

УДК 523.62-726

## ОЦЕНКА РАЗМЕРА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА С ПОВЫШЕННЫМ СОДЕРЖАНИЕМ ГЕЛИЯ ВНУТРИ МАГНИТНОГО ОБЛАКА

© 2019 г. Ю. И. Ермолаев\*

*Институт космических исследований РАН, Москва, Россия*

*\*yermol@iki.rssi.ru*

Поступила в редакцию 28.04.2019 г.

После доработки 28.04.2019 г.

Принята к публикации 30.05.2019 г.

В недавней работе [1] на основе данных базы измерений солнечного ветра OMNI и нашего каталога крупно-масштабных явлений солнечного ветра (<ftp://ftp.iki.rssi.ru/pub/omni/> [2]) было показано, что магнитные облака содержат электрический ток с повышенным содержанием ионов гелия в центре интервала события, в то время как в Ejecta такие структуры не наблюдаются. Из простых геометрических соображений получена верхняя оценка размера сечения электрического тока, равная ~10% от линейного размера сечения магнитного облака.

DOI: 10.1134/S0023420619060049

Одним из проявлений солнечной активности, приводящим к межпланетным и магнитосферным возмущениям, является выброс корональной массы (coronal mass ejection – CME) [3–6]. CME в межпланетном пространстве наблюдается в виде ICME (interplanetary CME) [7, 8], которые характеризуются тем, что в них давление магнитного поля превышает тепловое давление плазмы ( $\beta < 1$ ). Так как первоначально главным признаком ICME являлось высокое и скрученное в жгут межпланетное магнитное поле (ММП), то такие структуры получили название “магнитные облака (magnetic clouds – MC)”. Вскоре после обнаружения MC эксперименты показали, что в межпланетной среде очень много явлений с  $\beta < 1$ , но без высокого по величине и четкого вращения ММП [9–11]. Общепринятые количественные критерии, позволяющие надежно различить 2 типа ICME, в настоящее время отсутствуют. Например, при создании каталога крупномасштабных явлений солнечного ветра на основе данных архива OMNI (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov>, см. статью [12]), который представлен на сайте Института космических исследований РАН (<ftp://ftp.iki.rssi.ru/pub/omni/>), использовались следующие критерии для различий: для MC модуль магнитного поля должен достигать величины более 10 нТл и его компоненты описывать плавное вращение, для Ejecta какое-то из этих условий должно не выполняться [2]. Согласно этим критериям за 42 года (с 1976 по 2017 гг.) наблюдения солнечного ветра на различных КА было зарегистрировано 1407 Ejecta и 187 MC, т.е. случаев Ejecta наблюдается в ~7.5 ра-

за больше, чем MC. Средние значения параметров и их средние временные профили за период 1976–2000 гг. представлены в работах [13, 14].

Для объяснения этих наблюдений в литературе обсуждаются 2 возможные причины: различия в их происхождении на Солнце и различия в наблюдательных условиях в межпланетной среде. В первом случае предполагается, что на Солнце могут формироваться различные типы CME в соответствии с различными условиями, прежде всего, с различными величинами высвобождаемой энергии и с различной конфигурацией магнитного поля в области образования CME. Во втором случае принимается во внимание тот факт, что результаты локальных измерений параметров ICME с помощью космических аппаратов (КА) зависят от траектории КА относительно оси ICME. В настоящей короткой заметке мы обсудим только некоторые измерения межпланетных параметров.

Различия в межпланетных параметрах Ejecta и MC обсуждались в ряде публикаций (см., например, статьи [14, 15] и ссылки в них), и в них обращалось внимание на экспериментальные свидетельства того, что различия могут быть связаны с относительной геометрией ICME и траектории КА. В недавней работе [1] было показано двойным методом наложенных эпох, что в центре MC плазменный  $\beta$ -параметр падает (модуль магнитного поля растет), а относительное содержание гелия  $N\alpha/Np$  растет. Этот факт был интерпретирован, как указание на то, что в центре MC расположен электрический ток, в структуру которого вносят заметный вклад ионы гелия ( $\alpha$ -частицы).

В другом подвиде ICME (Ejecta) минимумы  $\beta$ -параметра и максимумы содержание гелия  $N\alpha/Np$  в центре явления отсутствуют, хотя уменьшенная величина  $\beta$ -параметра в соответствии с определением ICME ( $\beta < 1$ ) наблюдается в Ejecta, но она приблизительно постоянна на протяжении всего интервала наблюдения Ejecta.

Если предположить, что этот эффект полностью связан с геометрией наблюдения ICME, то это дает нам уникальную возможность оценить пространственный размер области с током в ICME. Предположим, что все ICME имеют одинаковую структуру, но в Ejecta в отличие от MC траектория КА проходит так далеко от тока, что спутник не регистрирует (не пересекает) ток. Так как траектория спутника может быть расположена случайным образом относительно оси ICME, то можно считать, что для всех  $\sim 1600$  случаев регистрации ICME нашего каталога траектории КА приблизительно параллельны плоскости эклиптики и равномерно расположены относительно оси ICME. В этом случае отношение числа MC и Ejecta к полному числу ICME дает оценку линейного размера области с током и без него, т.е.  $\sim 12\%$  (187/1594) линейного размера ICME занимает ток, а в  $\sim 88\%$  размера ICME ток отсутствует. Нужно отметить, что двойным методом наложенных эпох определяется распределение положений экстремумов тех или иных параметров индивидуальных явлений по нормализованной длительности явления, а не сам размер экстремума, так как экстремумы могут в принципе занимать любое положение. Поэтому используемый подход позволяет оценить лишь верхний предел линейного размера тока в ICME, и реальные токи, по-видимому, имеют меньший размер в сечении  $\sim 1$  млн км. Согласно нашим оценкам этот размер превышает границу характерных размеров между явлениями солнечного и локального происхождения [1, 16, 17], и поэтому этот электрический ток с повышенным содержанием гелия в основном был сформирован на Солнце.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект 16-12-10062.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yermolaev Y.I., Lodkina I.G., Yermolaev M.Y. et al. Dynamics of large-scale solar-wind streams obtained by the double superposed epoch analysis. 4. Helium abundance // Archive. 2018. <http://arxiv.org/abs/1807.03579>
2. Ермолаев Ю.И., Николаева Н.С., Лодкина И.Г., Ермолаев М.Ю. Каталог крупномасштабных явлений солнечного ветра для периода 1976–2000 гг. // Космич. исслед. 2009. Т. 47. № 2. С. 99–113. (Cosmic Research. P. 81–94.)
3. Hildner E. Mass ejections from the solar corona into interplanetary space. Study of travelling interplanetary phenomena / Eds. Shea M.A., Smart D.F., Wu S.T. // Astrophysics and Space Science Library. 1977. V. 71. P. 3–20. [https://doi.org/10.1007/978-90-277-0860-1\\_1](https://doi.org/10.1007/978-90-277-0860-1_1)
4. Munro R.H., Gosling J.T., Hildner E. et al. The association of coronal mass ejection transients with other forms of solar activity // Sol. Phys. 1979. V. 61. P. 201–215. <https://doi.org/10.1007/BF00155456>
5. Gosling J.T. The solar flare myth // J. Geophys. Res. 1993. V. 98. P. 18937–18950. <https://doi.org/10.1029/93JA01896>
6. Gopalswamy N. History and development of coronal-mass ejections as a key player in solar terrestrial relationship // Geosci. Lett. 2016. V. 3. P. 8. <https://doi.org/10.1186/s40562-016-0039-2>
7. Burlaga L., Sittler E., Mariani F., Schwenn R. Magnetic loop behind an interplanetary shock: Voyager, Helios, and IMP 8 observations // J. Geophys. Res. 1981. V. 86. P. 6673–6684. <https://doi.org/10.1029/JA086iA08p06673>
8. Klein L.W., Burlaga L.F. Interplanetary magnetic clouds at 1 AU // J. Geophys. Res. 1982. V. 87. P. 613–624. <https://doi.org/10.1029/JA087iA02p00613>
9. Gosling J.T. Coronal mass ejections and magnetic flux ropes in interplanetary space // Physics of magnetic flux ropes Geophysical Monograph. 1990. V. 58. P. 343–364.
10. Cane H.V., Richardson I.G. Interplanetary coronal mass ejections in the near-Earth solar wind during 1996–2002 // J. Geophys. Res. 2003. V. 108. P. 1156. <https://doi.org/10.1029/2002JA009817>
11. Wu C.C., Lepping R.P. Statistical comparison of magnetic clouds with interplanetary coronal mass ejections for solar cycle 23 // Sol. Phys. 2011. V. 269. P. 141–153. <https://doi.org/10.1007/s11207-010-9684-3>
12. King J.H., Papitashvili N.E. Solar wind spatial scales in and comparisons of hourly Wind and ACE plasma and magnetic field data // J. Geophys. Res. 2004. V. 110. A2. A02209. <https://doi.org/10.1029/2004JA010804>
13. Yermolaev Y.I., Lodkina I.G., Nikolaeva N.S., Yermolaev M.Y. Dynamics of large-scale solar wind streams obtained by the double superposed epoch analysis // J. Geophys. Res. 2015. V. 120. № 9. P. 7094–7106. <https://doi.org/10.1002/2015JA021274>
14. Yermolaev Y.I., Lodkina I.G., Nikolaeva N.S. et al. Dynamics of large-scale solar-wind streams obtained by the double superposed epoch analysis: 2. Comparisons of CIRs vs. Sheaths and MCs vs. Ejecta // Sol. Phys. 2017. V. 292. № 12 id 193. <https://doi.org/10.1007/s11207-017-1205-1>
15. Jian L.K., Russell C.T., Luhmann J.G., Skoug R.M. Properties of interplanetary coronal mass ejections at one AU during 1995–2004 // Solar Physics. 2006. V. 239. P. 393–436.
16. Ермолаев Ю.И. Где образуются среднемасштабные вариации солнечного ветра? // Геомагнетизм и аэронавигация. 2014. Т. 54. № 2. С. 174–175.
17. Зеленый Л.М., Милованов А.В. Фрактальная топология и странная кинетика: от теории перколяции к проблемам космической электродинамики // УФН. 2004. Т. 174. № 8. С. 809–852.