

УДК 523.62—726:520.87

Переходная область солнечного ветра по данным экспериментов по просвечиванию в диапазоне метровых волн

Н. А. Лотова, Ю. И. Алексеев, Я. В. Нагелис

Проведены эксперименты по просвечиванию околосолнечной межпланетной плазмы на волне $\lambda=2.92$ м. Радиальная зависимость угла рассеяния радиоволн $\theta(R)$ обнаруживает предсказываемое явление — аномальное усиление рассеяния в области радиальных расстояний от Солнца $R \approx (16-30) R_{\odot}$, которое отождествляется с переходной областью солнечного ветра. Анализ теоретических соотношений показывает, что в околосолнечной среде ($R \leq 40 R_{\odot}$) радиальные профили угла рассеяния $\theta(R)$ и индекса мерцаний $m(R)$ совпадают. Сочетание двух различных модификаций метода просвечивания значительно расширяет возможности изучения структуры и геометрии переходной области солнечного ветра.

SOLAR WIND TRANSITION REGION FROM OCCULTATION OBSERVATIONS WITHIN THE METER WAVELENGTHS, by Lotova N. A., Alekseev Yu. I., Nagelis Ya. V.—The occultation experiments using the interplanetary plasma near the Sun have been carried out at the meter wavelength, $\lambda=2.92$ m. The radial dependence of the scattering angle $\theta(R)$ displays the predicted phenomenon: the existence of the anomalous enhanced scattering region, stretching from about 16 to 30 R_{\odot} which is associated with the solar wind transition region. Analysis of the theoretical relations has shown that in the interplanetary medium close to the Sun ($R \leq 40 R_{\odot}$) both radial profiles of the scattering angle $\theta(R)$ and scintillation index $m(R)$ coincide. A combination of two different modifications of the occultation method extends significantly the possibilities in the investigations of the structure and geometry of the solar wind transition region.

Введение. Околосолнечная межпланетная плазма, область радиальных расстояний от Солнца $R \leq 40 R_{\odot}$, доступна для наблюдений лишь в затменных экспериментах методом просвечивания. Основные результаты изучения околосолнечной среды получены по наблюдениям мерцаний в диапазоне коротких сантиметровых волн [5—7, 10, 12, 15]. Обнаружена [5, 6, 12] переходная область солнечного ветра, физически выделенная область гелиосферы, в которой происходит основное ускорение солнечного ветра, переход от дозвукового режима течения к сверхзвуковому, $R \sim (10-20) R_{\odot}$. В параметрах межпланетной плазмы в переходной области возникают разные особенности, в том числе наблюдается усиление флуктуаций электронной концентрации в неоднородностях ΔN_e , которое обнаруживается по усилению индекса мерцаний в радиальной зависимости $m(R)$ [12]. Дальнейшее более полное исследование переходной области представляет огромный интерес для решения фундаментальных и прикладных задач по солнечному ветру.

Изучение околосолнечной среды по мерцаниям с привлечением квазаров затруднено тем, что в диапазоне коротких сантиметровых волн квазары являются сравнительно слабыми источниками и поэтому необходимо использовать наиболее крупные радиотелескопы, которые в значительной степени загружены. Исследования можно значительно расширить, если перейти к использованию диапазона метровых волн, в котором квазары являются мощными источниками и возможна постановка независимых наблюдений на разных радиотелескопах.

Диагностика переходной области по наблюдениям квазаров в метровом диапазоне волн. В исследованиях переходной области кроме мерцаний существенное значение приобретает известная модификация

метода просвечивания, основанная на изучении угла рассеяния радиоволн [1—3, 8, 11, 13]. Решение задачи рассеяния волн устанавливает взаимосвязь между измеряемой величиной, углом рассеяния θ и параметрами рассеивающей среды [4]:

$$\theta(R) \propto \lambda^2 \Delta N_e (L/a)^{1/2}, \quad (1)$$

где ΔN_e — средние квадратичные флуктуации электронной концентрации в неоднородностях среды; λ — длина волны излучения; a — линейный масштаб неоднородностей среды; L — толщина эффективно рассеивающего слоя. Так, изучение угла рассеяния волн θ позволяет получить ту же характеристику среды, которую дает изучение мерцаний, — радиальный профиль флуктуаций $\Delta N_e(R)$. Поскольку в переходной области солнечного ветра возникает явление аномального усиления индекса мерцаний m , обусловленное усилением средних квадратичных флуктуаций электронной концентрации неоднородностей среды ΔN_e [12], то, исходя из формулы (1), можно ожидать, что это явление будет приводить к усилению угла рассеяния радиоволн.

Наблюдения угла рассеяния $\theta(R)$ в отличие от мерцаний, которые изучаются в режиме слабого рассеяния, связаны с режимом сильного рассеяния, при котором выполняются неравенства: $s \gg 1$, $m \approx 1$, $\theta > 1$, где s — средний квадратичный набег фазы волны в среде за счет неоднородностей. Для реализации такого режима, как следует из (1), необходимо переходить к наблюдениям на длинных волнах, к диапазону метровых или декаметровых волн. В этом случае наблюдаемым проявлением переходной области будет появление в радиальной зависимости угла рассеяния $\theta(R)$ области повышенных значений относительно монотонной степенной зависимости вида

$$\theta(R) \propto R^{-1.6}, \quad (2)$$

которая следует из сравнения формулы (1) с выражением для индекса мерцаний [9, 12, 14]:

$$m \propto \lambda \Delta N_e [aL]^{1/2} \quad (3)$$

и отвечает зависимости

$$m(R) \propto R^{-1.6}, \quad (4)$$

характерной для областей дозвукового и сверхзвукового течений солнечного ветра [12]. Поскольку параметры ΔN_e и L , зависящие от радиального расстояния R в близких к Солнцу областях, входят в выражения (1) и (3) одинаково, форма радиальной зависимости угла рассеяния волн $\theta(R)$ будет совпадать с формой радиальной зависимости индекса мерцаний $m(R)$. Это обстоятельство — весьма существенно, так как позволяет сочетать две независимые модификации метода просвечивания в исследованиях переходной области.

Таким образом, данные о радиальной зависимости угла рассеяния радиоволн по квазарам $\theta(R)$ в дополнение к измерениям индекса мерцаний по мазерным источникам линии водяного пара и квазарам позволяют существенно расширить исследования, приступить к регулярному, комплексному изучению околосолнечной среды и переходной области солнечного ветра.

Методика наблюдений и результаты просвечивания среды. Для наблюдений использовался интерферометр с корреляционным радиометром на частоте 102.5 МГц при постоянной времени $\tau = 1.2$ с. Антеннами интерферометра служили отдельные секции крестообразного радиотелескопа ДКР-1000 Физического института АН СССР. Проведены два сеанса наблюдений, в которых межпланетная среда зондировалась при сближении с Солнцем источником ЗС 144 в период 8 — 23 июня и источником ЗС 279 в период 1 — 13 октября 1985 г. Измерялись ежедневные значения амплитуды интерференции. В наблюдениях источника

ЗС 279 интерферометр был образован двумя половинами полотна $E - W$ радиотелескопа ДКР-1000, длина базы интерферометра составляла $d=500$ м. Расчеты угла рассеяния радиоволн θ проводились по известным формулам [2], связывающим измеряемые значения глубины модуляции $M(t)$ с глубиной модуляции, обусловленной рассеянием радиоволн в межпланетной среде $M_{рас}(t)$:

$$M_{рас}(t) = M(t)/M^0, \quad (5)$$

где M^0 — глубина модуляции от источника во внеатменные дни, когда $\theta \rightarrow 0$ при $R \gtrsim 30 R_{\odot}$, и с углом рассеяния радиоволн θ

$$M_{рас} = \exp(-\pi^2 \theta^2 / \Delta\varphi^2), \quad (6)$$

$$\Delta\varphi = \lambda/d, \quad (7)$$

$\Delta\varphi$ — ширина интерференционного лепестка диаграммы направленности антенны. Таким образом, значения угла рассеяния волн определяются соотношением

$$\theta = [\Delta\varphi^2 \pi^{-2} (-\ln M_{рас})]^{1/2}. \quad (8)$$

Отметим, что для интерферометра, образованного двумя половинами полотна $E - W$ радиотелескопа ДКР-1000, формулой (6) можно пользоваться только тогда, когда измеряемые углы рассеяния $\theta < \lambda/d$.

Для контроля за стабильностью работы приемной аппаратуры проводились ежедневные измерения глубины модуляции калибровочного источника ЗС 273. Учет возможных медленных изменений коэффициента усиления осуществлялся введением в формулу (5) значения коэффициента

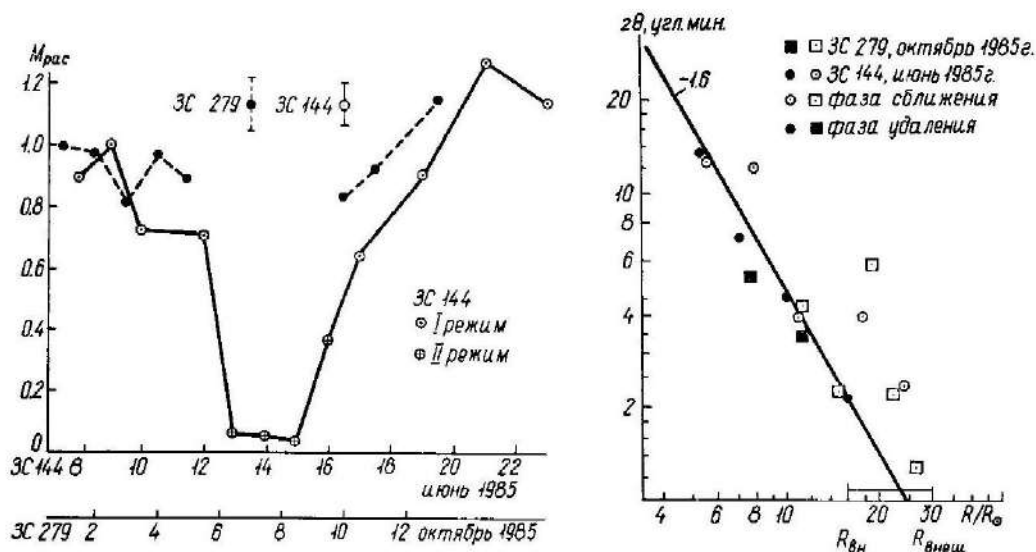


Рис. 1. Глубина модуляции интерференционной картины $M_{рас}(R)$ по наблюдениям источников ЗС 279 и ЗС 144

Рис. 2. Радиальная зависимость угла рассеяния радиоволн $\theta(R)$ по наблюдениям на волне $\lambda=2.92$ м источников ЗС 144 и ЗС 279

$k(t) = [M^0/M(t)]_{ЗС 273}$, соответствующего заданному дню наблюдений $k(t) [M(t)]_{ЗС 279}$. Измеренные таким образом значения глубины модуляции $M_{рас}(t)$ приведены на рис. 1. Соответствующие расчетные значения полного угла рассеяния 2θ , вычисленного по формуле (8), приведены на рис. 2. На рисунках приведены также результаты наблюдений источника ЗС 144, для которого интерферометр образован соединением отдельных секций полотна $E - W$ телескопа ДКР-1000 с базами $d = 910$ м (I режим) и $d = 644$ м (II режим). Сравнение величины $[M(t)]_{ЗС 144}$ по записям в различные дни проводилось для фиксированного звездного времени $t_i = \text{const}$. Значения глубины модуляции по источнику ЗС 144 во внеатменные дни $M^0_{ЗС 144}$ определялись в период

после 24 июня, когда источник ЗС 144 находился от Солнца достаточно далеко ($R > 30 R_{\odot}$). Ежедневные записи глубины модуляции $[M(t)]_{\text{ЗС 144}}$ калибровались по записям шумового генератора, что позволяло учесть возможность флуктуации коэффициента усиления приемной аппаратуры. Расчеты глубины модуляции $M_{\text{рас}}$ и угла рассеяния θ проводились, как и в первом случае, по формулам (5) — (8).

На рис. 2 прямой линией с наклоном -1.6 отмечена зависимость вида $\theta(R) \propto R^{-1.6}$ (2), которая ожидается, в соответствии с теорией рассеяния радиоволн, в модели тонкого фазового экрана и статистически однородной среды. В области радиальных расстояний $R \leq 40 R_{\odot}$ можно принять $L \propto R$, $\Delta N_e \propto R^{-2.1}$ при этом $a \approx \sqrt{z/2k}$ не зависит от прицельного расстояния R (z — расстояние от эффективно рассеивающего слоя до Земли, $k = 2\pi/\lambda$). Построение зависимости вида (2) облегчает отождествление переходной области по данным о зависимости $\theta(R)$. На рис. 2 показано, что в области радиальных расстояний $R \gtrsim (16-30)R_{\odot}$ наблюдается аномальное усиление рассеяния радиоволн. Значения угла рассеяния 2θ в данной области отличаются от степенной зависимости вида (2), характерной для области меньших расстояний ($R \leq 16 R_{\odot}$). Наблюдаемое в области $R \approx (16-30)R_{\odot}$ усиление рассеяния волн с учетом формул (1), (2) можно связать с усилением флуктуаций электронной концентрации в неоднородностях среды ΔN_e , возникающим в переходной области солнечного ветра. По данным рис. 2 можно локализовать в пространстве положение внутренней границы переходной области $R_{\text{внутр}} = 16 R_{\odot}$ и выяснить примерное расположение ее внешней границы $R_{\text{внеш}} \gtrsim 30 R_{\odot}$. Сравнение данных о радиальной зависимости угла рассеяния $\theta(R)$ по двум источникам (ЗС 144 и ЗС 279; рис. 2) позволяет заключить, что геометрия переходной области солнечного ветра в возмущенный период минимума солнечной активности в июне и октябре 1985 г. практически одинакова, что, по-видимому, соответствует примерно совпадающему состоянию минимальной активности околосолнечной межпланетной плазмы.

Обсуждение результатов. Анализ литературных данных. Эксперименты по просвечиванию околосолнечной среды мощным компактным источником ЗС 144 в диапазоне метровых волн проводились на первых этапах изучения межпланетной среды [1—4, 8, 11, 13]. Но в те годы еще не было известно о существовании солнечного ветра и его переходной области. Эффект аномального усиления рассеяния в радиальной зависимости $\theta(R)$ не был замечен и в литературе не обсуждался. Пересмотр существующих литературных данных о радиальной зависимости угла рассеяния волн $\theta(R)$ [1—4, 8, 11, 13] также подтверждает существование ожидаемого явления: аномальное усиление величины $\theta(R)$ в области радиальных расстояний $R \approx (10-20)R_{\odot}$. При обработке прежних экспериментов [1—4, 8, 11, 13], как и на рис. 2, для облегчения отождествления переходной области использован двойной логарифмический масштаб. Проведенный анализ и совокупность полученных сведений [1, 4, 8, 11, 13] совместно с данными рис. 2 показывают, что в радиальном профиле угла рассеяния волн $\theta(R)$ переходная область солнечного ветра обнаруживается во все годы, когда ежедневная статистика в сеансе наблюдений была достаточно полной. Недостаток настоящих и прежних экспериментов — малое количество данных, относящихся к более удаленным областям ($R \gtrsim 20 R_{\odot}$), когда величина рассеяния $\theta(R)$ становится малой и чувствительность метода заметно убывает. Последнее затрудняет получение асимптотики значений $\theta(R)$ и локализацию положения внешней границы переходной области ($R_{\text{внеш}}$). Кроме того, ошибки измерений на больших прицельных расстояниях (т. е. там, где ожидается область аномального рассеяния) существенно возрастают в силу малости углов рассеяния. Переход к декаметровым волнам мог бы быть полезным в решении данной задачи.

Из рис. 2 и литературных данных [1—4, 8, 11, 13] можно получить

весьма ценную статистику по локализации переходной области на различных фазах 11-летнего солнечного цикла. В таблице показано, что геометрия переходной области испытывает значительные изменения в ходе 11-летнего цикла. Эти изменения определяются состоянием солнечной активности и отражают ответное состояние околосолнечной межпланетной плазмы. Данные таблицы весьма существенно дополняют известную статистику по геометрии переходной области, полученную недавно методом мерцаний в диапазоне сантиметровых волн [12].

Геометрия переходной области по данным об угле рассеяния радиоволн в разные годы

Годы	$R_{\text{внутр}}/R_{\odot}$	$R_{\text{внеш}}/R_{\odot}$	Литературный источник
1959	9.0	19.0	[2]
1960	9.5	19.0	[2]
1961	13.5		[2]
1962	16.0		[2]
1963	9.0	21.5	[2]
1964	11.0		[3]
1965	18.0		[3]
1969	13.0; 14.0		[11, 8]
1971	6.3; 6.5	11.5; 11.0	[8, 13]
1977	12.5	25.0	[1]
1985	16.0	≥ 30.0	Данная работа

Таким образом, изучение радиальной зависимости угла рассеяния радиоволн $\theta(R)$ может быть положено в основу регулярного, подробного изучения структуры и геометрии переходной области ветра.

1. Абрамкин Э. П., Базелян Л. Л. Просвечивание сверхкороны декаметровым излучением ЗС 144 // Астрометрия и астрофизика.— 1983.— Вып. 49.— С. 41—47.
2. 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.
3. Бедевкин В. Ф., Виткевич В. В. Наблюдения сверхкороны Солнца в 1964—1965 гг. и характер рассеивающих неоднородностей в сверхкороне // Тр. Физ. ин-та АН СССР.— 1967.— 38.— С. 96—102.
4. Виткевич В. В. Сверхкорона Солнца по наблюдениям 1951—1958 гг. // Астрон. журн.— 1960.— 37, вып. 1.— С. 32—41.
5. Лотова Н. А., Блумс Д. Ф. Динамика солнечного ветра на малых расстояниях от Солнца // Геомагнетизм и аэрономия.— 1984.— 24, № 2.— С. 182—186.
6. Яковлев О. И., Ефимов А. И., Разманов В. М., Штрыков В. К. Неоднородная структура и скорость движения околосолнечной плазмы по данным станции «Венера-10» // Астрон. журн.— 1980.— 57, вып. 4.— С. 790—798.
7. Armstrong J. W., Woo R. Solar wind motion within $30 R_{\odot}$: Spacecraft radio scintillation observations // Astron. and Astrophys.— 1981.— 103, N 2.— P. 415—421.
8. Blesing R. G., Dennison P. A. Coronal broadening of the Crab Nebula 1969—1971 // Proc. Astron. Soc. Austral.— 1972.— 2, N 2.— P. 84—86.
9. Cohen M. H. High-resolution observations of radio sources // Ann. Rev. Astron. and Astrophys.— 1969.— 7.— P. 619—664.
10. Coles W. A. Interplanetary scintillation // Space. Sci. Revs.— 1978.— 21, N 4.
11. Harries J. R., Blesing R. G., Dennison P. A. 80 MHz observations of the coronal broadening of the Crab Nebula // Proc. Astron. Soc. Austral.— 1970.— 1, N 7.
12. Lotova N. A., Blums D. F., Vladimirovskii K. V. Interplanetary scintillation and the structure of the solar wind transonic region // Astron. and Astrophys.— 1985.— 150, N 2.— P. 266—272.
13. Matheson D. N., Little L. T. Angular distribution of radio waves scattered by the interplanetary medium // Nature. Phys. Sci.— 1971.— 234, N 45.— P. 29—31.
14. Salpeter E. E. Interplanetary scintillations // Astrophys. J.— 1967.— 147, N 2.
15. Scott S. L., Coles W. A., Bourgois G. Solar wind observations near the Sun using interplanetary scintillation // Astron. and Astrophys.— 1983.— 123, N 6.— P. 207.