

УДК 523.9

МОДЕЛИРОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ЭРУПТИВНОГО ПРОТУБЕРАНЦА

© 2024 г. Ю. А. Купряков^{1,2,*}, К. В. Бычков^{2,**}, О. М. Белова^{2,***},
А. Б. Горшков^{2,****}, П. Котрч^{1,*****}

¹ *Астрономический институт Академии наук Чешской Республики,
Ондржейов, Чехия*

² *Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга
МГУ им. М. В. Ломоносова (ГАИШ МГУ), Москва, Россия*

* *e-mail: jurij.kupriakov@asu.cas.cz*

** *e-mail: bychkov@sai.msu.ru*

*** *e-mail: whitecanvas05122010@mail.ru*

**** *e-mail: gorshkov@sai.msu.ru*

***** *e-mail: pavel.kotrc@asu.cas.cz*

Поступила в редакцию 06.02.2023 г.

После доработки 20.07.2023 г.

Принята к публикации 28.09.2023 г.

В работе приведены результаты анализа наблюдений эруптивного протуберанца на спектрографах MFS и HSFA2 обсерватории Ондржейов (Астрономический институт, Чешская Республика) в линиях водорода, гелия и кальция. После обработки спектров были определены интегральные потоки излучения в линиях и произведен теоретический расчет физических параметров плазмы с использованием модели при отсутствии локального термодинамического равновесия. Сравнение наблюдаемых и расчетных значений показало, что наблюдаемые потоки излучения в линиях могут быть объяснены в модели стационарного излучения газа с учетом непрозрачности в спектральных линиях. Для расчета теоретических потоков в ряде случаев потребовалось ввести излучение нескольких слоев с разной температурой и высотой. Рассчитанные потоки излучения с точностью до 10% согласуются с наблюдаемыми. В результате моделирования получены основные параметры плазмы протуберанца: температура, концентрация и др. Значения потоков излучения в спектральных линиях свидетельствуют о неоднородности излучающего газа, причем рядом друг с другом могут находиться области, температуры которых различаются на порядок величины.

DOI: 10.31857/S0016794024010031, EDN: GREFDK

1. ВВЕДЕНИЕ

Некоторые типы эруптивных протуберанцев тесно связаны с солнечными вспышками, а иногда даже составляют часть процесса вспышки. Полный обзор физики протуберанцев можно найти у [Labrosse et al., 2010], в обзоре [Gibson, 2018] или в книге “Solar Prominences” [Vial & Engvold, 2015]. Протуберанцы, расположенные в солнечных активных областях, обычно недолговечны. Когда протуберанец или вспышка наблюдаются на краю видимого солнечного диска, их очень трудно отличить друг от друга. Только детальные спектральные исследования позволя-

ют решить вопрос, что именно мы наблюдали. Активные события на лимбе Солнца дают хорошую возможность интерпретировать спектры. Мы представляем анализ события на восточном лимбе 21 апреля 2015 г. в 13:05–13:58 UT. Изучаемому извержению сильно искривленного протуберанца предшествовала вспышка в той же активной области, начиная с 10:30 UT. Затем появилась вспышечная аркада петель и источники мягкого рентгеновского излучения над лимбом. Далее последовал сильный нагрев плазмы протуберанца по сценарию, описанному в работе [Kotrč et al., 2013], где было произведено магни-

тогидродинамическое моделирование начальной фазы извержения жгута протуберанца. Одной из первых моделей для интерпретации спектров протуберанцев в линии $H\alpha$ была модель при отсутствии локального термодинамического равновесия, разработанная [Anzer & Heinzel, 1998]. Совсем недавно [Schwartz et al., 2016] использовали подобную модель для анализа наблюдений в линии $H\alpha$ спокойного волокна на диске Солнца. Авторы обнаружили, что одна часть наблюдаемого фрагмента волокна холоднее, плотнее и динамичнее, чем другая его часть. Полученные температуры в первой части находятся в диапазоне от 6000 до 10 000 К, а во второй части — от 11 000 до 14 000 К. Значения скоростей лежат в диапазоне 2.5–8.0 км/с. Мы решили выполнить подобные вычисления для эруптивного протуберанца на лимбе.

2. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА

Мы идентифицировали структуры, наблюдаемые на MFS (Multichannel-Flare-Spectrograph) в спектрах $H\alpha$, с деталями на фильмограммах и проанализировали эволюцию скоростей доплеровских компонент для события. На рис. 1 видно, что коротко- и длинноволновые составляющие скорости достигают значений более 100 км/с. Вся система вращается.

Целью работы было изучение поведения кривых интенсивности излучения в линиях $H\text{CaII}$, $H\beta$, D_3 , $H\alpha$ и $\text{Ca IR } 8542 \text{ \AA}$ (пример см. на рис. 2) в процессе развития вспышки и сравнение результатов с расчетными значениями. Все спектральные наблюдения в этих линиях были выполнены на спектрографе HSFA-2 (Horizontal-Sonnen-Forschungs-Anlage-2) [Kotrč et al., 2007]. После обработки данных были получены профили линий в активной и спокойных областях хромосферы и определены значения потоков излучения (например, рис. 3). Значения потоков во всех спектральных линиях в эрг $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ на моменты 13:16:24, 13:27:40, 13:42:58 UT приведены в табл. 1. Для определения возможных механизмов свечения в линиях мы выполнили расчеты в рамках модели набора однородных слоев газа, подбирая параметры таким образом, чтобы теоретические потоки излучения оказались близки к наблюдаемым.

3. МОДЕЛЬ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Изложенные выше наблюдения рассмотрим в рамках модели газа, прозрачного в непрерывном спектре оптического диапазона, но испытывающего возможное самопоглощение в спектральных линиях. Такая модель соответствует ситуации в солнечных протуберанцах. Мы про-

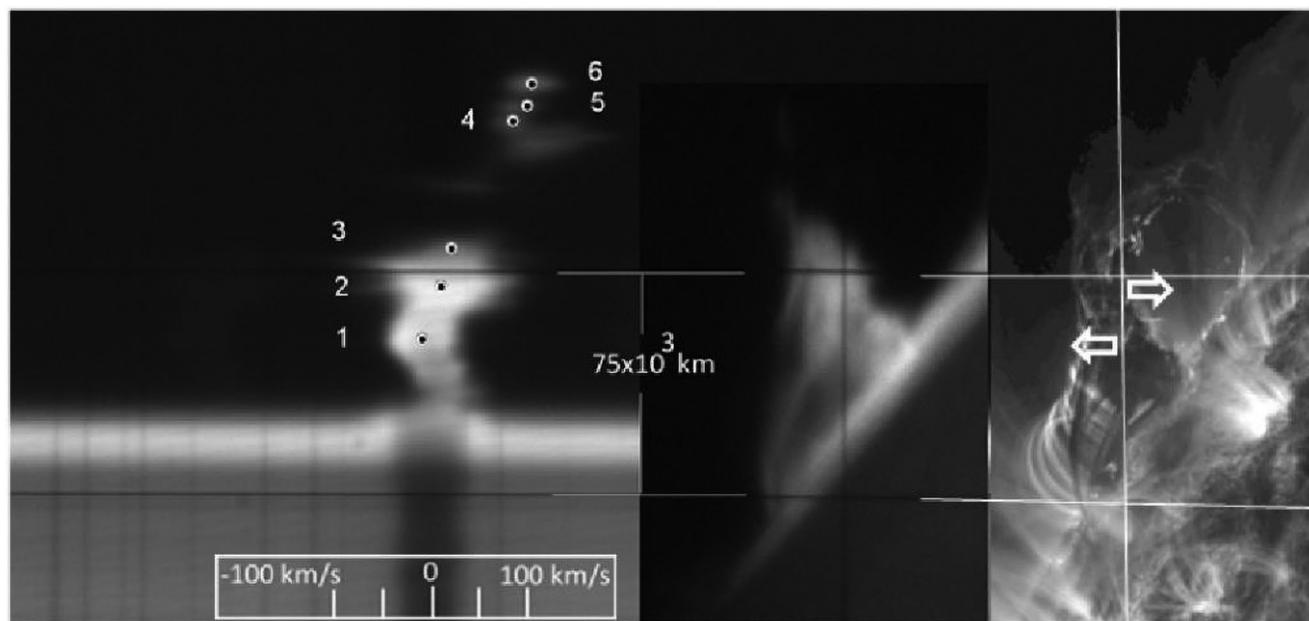


Рис. 1. Спектр $H\alpha$ на момент 13:21:11 UT (слева). Цифры соответствуют фотометрическим разрезам. Внизу — шкала скоростей. В центре — изображение на щели в линии $H\alpha$. Справа — изображение SDO 304 \AA с отмеченным положением щели спектрографа и доплеровскими компонентами скорости.

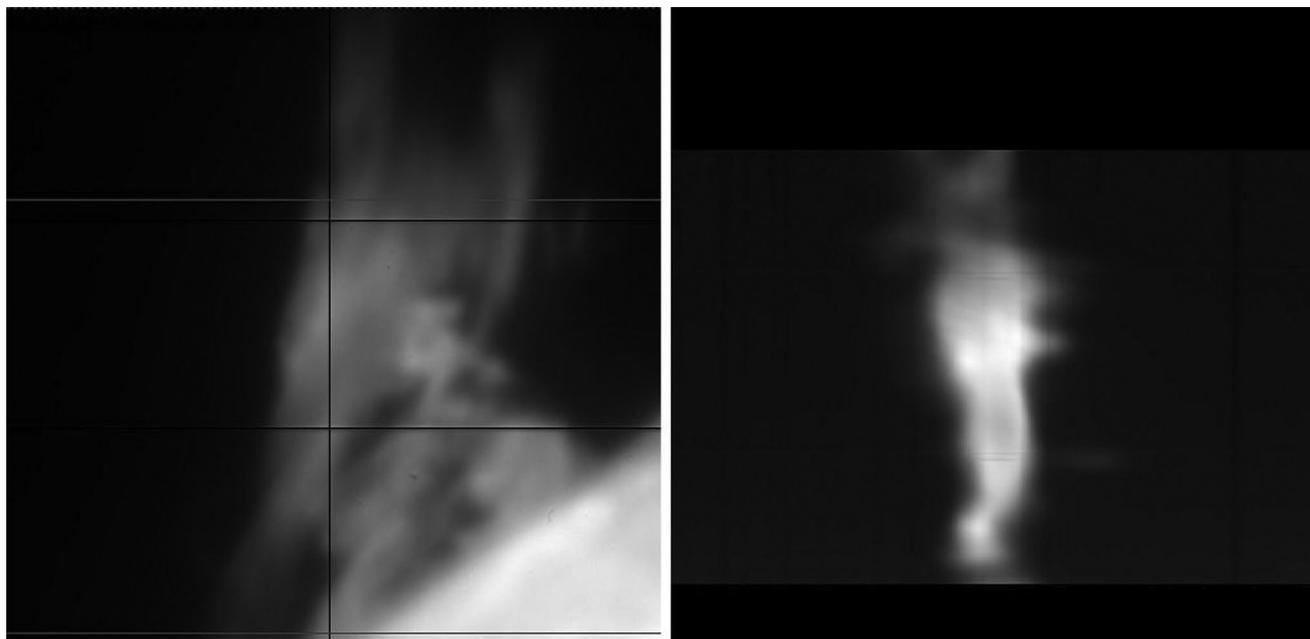


Рис. 2. Фильтрограмма и спектр в линии H α на момент 13:27:40 UT.

верим возможность подобрать такое распределение концентрации газа и его температуры внутри излучающего слоя, при котором теоретические потоки согласуются с наблюдениями.

Населенности дискретных уровней и состояние ионизации химических элементов, необходимые для расчета потока излучения в линиях, определялись путем решения уравнений баланса, записанных для 12 уровней атома водорода, 29 уровней атома гелия и 7 уровней иона CaII. Учитывались типичные (например, [Биберман и др., 1982]) для рассматриваемых объектов процессы: связанно-свободные, свободно-связанные и связанно-связанные ударные и радиационные переходы. Более подробное изложение применяемого нами алгоритма изложено в [Белова, Бычков, 2018]. Атомные данные для водорода взяты из [Johnson, 1972], для гелия — из [Вайнштейн и др., 1973]. Энергии уровней и вероятности переходов для кальция взяты из NIST (National Institute of Standards and Technology,

USA), для ударного возбуждения/деактивации — из [Melendez et al., 2007] и для ударной ионизации — из [Seaton, 1964]. Расчет переноса излучения выполнен в рамках модели вероятности выхода фотона Соболева—Холстейна—Бибермана [Биберман, 1947; Holstein, 1947; Holstein, 1951]; для атома гелия и иона CaII использован профиль Фойгта, для атома водорода — свертка контуров Доплера и Хольцмарка. Излучение фотосферы в оптическом диапазоне имитируется моделью черного тела с температурой 5500 К. Распределение температуры и плотности в излучающих областях подбиралось таким, чтобы теоретические потоки излучения в линиях соответствовали наблюдаемым. Отличие нашей реализации расчетов частичного термодинамического равновесия от других программ, написанных на эту тему (см. [Schwartz, et al., 2019] и ссылки в ней), заключается в числе учитываемых дискретных состояний n (около пяти в цитируемых источниках). Как показали наши расчеты, в ус-

Таблица 1. Значения потоков в спектральных линиях в эрг см⁻² с⁻¹ на моменты 13:16:24, 13:27:40, 13:42:58 UT

UT, ч:м:с	H α	H β	H α /H β	H CaII 3968	IR CaII 8542	D ₃ HeI 5876
13:16:24	6.07e + 7	3.31e + 7	1.83	2.39e + 7	1.43e + 7	4.39e + 6
13:27:40	6.14e + 7	3.09e + 7	1.99	2.19e + 7	9.09e + 6	1.16e + 7
13:42:58	8.81e + 7	3.55e + 7	2.48	2.37e + 7	5.48e + 6	3.43e + 7

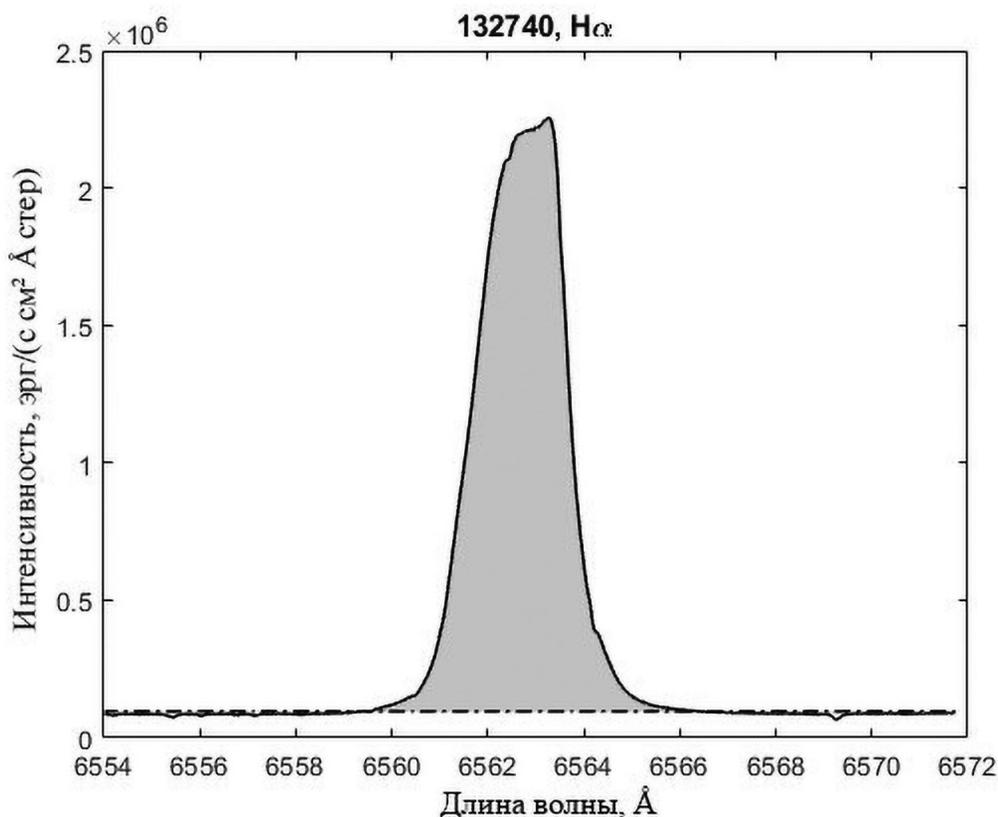


Рис. 3. Поток излучения (заштрихованная область) в линии $H\alpha$ на момент 13:27:40 UT.

ловиях протуберанца теоретические потоки в линиях атома водорода зависят от n в диапазоне до $n \approx 10$, и при дальнейшем увеличении n их изменение становится пренебрежимо малым.

Наши расчеты в рамках учитываемых выше процессов показали, что наблюдаемые потоки в линиях нельзя объяснить в модели уединенного однородного слоя ни при каких сочетаниях температуры, плотности и толщины газа. Такой результат согласуется с наблюдаемой неоднородностью протуберанца на фильтрограмме в линии $H\alpha$ (рис. 2) и на спектрограмме той же линии (рис. 1). Поэтому интерпретацию всех эпизодов мы выполнили в предположении неоднородного газа. Неоднородность имитировалась в виде расположенных друг за другом на луче зрения однородных слоев с разными значениями толщины, плотности и температуры. Первые два эпизода, 13:16:24 и 13:27:40 UT, объяснены в модели двух стационарных слоев: ближнего к наблюдателю (Б) и дальнего от него (Д). Излучение слоев складывается, причем ближний слой частично поглощает излучение дальнего в линиях бальмеровской серии и $CaII$. Теоретические параметры эпизодов различаются не сильно, при-

ведем их для первого (табл. 2), где Δv — скорость плазмы, а h — толщина слоя. Относительно плоский бальмеровский декремент ($H\alpha/H\beta = 1.8$) является следствием самопоглощения в линии $H\alpha$.

В третьем эпизоде крутой бальмеровский декремент ($H\alpha/H\beta = 2.48$) свидетельствует о небольшой, близкой к единице, оптической глубине в линии $H\alpha$. Для объяснения такого декремента необходим набор из трех слоев: ближнего (Б), среднего (С) и дальнего (Д), см. табл. 3. В горячем дальнем слое формируются линия HeI 5876 Å и большие потоки в линиях бальмеровской серии. Средний слой поглощает бальмеровские линии и создает излучение в линиях иона $CaII$. Ближний к наблюдателю слой создает основную мощность излучения прозрачного газа в бальмеровских линиях.

4. ВЫВОДЫ

1. Наблюдаемые потоки в линиях водорода, гелия и кальция могут быть объяснены в модели стационарного излучения газа с учетом непрозрачности в спектральных линиях.

Таблица 2. Теоретические параметры, полученные для первого эпизода

Слой	N , см ⁻³	T_e , К	Δv , км/с	h , 10 ³ км	τ_α
Б	5.9e + 12	8000	35	10	163
Д	4.0e + 11	100 000	50	100	1.7

Таблица 3. Набор из трех слоев для объяснения третьего эпизода

Слой	N , см ⁻³	T_e , К	Δv , км/с	h , 10 ³ км
Б	3.5e + 11	15 000	80	4
С	6.5e + 12	6500	50	1
Д	3.0e + 12	70 000	50	100

2. Относительные значения потоков свидетельствуют о неоднородности излучающего газа на луче зрения, причем рядом друг с другом могут находиться области, температуры которых различаются на порядок величины.

3. По-видимому, наблюдалась вспышка на лимбе Солнца на фоне протуберанца.

Это следует из нашего многолетнего опыта наблюдений, и к тому же в процессе развития события значения температуры лежат в диапазоне от 6500 до 10⁵ К, концентрация $N \sim 10^{12}$ см⁻³ и скорость варьируется от 35 до 100 км/с, что более характерно для вспышки, чем для протуберанца.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят коллективы SDO (Solar Dynamics Observatory) и Ondřejov Observatory и Ondřejov Observatory за предоставленную возможность проведения наблюдений и использования данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

— Белова О.М., Бычков К.В. Устойчивость нестационарного охлаждения чисто водородного газа относительно числа учитываемых дискретных уровней // *Астрофизика*. Т. 61. № 1. С. 119–130. 2018.

— Биберман Л.М. К теории диффузии резонансного излучения // *ЖЭТФ*. Т. 17. С. 416. 1947.

— Биберман Л.М., Воробьев В.С., Якубов И.Т. Кинетика неравновесной низкотемпературной плазмы. М.: Наука, 378 с. 1982.

— Вайнштейн Л.А., Собельман И.И., Юков Е.А. Сечения возбуждения атомов и ионов электронами. М.: Наука, 142 с. 1973.

— Anzer U., Heinzel P. Prominence Parameters Derived from Magnetic-Field Measurements and NLTE Diagnostics // *Sol. Phys.* V. 179. № 1. P. 75–87. 1998. <https://doi.org/10.1023/A:1005000616138>

— Holstein T. Imprisonment of resonance radiation in gases // *Phys. Rev.* V. 72. P. 1212–1233. 1947. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.72.1212>

— Holstein T. Imprisonment of resonance radiation in gases. II // *Phys. Rev.* V. 83. P. 1159–1168. 1951. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.83.1159>

— Johnson L.C. Approximations for collisional and radiative transition rates in atomic hydrogen // *ApJ.* V. 174. P. 227–236. 1972. <https://doi.org/10.1086/151486>

— Kotřč P., Bárta M., Schwartz P., Kupryakov Y.A., Kashapova L.K., Karlický M. Modeling of H-alpha Eruptive Events Observed at the Solar Limb // *Sol. Phys.* V. 284. № 2. P. 447–466. 2013. <https://doi.org/10.1007/s11207-012-0167-6>

— Labrosse N., Heinzel P., Vial J.-C., et al. Physics of Solar Prominences: I-Spectral Diagnostics and Non-LTE Modelling // *Space Sci. Rev.* V. 151. P. 243–332. 2010. <https://doi.org/10.1007/s11214-010-9630-6>

— Melendez M., Bautista M.A., Badnell N.R. Atomic data from the IRON project LXIV. Radiative transition rates and collision strengths for Ca II // *A&A.* V. 469. P. 1203–1209. 2007. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20077262>

— Schwartz P., Balthasar H., Kuckein C., et al. NLTE modeling of a small active region filament observed with the VTT // *Astron. Nachr.* V. 337. № 10. P. 1045–1049. 2016. <https://doi.org/10.1002/asna.201612431>

— Schwartz P., Gunár S., Jenkins J.M., et al. 2D non-LTE modelling of a filament observed in the H α line with the DST/IBIS spectropolarimeter // *A&A.* V. 631. P. A146 (12P). 2019.

— Seaton M.J. The spectrum of the solar corona // *Planetary and Space Science.* V. 12. № 1. P. 55–74. 1964.

— Vial J.-C., Engvold O. (eds) Solar Prominences. *Astrophys. Space Sci. Lib.* V. 415. 498 p. 2018. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-10416-4>

Simulation of spectral observations of an eruptive prominence

Yu. A. Kupryakov^{1, 2, *}, K. V. Bychkov^{2, **}, O. M. Belova^{2, *}, A. B. Gorshkov^{2, ****},
P. Kotrč^{1, *****}**

¹ *Astronomical Institute ASCR, Ondřejov, Czech Republic*

² *Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University, Moscow, Russia*

* *e-mail: jurij.kupriakov@asu.cas.cz*

** *e-mail: bychkov@sai.msu.ru*

*** *e-mail: whitecanvas05122010@mail.ru*

**** *e-mail: gorshkov@sai.msu.ru*

***** *e-mail: pavel.kotrc@asu.cas.cz*

The paper presents the results of an analysis of observations of an eruptive prominence on the MFS and HSFA2 spectrographs of the Ondřejov Observatory (Astronomical Institute, Czech Republic) in the lines of hydrogen, helium and calcium. After processing the spectra, the integral radiation fluxes in the lines were determined and a theoretical calculation of the physical parameters of the plasma was carried out using a model in the absence of local thermodynamic equilibrium. A comparison of the observed and calculated values showed that the observed radiation fluxes in the lines can be explained in a model of stationary gas radiation taking into account the opacity in the spectral lines. To calculate theoretical fluxes, in some cases it was necessary to introduce radiation from several layers with different temperatures and heights. The calculated radiation fluxes agree with the observed ones with an accuracy of 10%. As a result of the simulation, the main parameters of the prominence plasma were obtained: temperature, concentration, etc. The values of radiation fluxes in the spectral lines indicate the inhomogeneity of the emitting gas, and there may be regions next to each other whose temperatures differ by an order of magnitude.