

Оценка параметров облака коронального выброса массы по данным радиозондирования

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

Показано, что схема радиопросвечивания в режиме когерентного ответа позволяет оценивать не только скорость движения неоднородностей плазмы в короне Солнца, но и получать информацию о других динамических характеристиках облака СМЕ.

Структура облака СМЕ имеет разрезанную, неравномерно распределённую плотность. Часть облака, где наибольшая плотность, практически не расширяется за время около 100 сек.

«Хвостовая» часть имеет тенденцию к расширению с ускорением около 0.428 км/с^2 . Впереди облака на расстоянии $\sim 74000 \text{ км}$ (при $\dot{\epsilon}=0$), скорее всего, движется ударный фронт шириной $\sim 99840 \text{ км}$. Максимальная скорость изменения интегральной плотности плазмы на ударном фронте достигает $\sim 8 \text{ hexem/s}$.

It is shown that the scheme of radio illumination in the coherent response mode allows to estimate not only the velocity of plasma inhomogeneities in the solar corona, but also to obtain information about other dynamic characteristics of the CME cloud.

The structure of the CME cloud has a cut, unevenly distributed density. The part of the cloud, where the density is highest, practically does not expand during about 100 seconds. The "tail" part tends to expand with an acceleration of about 0.428 km/s^2 . Ahead of the cloud at a distance of $\sim 74000 \text{ km}$ (at $\dot{\epsilon}=0$), most likely moving shock front width of $\sim 99840 \text{ km}$ and the maximum rate of change of the integral of plasma density on the shock front reaches $\sim 8 \text{ hexem/s}$.

В период август-октябрь 2004 года проводились сеансы радиозондирования околосолнечного пространства. Сеансы проводились в режиме когерентного ответа, когда сигнал сантиметрового ($f_{x_up} \sim 7.1 \text{ ГГц}$) диапазона излучался с Земли, принимался на борту космического аппарата МЕХ (КА Mars Express). Затем с сохранением фазы переизлучался назад на Землю (на частотах $f_{x_down} \sim 8.4 \text{ ГГц}$ и $f_{s_down} \sim 2.3 \text{ ГГц}$), где принимался наземным пунктом дальней космической связи, например, DSS63 (Madrid). В такой схеме радиозондирования влияние плазменных неоднородностей околосолнечного пространства дважды проявляется в принятых на Земле сигналах. Следует заметить, что траектории лучей «вверх» (в дальнейшем «**up**» – от Земли к МЕХ) и «вниз» (в дальнейшем «**down**» - от МЕХ к Земле) разнесены в пространстве. Это позволяет отдельно анализировать события, происшедшие во время хода луча **up** и **down**.

В серии просвечиваний околосолнечного пространства в пяти сеансах было зафиксировано прохождение радиолучей через плазменные облака корональных выбросов (coronal mass ejection – СМЕ) [1,2]. Облака выбросов по мере удаления от Солнца имеют различные формы [1,2,4]. На изображениях коронографов видно (например, картинки LASCO на КА SOHO), что одной из форм, приобретаемой облаком на расстоянии около 5-10 радиусов Солнца (R_s), в грубом приближении, является круг (эллипс) [1,2,4]. Радиозондирование именно такого облака, по-видимому, и происходило 21 сентября 2004 года (DOY265; точка максимального сближения радиотрасс к Солнцу находилась на расстоянии $\sim 8.46R_s$; к сожалению, данные LASCO за эту дату в каталоге SOHO отсутствуют [11]). Но приборы на КА ACE, находящегося около точки Лагранжа L1, зафиксировали повышение плотности потоков частиц над фоновым потоком (почасовые усреднения данных) [12].

Целью данной работы является выявление динамических параметров облака СМЕ в упомянутом сеансе из данных радиозондирования в режиме когерентного ответа.

Методика.

Из земного высокостабильного сигнала f_{up} на борту когерентно формировались два сигнала X- и S-диапазонов умножением f_{up} на коэффициенты $k_x = 880/749$ и $k_s = 240/749$ и переизлучались на Землю. Составив из частот принятых радиосигналов соответствующие приведенные частоты $df_{x_up}(t)$ и $df_{x_down}(t)$, получено (в первом приближении) влияние плазменных неоднородностей на сигналы на трассах **up** и **down**[2]:

$$df_{x_down}(t) = \frac{3}{11} \cdot \frac{121}{112} \cdot [f_{S_down}(t) - \frac{k_s}{k_x} \cdot f_{x_down}(t)] = \frac{40.31 \cdot 10^6}{c \cdot f_{x_down}} \cdot \frac{dN_{e_down}(t)}{dt} \quad (1),$$

$$df_{x_up}(t) = \frac{749}{880} \cdot [\Delta f_x(t) - df_{x_down}(t)] = \frac{40.31 \cdot 10^6}{c \cdot f_{x_up}} \cdot \frac{dN_{e_up}(t)}{dt} \quad (2),$$

где $f_{S_down}(t)$ и $f_{x_down}(t)$ значения частот, принятых на Земле радиосигналов; Δf_x – величина Допплеровского сдвига частоты f_{x_up} , рассчитанная исходя из полученных f_{x_down} , в процессе сеанса; c – скорость света в вакууме. Величины $\frac{dN_{e_up}(t)}{dt}$ и $\frac{dN_{e_down}(t)}{dt}$ являются зависимостями от времени скоростей изменения интегральной плотности плазмы вдоль трасс распространения радиоволн и измеряется в **hexem/s** (1 **hexem** = 1 TECU = 10^{12} sm^{-2}).

Изменения интегральной плотности плазмы вдоль трасс были получены интегрированием по времени упомянутых величин $\frac{dN_{e_up}(t)}{dt}$ и $\frac{dN_{e_down}(t)}{dt}$, которые представлены на рисунке 1.

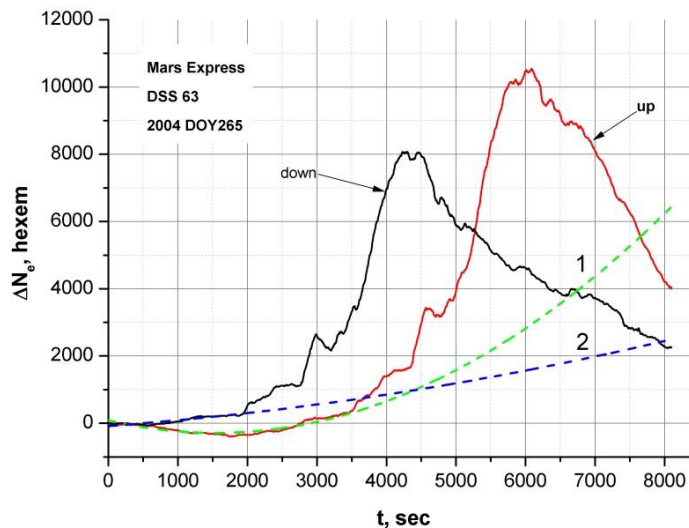


Рис.1. Изменения интегральной плотности плазмы вдоль трасс up и down. Пунктирными кривыми 1 и 2 показан ход изменений фоновой интегральной плотности плазмы.

Оценка изменений фоновой интегральной плотности плазмы вдоль трасс произведена путём экстраполяции полиномов 2-й степени, рассчитанных методом МНК по экспериментальным кривым на участках от начала сеанса до точек 2000 сек и 3500 сек для трасс **down** и **up**.

Значения обеих кривых со временем сначала увеличиваются до максимальных величин, а после достижения пиков начинают уменьшаться. Причём достижение пиков происходит в разное время (пиков, к тому же, два).

Для оценки схожести отпечатков облака плазмы на каждой трассе, проведён расчёт зависимости коэффициента кросс-корреляции от временной задержки для df_{X_down} и df_{X_up} (рисунок 2):

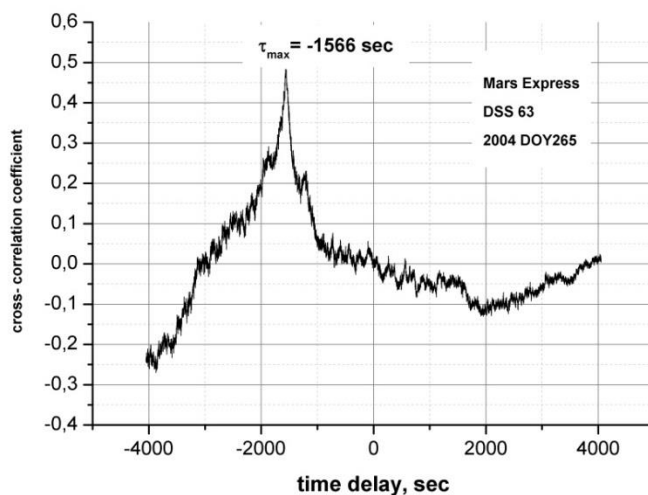


Рис.2. Зависимость коэффициента кросс-корреляции от временной задержки.

Анализ показал, что отпечаток влияния неоднородностей плазмы на трассе **up** оказался на Земле на **1566** сек позже, чем приход аналогичного отпечатка с трассы **down**.

В работах [2,3,5] показано, что в режиме когерентного ответа луч на трассе **up** сначала проходит через облако плазменной неоднородности (создается отпечаток), доходит до КА и возвращается назад (принимается первый отпечаток). Луч на трассе **down**, выходя из КА, также проходит через облако плазменной неоднородности (создается отпечаток), которое сместилось с места пересечения луча **up**, поступает на приёмник (принимается второй отпечаток). Длина трассы **up** от облака до КА и обратно практически в два раза длиннее длины трассы **down** от КА до облака, к тому же облако перемещается со скоростью V_{bulk} в сторону от Солнца. Поэтому в величине полученной временной задержки содержится кроме задержки из-за баллистических параметров движения КА относительно Земли и Солнца и задержка из-за перемещения облака. В работе [2] рассчитаны длины расстояний между трассами **up** и **down**, которое облако проходит в направлениях, лежащих между углами $\pm\hat{\epsilon}$, отсчитываемых от направления, перпендикулярно к трассам, и пересекает трассы. Там же приведены скорости движения облака $V_{bulk}(\hat{\epsilon})$.

Известно [4, 10], облака СМЕ расширяются. В работах [6, 9], приведены алгоритмы оценки скорости расширения облака V_{ex} при условии, когда известно V_{bulk} . В алгоритмах предполагается наличие в форме облака симметрии относительно определённого центра. Расстояние от точки захода луча в облако до точки, определённой как центр, каждая трасса проходит за время t_{in} , а расстояние от точки центра до точки выхода из облака каждая трасса проходит за время t_{out} . По определению эти расстояния одинаковы. В этом случае можно определить проекцию скорости V_{ex} , лежащей в одной плоскости с V_{bulk} :

$$V_{ex} = \frac{V_{bulk}(t_{out}-t_{in})}{t_{out}+t_{in}} = k_{ex} * V_{bulk}. \quad (3)$$

На рисунке 3 (а) показаны остатки изменений интегральной плотности плазмы после вычета полиномов, показанных на рисунке 1. Оценки t_{in} и t_{out} можно проводить разными

способами. Например, можно определить уровни, которые отстают от максимального значения в e -раз ниже, для каждой трассы (уровни на рис. 3(a) показаны пунктирным и штрих-пунктирным отрезками). В этом случае точками входа луча в облако и выхода луча из облака являются точки пересечения горизонтальных линий с кривыми.

Можно поступить и следующим образом: кривые, показанные на рисунке 3(a), поделить на соответствующие максимальные значения и получить кривые, показанные на рисунке 3(b).

Кривые для трассы **up** сдвинуты по оси времени на 1566 сек на обеих частях рисунка.

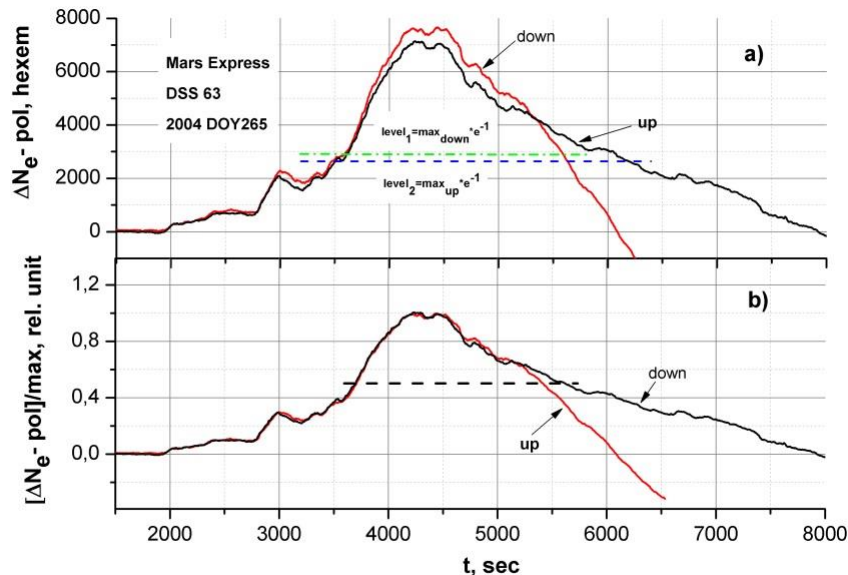


Рис.3. Изменения интегральной плотности плазмы вдоль трасс **up и **down** после вычета фоновых кривых, показанных на рисунке 1 - (a). Нормированные кривые для двух трасс - (b). Кривые для трассы **up** сдвинуты влево по оси времени на 1566 сек.**

Предположим всё, что находится над уровнем 0.5 (на рисунке 3(b) уровень показан горизонтальной пунктирной линией) соответствует телу облака СМЕ. В этом случае точками входа луча в облако и выхода луча из облака являются точки пересечения горизонтальной линии с нормированными кривыми. Точка прохождения лучами центра облака совпадает с моментом достижения нормированных кривых максимума.

Для наиболее точного нахождения данной точки проведены аппроксимирующие полиномы по нормированным кривым (полиномы на рисунке не показаны). Точки пересечения полиномов по «входу» и по «выходу» приняты за соответствующий максимум (эта точка лежит примерно в середине между двумя «горбами» обеих кривых). В этом случае t_{in} для луча **up** равна разнице между временем в точке максимума и временем точки входа, а t_{out} - разница между временем в точке выхода и временем точки максимума. Аналогично можно определить t_{in} и t_{out} для луча **down**.

Рефракция радиоволны, проходящей через плазменные неоднородности, характеризуется углом рефракции – ξ . При угле рефракции $\xi \ll 1$, среде сферически симметричной и плазменной неоднородности, пересекающей трассу со скоростью V_{bulk} , следуя работам [7,8], можно записать для каждой трассы:

$$\xi_{up}(t) = \frac{c}{f_{X_{up}} \cdot V_{bulk}} df_{X_{up}}(t) \quad \text{и} \quad \xi_{down}(t) = \frac{c}{f_{X_{down}} \cdot V_{bulk}} df_{X_{down}}(t) \quad (5)$$

Подставив известные значения в указанные формулы, получены зависимости величин углов рефракции от времени, которые приведены на рисунке 4(b) (высокочастотный шум кривых отфильтрован вейвлетом Хаара) при скорости движения облака $V_{\text{bulk}} = 390$ км/с.

Из формул (1,2,5) следует, что угол рефракции напрямую связан со скоростью изменения интегральной плотности плазмы вдоль трассы. Кривые, показанные на рисунке 4(a), дают представление о скорости изменения ΔN_e от времени (высокочастотный шум этих кривых также отфильтрован вейвлетом Хаара).

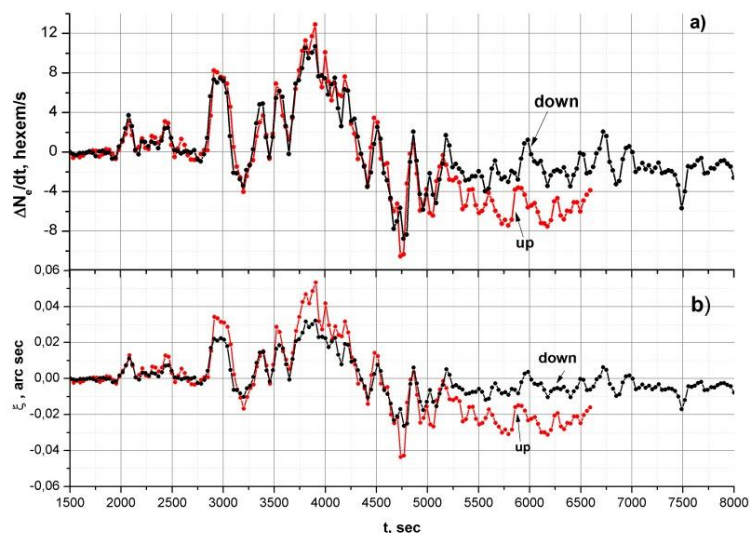


Рис. 4. Скорость изменения интегральной плотности плазмы на трассах **up** и **down** – (a). Угол рефракции для $\xi=0$ лучей **up** и **down** – (b). Кривые для трассы **up** сдвинуты по оси времени на 1566 сек.

Из рисунка следует, что облако на трассе **up** более плотное, чем облако на трассе **down**. Облако имеет неоднородную структуру. В момент времени $t \sim 3000$ сек на обеих трассах наблюдается достаточно плотная область, соизмеримая с максимальной плотностью в основной части облака. Возможно, это уплотнение среды связано с ударным фронтом, которая бежит впереди облака СМЕ.

Результаты.

Сдвигая уровень, указанный на рисунке 3(b) от 0.4 до 0.7 и оценивая t_{in} и t_{out} , получено значение $k_{\text{ex}} = 0.35 \pm 0.06$ для трасс **up** и **down**. Хотя значения коэффициентов k_{ex} для обеих трасс укладываются в указанные пределы, следует отметить, что k_{ex} для трассы **down** больше k_{ex} трассы **up** для всех уровней ниже на $15 \div 20\%$.

Следует заметить, кривые выше уровня 0.7 практически совпадают и имеют почти симметричный вид относительно упомянутого центра. Это, скорее всего, означает, что облако в наиболее плотной части практически не расширяется.

Оценки величин t_{in} и t_{out} по данным, показанным на рисунке 3(a), равны $k_{\text{ex}} = 0.28$ для трассы **up** и $k_{\text{ex}} = 0.37$ для трассы **down**, что также укладывается в указанные выше диапазоны оценок k_{ex} . Можно предположить, что часть облака, которая относится к «хвостовой» её части, расширяется с ускорением. Величина ускорения, например, при $\xi=0$ и времени прохождения облаком расстояния между трассами $\tau \approx 82$ сек [2] равна $a_{\text{ex}} = 0.428$ км/с².

Значения скорости расширения облака СМЕ от направления движения облака по отношению к лучам **up** и **down** $V_{ex}(\acute{\epsilon})$ (при $k_{ex} = \text{const}$) при указанных выше условиях, сведены в таблицу.

В таблице также приведены значения максимумов углов рефракции лучей на трассах **up** и **down** в зависимости от скорости V_{bulk} , которая в свою очередь зависит от направления движения облака $\acute{\epsilon}$: $\xi_{up}^{max}(\acute{\epsilon})$ и $\xi_{down}^{max}(\acute{\epsilon})$.

Из таблицы видно, что если данное облако СМЕ движется в сторону отрицательных углов $\acute{\epsilon}$, то скорость его растёт, Если облако двигается в сторону положительных углов $\acute{\epsilon}$, то скорость его уменьшается. Соответственно, скорость расширения облака находится в аналогичной зависимости от углов $\acute{\epsilon}$. Максимальная величина угла рефракции, наоборот, растёт, если облако движется в направлении положительных углов $\acute{\epsilon}$ и уменьшается, если движение облака происходит в сторону отрицательных углов $\acute{\epsilon}$.

Таблица.

$\acute{\epsilon}$, deg[2]	V_{bulk} , km/sec[2]	V_{ex} , km/sec	$\xi_{up}^{max}(\acute{\epsilon})$, arc.sec	$\xi_{down}^{max}(\acute{\epsilon})$, arc.sec
-30	600	210±36.0	0.035	0.021
-20	514	179.9±31.1	0.040	0.23
-10	440	154±26.4	0.047	0.028
0	390	136.5±23.4	0.053	0.032
10	380	133±22.8	0.055	0.033
20	370	129.5±22.2	0.056	0.034
30	360	126±21.6	0.058	0.035

Заключение.

Показано, что схема радиозондирования в режиме когерентного ответа позволяет оценивать не только скорость движения неоднородностей плазмы в короне Солнца, но и получать информацию о других динамических характеристиках облака СМЕ.

Структура облака СМЕ имеет разрезанную, неравномерно распределённую плотность. Часть облака, где наибольшая плотность, практически не расширяется за время около 100 сек. «Хвостовая» часть имеет тенденцию к расширению с ускорением около 0.428 км/с^2 . Впереди облака на расстоянии $\sim 74000 \text{ км}$ (при $\acute{\epsilon}=0$), скорее всего, движется ударный фронт шириной $\sim 99840 \text{ км}$. Максимальная скорость изменения интегральной плотности плазмы на ударном фронте достигает $\sim 8 \text{ hexem/s}$.

Работа выполнена при частичной поддержке программы Фундаментальных исследований президиума РАН "Экспериментальные и теоретические исследования объектов Солнечной системы и планетных систем звезд. Переходные и взрывные процессы в астрофизике"

Литература

1. Pätzold M. et al. //Solar Physics. 2012. V.279. P.127-152.
2. Pätzold M. et al.//Planetary and Space Science. 2016. V.127. P.44-90.
3. Wohlmuth R. et al.//Radio Science. 1997. V.32.No.2.P.617-628.

4. Филиппов Б.П. Эруптивные процессы на Солнце. 2007. ФИЗМАТЛИТ. С.216
5. Якубов В.П. Допплеровская сверхбольшезазорная интерферометрия. 1997. Томск. С.245
6. Jensen E.A., Russell C.T. // Geophysical Research Letters. 2008. V.35. P.L02103(1-5)
7. Яковлев О.И. Космическая радиофизика. 1998. М. РФФИ.
8. Андреев В.Е// Материалы VI Всероссийской научной конференции. 2016. Муром. С.413
9. Андреев В.Е// Материалы VII Всероссийской научной конференции. 2017 Муром. С.310
10. Savani N.P. et al. // The Astrophysical Journal. 2011. 731:109 (6pp)
11. SOHO Lasco CME catalog. -URL: https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/
12. The ACE science center. -URL: <http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/>