ISSN online 3034–4107
ИЗВЕСТИЯ КРЫМСКОЙ АСТРОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ

Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 122, № 3, 14–19 (2026) EDN: RBCGGN

УДК 523.9

Исследование ярких областей в протуберанце 2015-08-21 в шести спектральных линиях на разных расстояниях от лимба Солнца

Ю.А. Купряков[1,2]✉, *К.В. Бычков*[1], *В.А. Малютин*[1], *А.Б. Горшков*[1], *О.М. Белова*[3]

[1] Астрономический институт им. П.К. Штернберга, МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия
[2] Astronomical Institute, Academy of Sciences of the Czech Republic, Ondřejov, Czech Republic
[3] Кафедра экспериментальной астрономии, Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Поступила в редакцию 23 июля 2026 г.

Аннотация. Проведен анализ ярких областей в протуберанце 2015-08-21. Наблюдения проводились в интервале 13:19:10 – 13:22:54 UT. Перед наблюдением протуберанца была зафиксирована вспышка класса M1.4 в активной области NOAA 12403 недалеко от протуберанца, которая продолжалась с 10:00 до 13:30 UT. При обработке мы выбирали области протуберанца с повышенным потоком. Для объяснения наблюдаемых потоков мы приняли модель газа, прозрачного в непрерывном спектре оптического диапазона, но испытывающего возможное самопоглощение в частотах спектральных линий. Был получен результат, в соответствии с которым двухслойная модель протуберанца удовлетворяет наблюдаемым потокам во всех шести исследуемых линиях кальция, водорода и гелия. Концентрация плазмы в двух рассмотренных слоях варьируется от $1.5 \cdot 10^{10}$ до $7.30 \cdot 10^{10}$ см$^{-3}$; толщина слоев – от $5 \cdot 10^3$ до $20 \cdot 10^3$ км; температура – от 12200 до 15100 K; микротурбулентная скорость – от 0.1 до 15 км/с; параметр T_{Ly}, который по смыслу является температурой фотосферного излучения в частотах лаймановской серии водорода, – от 10400 до 10700 K.

Ключевые слова: корона, модель газа, стационарный нагрев

1 Введение

Протуберанцы – это холодные и плотные структуры солнечной короны. В протуберанцах могут реализовываться плотности до 10^{11}см$^{-3}$, причем не обязательно плотность уменьшается с ростом высоты над фотосферой. В случае уменьшения плотности и увеличения температуры режим излучающей плазмы меняется с оптически толстого на оптически тонкий. Оптически плотная плазма означает, что она частично или полностью поглощает собственный и падающий свет. По этой причине волокна на диске кажутся темнее, чем окружающая их среда. Диагностика оптически плотной плазмы подробно описана в работах Heinzel (2015) и Labrosse (2015). Напротив, когда плазма оптически тонкая, она прозрачна для собственного или падающего излучения, что означает, что все излучение, проходящее через структуру, выходит из нее и в конечном итоге достигает наблюдателя. Таким образом, для наблюдаемой структуры общее количество фотонов спектральной линии и ее профиль, измеренный наблюдателем, обусловлены суммой вкладов в эту линию от плазмы вдоль луча зрения. В этом случае структура выглядит такой же яркой, как окружающая среда, или ярче. В протуберанцах различные факторы могут нарушать условие равновесия ионизации. Наблюдавшиеся мелкомасштабные потоки и регистрируемые временные изменения могут быть причиной локальных изменений плотности и температуры. Эти изменения имеют временной масштаб порядка нескольких минут и приводят к изменению баланса ионизации и рекомбинации атомов и ионов вещества. Например, Engvold (1980) уже заметил, что при плотностях, обнаруженных в протуберанцах, эмиссия водорода может образовываться в неравновесных условиях. Некоторые исследователи предполагают, что протуберанцы имеют состав ближе к составу фотосферы, чем короны (например, Parenti, Vial, 2007). Это важный фактор для понимания формирования протуберанцев, который определяет источник происхождения их плазмы: из коронального или фотосферного газа.

✉*Адрес для корреспонденции:* kupry@sai.msu.ru

© Автор(ы), 2026.
Статья открытого доступа. Авторское право и право на публикацию текстов, представленных в журнале "Известия Крымской астрофизической обсерватории", сохраняются за авторами, при этом право первой публикации предоставляется журналу. Тексты могут свободно использоваться при условии правильного цитирования в соответствии с лицензией Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

2 Наблюдения

Наблюдения спокойного протуберанца 2015-08-21 (рис. 1), расположенного на восточном лимбе недалеко от NOAA 12403, проводились на горизонтальной солнечной установке (HSFA) обсерватории Ondřejov Астрономического института Чешской академии наук. В установке используется целостат (Jensh type Carl Zeiss)

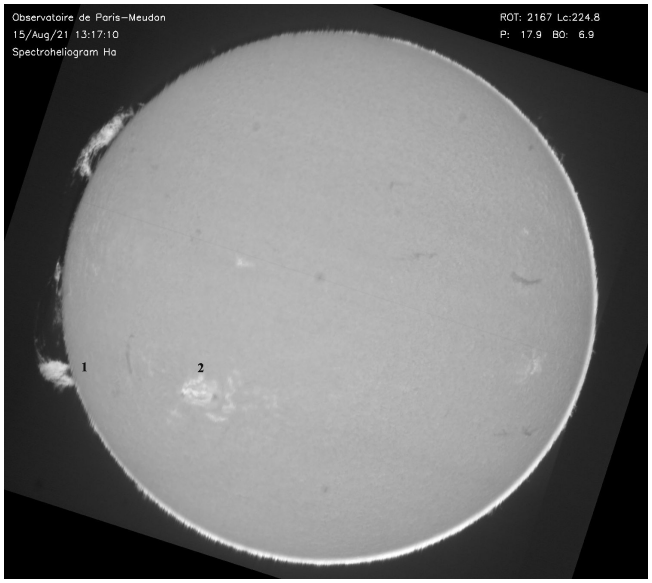


Рис. 1. Гелиограмма в линии Hα (обсерватория Meudon, Париж). Цифрами отмечены: 1 – положение исследуемого протуберанца, 2 – область вспышки

с двумя зеркалами диаметром 600 мм и первичное зеркало диаметром 500 мм с фокусным расстоянием 35 м для построения изображения Солнца на щели спектрографа. Спектрограф оснащен дифракционной решеткой (Richardson, Spectra-Physics) с разрешением 1200 штрихов/мм. Приемниками излучения являлись шесть ПЗС-камер (VDS Vosskuehler-1300LN + Grabber Matrix Vision), изображение на которых строилось с помощью зеркальных телескопов с диаметром главного зеркала 200 мм и фокусным расстоянием 2500 мм. Одна из камер, установленных перед щелью спектрографа, фиксировала изображение хромосферы на щели спектрографа в линии Hα (кадр slit-jaw или SJ). Поперек щели были закреплены две реперные нити, их назначение – привязка участков вдоль щели на спектрах, снятых разными камерами.

При наблюдениях протуберанца 2015-08-21 были получены наборы спектров объекта в линиях CaII H, Hϵ, Hβ, HeI D3, Hα и CaII IR (8542 Å) последовательно для четырех положений щели спектрографа, соответствующих следующим моментам времени UT: 13:19:10, 13:20:15, 13:21:25 и 13:22:54 (см. рис. 2). Кроме того, были получены кадры темнового тока и плоского поля, а в 10:44:32 набор спектров был получен для центра диска Солнца. При этом положение щели плавно перемещалось по Солнцу в течение экспозиции с целью усреднения (т. н. спектр центра диска, служит для последующей калибровки наблюдений). Длительность экспозиций при наблюдениях протуберанца составила от 300 мс для HeI D3 до 3500 мс для CaII IR, при наблюдениях центра диска – от 15 до 140 мс соответственно. Расстояние между реперными нитями соответствует 53800 км на Солнце.

Первичная обработка спектров заключалась в учете темнового тока и плоского поля и проводилась при помощи программ, предоставленных обсерваторией Ondřejov. Для каждого из четырех положений щели выбраны участки вдоль нее, в которых путем усреднения получены спектры изучаемого объекта (отмечены цифрами 1–4) и спектры фона (Q1–Q4). Цифры 1, 2, 3, 4 соответствуют моментам наблюдения UT 13:19:10, 13:20:15, 13:21:25 и 13:22:54. Важно отметить, что спектр фона в нашем случае отличен от нуля, несмотря на то что протуберанец наблюдается на лимбе. Участки вдоль щели выбирались таким образом, чтобы профили линий в них были примерно постоянными, так что усреднение приводило бы к снижению уровня шума, но не к изменению профиля линии. Для четвертого момента наблюдения были выбраны по два фрагмента протуберанца для последующего анализа, которые обозначены строчными буквами a и b. При сканировании кадров мы выбирали области с повышенной плотностью на разных расстояниях от диска Солнца.

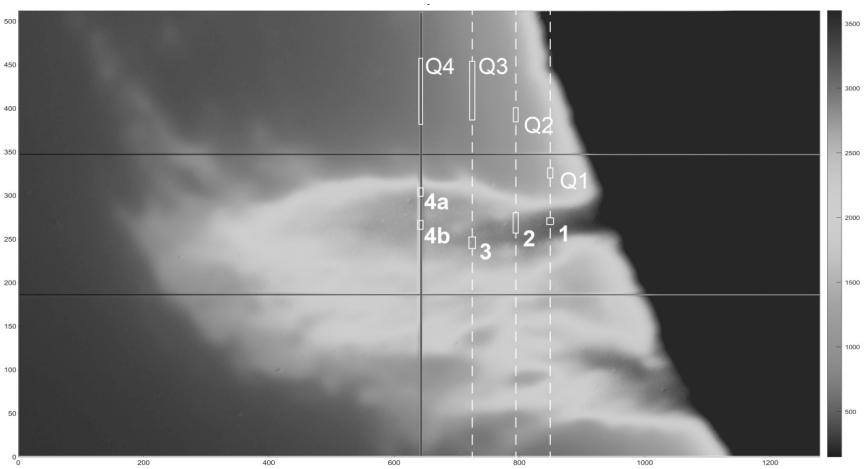


Рис. 2. Кадр SJ для четырех моментов наблюдения и соответствующих положений щели спектрографа с обозначенными местами измерения спектров протуберанца и спектров фона (с буквой Q). Для удобства моменты подписаны порядковыми номерами, а не тайм-кодами

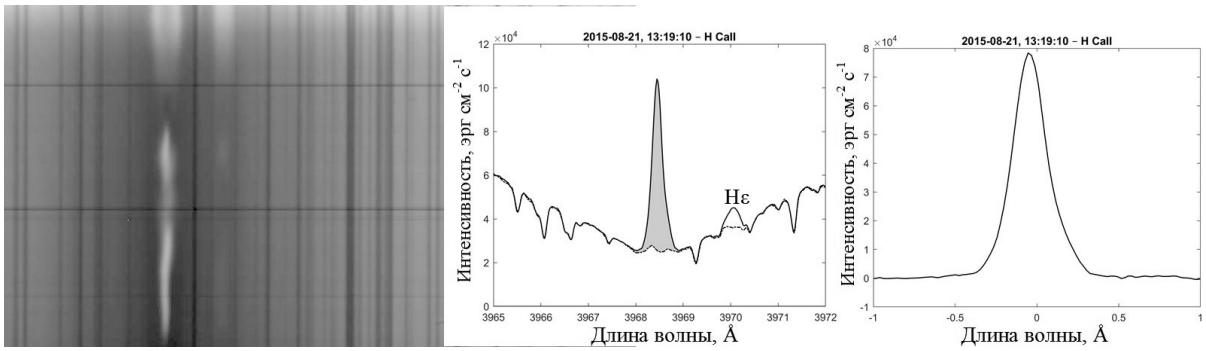


Рис. 3. Определение потока в линии CaII H для момента 13:19:10 UT. Слева – спектр объекта, в центре – фотометрический разрез спектра (сплошная линия) и фона (штриховая линия). Видна также линия Hϵ, присутствующая в спектре протуберанца. Справа – вклад протуберанца в наблюдаемый профиль линии, т. е. разница между спектрами на центральном рисунке. Интегрирование этого вклада по длинам волн определяет поток в линии от объекта, равный площади области, закрашенной серым на центральном рисунке

Исключив влияние темнового и плоского поля, мы получили потоки в линиях CaII H, Hϵ, Hβ, D3, Hα и CaII IR (8542 Å). На рис. 3 в качестве примера приведены спектр протуберанца и спектр фона в линии CaII H, а также профиль этой линии, соответствующий вкладу протуберанца. В таблице 1 приведены значения наблюдаемых потоков для различных областей протуберанца.

Таблица 1. Определенные значения потоков в эрг см$^{-2}$ с$^{-1}$, H (км) – расстояние до лимба Солнца

Время	13:19:10	13:20:15	13:21:25	13:22:54a	13:22:54b
H	15500	33800	47500	62100	64000
Hα	$2.74 \cdot 10^6$	$2.63 \cdot 10^6$	$3.11 \cdot 10^6$	$2.94 \cdot 10^6$	$3.05 \cdot 10^6$
Hβ	$5.02 \cdot 10^5$	$4.67 \cdot 10^5$	$5.74 \cdot 10^5$	$5.49 \cdot 10^5$	$5.85 \cdot 10^5$
Hϵ	$4.37 \cdot 10^4$	$3.33 \cdot 10^4$	$4.34 \cdot 10^4$	$4.56 \cdot 10^4$	$4.33 \cdot 10^4$
CaII H	$3.27 \cdot 10^5$	$2.33 \cdot 10^5$	$2.74 \cdot 10^5$	$3.40 \cdot 10^5$	$2.46 \cdot 10^5$
CaII IR	$2.52 \cdot 10^5$	$2.14 \cdot 10^5$	$2.80 \cdot 10^5$	$2.21 \cdot 10^5$	$3.06 \cdot 10^5$
HeI D3	$6.23 \cdot 10^4$	$5.50 \cdot 10^4$	$6.80 \cdot 10^4$	$7.75 \cdot 10^4$	$6.49 \cdot 10^4$

3 Теоретический расчет потоков

Для теоретического расчета наблюдаемых потоков в спектральных линиях мы приняли модель газа, прозрачного в непрерывном спектре оптического диапазона, но испытывающего возможное самопоглощение в частотах спектральных линий. Населенности дискретных уровней и состояние ионизации химических элементов, необходимые для расчета потока излучения в линиях, определялись путем решения уравнений баланса, записанных для 18 дискретных уровней атома водорода, 22 уровней иона CaII и 29 уровней атома гелия. Учитывались основные элементарные процессы заселения уровней: связанно-связанные, связанно-свободные и свободно-связанные ударные и радиационные переходы в поле фотосферного излучения (которое считается чернотельным с температурой $T = 5500$ К). Мы также ввели дополнительный параметр T_{Ly}, который по физическому смыслу является температурой чернотельного фотосферного излучения в частотах лаймановской серии водорода. Атомные данные для водорода взяты из статьи Johnson (1972). Расчет переноса излучения выполнен в рамках модели вероятности выхода фотона Соболева – Холстейна – Бибермана (Биберман, 1947; Holstein, 1947, 1951). Профиль коэффициента поглощения для линий атома водорода является сверткой контуров Доплера и Хольцмарка, а для линий иона кальция и атома гелия – фойгтовским контуром. В данной работе мы используем модель совокупности газовых слоев, которая взята из статьи Барановский (1983). Каждый слой характеризуется своим значением газовой концентрации N, толщины L, температуры T и микротурбулентной скорости v_t. В нашей работе используется приближение стационарного нагрева слоев газа. Подробное изложение применяемого нами алгоритма изложено в статьях Белова, Бычков (2018) и Купряков и др. (2024).

Значения параметров подбирались интуитивно, так как единого теоретического подхода пока нет. Одна лишь модель стационарно нагретого газа не в состоянии объяснить всей совокупности наблюдений. Ранее мы убедились в полезности модели медленной ударной волны для объяснения относительно большого потока резонансной линии кальция. В будущем мы собираемся рассмотреть и другие механизмы. Выбор двухслойной модели обусловлен тем, что модель однородного слоя не позволяет сопоставить теорию с наблюдениями ни при каких теоретических параметрах.

Таблица 2. Теоретические значения потоков F в эрг см$^{-2}$ с$^{-1}$ и параметры газа в приближении стационарного нагрева. Индекс 1 у параметров соответствует дальнему слою, индекс 2 – ближнему слою от наблюдателя. Моменты времени указаны в UTC. Концентрация газа N указана в см$^{-3}$, толщина слоев L – в км, температура газа T – в К, микротурбулентная скорость v_t – в км/с

Время (UTC)	13:19:10	13:20:15	13:21:25	13:22:54a	13:22:54b
F(Hα)	$2.59 \cdot 10^6$	$2.35 \cdot 10^6$	$2.68 \cdot 10^6$	$2.66 \cdot 10^6$	$2.72 \cdot 10^6$
F(Hβ)	$5.27 \cdot 10^5$	$4.67 \cdot 10^5$	$5.79 \cdot 10^5$	$5.47 \cdot 10^5$	$5.79 \cdot 10^5$
F(Hϵ)	$4.23 \cdot 10^4$	$3.47 \cdot 10^4$	$4.10 \cdot 10^4$	$4.32 \cdot 10^4$	$4.16 \cdot 10^4$
F(CaII H)	$3.28 \cdot 10^5$	$2.57 \cdot 10^5$	$2.96 \cdot 10^5$	$3.41 \cdot 10^5$	$2.53 \cdot 10^5$
F(CaII IR)	$2.50 \cdot 10^5$	$2.37 \cdot 10^5$	$3.02 \cdot 10^5$	$2.16 \cdot 10^5$	$3.07 \cdot 10^5$
F(HeI D3)	$6.29 \cdot 10^4$	$5.43 \cdot 10^4$	$6.86 \cdot 10^4$	$7.78 \cdot 10^4$	$6.58 \cdot 10^4$
N_1, см$^{-3}$	$3.30 \cdot 10^{10}$	$2.60 \cdot 10^{10}$	$1.7 \cdot 10^{10}$	$7.30 \cdot 10^{10}$	$2.20 \cdot 10^{10}$
N_2, см$^{-3}$	$2.20 \cdot 10^{10}$	$2.00 \cdot 10^{10}$	$2.20 \cdot 10^{10}$	$1.26 \cdot 10^{10}$	$1.48 \cdot 10^{10}$
L_1, км	5000	6000	16000	1200	10000
L_2, км	8000	8000	8000	20000	16000
T_1, К	12600	12200	12500	12300	12300
T_2, К	15000	15100	15100	15050	14800
v_{t1}, км с$^{-1}$	13.0	7.0	12.0	14.0	15.0
v_{t2}, км с$^{-1}$	1.0	1.0	1.0	2.0	0.1
T_{Ly}, К	10700	10500	10400	10700	10400

Предположения о стационарном нагреве газа оказалось достаточно: так, для объяснения наблюдаемых потоков во всех шести линиях потребовалось рассмотреть двухслойную модель с параметрами, указанными в таблице 2. Индекс 1 в таблице относится к наиболее далекому слою от наблюдателя, индекс 2 – к ближайшему к наблюдателю слою. Основной вклад в излучение кальция (а именно инфракрасной линии 8542 Å) и в линию D3 гелия дает первый слой. В линиях Hα и Hβ все слои вносят значительный вклад. Оптическая толщина

двух линий – Hα и CaII H – превышает единицу. Итак, наша модель протуберанца представляется двумя слоями с похожими по порядку величины параметрами. Введения дополнительного слоя или упрощения структуры до однородного слоя не происходит вдоль исследуемого участка протуберанца, а также не происходит и за несколько минут сеанса наблюдений. Слои протуберанца имеют общую протяженность более 10000 км и разогреты приблизительно от 12000 до 15000 К. Температура T_{Ly} превышает 10000 К; только при таких значениях удается объяснить бальмеровский декремент водорода. Такое повышенное значение T_{Ly} может свидетельствовать о дополнительном источнике нагрева газа и осуществляется именно на частотах лаймановской серии. Можно предположить, что таким механизмом является ударная волна, распространившаяся в этой области после вспышки класса M1.4 в активной области NOAA 12403.

4 Заключение

1. Наблюдаемые потоки в шести спектральных линиях удается объяснить в рамках модели стационарного нагрева.
2. Параметр T_{Ly} превышает значение 10000 К. Такие значения T_{Ly} можно интерпретировать как дополнительный источник энергии, связанный с накачкой энергии на частотах лаймановской серии. У других серий такой накачки нет. Возможный источник нагрева определяется предшествующей нашим наблюдениям вспышкой вблизи лимба.
3. В двухслойной модели при стационарном нагреве концентрация варьируется от $1.5\cdot10^{10}$ до $7.3\cdot10^{10}$ см$^{-3}$; толщина слоев – от 5000 до 20000 км; температура – от 12200 до 15100 К; микротурбулентная скорость – от 0.1 до 15 км/с.

Благодарности. Авторы благодарят рецензента за полезные замечания, а также коллективы обсерваторий Meudon и Ondřejov за предоставленную возможность проведения наблюдений и использования данных.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ им. М.В. Ломоносова.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Литература

Барановский Э.А., 1983. Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. Т. 67. С. 84–90. [Baranovsky E.A., 1983. Izv. Krymsk. Astrofiz. Observ., vol. 67. pp. 84–90. (In Russ.)]

Белова О.М., Бычков К.В., 2018. Астрофизика. Т. 61. № 2. С. 255–270. [Belova O.M., Bychkov K.V., 2018. Astrofizika, vol. 61, no. 2, pp. 255–270. (In Russ.)]

Биберман Л.М., 1947. ЖЭТФ. Т. 17. С. 416. [Biberman L.M., 1947. ZhETF, vol. 17, p. 416. (In Russ.)]

Купряков Ю.А., Бычков К.В., Белова О.М., Малютин В.А., Горшков А.Б., 2024. Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. Т. 79. № 2. С. 2420801. [Kupryakov Yu.A., Bychkov K.V., Belova O.M., Malyutin V.A., Gorshkov A.B., 2024. Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 3. Fizika. Astronomiya, vol. 79, no. 2, p. 2420801. (In Russ.)]

Engvold O., 1980. Solar Phys., vol. 67, pp. 351–355. EDN: VAQRDV.

Heinzel P., 2015. In: Vial J.-C., Engvold O. (Eds.), Solar Prominences. Springer Cham, vol. 415, pp. 103–130.

Holstein T., 1947. Phys. Rev., vol. 72, p. 1212.

Holstein T., 1951. Phys. Rev., vol. 83, p. 1159.

Johnson L.C., 1972. Astrophys. J., vol. 174, pp. 227–236.

Labrosse N., 2015. In: Vial J.-C., Engvold O. (Eds.), Solar Prominences. Springer Cham, vol. 415, pp. 131–155.

Parenti S., Vial J.-C., 2007. Astron. Astrophys., vol. 469, pp. 1109–1115.

A study of bright regions in the 2015-08-21 prominence in six spectral lines at different distances from the solar limb

Yu.A. Kupryakov[1,2], *K.V. Bychkov*[1], *V.A. Maliutin*[1], *A.B. Gorshkov*[1], *O.M. Belova*[3]

[1] Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University, Moscow, Russia
[2] Astronomical Institute ASCR, Ondřejov, Czech Republic
[3] Department of Experimental Astronomy, Faculty of Physics, Moscow State University, Moscow, Russia

Abstract. The authors analyze bright regions in the 2015-08-21 prominence observed with the Ondřejov Observatory's Horizontal-Sonnen-Forschungs-Anlage (HSFA-2). Observations were conducted between 13:19:10 and 13:22:54 UT. Before the observation of the prominence, a flare of class M1.4 was recorded in NOAA AR 12403 near the prominence, which lasted from 10:00 to 13:30 UT. In our processing, we selected regions of the prominence with an increased flux. To explain the observed fluxes, we adopted a model of gas that is transparent in the continuous spectrum of the optical range, but undergoes possible self-absorption at spectral line frequencies. We obtained a result according to which a two-layer model of the prominence satisfies the fluxes in all six studied lines of calcium, hydrogen, and helium. Among the parameters is the T_{Ly} value, which is the temperature of photospheric radiation at Lyman frequencies of hydrogen. The plasma density in the two layers considered varies from $1.5 \cdot 10^{10}$ to $7.30 \cdot 10^{10}$ cm^{-3}; the layer thickness ranges from $5 \cdot 10^3$ to $20 \cdot 10^3$ km; the temperature is 12200–15100 K; the microturbulent velocity is 0.1–15 km/s; T_{Ly} is 10400–10700 K.

Key words: corona, gas model, steady-state heating

© Автор(ы), 2026.
Статья открытого доступа. Авторское право и право на публикацию текстов, представленных в журнале "Известия Крымской астрофизической обсерватории", сохраняются за авторами, при этом право первой публикации предоставляется журналу. Тексты могут свободно использоваться при условии правильного цитирования в соответствии с лицензией Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0).