

**ПРОБЛЕМА ЗАТЕКАНИЯ ПЛАЗМЫ
В ГЕЛИОСФЕРНЫЙ ТОКОВЫЙ СЛОЙ
ПРИ НАЛИЧИИ ЗАМКНУТЫХ ЛИНИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ**

Кислов Р.А., Малова Х.В., Хабарова О.В., Попов В.Ю., Зелёный Л.М.

Институт космических исследований РАН, Россия, Москва

**THE PROBLEM OF PLASMA INFLOW INTO
THE HELIOSPHERIC CURRENT SHEET
IN PRESENCE OF CLOSED MAGNETIC FIELD LINES**

Kislov R.A., Malova H.V., Khabarova O.V., Popov V.Yu., Zelenyi L.M.

Space research institute of the Russian academy of sciences, Moscow, Russia

The heliospheric current sheet (HCS) is considered as a tangential discontinuity in many solar wind models. However there are indications of the existence of closed magnetic field lines near the HCS. In this case there is a problem of accumulation of matter moving along the magnetic field lines near the HCS. In this study a possible solution of this problem is proposed. It is based on the spreading of matter in the tangential direction near the current sheet. The effect has a kinetic nature and can be described in terms of a one-dimensional kinetic model that takes into account the quasi-adiabatic dynamics of particles crossing the current sheet.

DOI: 10.31725/0552-5829-2022-147-150

Гелиосферный токовый слой (ГТС) представляет собой токовую поверхность, разделяющую области различной полярности межпланетного магнитного поля. Традиционно солнечный ветер моделируют в приближении магнитной гидродинамики [1]. Учет нормальной компоненты магнитного поля в МГД-моделях приводит к эффекту накопления вещества в токовом слое, который можно продемонстрировать на простом примере. Предположим, что токовый слой является осесимметричным и стационарным, что соответствует усреднению его характеристик за один оборот вращения Солнца. Рассмотрим уравнение вмороженности $\mathbf{E} + \mathbf{c}^{-1}[\mathbf{v}, \mathbf{B}] = 0$, где $\mathbf{v}$, $\mathbf{E}$, $\mathbf{B}$ – векторы полной скорости, электрического и магнитного полей. В стационарной модели из вмороженности магнитного поля и условия $\text{rot}\mathbf{E} = 0$ следует, что полоидальные компоненты скорости и магнитного поля $\mathbf{v} - \mathbf{v}_\phi$ и $\mathbf{B} - \mathbf{B}_\phi$ параллельны ($\mathbf{v}_\phi$ и $\mathbf{B}_\phi$ – векторы азимутальных компонент). Полоидальная скорость $\mathbf{v} - \mathbf{v}_\phi$ почти совпадает с полной скоростью солнечного ветра $\mathbf{v}$, т.к. он направлен практически радиально. При пересечении космическими аппаратами токового слоя регистрируемая по обе стороны от ГТС средняя скорость $\mathbf{v} - \mathbf{v}_\phi$ направлена от Солнца. Если предположить, что силовые линии полоидального магнитного поля внутри токового слоя образуют петли, то потоки вещества из северной и южной полуплоскостей должны втекать в токовый слой. При этом должны воз-

никнуть проблемы накопления вещества в слое и, как следствие, соответствующей потери его устойчивости.

Предположим, что, благодаря наличию ненулевой нормальной компоненты в ГТС, его магнитные силовые линии приобретают петлеобразную форму, а плазменные потоки могут свободно перемещаться вдоль силовых линий из верхней полуплоскости в нижнюю и наоборот. Поскольку толщина ГТС сопоставима с гирорадиусами сверхтепловых протонов, их движение в слое становится неадиабатическим, т.е. они могут «отсоединяться» от магнитного поля внутри нейтральной области и двигаться вдоль серпантинных, т. наз. квазиадиабатических траекторий в нейтральной области, где магнитное поле минимально. Благодаря этому поток плазмы, входящий в токовый слой параллельно магнитным силовым линиям, внутри слоя разворачивается в перпендикулярном направлении и направляется вдоль линий тока. Таким образом, накопления вещества внутри токового слоя не произойдет. Для описания подобных конфигураций наиболее адекватной является гибридная модель, основанная на квазиадиабатическом подходе для описания динамики протонов и приближении ведущего центра для замагниченных электронов [2, 3].

В настоящей работе для описания эффекта разворота потока использована разработанная ранее модель [2]. Будем использовать систему координат, в которой ось X соответствует направлению на Солнце, ось Z параллельна оси вращения Солнца, а Y направлена так, чтобы образовалась правая тройка векторов $\{XYZ\}$. Все параметры для расчетов были взяты в согласии с наблюдательными данными. Гидродинамическая скорость плазмы вычислялась по следующей формуле:

$$V_y = \frac{n_1 v_{d1y} + n_2 v_{d2y}}{n_1 + n_2},$$

где индекс 1 соответствует влетающим в систему протонам с анизотропной функцией распределения (именно они в модели являются основными носителями тока), индекс 2 – холодной фоновой плазме с изотропной функцией распределения; n_1 и n_2 – соответствующие концентрации частиц, v_{d1y} и v_{d2y} – дрейфовые скорости в Y -направлении (направлении “разворота” потока). В формулу выше не входят параметры электронов, т.к. их массы пренебрежимо малы по сравнению с протонами, и они не влияют на общий перенос вещества.

На рисунке показаны результаты расчётов гидродинамической скорости в Y -направлении для случаев отсутствующего и ненулевого ширового магнитного поля B_y в зависимости от расстояния Z до нейтральной плоскости токового слоя ($Z = 0$). На рисунке магнитное поле нормировано на B_0 – величину тангенциального поля B_x на краю слоя. При наличии ненулевой компоненты B_y гидродинамическая скорость потока плазмы выше, чем при $B_y = 0$, т.к. в конфигурации с магнитным широм частицы свободно распро-

страняются в продольном к магнитному полю направлении. Видно, что скорость плазмы в Y направлении может несколько превышать типичную для орбиты Земли скорость солнечного ветра. Это естественно, т.к. при выбранных параметрах решение на рисунке соответствует полному развороту потока солнечного ветра в токовом слое. В реальности величина V_y может быть меньше, т.к. обычно только часть частиц в плазме имеет квазиadiaбатическую динамику. Кроме того, в реальных условиях солнечного

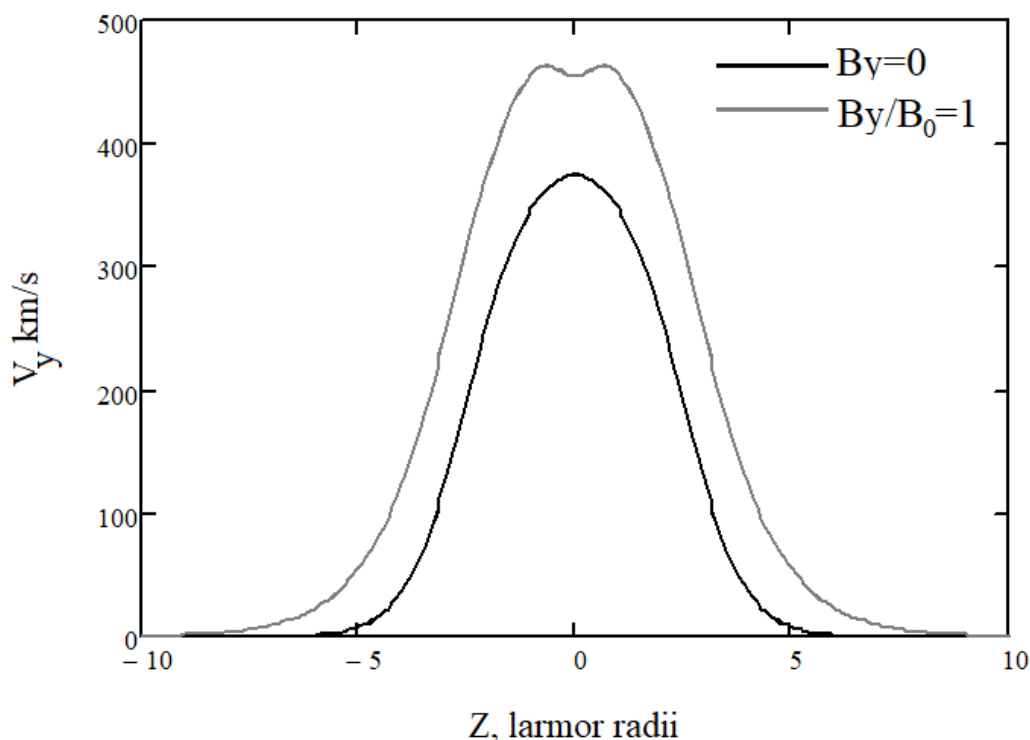


Рисунок. Гидродинамическая скорость потока плазмы солнечного ветра в Y -направлении внутри токового слоя, рассчитанная по модели [2].

ветра топология магнитного поля и соответствующая динамика частиц могут быть более сложными по сравнению с модельными допущениями. Полученный результат показывает, что в рамках модели [2] возможно описать растекание плазмы по токовому слою и решить проблему с накоплением вещества: вблизи токового слоя поток плазмы должен разворачиваться в Y направлении вдоль линий тока.

Работа поддержана грантом РФФ 20-42-04418.

Литература

1. Kislov R.A., Khabarova O.V., Malova H.V. A new stationary analytical model of the heliospheric current sheet and the plasma sheet // Journal of Geophysical Research. 2015. Vol. 120. Issue 10. Pp. 8210-8228. DOI: 10.1002/2015JA021294.

2. 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 // The Astrophysical Journal. 2017. Vol. 834. Issue 1. 34. <http://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/834/1/34>.
3. Zelenyi, L.M., Malova, K.V., Artemyev, A.V., et al. Thin current sheets in collisionless plasma: Equilibrium structure, plasma instabilities, and particle acceleration // Plasma Physics Reports. 2011. Vol. 37. Pp. 118-160. doi:10.1134/S1063780X1102005X.