ДРЕЙФОВЫЕ ПОТОКИ ВЕЩЕСТВА В КОРОНУ СОЛНЦА

Мерзляков В.Л.

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

DRIFT FLOW OF PLASMA INTO SOLAR CORONA

Merzlyakov V.L.

*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation, RAS,
Moscow, Troitsk, Russia*

The electric drift of coronal and chromospheric plasma is analyzed. This drift is supposed to arise because of local variation of magnetic field. The variation is made by photospheric convection. It is established that mesogranul convection creates the chromospheric plasma flux into corona. The value of the flux was estimated as 10^{-10} g/cm² s that is equivalent the solar wind flow from the Sun. Also the reverse flux from the corona was calculated. Such flow proved to be about 1% of chromospheric plasma flux.

DOI: 10.31725/0552-5829-2019-289-292

Введение

Как известно, Солнце теряет вещество с потоками солнечного ветра. Для поддержания такого потока требуется постоянное поступление плазмы в корону $10^{-11} - 10^{-10}$ г/см² с. Поступление происходит не простым расширением хромосферы, а имеется двухпотокное движение на границе хромосфера–корона. Холодная плазма движется к фотосфере, а горячая ($>1 \cdot 10^6$ К) от Солнца, «теплая» ($5 \cdot 10^6 - 1 \cdot 10^6$ К) в обоих направлениях [1].

Наиболее вероятным кандидатом трансформации вещества рассматривают спиккулы II типа, которые проникают на большие высоты до 10 тыс. км. Однако пока нет фактов и модельных построений, которые бы убедительно подтвердили такое предположение. В предлагаемой работе исследуется дрейфовый механизм по перемещению вещества в корону Солнца, и даются оценки его эффективности.

Дрейф

В работе [2] показано, что конвекция локально усиливает фоновое магнитное поле в десятки раз. На Солнце, согласно Stenflo [3], присутствуют фоновые поля ~ 1 Гс. Значит, конвекция создает на фотосфере систему переменных магнитных источников, которые порождают вихревое электрическое поле. Под действием этого электрического поля хромосферная и корональная плазма постоянно дрейфуют в скрещенных полях.

Рассмотрим такие дрейфовые перемещения от мезогрануляционной конвекции, действие которой простирается до корональных высот $\sim 10^4$ км,

исходя из её геометрического масштаба. На стыках мезогрануляционных ячеек возникают несколько локальных магнитных источников с различной направленностью силовых линий. И эти источники, как можно ожидать, создают существенно недипольное магнитное поле. В пределах указанного масштаба должна присутствовать, по крайней мере, октупольная гармоника. Это означает, что отношение октупольной гармоники (Q) к дипольной гармонике (M) должно быть $Q/M \geq 1 \cdot 10^{-4} R_{\text{sun}}^2$.

Переменное магнитное поле от указанных выше источников порождает вихревое электрическое $E \sim (\partial Q/\partial t + \partial M/\partial t)$. В работе [4] дана аналитическая формула для расчета такого электрического поля. Движение плазмы происходит как дрейф в скрещенных полях электрического ($\mathbf{E}$) и магнитного ($\mathbf{B}$) со скоростью $3 \cdot 10^5 [\mathbf{E} \times \mathbf{B}] / B^2$ [км/с]. Все необходимые формулы для расчета этого дрейфа приведены в [5].

Результаты

Модельные расчеты дрейфового перемещения плазмы показали, что двунаправленное движение через границу хромосфера–корона происходит, когда быстрее растет дипольная гармоника $\partial Q/\partial t < 10^{-1} \partial M/\partial t$.

На рис. 1 приведено расчетное поле направлений в плоскости, перпендикулярной нейтральной поверхности, где радиальная компонента магнитного поля равна нулю. Отсчеты даны в масштабе тыс. км. Двунаправленность имеет место на границе хромосфера–корона (высота 2 тыс. км на рис. 1). Характер движения на уровне основания короны (≈ 2.5 тыс. км) показан на рис. 2, где изображены изолинии вертикальной компоненты скорости в км/с. Отсчеты по осям в тыс. км. Расчеты скорости проводились при точечном подфотосферном источнике, за время жизни которого $5 \cdot 10^3$ сек магнитное поле на фотосфере увеличивается с 1 Гс до 50 Гс.

Рис. 1.

Рис. 2.

В окрестности нейтральной поверхности шириной ≈ 1 тыс. км корональная плазма перемещается в хромосферу (рис. 2). Эта перемещенная плазма локально уплотняется и охлаждается до хромосферных величин. Такая холодная плотная плазма и регистрируется как нисходящее движение холодного вещества. А сама уплотненная структура наблюдается как нановспышка [6].

Расчеты потоков вещества в корону показали, что за время жизни мезогрануляционного источника ($\approx 5 \cdot 10^3$ сек) в корону поступает 10% – 15% хромосферной плазмы в пределах изучаемой площади действия источника $\approx 10^4 \times 10^4$ км². Этот случай относится к ситуации с горизонтальным внешним полем не более ~ 0.1 Гс. С ростом внешнего магнитного поля количество поступающего вещества уменьшается и зависит от ориентации по отношению к магнитному полю мезогрануляционного источника. Когда внешнее горизонтальное магнитное поле более ~ 1 Гс, поток хромосферного вещества не может превысить $\approx 10\%$. Таким образом, в зависимости от внешнего магнитного поля имеем вероятный диапазон хромосферного потока в корону от 5% до 15%.

Обратный поток из короны в хромосферу также зависит от величины и ориентации внешнего магнитного поля. Когда такое поле менее 0.1 Гс, то из короны в хромосферу поступает $\approx 15\%$ вещества с высот до 10 тыс. км. При внешнем магнитном поле более 1 Гс максимальное количество корональной плазмы уменьшается до $\approx 4\%$. Значит, возможный обратный поток коронального вещества не может превышать 15%.

Имея расчетные значения количества хромосферного и коронального вещества, оценим мощности потоков на границе хромосфера–корона. Хромосферный поток поступает из столба хромосферы, содержащей $7 \cdot 10^{18}$ см⁻² протонов массой $1.67 \cdot 10^{-24}$ г. За время $5 \cdot 10^3$ сек, как было найдено, поступает 0.05–0.15 от этого количества протонов. Отсюда, получаем интенсивность потока в корону $7 \cdot 10^{18} \cdot 1.67 \cdot 10^{-24} \cdot (0.05-0.15) / (5 \cdot 10^3) = (1-3) \cdot 10^{-10}$ г/см²с. Обратный поток корональной плазмы идет из плазменного столба протяженностью $\approx 7.5 \cdot 10^8$ см со средней плотностью $5 \cdot 10^7$ см⁻³. Принимая максимальную долю уходящего вещества 15%, получаем верхний предел обратного потока из короны: $7.5 \cdot 10^8 \cdot 5 \cdot 10^7 \cdot 1.67 \cdot 10^{-24} \cdot 0.15 / (5 \cdot 10^3) = 2 \cdot 10^{-12}$ г/см²с. Величина этого обратного потока оказалась не более 1% от потока из хромосферы.

Выводы

В рамках рассмотренной концепции дрейфового перемещения хромосферной плазмы в корону получен поток вещества $\approx 10^{-10}$ г/см² с. Этот поток связан с действием мезогрануляционной конвекции, и следовательно, имеет место по всему Солнцу. В этом случае в корону поступает такое количество вещества, которое компенсирует постоянный его отток с солнеч-

ным ветром. Значит, рассмотренный дрейф является основным механизмом поступления вещества в корону Солнца.

Как было установлено, помимо хромосферного потока существует обратный поток корональной плазмы. Интенсивность этого потока составляет малую долю не более 1% по сравнению с потоком в корону.

Литература

1. *Kitagawa N., Hara H., Yokoyama T.* // *Astrophys. J.*, 2016, v. **816**, 14 (9 pp).
2. *Getling A.V., Ishikawa R., Buchnev A.A.* // *Adv. Space Res.*, 2015, v. **55**, p. 862-870.
3. *Stenflo J.O.* // *Astron. Astrophys.*, 2012, v. **547**, A93 (11 pp).
4. *Молоденский М.М., Мерзляков В.Л.* // *Письма в Астрон. Журн.*, 2002, т. **28**, № 4, с. 314-320.
5. *Мерзляков В.Л.* // *Труды Всероссийской конф. “Солнечная и солнечно-земная физика – 2011”*, СПб, ГАО РАН, 2011, с. 163-166.
6. *Merzlyakov V.L.* // *Geomagn. Aeron.*, 2017, v. **57**, p. 1063-1066.