постоянства функции источника с высотой. Это условие, очевидно, не может выполняться вследствие изменения с высотой скорости нетепловых движений. В частности, в основании хромосферы на луче зрения существует вклад внешних слоев хромосферы, в которых скорости нетепловых движений могут быть выше. Поэтому полного совпадения кривых $\lg N_i(h)$, полученных двумя способами, ожидать не следует.

На рис. 3, а показаны распределения $\lg N_i(h)$ с высотой количества ионов Sr II в невозмущенной области, полученные двумя способами. Наилучшее совпадение результатов получается в интервале высот 900—1200 км при $6 \text{ км/с} > v_t > 5 \text{ км/с}$. Наиболее вероятная скорость на этих высотах $v_t \approx 5.5 \text{ км/с}$. При больших и меньших скоростях кривые, полученные разными способами, сильно расходятся. Таким образом, приходим к выводу, что реальная кривая распределения ионов Sr II в невозмущенной нижней хромосфере $\lg N_i(h)$ должна проходить между кривыми, соответствующими $v_t=6$ и $v_t=5 \text{ км/с}$.

Для интерпретации хода интенсивностей линий дублета Sr II в активных областях мы усреднили результаты по двум активным четкам и воспользовались кривыми роста, рассчитанными для $T=6500$ и $T=8000 \text{ К}$ при разных v_t . Результаты, представленные на рис. 3, б, показывают, что наилучшее совпадение кривых $\lg N_i(h)$, найденных разными способами, в интервале высот 1200—1500 км получилось при

$v_t = 5$ км/с. На меньших высотах кривые сильно расходятся, что, конечно, связано с необоснованностью исходного предположения о постоянстве функции источника с высотой для активных областей.

Заключение. Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы:

1. В распределении концентрации ионов Sr II по высоте в активных и невозмущенных областях имеется плато на высотах примерно 1000 км. Это связано, по [1, 4], с реальными особенностями строения хромосферы — преобладанием на этих высотах горизонтальных структур.

2. По спектрограммам, полученным во время солнечного затмения 31 июля 1981 г., средняя скорость нетепловых движений ионов Sr II в невозмущенной области на высотах 900—1200 км составляет примерно 5.5 км/с. Отметим, что близкое значение скорости $v_t \approx 6$ км/с мы получили также, обработав по нашей методике наблюдения [5], относящиеся к дублету Sr II. Эта скорость существенно отличается от значения, полученного в [6] по этим же наблюдательным данным ($v_t = 11$ км/с). Однако следует отметить, что неучтенная бленда коротковолнового крыла линии Sr II λ 421.6 нм существенно искажает значения v_t . Наши исследования показывают, что если при расчете кривых отношения интенсивностей линий дублета Sr II использовать симметричный контур линии λ 421.6 нм, построенный по длинноволновому неблендированному крылу, то значения v_t получаются существенно большими. В частности, из данных [5] получаем в этом случае $v_t = 10$ км/с, очень близкое к значению из [6]. Таким образом, полученная нами нетепловая скорость ионов Sr II в нижней хромосфере незначительно превышает полученные в [1, 6] скорости атомов Na I и подтверждает концепцию невысоких турбулентных скоростей в нижней хромосфере.

3. Отмечена тенденция к некоторому уменьшению скорости нетепловых движений ионов Sr II в активных областях по сравнению с невозмущенными, что может быть связано с более высокой плотностью вещества в активных областях и влиянием их магнитного поля.

Полученные результаты важны для построения и уточнения хромосферных моделей, поэтому необходимы дальнейшие высокоточные наблюдения как линий Sr II, так и линий других Li-подобных ионов (Na I, Ba II).

1. Айманова Г. К., Гуляев Р. А. Распределение нейтрального натрия и скорость нетепловых движений в нижней хромосфере по затменным наблюдениям резонансного дублета $D_{1,2}$ // Астрон. журн.— 1976.—53, вып. 2.— С. 353—360.
2. Акимов Л. А., Белкина И. Л., Дятел Н. П. Высоты факелов над фотосферой по наблюдению затмения 31 июля 1981 г. // Там же.— 1984.—61, вып. 3.— С. 530—534.
3. Белкина И. Л., Дятел Н. П., Чиркова Р. М. Исследование резонансного дублета $D_{1,2}$ Na I в нижней хромосфере по спектрограммам полного солнечного затмения 10 июля 1972 г. // Солнеч. данные.— 1979.— № 4.— С. 81—90.
4. Гуляев Р. А. Аналогия в структуре хромосферы и короны // Астрон. журн.— 1986.— 63, вып. 5.— С. 1026—1029.
5. Dunn R. B., Evans I. W., Jefferies J. T. et al. The chromospheric spectrum at the 1962 eclipse // Astrophys. J. Suppl. Ser.— 1968.—15, N 3—9.— P. 275—458.
6. Landman D. A. Some spectral plasma diagnostics for prominences and structure in the middle chromosphere // Astrophys. J.— 1983.—269, N 2.— P. 728—742.
7. Minnaert M., Mulders G. F. W., Houtgast J. Photometric atlas of the Solar spectrum.— Amsterdam: Kampert Helm, 1940.—120 p.

Астрон. обсерватория
Харьков. ун-та им. А. М. Горького,
Ин-т зем. магнетизма, ионосферы
и распространения радиоволн АН СССР, Троицк

Поступила в редакцию 23.02.88,
после доработки 05.08.88