

## Оценка скорости расширения коронального выброса массы по радиозатменным данным аппаратов Helios

В.Е. Андреев

Фрязинский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова Российской академии наук, 141190, г. Фрязино, Московская.обл., пл. Б.А. Введенского, д.1, e-mail:[v.e.andreev@gmail.com](mailto:v.e.andreev@gmail.com)

*Показана возможность оценить скорость расширения плазменного выброса из Солнца (coronal mass ejection – CME) по одновременным измерениям флуктуаций Фарадеевского вращения линейно поляризованного радиосигнала аппарата Helios в двух пунктах приёма радиосигналов.*

*It is shown that the possibility to estimate the rate of expansion of the plasma ejection from the Sun (coronal mass ejection – CME) for the simultaneous measurements of fluctuations of the Faraday rotation of linearly polarized radio signals of Helios in two points of reception of radio signals.*

Зондирование околосолнечной плазмы на расстояниях от 3-10  $R_s$  ( $R_s$  – радиус Солнца) линейно поляризованными радиосигналами с космических аппаратов Helios и одновременный приём этих сигналов на нескольких, разнесённых на большие расстояния приёмных пунктах (например, DSS14 – Goldstone, DSS43 – Canberra), позволили изучить характеристики Альвеновских волн, найти квазигармонические компоненты с разной частотой во флуктуациях Фарадеевского вращения, определить скорость плазмы солнечного ветра на малых расстояниях от Солнца [1-7].

**Целью** работы является получение оценки скорости расширения плазменного выброса из Солнца (coronal mass ejection – CME) по одновременным измерениям флуктуаций Фарадеевского вращения в двух пунктах приёма радиосигналов.

CME, как показано, например, в работах [3,6], оставляет след во временных изменениях Фарадеевского вращения плоскости поляризации радиоволны дециметрового диапазона ( $\lambda = 13$  см,  $f = 2295$  МГц) на трассах радиосвязи Helios – DSS. Известно, изменения поворота угла плоскости поляризации определяются по формуле [1,2]:

$$\Delta\psi(t) = \frac{1.35 \cdot 10^{-6}}{f^2} \int_{sc}^E N(l,t) B_l(l,t) dl(t),$$

где  $\Delta\psi(t)$  – временные изменения угла вращения в градусах,

$f$  – частота радиосигнала в МГц,

$N(l,t)$  – плотность электронной концентрации вдоль трассы радиосвязи в  $\text{см}^{-3}$ ,

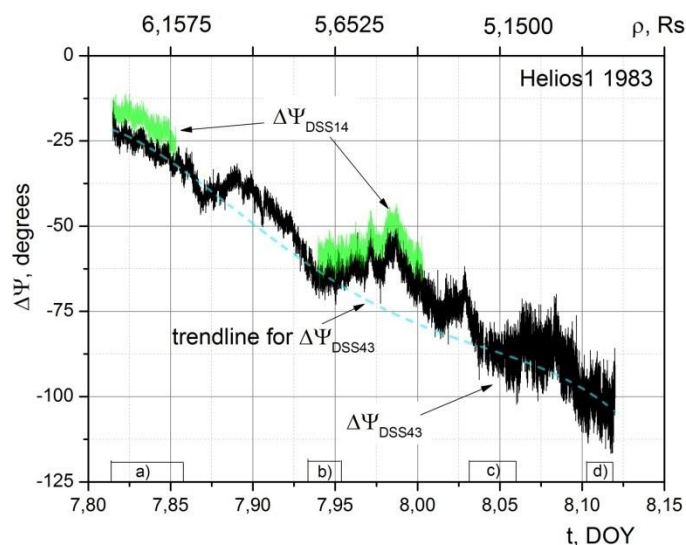
$B_l(l,t)$  – компонента магнитного поля, параллельная трассе распространения радиоволн в Гауссах,

$E$  – станция приёма радиосигнала на Земле, SC- космический аппарат Helios,

$t$  - время.

На рисунке 1 представлены зависимости  $\Delta\psi(t)$ , полученные на двух разнесённых трассах радиосвязи Helios1 – DSS14 и Helios1 – DSS43 7-8 января 1983г. Измерения проводились ежесекундно. На оси абсцисс время указано в долях суток, на верхней горизонтальной оси указаны расстояния максимального сближения радиотрассы к Солнцу в радиусах Солнца –  $\rho$ . Одновременные измерения в двух пунктах проводились в интервалах времени: первый – (7.8149 – 7.8531), второй – (7.9396 – 8.0031). Для выявления линии тренда проведён полином 4-й степени методом наименьших

квадратов по подобранным с неравномерным шагом участкам, отмеченным на рисунке буквами a), b), c) и d) для  $\Delta\Psi_{DSS43}(t)$ . Затем этот полином вычитался из первоначальных данных  $\Delta\Psi_{DSS43}(t)$  и остатки зависимости  $\Delta\Psi_{DSS43}(t)$  в дальнейшем были использованы для оценки скорости расширения СМЕ.



**Рис.1. Зависимости  $\Delta\Psi(t)$ , полученные на двух разнесённых трассах радиосвязи: Helios1 – DSS14 и Helios1 – DSS43 7-8 января 1983г. Одновременные измерения в двух пунктах проводились в интервалах времени: первый – (7.8149 – 7.8531), второй – (7.9396 – 8.0031).**

Плазменное облако СМЕ, движущееся от Солнца, может иметь различные формы, например, в виде расширяющихся спирали (helical), каната (fluxrope), круассана (croissant) [3,6]. Сечения таких структур, отсекаемые трассами радиоволн, проходящими через эти структуры под каким либо углом, в проекции на плоскость эклиптики будут иметь, в простом случае, вид эллипса. Схематически проекция такого сечения изображена на рисунке 2. Здесь же показаны проекции векторов скоростей:  $\mathbf{V}_{sp}$  – скорость приближения (удаления) трасс к Солнцу,  $\mathbf{V}_{bulk}$  – скорость движения СМЕ от Солнца,  $\mathbf{V}_{ex}$  – скорость расширения облака СМЕ. Точками **a**, **b** отмечены моменты начала вхождения трассы радиосвязи в СМЕ и выхода из него. Точкой **o** отмечен условный центр СМЕ. Расстояние между точками MN –  $\mathbf{R}_{MN}$  – проекция расстояния между трассами на плоскость эклиптики в точках максимального сближения трасс с Солнцем.

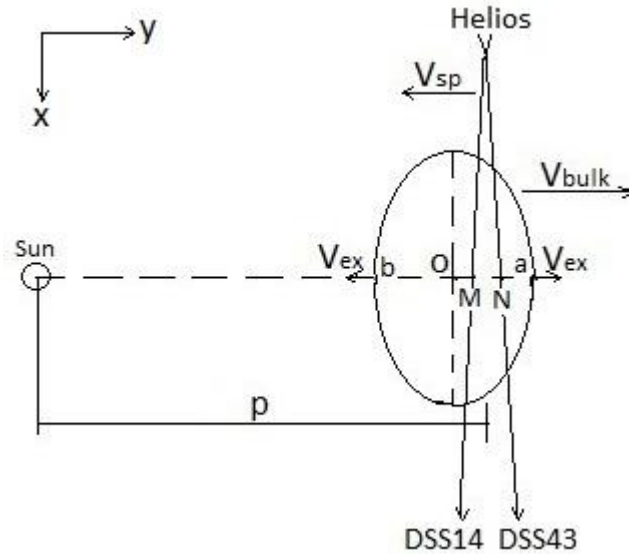


Рис. 2. Схема просвечивания СМЕ радиоволнами в проекции на плоскость эклиптики.

$V_{sp}$  – скорость приближения трасс к Солнцу,  $V_{bulk}$  – скорость движения СМЕ от Солнца,  $V_{ex}$  – скорость расширения облака СМЕ. Точками *a*, *b* отмечены моменты начала вхождения трассы радиосвязи в СМЕ и выхода из него. Точкой *o* отмечен условный центр СМЕ. Расстояние между точками *MN* –  $R_{MN}$  – проекция расстояния между трассами на плоскость эклиптики в точках максимального сближения трасс с Солнцем.

Расстояние от точки *a* до точки *с* каждая трасса проходит за время  $t_{in}$ , а расстояние от точки *с* до точки *b* каждая трасса проходит за время  $t_{out}$ . По определению эти расстояния одинаковы. В этом случае можно определить проекцию скорости  $V_{ex}$ :

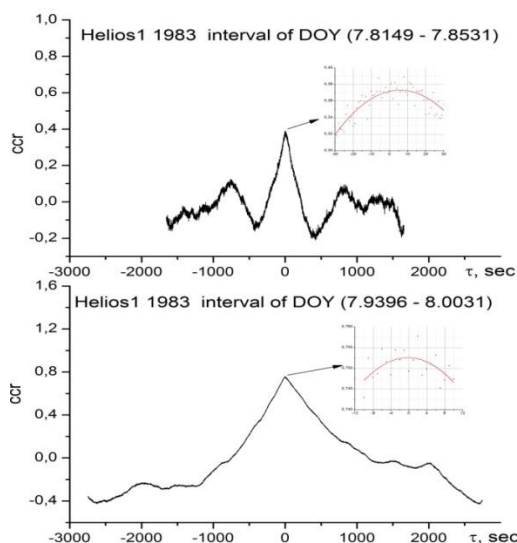
$$V_{ex} = \frac{V_{bulk}(t_{out} - t_{in}) \mp V_{sp}(t_{out} - t_{in})}{t_{out} + t_{in}}$$

Знак «+» перед  $V_{sp}$  относится к случаю, когда трассы удаляются от Солнца. Одновременные измерения в двух пунктах позволяют провести кросс-корреляционный анализ данных для оценки величины временной задержки  $\tau$  при последовательном пересечении неоднородностями плазмы одну трассу за другой, находящихся на расстоянии  $R_{MN}$ . Эта оценка позволяет определить суммарную скорость  $V_{rel} = V_{bulk} \pm V_{sp} = R_{MN}/\tau$  (используется модуль  $\tau$ ). [2,5]. Тогда величину проекции скорости  $V_{ex}$  можно оценить из формулы:

$$V_{ex} = \frac{R_{MN}(t_{out} - t_{in})}{t_{out} + t_{in}}$$

Кросс-корреляционные функции –  $ccr(\tau)$  – изменений Фарадеевского вращения  $\Delta\Psi(t)$ , полученные для одновременных измерений на DSS14 и DSS43, в периоды времени (в долях суток): первый (7.8149 – 7.8531) и второй (7.9396 – 8.0031) приведены на рисунке 3. В оценке кросс-корреляции участвовали все данные указанных периодов измерений. Для уточнения положения  $\tau_{max}$  максимума функции  $ccr(\tau)$  использована аппроксимация  $ccr(\tau)$  параболой ( $a*\tau^2 + b*\tau + c$ ) части функции  $ccr(\tau)$  для коротких интервалов  $\tau$ . В этом случае  $\tau_{max} = -b/2a$ . В результате было получено: для первого интервала  $\tau_{max1} = 4.5 \pm 0.7$  сек, для второго интервала  $\tau_{max2} = -1.2 \pm 0.5$  сек. Заметим, знак  $\tau_{max}$  зависит от того, какая трасса радиозондирования в данном интервале времени была ближе к Солнцу (к плазме СМЕ). Средняя величина  $R_{MN}$ : для первого интервала -  $R_{MN1} = 1626.7$  км, для второго интервала -  $R_{MN2} = 1973.7$ . Соответственно, получаем

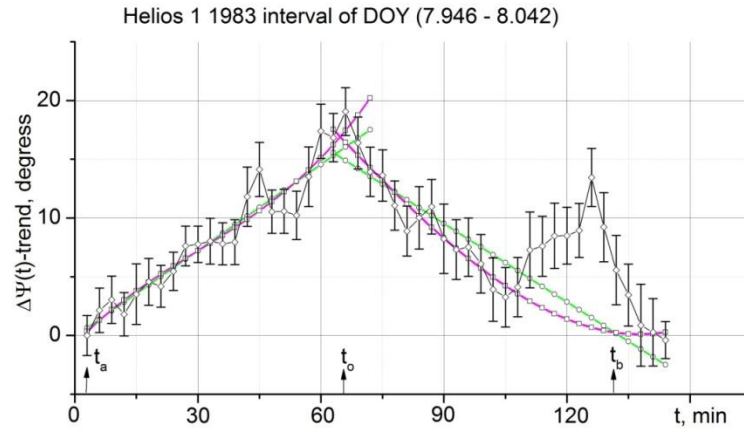
суммарные скорости:  $V_{rel1} = 362.2 \pm 57.6$  км/с,  $V_{rel2} = 1644.7 \pm 664.8$  км/с. Средняя скорость приближения радиотрассы к Солнцу (плазме СМЕ)  $V_{sp} = 41.07$  км/с.



**Рис.3. Кросс-корреляционные функции  $ccf(\tau)$  изменений Фарадеевского вращения  $\Delta\Psi(t)$ , полученные для одновременных измерений на DSS14 и DSS43, в периоды времени (в долях суток): первый (7.8149 – 7.8531) и второй (7.9396 – 8.0031). Для уточнения положения  $\tau_{max}$  максимума функции  $ccf(\tau)$  использована аппроксимация  $ccf(\tau)$  параболой ( $a*\tau^2 + b*\tau + c$ ) части функции  $ccf(\tau)$  для коротких интервалов  $\tau$  (показаны на вставках).**

То, что проекция средней скорости удаления СМЕ от Солнца  $V_{bulk2}$  почти в  $\sim 5$  раз больше проекции средней скорости удаления солнечного ветра  $V_{bulk1}$ , ускоряемого Альвеновскими волнами [7], ещё раз указывает, что на втором интервале радиотрассы проходили через плазменную неоднородность, похожую на СМЕ.

Для оценки скорости расширения СМЕ на зависимости  $\Delta\Psi_{DSS43}(t)$  с вычетом тренда определим момент начала соприкосновения радиотрассы с СМЕ -  $t_a$ , момент прохождения центра СМЕ -  $t_0$  и момент выхода радиотрассы из СМЕ -  $t_b$ . С этой целью второй интервал (см. рисунок 1) сначала разделим на последовательные трёхминутные куски, в которых найдём средние значения остатка  $\Delta\Psi_{DSS43}(t)$  и стандартные отклонения. Затем с первой точки интервала до середины интервала и с середины интервала до конца интервала по усреднённым данным проведём два полинома первой и второй степеней. Экстраполируем полиномы до пересечения с нулём и между собой. За  $t_a$  и  $t_b$  принимаем моменты времени, когда полином больше нуля на концах интервала. За  $t_0$  принимаем точку пересечения полиномов второй степени. Заметим, что  $t_0$  не совпадает с серединой временного интервала. В случае совпадения  $t_0$  с серединой интервала  $V_{ex} = 0$  - СМЕ движется без расширения.



**Рис.4. Зависимости  $\Delta\Psi_{DSS43}(t)$  с вычетом тренда. Показаны момент начала соприкосновения радиотрассы с СМЕ -  $t_a$ , момент прохождения центра СМЕ –  $t_o$  и момент выхода радиотрассы из СМЕ –  $t_b$ .**

В результате были получены:  $t_{in} = 3690 \pm 90$  сек и  $t_{out} = 4050 \pm 90$  сек. Затем вычислена величина проекции скорости расширения СМЕ на плоскость эклиптики, которая равна:  $V_{ex} = 76.5 \pm 20.5$  км/с .

#### **Заключение**

Полученные результаты показывают, что радиозатменными методами с использованием космических аппаратов, заходящих (выходящих) за Солнце можно оценить скорость расширения СМЕ.

Формула, полученная для оценки  $V_{ex}$ , пригодна и для других схем радиозондирования, например, когда два космических аппарата излучают радиоволны в сторону Земли, а на Земле принимают сигналы либо один приемник, либо одновременно несколько, разнесённых на большие расстояния, приёмников; когда передатчик космического аппарата когерентно связан с земным высокостабильным генератором (Up/DownLink) и т.п.

*Работа выполнена при частичной поддержке программы ПРАН № 22 "Фундаментальные проблемы исследований и освоения Солнечной системы".*

#### **Литература**

1. Bird M.K. et al. //Solar Physics. 1985. V.98.P.341-368
2. Efimov A.I. et al. //Astronomy Letters. 1996. V.22.No.6.P785-790
3. Jensen E.A., Russell C.T. //Geophysical Research Letters. 2008.V.35.P.L02103(1-5)
4. Andreev V.E. et al. //Astronomy Reports. 1997, V.41.No.2.P.227-235
5. Ефимов А.И. и др. //Солнечно-земная физика.2008.Т.1.Вып.12.С.114-118
6. Patzold M. et al. //Solar Physics. 2012. V.279. P.127-152
7. Efimov A.I. et al. //Solar Physics. 2015. DOI 10.1007/s11207-015-0687-y