ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАДИОЯРКОСТИ ПО ДИСКУ СОЛНЦА НА ММ ВОЛНАХ: МОДЕЛИ И НАБЛЮДЕНИЯ

**Нагнибеда В.Г.¹, Топчило Н.А.¹, Рахимов И.А.²,
Лукичева М.А.^{1,3}, Чобану М.И.¹**

¹*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия*

²*Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург, Россия,*

³*СПб филиал Специальной астрофизической обсерватории РАН,
Санкт-Петербург, Россия*

FEATURES OF RADIO BRIGHTNESS DISTRIBUTION OVER THE SUN DISK ON MM WAVES: MODELS AND OBSERVATIONS

**Nagnibeda V.G.¹, Topchilo N.A.¹, Rakhimov I.A.²,
Loukitcheva M.A.^{1,3}, Chobanu M.I.¹**

¹*St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia*

²*IAA RAS, St. Petersburg, Russia*

³*St. Petersburg Branch of Special Astrophys. Obs. RAS, St. Petersburg, Russia*

Special interest causes a millimeter-submillimeter range of wavelengths, radiation in which is completely defined by chromosphere. In the presented work model calculation of the radio brightness distribution along the solar disc for spatially-non-uniform 3D models of chromosphere by means of program Bifrost for a cube $24 \times 24 \times 17$ Mm with spatial resolution of 48 km across and 19×100 km on a vertical is executed. One peculiarity of the calculated distribution is too small extension of chromospheric emission comparing with observational data at short radio waves.

DOI: 10.31725/0552-5829-2020-239-242

Хорошо известно, что тепловое миллиметровое и субмиллиметровое излучение Солнца генерируется в хромосфере, поэтому служит наиболее удобным средством диагностики хромосферной плазмы [1, 2]. В большинстве случаев методом такой диагностики служит исследование распределения яркости по диску Солнца: в оптическом диапазоне – это классическая задача о потемнении к краю диска, которая, начиная с пионерских работ И.С. Шкловского, обратилась в радиодиапазоне в задачу об уярчении к краю диска и существовании яркого узкого кольца вокруг солнечного лимба, обусловленного вкладом более горячей верхней хромосферы. Однако, такие наблюдения требуют достаточно высокого углового разрешения. Поэтому до недавнего времени для сравнения с наблюдениями использовались 1D- или, для учета эмпирически вводимых неоднородностей, 2D-модели хромосферы

В настоящее время появился уникальный инструмент мм и субмм диапазона – ALMA, способный обеспечить недоступное ранее угловое разрешение для солнечных радионаблюдений [3, 4], а также, Bifrost – чис-

ленная 3D-модель, разработанная с использованием полного набора уравнений радиационной гидродинамики, описывающая максимально приближенную к реальности сильно неоднородную структуру солнечной хромосферы (рис. 1). Цель нашей работы – протестировать новую 3D-модель, сравнивая модельные расчеты с наблюдаемыми распределениями яркостной температуры в прилиम्бовой зоне Солнца, с измерениями радиорадиуса и новыми наблюдениями с использованием ALMA [5, 6].

В настоящее время в нашем распоряжении имеются две общедоступные модели, рассчитанные программой Bifrost [7]:

1. EN-модель – модель области **атмосферы спокойного Солнца с усиленной магнитной сеткой** en024048_hion: куб размером 24x24x17 Мм с разрешением 48 км по горизонтали и 19-100 км по вертикали. Модель тестировалась нами в 2019 г. [8].

2. СН-модель – модель области **атмосферы спокойного Солнца, имитирующая корональную дыру (открытое магнитное поле)**, ch024031_by200bz005: куб размером 24x24x17 Мм с разрешением 31 км по горизонтали и 12-82 км по вертикали. Результаты тестирования модели представлены ниже.

Основное различия физических характеристик EN- и СН-моделей (см. рис. 1) состоит в отсутствии крупномасштабных структур, связанных с магнитным полем, что наиболее полно отражается в распределении температур на высотах более 2000 км.

Рис. 1. Характерные распределения физических параметров в картинной плоскости для EN (а, б) и СН (в, г) моделей.

а и в – карты распределения магнитного поля, б и г – карты распределения электронной температуры.

Левый столбец – уровень фотосферы, средний – высота 800 км, правый – 2000 км.

Тестирование моделей заключалось в конструировании высотного распределения параметров солнечной атмосферы путем последовательного

расположения различных вертикальных сечений кубов данных тестируемой модели вдоль поверхности Солнца от центра диска до лимба и частично за ним (рис. 2). Различный выбор набора сечений и порядка их расположения позволил конструировать различные виды атмосфер и исследовать их радиоизлучение (рис. 3). На рис. 2–3 прицельный параметр приведен в единицах оптического радиуса Солнца ($R_{\text{опт.}} = 960''$): $\rho = r / R_{\text{опт.}}$.

Рис. 2. Слева: схема атмосферы Солнца и траектории лучей в плоскости экватора, как это видно с полюса Солнца. Справа: модель атмосферы и траектории лучей в полярной системе координат. В этой системе координат производится заполнение атмосферы сечениями кубов из расчетных моделей (H_{max} – максимальная высота модели атмосферы).

Для расчета яркостной температуры выходящего излучения использовались формулы и алгоритм, описанные в [9]. Расчеты проводились для волн диапазона радиointерферометра ALMA вплоть до волны 1.35 см.

Рис. 3. Пример расчетного распределения радиояркостности на волне 3.24 мм для EN- и CH-моделей. Вид и характер распределений похожи, но “шумовая” компонента и уярчение к краю (h_{max} – положение максимума яркости) у CH-моделей больше, а вычисленный радиорadius ($R = R_{\text{опт.}} + dR$) меньше, чем у EN-моделей (рис. 4).

Рис. 4. Значения радиорadiusа Солнца в миллиметровом диапазоне длин волн, полученные из наблюдений в последние годы [6], дополненные нашими расчетами для EN-модели (кривые минимальных (R_{min}) и максимальных (R_{max}) значений по всем вариантам расчета [8]) и новыми расчетами для CH-модели (звездочки).

Основные результаты тестирования радиорадиуса у EN-/CH-моделей:

– Превышение модельного радиорадиуса над оптическим значительно меньше, чем у наблюдаемых значений и его зависимость от длины волны значительно слабее. Причина этого пока не выяснена.

– В открытом магнитном поле радиорадиус меньше (но не намного) и находится на уровне минимума для закрытых конфигураций.

Еще одной из характерных черт модельных атмосфер является быстрое убывание радиояркости с высотой над лимбом (малая протяженность хромосферы). В текущий период глубокого минимума солнечной активности появилась возможность экспериментальной проверки этого феномена по наблюдениям солнечного затмения 21.06.2020 г. на радиотелескопах ИПА РАН в широком диапазоне длин волн – 0.89, 1.05, 3.5, 6.2 и 12/13 см [10]. На длинных волнах (рис. 5) это видно глазом, на коротких требуется тщательное моделирование затменной кривой.

Рис. 5. Наблюдение распределения радиоизлучения в районе 1 и 4 контактов на затмении 21 июня 2020 г. на телескопе РТ-32 ИПА РАН на волнах 3.5 и 13 см. Вверху: изображение Солнца в линии 193 Å (по SDO/AIA) с положениям лимбов Луны для периодов 1 и 4 контактов, а также размеров диаграмм (белые круги в точках контактов); внизу: оригинальные затменные кривые с указанием времен (вертикальные пунктирные линии), соответствующих лимбам Луны на верхнем снимке.

Литература

1. Loukitcheva M.A., Nagnibeda V.G. // ESASP-463, 2000, 363-366.
2. Loukitcheva M., Solanki S., Carlsson M., Stein R. // A&A, 2004, v. 419, 747.
3. Wedemeyer S., Bastian T., Brajsa R. et al. // SSR, 2016, v.200, Issue 1-4, 1-73.
4. Loukitcheva M., Solanki S., Carlsson M., White S. // A&A, 2015, v. 575, id.A15.
5. Nindos A., Alissandrakis C., Bastian T. et al. // A&A, 2018, v. 619, id.L6, 5.
6. Selhorst C., Simões P., Brajša R. et al. // ApJ, 2019, v. 871, id.45.
7. <http://sdc.uio.no/search/simulations>
8. Топчило Н.А., Лукичева М.А., Нагнибеда В.Г., Рыжов В.С. / Труды XXIII Всеросс. конф. по физике Солнца “ССЗФ – 2019”, ГАО РАН, СПб, 2019, с. 403-406.
9. Loukitcheva M., White S., Solanki S. // A&A, 2017, v. 601, id.A43.
10. Рахимов И.А., Дьяков А.А., Олифинов В.Г. и др. // См. настоящий сборник.