

ОБНАРУЖЕНИЕ ЛИНИИ ПОГЛОЩЕНИЯ ГИДРОКСИЛА (ОН) В РАДИОИЗЛУЧЕНИИ КОРОНЫ СОЛНЦА

Овчинникова Н.Е., Богод В.М., Лебедев М.К.

Санкт-Петербургский Филиал САО РАН, Санкт-Петербург, Россия

DETECTION OF HYDROXYL (OH) ABSORPTION LINE IN THE RADIO EMISSION OF THE SOLAR CORONA

Ovchinnikova N.E., Bogod V.M., Lebedev M.K.

St. Petersburg Branch of SAO RAS, St. Petersburg, Russia

<https://doi.org/10.31725/0552-5829-2023-245-248>

The emission lines of the solar atmosphere are the main provider of information about the physical nature of solar activity. Attempts to detect them in the solar corona have been made repeatedly using different instruments. Observations of the radio line using the RATAN-600 radio telescope indicate its irregular registration for a number of reasons. The complexity of the problem lies in the implementation of technical and methodological approaches to the implementation of observational monitoring. Here we present the results of the first series of observations using a new spectral complex with high frequency resolution in the 1–3 GHz range. The technique of processing multichannel data using multidimensional statistical methods makes it possible to identify weak signals in the solar corona at the level of powerful background signals. To increase sensitivity, the azimuthal tracking mode is used. An absorption line was detected in the 1.6 GHz range with a variable frequency shift in several active regions (AR). A possible explanation of its nature is an absorption by hydroxyl radical in the relatively cold coronal mass of dense and cold filament in the corona.

Введение

Излучение линий является уникальным инструментом для понимания физической природы объектов. На Солнце эти исследования ведутся на уровнях фотосферы и хромосферы, тогда как на уровне короны такие возможности отсутствуют из-за высокой температуры короны ($\sim 10^6$ K). Тем не менее, для переходной зоны проводились их модельные расчеты и даже наблюдения [1, 2]. Благодаря новому спектрально-поляризационному комплексу стали возможны наблюдения тонких корональных структур в диапазоне 1–3 ГГц.

Спектральные наблюдения на РАТАН-600 в диапазоне 1-3 ГГц

При наблюдениях Солнца на РАТАН-600 с использованием нового высокоскоростного спектрополяризметрического комплекса с разрешением по частоте 0.12–10 МГц и разрешением по времени 10 мс в диапазоне 1-3 ГГц в спектрах радиоизлучения отдельных активных областей (АО) на Солнце была обнаружена предположительно линия поглощения в области 1.5–1.65 ГГц вблизи линии поглощения гидроксила (1.7 ГГц) [3–5]. Поглощение наблюдалось только в излучении тех АО, которые перекрывались холодным волокном, видимым на снимках в H-Alpha, и для АО на

лимбе в присутствии протуберанца – т. е. только там, где потенциально возможно существование гидроксильной группы. Радиоизлучение активных областей на Солнце определяется структурой сильных магнитных полей солнечной короны, в которых эффект Зеемана приводит к измеримому расщеплению атомных уровней и поляризации излучаемого света [6]. При наблюдениях в пассажном режиме, когда Солнце проходит через ножевую диаграмму направленности антенны телескопа, линия равномерно смещается по частоте с изменением высоты петли и, соответственно, величины магнитного поля при движении вдоль активной области. Структура линий, наблюдавшихся 27 марта 2022 года и описанных в [4], в точности соответствует частотам сверхтонкого расщепления в основном состоянии $X^2\Pi$ гидроксила OH (1612, 1665, 1667 и 1720 МГц) [7]; сдвиг частот изменяется синхронно от 10 до 30 МГц при перемещении вдоль АО. На рис. 1 приведены спектрограмма радиоизлучения в АО NOAA 13030 с волокном по результатам наблюдений 18 июня 2022 года (в s.f.u./arcsec). Наблюдения проводились с частотным разрешением 4 МГц. В этой АО наблюдалась вспышечная активность класса C5.6.

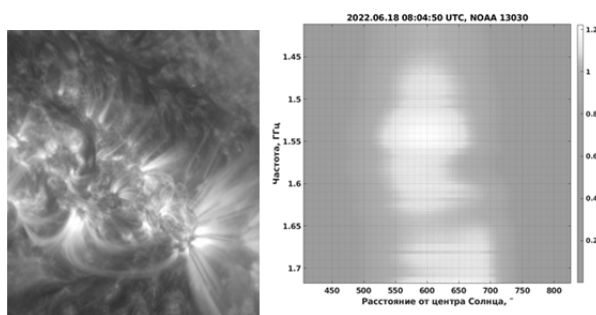


Рис. 1. Спектрограмма радиоизлучения NOAA 13030, s.f.u./arcsec

В области 1.65-1.67 ГГц наблюдается линия поглощения шириной ~ 10 МГц, смещение линии по частоте при перемещении вдоль АО составляет 15 МГц. Уширение линии связано, по-видимому, с влиянием электрического поля [7], возникающего при вспышке [8, 9]. Расчеты для модели холодного волокна в короне [9]

показывают возможные значения температуры $7.53 \cdot 10^3$ К, а плотность плазмы соответствует концентрации $6.65 \cdot 10^{12}$ см $^{-3}$, т.е. очень плотному корональному волокну, уравновешенному в гидростатической солнечной атмосфере в условиях короны на высотах порядка 5 Мм [10].

Линия поглощения гидроксила в излучении АО NOAA 13258 у основания крупного вихреобразного протуберанца на западном лимбе 27 марта 2023 года наблюдалась в режиме сопровождения с разрешением по частоте 4 МГц.

Форма линии соответствует оценочным модельным расчетам для условий в холодном волокне в солнечной короне (7500 К, $\sim 10^{-6}$ атм.) [11, 12] с учетом аппаратной функции спектрополяриметрического комплекса 1–3 ГГц (без учета смещения под действием магнитного поля). Моделирование проводилось с использованием спектроскопической базы HITRAN (HITRAN on the Web Information System) [13]. Величину магнитного поля в наблюдаемой области, согласно [7], можно оценить как ~ 30 -50 Гс. Результаты наблюдений и оценок приведены на рис. 2.

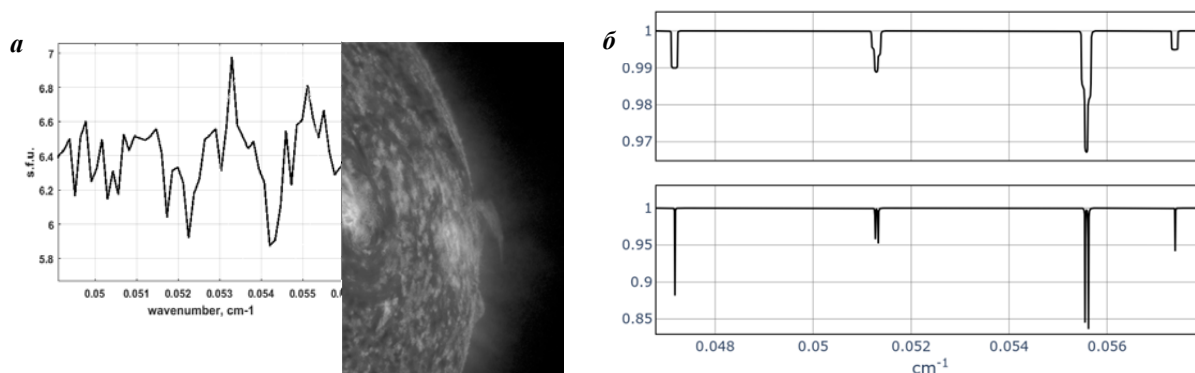


Рис 2. *a* – спектр излучения NOAA 13258 в *s.f.u.*, накопленный в течение десяти минут; *б* – оценочная модель функции пропускания гидроксильной группы в области 0.04-0.06 cm^{-1} : сверху – с учетом аппаратной функции приемного комплекса, внизу – без учета аппаратной функции.

27 и 28 сентября 2023 года АО NOAA 13435 с волокном наблюдалась в режиме сопровождения с частотным разрешением 1 МГц. Спектры излучения в двух поляризациях, накопленные в течение десяти минут, приведены на рис. 3. В области 0.05-0.055 cm^{-1} наблюдается группа линий, предположительно возникающих в результате расщепления уровней $X^2\Pi_{3/2}$ 0-0 и 1-1 в основном состоянии гидроксильной группы, обусловленного аномальным эффектом Зеемана.

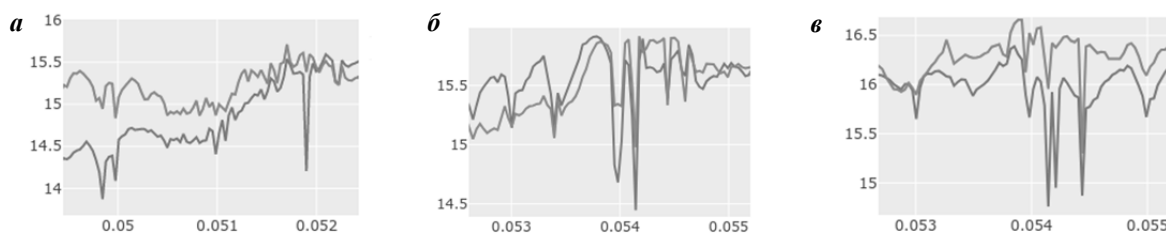


Рис. 3. Спектры излучения NOAA 13435 в *s.f.u.*, накопленные в течение десяти минут: *a, б* – 28 сентября 2023, *в* – 27 сентября 2023; по оси абсцисс – cm^{-1}

Заключение

Впервые показана возможность наблюдения в радиодиапазоне на уровне солнечной короны отдельных спектральных линий, в частности, линии гидроксила, которые могут формироваться только в относительно холодных и плотных волокнах. Обнаружение линии гидроксила (ОН) в короне Солнца может указывать на стабильность баланса температуры короны и природу ее нагрева.

Благодарности

Наблюдения на телескопах САО РАН выполняются при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Обновление приборной базы осуществляется в рамках национального проекта «Наука и университеты».

Литература

1. Дравских А.Ф., Дравских Ю.А. О возможности наблюдений линий водорода // Астрономический журнал. 2021. Т. 98. № 8. С. 694–704.
DOI: 10.31857/S0004629921080041.
2. Khersonskii V.K., Varshalovich D.A. The possibility of observing recombination lines in solar radiation // Астрономический журнал. 1980. Вып. 57. С. 621-623.
3. Bogod V.M., M.K. Lebedev, N.E. Ovchinnikova, et al. Spectroradiometry of the Solar Corona on the RATAN-600 // Cosmic Research. 2023. Vol. 61, No. 1, pp. 27–33
4. Ovchinnikova N.E., M.K. Lebedev, V.M. Bogod, et al. Results of a new approach to the analysis of multi-wavelength observations data obtained with RATAN-600 // Proceedings of The Multifaceted Universe: Theory and observations. PoS(MUTO2022) 2022, 425
5. Bogod V., Lebedev M., Ovchinnikova N., et al. Detection of absorption in the decimeter radio emission of solar corona // Proceedings of The Multifaceted Universe: Theory and observations. PoS(MUTO2022) 2022, 425, DOI: 10.22323/1.425.0005
6. Derouich M. Inversion of Zeeman polarization for solar magnetic field diagnostics // New Astronomy. 2017. Volume 53. pp. 26-34
7. Kenji Maeda et al. Hyperfine structure of the hydroxyl free radical (OH) in electric and magnetic fields // New J. Phys. 2015. 17 045014
8. Solov'ev A.A. Force free magnetic flux ropes: string confinement of super-strong magnetic fields and flare energy release // Monthly Notices of Royal Astronomical Society. 2022. Vol. 515, issue 4, pp.4981-4989.
9. Соловьев А.А. Плотные и холодные волокна в солнечной короне, настоящий сборник.
10. Avrett E.H., Loeser R. Models of the solar chromosphere and transition region from SUMER and HRTS observations: formation of the extreme-ultraviolet spectrum of hydrogen, carbon, and oxygen // Astrophysical Journal Supplement Series. 2008.
11. Park H., Chae J., Song D. Temperature of solar prominences obtained with the fast imaging solar spectrograph on the 1.6 m New Solar Telescope at the Big Bear solar observatory // Solar Physics. 2013. Vol. 288. P. 105-116.
12. Sanetaka Okada et al. Temperature analysis of solar prominences by multi-wavelength observations // Publ. Astron. Soc. Japan. 2020. 72 (5), 71(1-17)
13. <https://hitran.iao.ru/>