

УДК 523.9

Эволюция солнечной вспышки SOL 2013-05-17: анализ оптических спектров (серия Бальмера) и квазипериодические пульсации

Ю.А. Купряков^{1,2}, К.В. Бычков², О.М. Белова², А.Б. Горшков², М. Bárta¹

¹ Astronomical Institute AS CR, Fričova 298, 251 65 Ondřejov, Czech Republic
kupry@asu.cas.cz

² Астрономический институт им. П.К. Штернберга МГУ им. М.В. Ломоносова, Университетский пр., 13, Москва, 119234, Россия

Поступила в редакцию 31 августа 2023 г.

Аннотация. Цель работы – изучение поведения кривых интенсивности излучения в линиях $H\epsilon$, $H\beta$ и $H\alpha$ в процессе развития вспышки и сравнение результатов с расчетными значениями. Наблюдения проводились на горизонтальной солнечной установке HSFA-2 (Ondřejov Observatory). Для обработки была отобрана вспышка 2013-05-17 класса M 3.2 в активной области NOAA 11748, для которой были определены абсолютные значения потоков в спектральных линиях. Показано, что наблюдениям удовлетворяет модель нагрева хромосферного газа потоком магнитогиродинамических волн из конвективной зоны и его ионизация и возбуждение потоком надтепловых частиц из короны. Выполнены расчеты в линиях водорода с учетом основных процессов, определяющих излучение газа, непрозрачного в спектральных линиях. Плоский декремент бальмеровской серии свидетельствует о неоднородности излучающей области по вертикали. Поиск квазипериодических пульсаций показал, что в данной вспышке они обнаруживаются только в линии $H\alpha$ с уровнем значимости 95%. В других спектральных диапазонах они отсутствуют.

Ключевые слова: спектральные линии, солнечные вспышки, хромосферное излучение, квазипериодические осцилляции

1 Введение

Недавнее обнаружение тонких магнитных петель в хромосфере с температурой около миллиона градусов (Haisheng et al., 2012), из оснований которых наблюдались выбросы горячей плотной плазмы, свидетельствует о возможности нагрева плазмы и ускорения частиц непосредственно в хромосфере. Дополнительным фактором возникновения в хромосфере спорадических процессов ускорения частиц и нагрева плазмы может служить обнаруженное мощное терагерцовое излучение из активных областей (Kaufmann et al., 1986). Анализ в работе Зайцев и др. (2013) показывает, что для терагерцового излучения наиболее вероятен плазменный механизм, реализующийся в плотных компактных и очень горячих источниках, расположенных на хромосферных уровнях с концентрацией плазмы порядка 10^{14} – 10^{15} см⁻³, что также подтверждается в работе Morgacheva et al. (2019) при анализе миллиметрового излучения солнечной вспышки 2 апреля 2017 г., наблюдавшейся космическим аппаратом МГТУ РТ-7.5. Результаты показывают, что терагерцовое излучение формируется в тонком хромосферном слое толщиной около 10 км с температурой плазмы $\sim 10^5$ К. На примере вспышки SOL 2013-05-17 мы попытались определить механизм нагрева хромосферы.

2 Наблюдения и обработка

Все спектральные наблюдения были получены нами на обсерватории Чешской академии наук (Ondřejov) на спектрографах Multichannel Flare Spectrograph (MFS, 230 mm/13.5 m) и Horizontal-

Sonnen-Forschungs-Anlage (HSFA-2, 500 mm/35 m). Мы использовали данные рентгеновских наблюдений вспышек и данные микроволнового излучения (Radio Solar Telescope Network, RSTN), а также данные радиотелескопа RT3 3.0 GHz (Ondřejov Observatory) и Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES).

Нами была отобрана вспышка 17-05-2013 класса M 3.2 в активной области NOAA 11748 (N12 E22). Начало вспышки – 08:43, максимум – 08:57 и окончание – 09:19 UT.

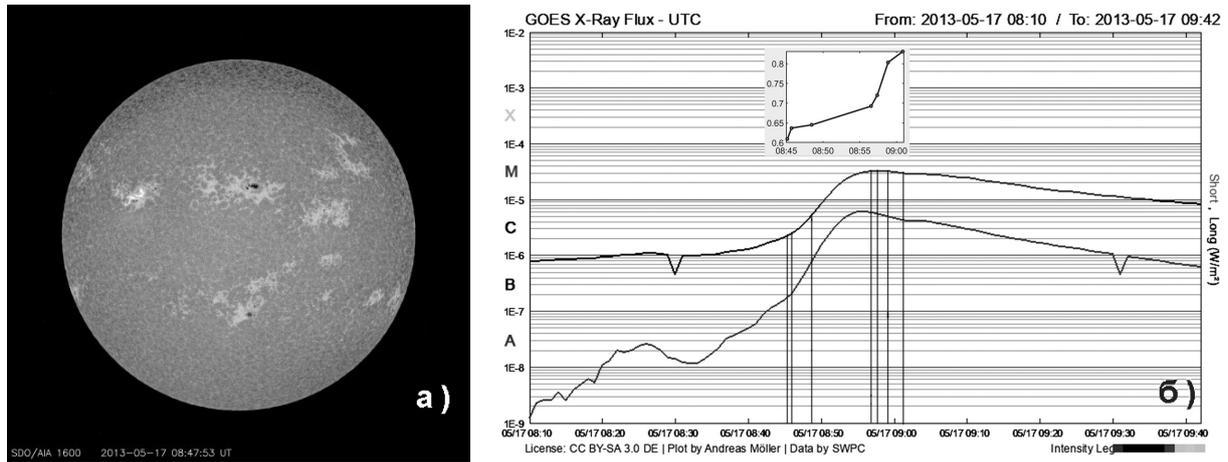


Рис. 1. а) Фильтрограмма в линии 1600 Å 08:57 UT SDO (Solar Dynamics Observatory, [Pesnell et al., 2012](#)). б) Изменение потока рентгеновского излучения в ходе вспышки (данные GOES-15); отмечены значения, выбранные для обработки. В верхнем окне рисунка показана эволюция полуширины линии $H\alpha$, Å. Заметна задержка начала роста полуширины $H\alpha$ по отношению к рентгеновому потоку, составляющая около 12 мин

На рис. 1б приведен ход рентгеновского излучения в процессе вспышки, вертикальные линии соответствуют следующим моментам обработки данных: 8:45:09; 8:46:43; 8:48:28; 8:56:33; 8:57:23; 8:58:52; 9:00:52 UT. На рис. 2 показана область хромосферы на щели спектрографа (1). Вертикальная линия соответствует положению щели. Приведены спектры $CaII H + H\epsilon$ (2), $H\beta$ (3), $H\alpha$ (4).

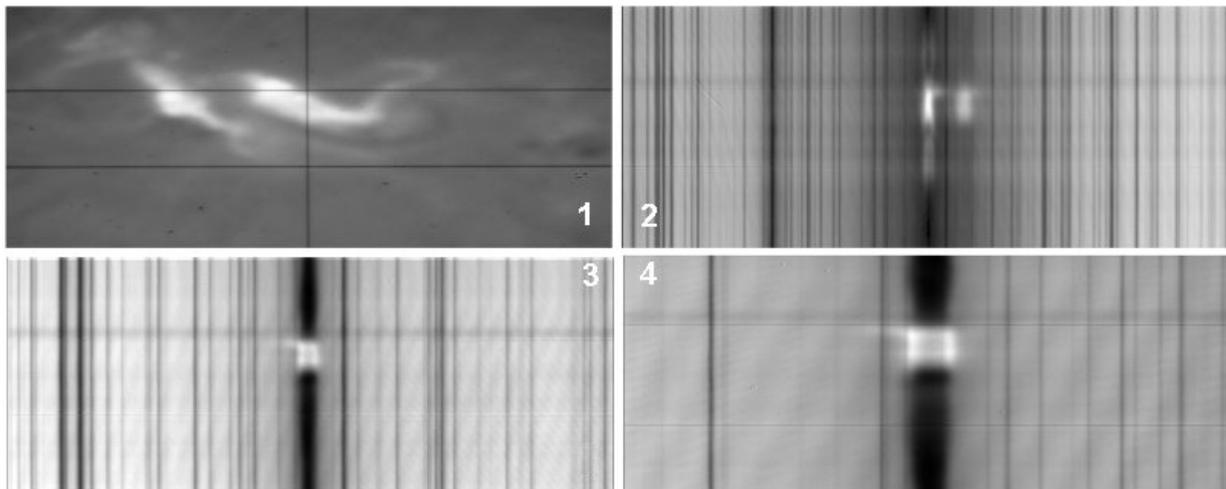


Рис. 2. Изображение хромосферы в линии $H\alpha$ на щели спектрографа (1) и спектры $CaII H + H\epsilon$ (2), $H\beta$ (3), $H\alpha$ (4) в момент 08:56:33 UT

После редукции данных были получены профили линий в активной и спокойной областях хромосферы (рис. 3) и определены значения потоков излучения. Заштрихованная область соответствует

площади потоков во вспышке. Измеренные значения потоков в спектральных линиях на выбранные моменты приведены в таблице 1.

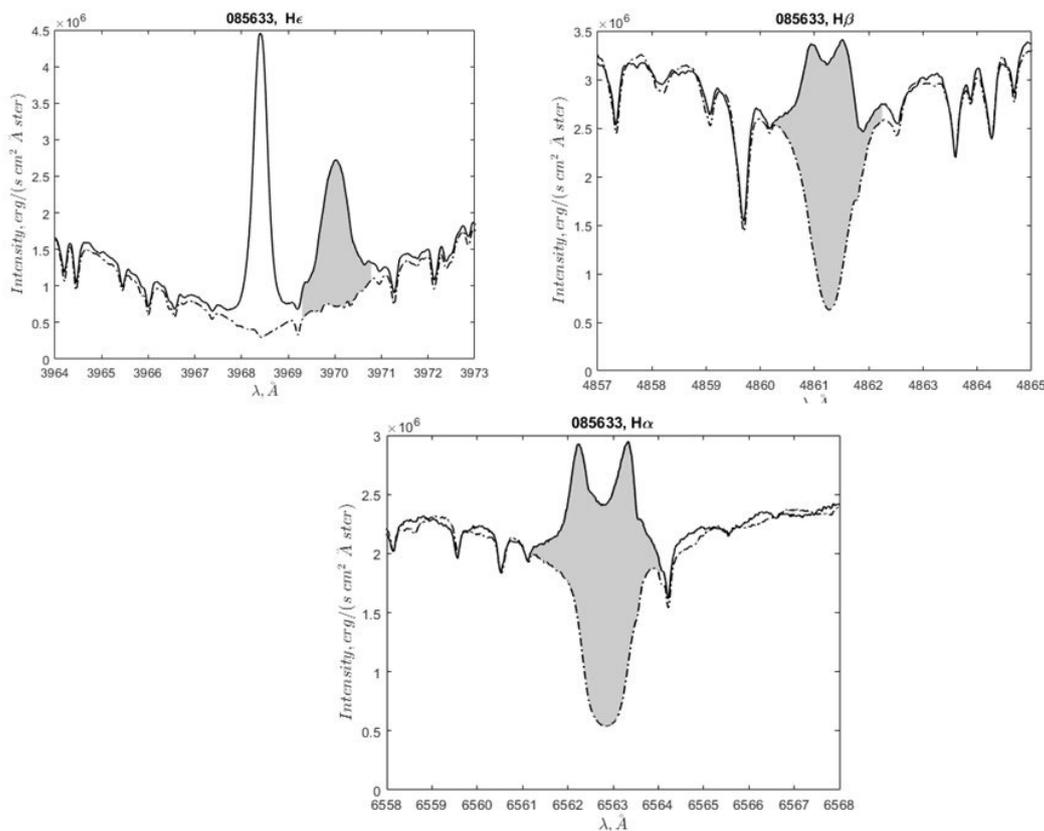


Рис. 3. Профили спектральных линий в активной (сплошные линии) и спокойной (штрих-пунктирные линии) хромосфере. Заштрихованная часть соответствует потоку в линии. На рисунке профиля H CaII отмечено положение линии Hε

Таблица 1. Значения интегральных потоков в линиях, эрг/см²/с, для каждого момента времени

Время	08:45:09	08:46:43	08:48:28	08:56:33	08:57:23	08:58:52	09:00:52
Hε	1.18e + 7	1.57e + 7	2.92e + 7	3.76e + 7	3.58e + 7	3.64e + 7	2.54e + 7
Hβ	7.08e + 6	1.19e + 7	2.51e + 7	3.50e + 7	3.19e + 7	3.04e + 7	2.02e + 7
Hα	2.98e + 6	6.05e + 6	1.31e + 7	2.11e + 7	1.94e + 7	1.74e + 7	9.41e + 6

3 Модель и метод расчетов водородных линий

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 линейчатого излучения, определялись путем решения уравнений баланса, записанных для 12 уровней атома водорода. Учитывались типичные (например, Биберман и др., 1982) для рассматриваемых объектов процессы: связанно-свободные, свободно-связанные и связанно-связанные ударные и радиационные переходы. Подробное изложение применяемого нами алгоритма описано в статье Belova, Bychkov (2017). 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); для атома водорода применили свертку контуров Доплера и Хольцмарка. Излучение фотосферы в оптическом диапазоне имитируется моделью черного тела с температурой 5500 К. Температура и плотность слоев подбирались такими, чтобы теоретические потоки излучения в линиях соответствовали наблюдаемым.

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 слоя газа. 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. Причем ближний слой частично поглощает излучение более далекого. Результаты для двух слоев газа показаны на рис. 4, где приведены значения:

- наблюдаемые и рассчитанные потоки в эрг/см²/сек для линий H α , H β , H ϵ ;
- толщина слоя в километрах;
- концентрация водорода в см⁻³;
- электронная температура в кельвинах.

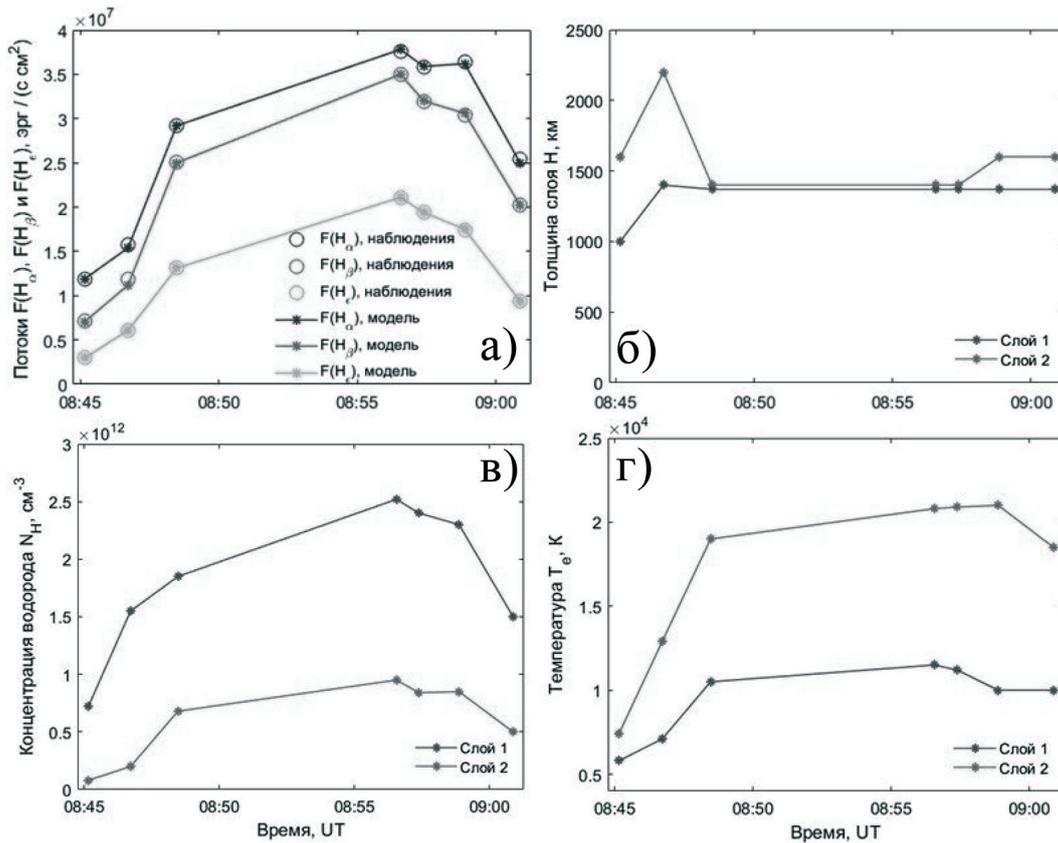


Рис. 4. Результаты теоретических расчетов потоков во вспышке 2013-05-17

4 Квазипериодические пульсации

Теперь обратимся к вопросу поиска квазипериодических пульсаций (КПП) в этой вспышке. В последние годы стало ясно, что КПП являются неотъемлемым признаком солнечных вспышек, поскольку почти все вспышки имеют КПП. Более того, в настоящее время твердо установлено, что КПП часто

имеют несколько периодов. До сих пор не было возможности окончательно определить механизм запуска или причину КПП (Doorselaere et al., 2016).

В настоящее время существует два основных класса механизмов, объясняющих КПП. Первый связывает наблюдаемые пульсации с прямым воздействием магнитогидродинамических (МГД) волн, а второй – с повторяющимся процессом магнитного пересоединения (Kupriyanova et al., 2020). Часто механизмы двух классов сосуществуют и дополняют друг друга. Мы попытались выяснить, что же наблюдается в данном случае и в каком спектральном диапазоне это проявляется. Для обработки мы выбрали данные, полученные в оптическом, радио- и рентгеновском диапазонах. Методика обработки сигнала и определения периодов КПП подробно описана в работе Купряков и др. (2022).

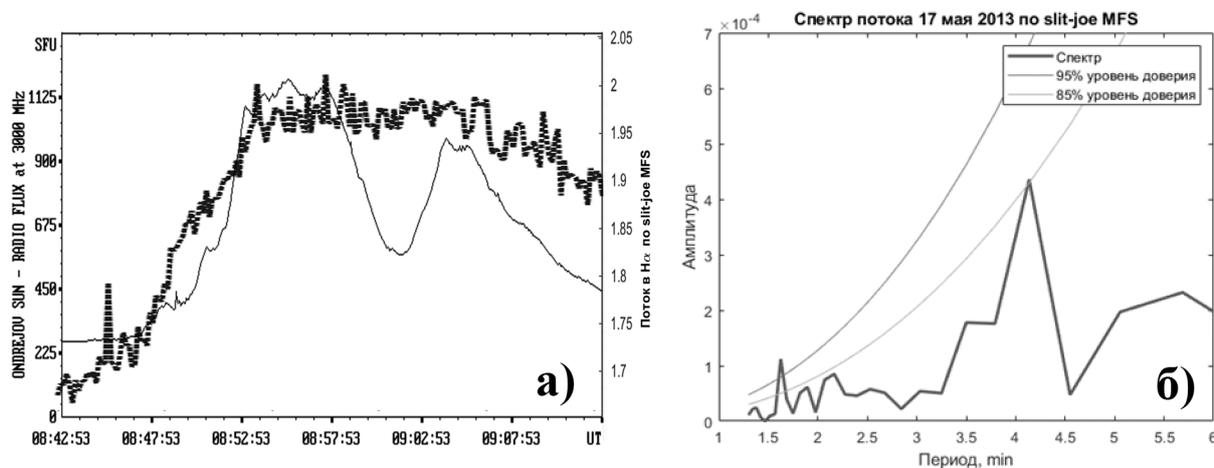


Рис. 5. а) Поток интенсивности излучения в радиодиапазоне на 3 ГГц (сплошная линия) и по хромосферным наблюдениям в линии $H\alpha$ на щели спектрографа SJ MFS, дискретность ряда – 10 с (штриховая линия). б) Спектр потока $H\alpha$

Результаты были следующими:

- в потоке хромосферного излучения в линии $H\alpha$ выявлены пики с периодом 1.625 мин (уровень доверия 95%) и 4.136 мин (уровень доверия 85%), см. рис. 5а;
- в данных микроволнового излучения (Radio Solar Telescope Network, RSTN) пульсаций не выявлено, только шум (хотя данные неплохие) – т. е. это надежный результат, хоть и отрицательный;
- в потоке радиоданных 3.0 ГГц, при наличии длинного непрерывного ряда данных (рис. 5в), обнаружить пульсации также не удалось.

Такое же утверждение можно сделать и по данным RHESSI, FERMI/GBM. Хотя если посмотреть наши предыдущие работы с использованием этого метода (Купряков и др., 2022), то в других вспышках мы обнаружили целый спектр подобных пульсаций. Возможно, этот факт свидетельствует о том, что в данном случае мы имеем вспышку с нагревом плазмы МГД-волнами, а не с перезамыканием магнитных трубок.

5 Выводы

- Начало вспышки соответствовало: в рентгене 08:35 UT; в оптике 08:45 UT; в радиодиапазоне 3 ГГц 8:46 UT. Также мы наблюдаем задержку в 12 минут между началом роста потока в рентгеновских лучах и началом роста полуширины (FWHM) $H\alpha$, а также усиление микроволн. Это говорит о том, что мы обязательно сталкиваемся с эффектом газодинамического процесса хромосферного нагрева. Этот процесс может быть связан с увеличением объема нагретой плазмы, испарением или движением плазмы (Kotrc et al., 2013). Эффект очень тесной корреляции $H\alpha$ FWHM и микроволн несомненно соответствует классической теории вспышечной физики.

2. Приведенные потоки за время развития вспышки свидетельствуют о сильной неоднородности излучающего газа. Например, для момента 8:46:43 UT:
 - а) сильную по отношению к $H\beta$ линию $He\epsilon$ ($He\epsilon/H\beta = 0.53$) излучают плотные ($N = 1.55 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$) и холодные ($T_e = 7100 \text{ К}$) области толщиной около 1400 км;
 - б) плоский бальмеровский декремент ($H\alpha/H\beta=1.37$) дает область размером 2200 км, ее температура $T_e = 12900 \text{ К}$, концентрация $N = 2.0 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$.
3. Толщина слоя 1 за время развития вспышки не изменяется, в то время как толщина слоя 2 увеличивается к моменту окончания вспышки.
4. Концентрация водорода и температура изменяются симметрично в первом и втором слоях за время вспышки.
5. К нашему удивлению, обнаружить КПП удалось только в излучении $H\alpha$. Во всех других диапазонах их проявление не обнаружено, несмотря на длинные и непрерывные ряды наблюдений.

Авторы благодарят коллективы RSTN, FERMI, RHESSI, GOES, SDO и Ondřejov Observatory за предоставленную возможность проведения наблюдений и использования данных.

Литература

- Биберман Л.М., 1947. ЖЭТФ, Т. 17. С. 416. [Biberman L.M., 1947. ZhETF, vol. 17, p. 416. (In Russ.)]
- Биберман Л.М., Воробьев В.С., Якубов И.Т., 1982. Кинетика неравновесной низкотемпературной плазмы. М.: Наука. [Biberman L.M., Vorob'ev V.S., Yakubov I.T., 1982. Kinetics of Nonequilibrium Low-Temperature Plasmas, M.: Nauka. (In Russ.)]
- Зайцев В.В., Степанов А.В., Мельников В.Ф., 2013. Письма в Астрон. журн. Т. 39. С. 1. [Zaitsev V.V., Stepanov A.V., Mel'nikov V.F., 2013. Pis'ma v Astron. zhurn., vol. 39, pp. 1–11. (In Russ.)]
- Купряков Ю.А., Горшков А.Б., Кашапова Л.К., Bárta M., 2022. Известия Крымск. Астрофиз. Обсерв., Т. 118. № 3. С. 58. [Kupryakov Yu., Gorshkov A., Kashapova L., Barta M., 2022. Izv. Krymsk. Astrofiz. Obs., vol. 118, no. 3, pp. 58–62. (In Russ.)]
- Belova O.M., Bychkov K.V., 2017. Astrophysics, vol. 60, pp. 111–117.
- Belova O.M., Bychkov K.V., 2018. Astrophysics, vol. 61, pp. 224–240.
- Doorselaere T.V., Kupriyanova E.G., Yuan D., 2016. Solar Phys., vol. 291, pp. 3143–3164.
- Haisheng Ji, Wenda Cao, Goode P.R., 2012. Astrophys. J., vol. 750, p. L25.
- Holstein T., 1947. Phys. Rev., vol. 72, pp. 1212–1233.
- Holstein T., 1951. Phys. Rev., vol. 83, pp. 1159–1168.
- Johnson L.C., 1972. Astrophys. J., vol. 174, pp. 227–236.
- Kaufmann P., Correa E., Costa J.E.R., Zodi Vaz A.M., 1986. Astron. Astrophys., vol. 157, p. 11.
- Kotrč P., Bárta M., Schwartz P., Kupryakov Yu.A., Kashapova L.K., Karlický M., 2013. Solar Phys., vol. 284, pp. 447–466.
- Kupriyanova E.G., Kolotkov D.Yu., Nakariakov V.M., Kaufman A.S., 2020. Solar-Terrestrial Physics, vol. 6, pp. 3–23.
- Morgachev A.S., Tsap Yu.T., Smirnova V.V., Motorina G.G., 2019. Geomagnetism and Aeronomy, vol. 59, pp. 1114–1120.
- Pesnell W.D., Thompson B.J., Chamberlin P.C., 2012. Solar Phys., vol. 275, pp. 3–15.

Evolution of the solar flare SOL 2013-05-17: analysis of optical spectra (Balmer series) and quasi-periodic pulsations

Yu.A. Kupryakov^{1,2}, K.V. Bychkov², O.M. Belova², A.B. Gorshkov², M. Bárta¹

¹ Astronomical Institute ASCR, Fričova 298, Ondřejov 251 65, Czech Republic
kupry@asu.cas.cz

² Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University, Universitetsky pr. 13, Moscow 119234, Russia

Abstract. This work aims to study the behavior of radiation intensity curves in the $H\epsilon$, $H\beta$, and $H\alpha$ lines during the development of a flare and compare the results with calculated values. Observations were carried out with the horizontal solar telescope HSFA-2 (Ondřejov Observatory). The 2013-05-17 flare of class M 3.2 in the NOAA AR 11748 was selected for processing, and the absolute values of fluxes in the spectral lines were determined. It is shown that the model of heating of the chromospheric gas by the flow of magnetohydrodynamic waves from the convective zone and its ionization and excitation by the flow of suprathermal particles from the corona satisfies the observations. Calculations are performed in hydrogen lines, taking into account the main processes that determine the radiation of gas opaque in spectral lines. The flat decrement of the Balmer series indicates the inhomogeneity of the radiating region along the vertical. The search for quasi-periodic pulsations showed that in this flare they were found only in the $H\alpha$ line with a significance level of 95%. They are absent in other spectral ranges.

Key words: spectral lines, solar flares, chromospheric radiation, quasi-periodic oscillations