

ВЫСОКОШИРОТНЫЕ ТОКОВЫЕ СЛОИ В ПОЛЯРНОЙ ГЕЛИОСФЕРЕ И ЭФФЕКТ ИХ КОРОТАЦИИ С ИСТОЧНИКОМ ВНУТРИ КОРОНАЛЬНОЙ ДЫРЫ

Кислов Р.А.

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

HIGH-LATITUDE CURRENT SHEETS IN THE POLAR HELIOSPHERE AND EFFECT OF THEIR SYNCHRONOUS ROTATION WITH THE SOURCE INSIDE THE CORONAL HOLE

Kislov R.A.

*Pushkov institute of terrestrial magnetism, ionosphere and radio wave propagation RAS,
Troitsk, Moscow, Russia*

This study presents an magnetohydrodynamic (MHD) model of polar conical current sheets. The proposed model is two-dimensional and applicable across various heliocentric distances, enabling a detailed description of the conical current sheet's geometry. The research examines the effects of temperature and the structure's angular rotation velocity on the central plasma density maximum near its axis. Additionally, the study elucidates the mechanism of corotation of the conical current sheet as a whole, along with its solar source.

<https://doi.org/10.31725/0552-5829-2024-157-160>

Долгое время считалось, что единственный крупномасштабный токовый слой в гелиосфере – это гелиосферный токовый слой, расположенный на низких гелиоширотах. Анализ данных, собранных во время миссии аппарата Ulysses в 1990–2010 годах, показал, что свойства солнечного ветра существенно различаются на разных гелиоширотах. В высокоширотной гелиосфере, в отличие от низкоширотной, преобладает высокоскоростной поток из полярных корональных дыр угловой шириной более 15° (скорость 700–900 км/с против 400 км/с на низких гелиоширотах). Область полярных корональных дыр традиционно рассматривается как имеющая однополярное магнитное поле с открытыми силовыми линиями, достигающими границ гелиосферы.

Описанная картина была скорректирована по результатам работы [1]. В ней на основе анализа данных Ulysses показано, что внутри быстрого потока из полярных корональных дыр расположены узкие конусовидные области шириной около 2° . В них скорость солнечного ветра ниже, чем в окружающем высокоскоростном потоке на 100–200 км/с, а полярность межпланетного магнитного поля имеет противоположный знак. Обнаруженные области ограничены токовыми слоями. Также внутри этих областей происходит резкое падение плазменного бета.

По наблюдениям, обнаруженные полярные конические токовые слои существуют только в минимуме солнечной активности. Структуры наблюдались при пролётах аппарата над южным полюсом Солнца в 1994 и 2007 годах. В каждом из пролётов было замечено до 7 пересечений структуры на средних и высоких гелиоширотах. Промежуток времени между ними соответствует Кэррингтоновской частоте вращения Солнца. Детальное сравнение показало, что каждый раз наблюдается одна и та же магнитная структура.

Природа формирования полярных токовых слоёв остаётся предметом дискуссий. Однако её можно формально получить в рамках магнитной гидродинамики. Для этого в дополнение к наблюдениям в работе [1], а также в уточнении к ней [2] были предложены несколько МГД моделей конического или цилиндрического токового слоя. Наблюдаемое уменьшение скорости солнечного ветра вблизи оси симметрии магнитной трубки во всех моделях связано с локальным максимумом плотности плазмы вблизи полюса Солнца. При изотропии плотности потока вещества $F = \rho v$, где ρ – плотность плазмы, v – скорость солнечного ветра, скорость окажется вблизи оси трубки минимальной. Нейтральные линии магнитного поля и вытягивающиеся из них токовые слои образованы за счёт сложения дипольного и мультипольных магнитных моментов Солнца.

В новой работе основное внимание уделено особенностям формы конических токовых слоёв. Первое уточнение касается их радиуса в рамках МГД модели. В старых теориях она была в несколько раз больше, чем в наблюдениях. Согласно с наблюдениями удалось добиться за счёт уменьшения в 5 раз толщины локального пика плотности плазмы на Солнце и за счёт уменьшения проводимости плазмы в корональной дыре в 10 раз.

Второе уточнение носит принципиальный характер и касается формы токового конуса (конусообразной трубки) и его вращения. В работе [3] было показано, что потоки из корональных дыр представляют собой кинематические волны. В то время как скорость солнечного ветра направлена всегда преимущественно по радиусу, структура (ударные волны, области сжатия и разрежения и прочее) вращается на удалении 1 AU от Солнца с огромной линейной скоростью в азимутальном направлении. Угол между видимой скоростью движения структуры и скоростью вещества составляет 45° . Чтобы понять причину, достаточно представить себе часы, в которых вместо стрелки имеется водомёт. Как бы быстро не текла вода, её капли будут попадать в число 12 каждую минуту. А множество капель, вышедших из водомёта в разных направлениях и в разные моменты времени, будет образовывать спирали, вращающиеся с периодом 1 минута. Аналогично происходит и с потоками плазмы из корональных дыр. Каждая спираль в фиксированной точке пространства образована разными частицами в разные моменты времени. Поскольку корональная дыра может иметь неоднородную структуру, то вдоль соседних спиралей плотность вещества и

другие параметры плазмы могут различаться. При распространении в солнечном ветре различия между соседними потоками могут сохраняться, что и приводит к видимому вращению магнитной и плазменной структуры.

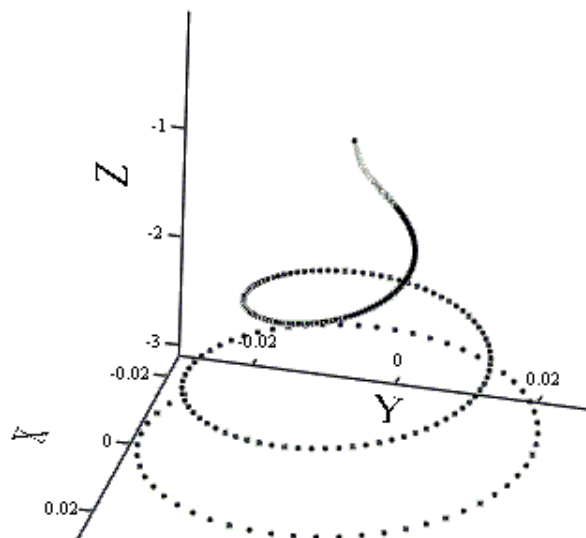


Рисунок. Форма полярного токового слоя. Расстояния по осям даны в АУ.

В работе [3] описанная выше картина была сформулирована с помощью математической модели, основанной на вычислении функции распространения потоков вещества в солнечном ветре. Здесь данная модель применена не к низкоширотным потокам из корональных дыр, а к источникам полярных конических токовых слоёв. Результаты моделирования приведены на рисунке. Изображённая объёмная спираль соответствует множеству частиц, испущенных центра вращающегося источника в разные моменты времени. Форма спирали соответствует линии симметрии конусообразного токового слоя (закрученный “конус”). Таким образом, наблюдаемая структура имеет форму не конуса с осью симметрии вдоль радиуса, а объёмной спирали, что объясняет её предыдущие наблюдения не только на высоких гелиоширотах, но и на средних. При моделировании предполагалось, что угол между центром источника и осью вращения Солнца равен 10° , а поток вещества в области источника образует угол 10° с радиальным направлением, модуль скорости плазмы – 600 км/с. Размер источника – 2° . Координата Z на рисунке направлена вдоль оси вращения Солнца, числа на осях указаны в астрономических единицах, начальная точка на графике соответствует Солнцу.

Литература

1. Khabarova O.V., Malova H.V., Kislov R.A., et al. High-latitude Conic Current Sheets in the Solar Wind // The Astrophysical Journal. 2017. Vol. 836. Issue 1. P. 108.
<https://doi.org/10.3847/1538-4357/836/1/108>

2. Кислов Р.А. МГД-модель высокоширотного токового слоя в гелиосфере // Учёные записки физического факультета Московского Университета. 2017. № 4. с. 1740704-1 - 1740704-4.
3. Кислов Р.А., Кузнецов В.Д. Пространственная эволюция и структура высокоскоростных потоков из солнечного ветра из корональных дыр // Геомагнетизм и Аэрономия. 2022. Т. 62. № 6. с. 683-692. doi: 10.31857/S0016794022060074