

УДК 523.62 726

## Зондирование околосолнечной плазмы в двух модификациях метода просвечивания

Н. А. Лотова, В. И. Костромин, П. Б. Казимирский, О. П. Медведева

В 1986—1987 гг. осуществлены несколько серий экспериментов по зондированию околосолнечной межпланетной плазмы в двух независимых модификациях метода просвечивания. В диапазоне метровых волн исследуется радиальная зависимость угла рассеяния радиоволн, в диапазоне сантиметровых—радиальная зависимость индекса мерцаний. Проводится сопоставление данных о радиальной зависимости угла рассеяния радиоволн  $\Theta(R)$  и индекса мерцаний  $m(R)$  в разных по времени сериях наблюдений. Установлено, что в период с октября 1986 по март 1987 г. положение переходной области не испытывало сильных изменений. Ее основное расположение в области радиальных расстояний от Солнца  $R \sim 16\text{--}30 R_{\odot}$ —это предельно удаленное от Солнца положение, характерное для состояния глубокого минимума солнечной активности.

*SOUNDING OF NEAR-SOLAR PLASMA BY TWO MODIFICATIONS OF THE OCCULTATION METHOD, by Lotova N. A., Kostromin V. I., Kazimirskij P. B., Medvedeva O. P.*—Several series of experiments on sounding near-solar interplanetary plasma were carried out in 1986—1987 using two independent modifications of the occultation method. Radial dependences of the radio-wave scattering angle and the scintillation index were studied in the meter and centimeter wavelength ranges, respectively. The data on radial dependence for the radio-wave scattering angle  $\Theta(R)$  and those for the scintillation index  $m(R)$  were compared in different observation series. It was found out that during the period from October 1986 to March 1987 the transition region did not shift essentially. Its location within the radial distance  $R \sim 16\text{--}30 R_{\odot}$  is the farthest from the Sun and is characteristic of a deep solar minimum.

В изучении механизма ускорения солнечного ветра большое значение имеет вопрос о пространственной локализации области формирования сверхзвукового потока, переходной области солнечного ветра [2]. Работа посвящена развитию регулярных исследований временной динамики переходной области на основе зондирования околосолнечной плазмы методом просвечивания. Чтобы, по возможности, сократить временной интервал между соседними сериями наблюдений, осуществлены эксперименты двух типов, в которых в качестве просвечивающих используются радиосточники различных классов. В диапазоне сантиметровых волн ( $\lambda = 1.35$  см) изучаются мерцания мазерных источников линии водяного пара, радиальная зависимость индекса мерцаний  $m(R)$ . В диапазоне метровых волн ( $\lambda = 2.9$  м) изучаются видимые угловые размеры квазаров, радиальная зависимость угла рассеяния радиоволн  $\Theta(R)$ . В зоне формирования сверхзвукового потока зависимости  $m(R)$ ,  $\Theta(R)$  обнаруживают усиление рассеяния волн, которое позволяет определить положения переходной области, ее внутренней  $R_{\text{внутр}}$  и внешней  $R_{\text{внеш}}$  границ. Ранее было показано, что возможность сочетания экспериментов двух типов при изучении переходной области основана на совпадении формы радиальной зависимости измеряемых характеристик—угла рассеяния радиоволн  $\Theta(R)$  и индекса мерцаний  $m(R)$ —в близких к Солнцу ( $R \leq 50 R_{\odot}$ ) областях среды [3]. Вне переходной области, как в области дозвукового ( $R \leq 16 R_{\odot}$ ), так и сверхзвукового ( $R \geq 20 R_{\odot}$ ) течения, зависимости  $\Theta(R)$ ,  $m(R)$  имеют степенной вид с одинаковым показателем  $\alpha = -1.6$ :

$$\Theta(R) \sim R^{-1.6}; \quad m(R) \sim R^{-1.6}. \quad (1)$$

В переходной области солнечного ветра возникает усиление рассеяния радиоволн, которое обнаруживается по отклонению характеристик

$\Theta(R)$ ,  $m(R)$  от степенной зависимости (1). При этом формы зависимостей  $\Theta(R)$ ,  $m(R)$  также совпадают.

В период с октября 1986 по март 1987 г. осуществлены три серии наблюдений. В двух сериях эксперименты проводились на радиотелескопе ДКР-1000 Физического института АН СССР. В наблюдениях на волне  $\lambda=2.9$  м использовался интерферометр, антеннами которого служили две половины полотна восток — запад ДКР-1000. Длина базы интерферометра составляла  $d \approx 500$  м. Ежедневно измерялась амплитуда интерференционной картины  $M(t)$  от источников (кварзаров) при

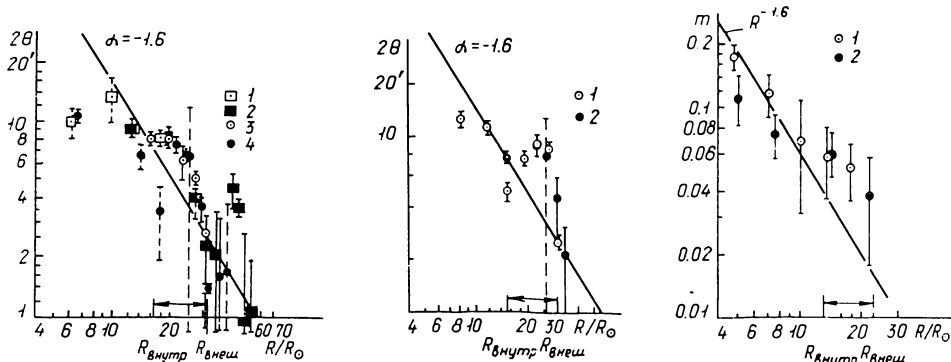


Рис. 1. Радиальная зависимость полного угла рассеяния радиоволн  $2\Theta(R)$  по наблюдениям источников: 1, 2 — 3С 275; 3, 4 — 3С 279. Октябрь 1986 г. Фазы: 1, 3 — сближения источников с Солнцем; 2, 4 — удаления источников от Солнца

Рис. 2. То же, что на рис. 1, но для источника 3С 2. Март 1987 г. Фаза: 1 — сближения, 2 — удаления

Рис. 3. Радиальная зависимость индекса мерцаний  $m(R)$  по наблюдениям источника IRC — 20 431. Декабрь 1986 г. Фаза: 1 — сближения, 2 — удаления

сближении их с Солнцем: 3С 275, 3С 279 — в октябре 1986 г. и 3С 2 — в марте 1987 г. Методика наблюдений и обработки экспериментальных данных приведена в [1, 3]. Угол рассеяния радиоволн в окосолнечной среде  $\Theta$  связан с измеряемой амплитудой  $M$  соотношением [1, 3]:

$$M = M_0 \exp \left[ -\pi^2 \Theta^2 / (\Delta\varphi^2) \right], \quad (2)$$

где  $M_0$  — глубина модуляции от источника во внеатмосферные дни, когда  $\Theta \rightarrow 0$ ;  $\Delta\varphi = \lambda/d$  — ширина главного интерференционного лепестка диаграммы направленности антенны.

На рисунках 1, 2 и в табл. 1 приведены результаты измерений радиальной зависимости угла рассеяния радиоволн  $\Theta(R)$ , по которым определены положения границ переходной области  $R_{\text{внутр}}$ ,  $R_{\text{внеш}}$  (табл. 2).

В серии наблюдений в декабре 1986 г. эксперименты проводились на радиотелескопе РТ-22. На волне  $\lambda=1.35$  см наблюдались мерцания мазерного источника линии водяного пара IRC—20 431 во время его сближения с Солнцем. Методика таких наблюдений и обработки полученных данных приведена в [4]. На рис. 3 и в табл. 3 представлены результаты измерений радиальной зависимости индекса мерцаний  $m(R)$  и положения границ переходной области  $R_{\text{внутр}}$ ,  $R_{\text{внеш}}$  (табл. 2).

По табл. 2 можно провести сравнительный анализ геометрии переходной области в межпланетном пространстве и обсудить ее временную динамику в период с октября 1986 по март 1987 г. Как видно из табл. 2, положение переходной области не обнаруживает резких, значительных изменений. Наблюдения охватывают временной интервал, совпадающий с состоянием минимума солнечной активности. Основное положение переходной области на радиальных расстояниях от Солнца  $R \sim 16\text{—}30 R_{\odot}$  совпадает с ее расположением, измеренным ранее по

Таблица 1. Результаты анализа интерференционной картины от просвечивающего источника

Дата	$R/R_{\odot}$	Просвечиваемос полушарие	$M/M_{\oplus}$	$2\theta$
1986 г. Источник ЗС 275				
30.09	17.7	ES	$0.685 \pm 0.025$	8.27'
1.10	13.4	ES	$0.628 \pm 0.009$	9.16
2.10	9.8	ES	$0.402 \pm 0.188$	12.84
3.10	6.1	ES	$0.585 \pm 0.112$	9.84
8.10	12.5	WS	$0.622 \pm 0.061$	9.26
10.10	19.9	WS	$0.680 \pm 0.069$	8.35
11.10	23.6	WS	$0.792 \pm 0.017$	6.49
12.10	27.3	WS	$0.914 \pm 0.032$	4.02
13.10	31.0	WS	$0.970 \pm 0.028$	2.34
14.10	34.7	WS	$0.975 \pm 0.040$	2.10
16.10	42.1	WS	$0.890 \pm 0.040$	4.58
17.10	45.8	WS	$0.927 \pm 0.012$	3.68
18.10	49.5	WS	$0.995 \pm 0.034$	0.94
19.10	53.3	WS	$0.993 \pm 0.015$	1.05
1986 г. Источник ЗС 279				
30.09	30.5	EN	$0.961 \pm 0.002$	2.67
1.10	26.8	EN	$0.867 \pm 0.024$	5.08
2.10	23.1	EN	$0.804 \pm 0.069$	6.27
3.10	19.4	EN	$0.695 \pm 0.020$	8.11
4.10	15.7	EN	$0.695 \pm 0.036$	8.11
10.10	6.4	WN	$0.544 \pm 0.052$	10.49
11.10	10.2	WN	$0.876 \pm 0.036$	4.88
12.10	13.9	WN	$0.786 \pm 0.053$	6.59
13.10	17.6	WN	$0.936 \pm 0.043$	3.45
14.10	21.3	WN	$0.728 \pm 0.038$	7.57
15.10	25.0	WN	$0.787 \pm 0.330$	6.57
16.10	28.7	WN	$0.928 \pm 0.021$	3.65
17.10	32.4	WN	$0.989 \pm 0.000$	1.40
18.10	36.1	WN	$0.985 \pm 0.040$	1.60
19.10	39.9	WN	$0.984 \pm 0.060$	1.70
1987 г. Источник ЗС 2				
14.03	30.0	ES	$0.964 \pm 0.002$	2.56
15.03	26.3	ES	$0.652 \pm 0.036$	8.79
16.03	22.6	ES	$0.621 \pm 0.081$	9.27
17.03	18.9	ES	$0.730 \pm 0.041$	7.53
18.03	15.2	ES	$0.872 \pm 0.030$	4.97
19.03	11.6	ES	$0.484 \pm 0.058$	11.55
20.03	8.0	ES	$0.407 \pm 0.080$	12.74
26.03	15.0	WS	$0.714 \pm 0.023$	7.79
27.03	18.7	WS	$0.760 \pm 0.005$	7.04
28.03	22.3	WS	$0.632 \pm 0.075$	9.10
29.03	26.0	WS	$0.695 \pm 0.311$	8.10
30.03	29.7	WS	$0.890 \pm 0.071$	4.59
31.03	33.4	WS	$0.974 \pm 0.027$	2.18

Таблица 2. Сравнительные данные по геометрии переходной области солнечного ветра

Источник	Период наблюдений	$R_{\text{внутр}}/R_{\odot}$	$R_{\text{внеш}}/R_{\odot}$
ЗС 275	Октябрь 1986 г.	16.5	31.0
ЗС 279			
IRC—20 431	Декабрь 1986 г.	13.0	$\approx 25.0$
ЗС 2	Март 1987 г.	15.5	30.0

Таблица 3. Результаты анализа мерцаний мазерного источника линий водяного пара IRC—20 431

Дата, декабрь 1986 г.	$R/R_{\odot}$	Просвечиваемое полушарие	$m$	Дата, декабрь 1986 г.	$R/R_{\odot}$	Просвечиваемое полушарие	$m$
19	17.5	EN	$0.052 \pm 0.015$	24	5.0	WN	$0.112 \pm 0.030$
20	13.9	EN	$0.059 \pm 0.023$	25	7.5	WN	$0.074 \pm 0.018$
21	10.3	EN	$0.070 \pm 0.039$	27	14.4	WN	$0.062 \pm 0.015$
22	7.1	EN	$0.116 \pm 0.025$	29	21.7	WN	$0.038 \pm 0.020$
23	4.8	EN	$0.177 \pm 0.025$				

наблюдениям угла рассеяния радиоволн в 1985 г. [3]. Сопоставление с ранее полученными данными [3] позволяет заключить, что такая конфигурация переходной области характерна для состояния глубокого минимума солнечной активности и среди известных значений соответствует предельному удалению от Солнца.

1. Бабий В. И., Виткевич В. В., Власов В. И. и др. Сверхкорона Солнца по наблюдениям 1959—1963 гг. // Астрон. журн.— 1965.— 42, вып. 1.— С. 107—116.
2. Лотова Н. А. Переходная область солнечного ветра // Геомагнетизм и аэрономия.— 1986.— 26, № 3.— С. 369—372.
3. Лотова Н. А., Алексеев Ю. И., Нагелис Я. В. Переходная область солнечного ветра по данным экспериментов по просвечиванию в диапазоне метровых волн // Кинематика и физика небес. тел.— 1987.— 3, № 4.— С. 70—74.
4. Lotova N. A., Blums D. F., Vladimirkii K. V. Interplanetary scintillation and the structure of the solar wind transonic region // Astron. and Astrophys.— 1985.— 150, N 2.— P. 266—272.

Ин-т зем. магнетизма, ионосферы  
и распространения радиоволн АН СССР, Троицк,  
Физ. ин-т им. П. Н. Лебедева АН СССР, Москва

Поступила в редакцию 30.10.87,  
после доработки 04.01.88

Окончание. Начало с. 50.

18. Frazier E. N., Stenflo J. O. Magnetic, velocity and brightness structure of solar faculae // Astron. and Astrophys.— 1978.— 70, N 6.— P. 789—799.
19. Krause F., Rüdiger G. On the turbulent decay of strong magnetic fields and the development of sunspot areas // Solar Phys.— 1975.— 42, N 1.— P. 107—119.
20. Semel M. Magnetic fields observed in a sunspot and faculae using 12 lines simultaneously // Astron. and Astrophys.— 1981.— 97, N 1.— P. 75—78.
21. Stenflo J. O. Magnetic-field structure of the photospheric network // Solar Phys.— 1973.— 32, N 1.— P. 41—63.

Астрон. обсерватория  
Киев, ун-та им. Т. Г. Шевченко,  
Крым. астрофиз. обсерватория АН СССР, Научный

Поступила в редакцию 30.10.87,  
после доработки 15.03.88