Секция А. Астрофизика и физика Солнца. БШФФ-2026. С. 77–80.

УДК 523.62-726
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-77
ORCID 0000-0002-5609-7572

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВНУТРЕННЕЙ ГЕЛИОСФЕРЫ С НЕСКОЛЬКИМИ КРУПНОМАСШТАБНЫМИ ТОКОВЫМИ СЛОЯМИ

Р.А. Кислов[1]

[1]Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Россия, Москва, Троицк

MODELING THE INNER HELIOPSHERE WITH MULTIPLE LARGE-SCALE CURRENT SHEETS

R.A. Kislov[1]

[1]Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS, Troitsk, Moscow, Russia

Аннотация. Гелиосферный токовый слой (ГТС) разделяет гелиосферу на области противоположной полярности межпланетного магнитного поля и является продолжением (необязательно радиальным) солнечного дипольного магнитного экватора. Долгое время ГТС считался единственным крупномасштабным токовым слоем в гелиосфере. Со временем стало известно, что в периоды максимумов солнечной активности на Солнце продолжительное время могут доминировать недипольные гармоники магнитного поля — в первую очередь, квадрупольная и октупольная. В результате на Солнце может быть больше одной нулевой линии радиальной компоненты магнитного поля. Как было показано ранее (с участием автора данной работы) в рамках осесимметричной полуаналитической МГД-модели, на их продолжениях могут формироваться среднеширотные крупномасштабные токовые слои, похожие на ГТС, и способные сосуществовать с ним. В данной работе представлены ранее неопубликованные результаты расчетов компонент магнитного поля, концентрации и радиальной компоненты скорости солнечного ветра для октупольных конфигураций магнитных полей на Солнце.

Ключевые слова: токовые слои, межпланетное магнитное поле, солнечный ветер, Солнце.

Abstract. The heliospheric current sheet (HCS) divides the heliosphere into regions of opposite interplanetary magnetic field polarity and is radial or non-radial extension of the solar dipole magnetic equator. For a long time, the HCS has been considered to be the only large-scale current sheet in the heliosphere. Over time, it became known that during periods of solar activity maxima, non-dipole harmonics of the magnetic field, primarily the quadrupole and octupole harmonics, can dominate on the Sun for a long time. As a result, the Sun can have more than one zero line of the radial magnetic field component. As previously shown with the participation of the author of this study within the framework of an axisymmetric semi-analytical MHD model, mid-latitude large-scale current sheets similar to HCS can form on their extensions and can coexist with HCS. This paper presents the previously unpublished results of calculations of magnetic field components, solar wind concentration, and radial component of the velocity for octupole magnetic field configurations on the Sun.

Keywords: current sheets, interplanetary magnetic field, solar wind, Sun.

ВВЕДЕНИЕ

Гелиосферный токовый слой (ГТС) лежит на единственном продолжении магнитного дипольного экватора Солнца в минимуме солнечной активности. Это продолжение далеко не всегда можно считать радиальным (Behannon et al. 1981), а сам ГТС имеет сложное строение. Часто выделяют окружающий его гелиосферный плазменный слой (ГПС), характеризующийся повышенными плотностью плазмы, плазменным β и толщиной более 10^5 км на орбите Земли, а также непосредственно ГТС, расположенный внутри ГПС, имеющий толщину ~1000 км (Winterhalter et al. 1994) и, таким образом, являющийся кинетической структурой с масштабами порядка нескольких протонных гирорадиусов (Malova et al. 2017). Система ГТС—ГПС может иметь сложную форму “юбки балерины” (сравнение впервые введено в [Svalgaard & Wilcox 1974]) и состоять из нескольких близколежащих тонких слоев (Малова и др. 2018; Маевский и др. 2020).

Вне минимума солнечной активности магнитное поле Солнца становится недипольным, причем квадрупольная и октупольная гармоники могут преобладать над дипольной на протяжении непрерывной серии кэррингтоновских оборотов (Wang 2014; Obridko et al. 2012). В безтоковом приближении недипольные гармоники магнитного поля быстро убывают по мере удаления от Солнца. Однако при формировании токов в короне и солнечном ветре линии магнитного поля начинают вытягиваться и особенности геометрии магнитного поля фотосферы и нижней короны могут транслироваться на альфвеновскую поверхность и оттуда распространяться вместе с потоками уже сформировавшегося солнечного ветра в гелиосферу [Weber & Davis 1967; Kislov et al. 2019]. Под особенностями геометрии понимаются, в первую очередь, нейтральные (нулевые) линии радиальной компоненты магнитного поля.

По аналогии с формированием ГТС на продолжениях недипольных нейтральных линий можно предположить формирование токовых слоев, похожих на ГТС по строению, масштабам и параметрам плазмы. В отличие от ГТС, они могут быть расположены на высоких или средних гелиоширотах и иметь конусообразную форму. Такие структуры были впервые описаны в рамках самосогласованной МГД-модели [Kislov et al. 2019], где также были проанализированы по данным космических аппаратов имевшиеся ранее, но неточно интерпретированные пересечения крупномасштабных токовых слоев. В работе [Kislov et al. 2019] эти структуры назывались стационарными токовыми слоями (СТС), поскольку они являются долгоживущими и медленно меняющими свою структуру.

Хотелось бы обратить внимание на различия СТС и конических токовых слоев (КТС), впервые обнаруженных по наблюдениям в 2017 г. внутри высокоскоростных

потоков из полярных корональных дыр [Khabarova et al. 2017]. К сожалению, из-за схожести формы в обзоре [Петрукович и др., 2020, с. 862–863] произошло смешение понятий КТС и СТС. Постараемся разобраться. Итак, СТС — это крупномасштабные токовые слои, существующие в периоды максимумов солнечной активности на средних или высоких гелиоширотах и связанные с недипольными гармониками магнитного поля Солнца. КТС — это тоже крупномасштабные токовые слои, но существующие только в минимуме солнечной активности в потоках из полярных корональных дыр. Их природа более сложная и менее изученная, связанная, по-видимому, с формированием магнитных и плазменных вихрей на полюсах Солнца, а не с наличием недипольных гармоник (хотя последние могут использоваться для формального описания). Кроме того, КТС имеют существенно меньшие угловые размеры, порядка градусов, в то время как СТС могут иметь угол раствора больше 90° при фитировании их источника на Солнце конусом [Khabarova et al. 2017; Kislov et al. 2019; Maiewski et al. 2020]. КТС и СТС — это не высокоширотные ГТС, чему уделялось большое внимание в работах [Khabarova et al. 2017; Kislov et al. 2019] и что было упущено в [Петрукович и др. 2020].

Ниже приведены ранее не опубликованные результаты вычислений для случаев с сильным октупольным магнитным полем на Солнце в модели [Kislov et al. 2019].

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Выбрана цилиндрическая система координат (r, φ, z) с началом в центре Солнца, (инерциальная система отсчета). Векторы магнитного поля **B**, плотности тока **j**, скорости **v** связаны системой уравнений Максвелла, уравнением Эйлера с плотностью силы Ампера, уравнением вмороженности, уравнением состояния плазмы и уравнением непрерывности в рамках идеальной стационарной МГД-модели [Kislov et al. 2019], формулы (9)–(16) из [Kislov et al., 2019]. Предполагается осевая симметрия и учитывается то, что солнечный ветер — сверхзвуковое и сверхальфвеновское течение, что позволяет упростить уравнения модели. Предполагается, что любые функции в модели зависят от магнитного потока Ф и радиуса r. В переменных (r, Ф) уравнения могут быть решены аналитически (формулы (18)–(23) в [Kislov et al., 2019]), переход к координатам (r, z) осуществляется за счет решения интегрального уравнения (формула (24) в [Kislov et al., 2019]).

Модель не носит характера краевой или начальной задачи, уравнения сводятся к алгебраическим, зависящим от свободных функций, возникающих при интегрировании исходных уравнений вдоль линий магнитного поля. В число свободных функций входят скорость солнечного ветра и плотность плазмы на альфвеновской поверхности, угловая скорость изоротации Ферраро и плотность момента импульса на альфвеновской поверхности. Для нахождения свободных функций используются соотношения между параметрами плазмы вблизи Солнца, основанные на наблюдениях и моделях короны в полном согласии с моделью [Kislov et al., 2019]. При переходе от координат (r, Ф) к (r, z) приходится задавать зависимость плотности от расстояния вдоль какого либо значения z, используется $z = 0$. Наконец, на альфвеновской поверхности задается магнитный поток как функция широты, что позволяет, с одной стороны, установить связь между свободными функциями и дополнительными условиями, с другой стороны, учесть дипольные и недипольные осесимметричные магнитные поля на Солнце.

НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Ранее нигде не приводились решения для компонент магнитного поля, плотности плазмы и скорости в рамках модели [Kislov et al., 2019] для случаев смешанного дипольного и октупольного магнитного поля на Солнце и для смеси квадрупольного и октупольного магнитного поля. Они изображены соответственно на рис. 1 и 2.

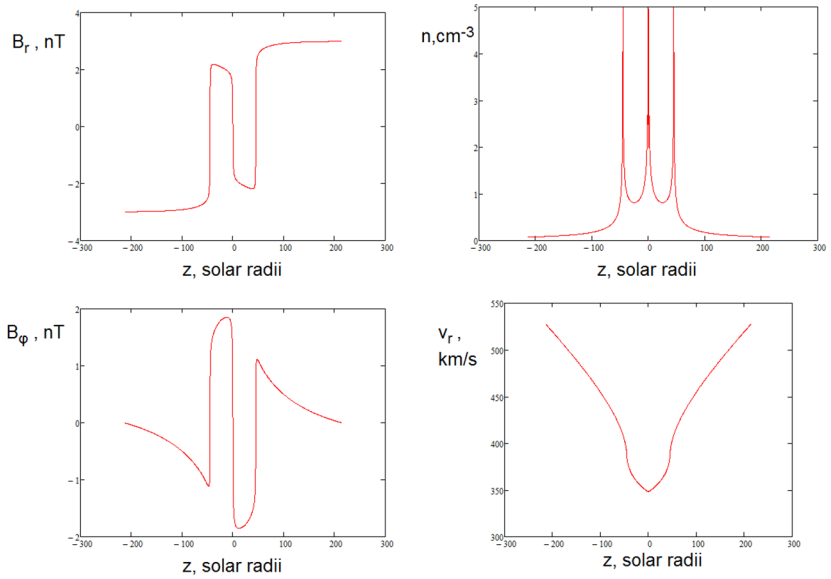

Рис. 1. Зависимости параметров солнечного ветра от координаты z ($z = 0$ соответствует гелиографическому экватору); B_r и B_φ — радиальная и азимутальная компоненты магнитного поля, n — концентрация, v_r — радиальная компонента скорости. Случай смешанного дипольного и октупольного магнитного поля, $r = 1$ а.е. на всех панелях

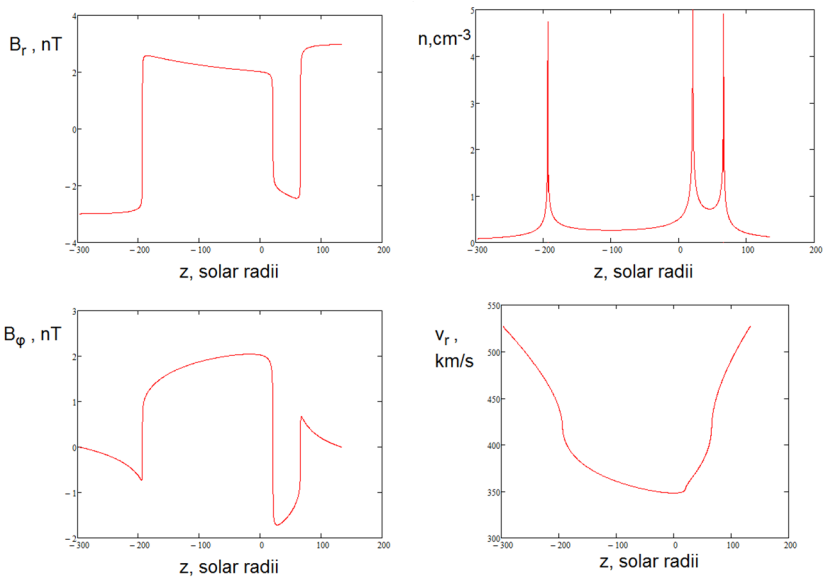

Рис. 2. Аналогично рис. 1. Случай смешанного квадрупольного и октупольного магнитного поля, $r = 1$ а.е. на всех панелях

Видно, что при выбранных в работе [Kislov et al., 2019] параметрах модели имеются три нейтральных поверхности основных компонент магнитного поля B_r и B_φ, причем изменение их знака происходит одновременно. Им соответствуют максимумы плотности плазмы и точки перегиба в зависимости радиальной компоненты скорости солнечного ветра от z. В дипольно-октупольном случае (см. рис. 1) все зависимости симметричны относительно экватора, так как рассматривается смесь гармоник одинаковой четности. В квадрупольно-октупольном случае (см. рис. 2) возникает асимметрия север—юг из-за разной четности гармоник. Приведенные решения характерны для токовых МГД-слоев и, дополняя результаты работы [Kislov, 2019], показывают формирование трех мощных токовых слоев в гелиосфере с характерной толщиной порядка нескольких радиусов Солнца ($1R_☉ \approx 7\cdot10^{10}$ см). Токовый слой, расположенный ближе к экватору (z=0), может рассматриваться как ГТС. Отметим, что другие токовые слои при увеличении роли октупольной компоненты магнитного поля формируются вблизи полюсов и постепенно опускаются на низкие широты, приближаясь к ГТС. ГТС при появлении квадрупольного магнитного поля на Солнце покидает экватор и постепенно отклоняется, достигая гелиоширот порядка 20°–30°.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе мы дополнили наши предыдущие результаты [Kislov et al., 2019] вычислениями зависимостей основных компонент межпланетного магнитного поля, скорости солнечного ветра и его плотности от координаты z, перпендикулярной гелиоэкваториальной плоскости. В настоящее время не в полной мере решена задача о наблюдательном подтверждении существования СТС и ГТС одновременно — для этого необходимо отыскать моменты времени, когда два разных аппарата пересекают крупномасштабные токовые слои вдали от Солнца: один — на низких гелиоширотах, другой — на высоких (в последнем случае это может быть только Ulysses). Для решения данной задачи следует заранее знать, насколько могут отличаться токовые слои на разных гелиоширотах. Из приведенных рисунков видно, что основные плазменные характеристики у СТС сходны на одинаковых цилиндрических расстояниях. Также они должны, как и ГТС, резко выделяться на фоне окружающей плазмы, в особенности плотностью вещества. Кроме того, можно сделать новый по сравнению с работой [Kislov et al., 2019] вывод, что при моделировании ГТС не является более сильным, чем другие СТС при условии, что СТС существуют.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Маевский Е.В., Малова Х.В., Кислов Р.А. и др. Формирование множественных токовых слоев в гелиосферном плазменном слое // Космические иссл. 2020. Т. 58, № 6. С. 445–460. DOI: 10.31857/S0023420620060072.

Малова Х.В., Попов В.Ю., Хабарова О.В. и др. Структура токовых слоев с квазиадиабатической динамикой в солнечном ветре // Космические иссл. 2018. Т. 56, № 6. С. 451–460. DOI: 10.31857/S002342060002488-4.

Петрукович А.А., Малова Х.В., Попов В.Ю. и др., Современный взгляд на солнечный ветер от микро- до макромасштабов // УФН. 2020. Т. 9, № 8. С. 859–870. https://doi.org/10.3367/UFNr.2019.06.038677.

Behannon K.W., Neubauer F.M., Barnstorf H., Fine-scale characteristics of interplanetary sector boundaries // J. Geophys. Res. 1981. V. 86. P. 3273–3287. DOI: 10.1029/JA086iA05p03273.

Khabarova O.V., Malova H.V., Kislov R.A., et al., High-latitude conic current sheets in the solar wind // Astrophys. J. 2017. V. 836. 14 p. https://doi.org/10.3847/1538-4357/836/1/108.

Kislov R.A., Khabarova O.V., Malova H.V. Quasi-stationary current sheets of the solar origin in the heliosphere // Astrophys. J. 2019. V. 875. 13 p. https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab0dff.

Maiewki E.V., Kislov R.A., Khabarova O.V., et al. Magnetohydrodynamic modeling of the solar wind key parameters and current sheets in the heliosphere: radial and solar cycle evolution // Astrophys. J. 2020. V. 892. 17 p. https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab712c.

Malova H.V., Popov V.Yu., Grigorenko E.E., et al. Evidence for quasi-adiabatic motion of charged particles in strong current sheets in the solar wind // Astrophys. J. 2017. V. 834. 9 p. DOI:10.3847/1538-4357/834/1/34.

Obridko V.N., Ivanov E.V., Özgüç A., et al. Coronal mass ejections and the index of effective solar multipole // Solar Phys. 2012. V. 281. P. 779–792. https://doi.org/10.1007/s11207-012-0096-4.

Svalgaard L., Wilcox J.M., Duvall T.L. A model combining the polar and the sector structured solar magnetic fields // Solar Phys. 1974. V. 37. P. 157–172. DOI: 10.1007/BF00157852.

Wang Y.-M., Solar Cycle Variation of the Sun's low-order magnetic multipoles: heliospheric consequences // Space Sci. Rev. 1994. V. 186. P. 387–407. https://doi.org/10.1007/s11214-014-0051-9.

Weber E.J., Davis L., Jr. The angular momentum of the solar wind // Astrophys. J. 1967. V. 148. P. 217–227. DOI: 10.1086/149138.

Winterhalter D., Smith E. J., Burton M. E., McComas D.J. The heliospheric plasma sheet // J. Geophys. Res. 1994. V. 99. P. 6667-6680. DOI: 10.1029/93JA03481.