

УДК 621.371.36.029.63

## ФЛУКТУАЦИИ АМПЛИТУДЫ ДЕЦИМЕТРОВЫХ И САНТИМЕТРОВЫХ РАДИОВОЛН, ИЗЛУЧАЕМЫХ СПУТНИКАМИ «ВЕНЕРА-15» И «ВЕНЕРА-16», ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ ЧЕРЕЗ ОКОЛОСОЛНЕЧНУЮ ПЛАЗМУ

*О. И. Яковлев, А. И. Ефимов, Е. П. Молотов, С. Н. Рубцов, В. П. Якубов, А. И. Кучерявенков, А. С. Кафтонов*

Изложены результаты исследований флуктуаций сантиметровых и дециметровых радиоволн в околосолнечной плазме. Приведены экспериментальные зависимости индекса мерцаний от прицельного расстояния, изменяющегося от 2,3 до 100 радиусов Солнца. Обсуждаются зависимости индекса мерцаний от длины волны и солнечной активности. Получена зависимость дисперсии флуктуаций электронной концентрации от расстояния до Солнца. Показано, что в околосолнечном пространстве есть постоянно присутствующая область повышенной неоднородности плазмы.

1. Первые эксперименты радиопросвечивания околосолнечной плазмы с применением космических аппаратов были осуществлены с помощью аппаратов «Пионер-6» и «Марс-2» [1, 2]. В дальнейшем в Советском Союзе исследовались флуктуации радиоволн дециметрового диапазона при распространении через корону Солнца во время радиосвязи с аппаратами «Марс-7» и «Венера-10» [3, 4]. Результаты исследований, проведенных с помощью трех советских аппаратов, были обобщены в работе [5]. По результатам этих экспериментов проводился анализ неоднородной структуры и скорости движения околосолнечной плазмы [6], а систематизированное изложение закономерностей распространения радиоволн через околосолнечное пространство, а также результатов исследований плазмы приведено в работах [7-9]. В 1984 г. с помощью аппаратов «Венера-15» и «Венера-16» были осуществлены новые эксперименты радиопросвечивания околосолнечной плазмы.

Цель этой работы состоит в анализе экспериментальных данных о дисперсии и распределении флуктуаций амплитуды, полученных при распространении дециметровых и сантиметровых радиоволн через околосолнечную плазму в сеансах радиосвязи с аппаратами «Венера-15» и «Венера-16».

2. Антенны аппаратов «Венера-15» и «Венера-16» излучали когерентные монохроматические радиоволны дециметрового ( $\lambda_1=32$  см) и сантиметрового ( $\lambda_2=5$  см) диапазонов. Регистрация сигналов осуществлялась в двух наземных пунктах, разнесенных по долготе на 7000 км. Длина трассы  $L$  во время наших экспериментов изменялась от 247 до 258 млн. км, а область пространства, существенная для распространения радиоволн, при этом располагалась в плоскости эклиптики. Измерения проведены в период с марта по сентябрь 1984 г., когда было осуществлено 196 сеансов регистрации; общее время наблюдения составило 650 часов. Регистрация сигналов проводилась при изменении прицельного расстояния радиолуча  $\rho$  в пределах от 100 до 2,3 радиусов Солнца  $R_0$  как во время приближения лучевой линии к Солнцу, так и при удалении от него.

Для получения информации о флуктуациях амплитуды принятые сигналы гетеродинировались, частота в несколько ступеней понижалась до 1 кГц и далее производилась фильтрация в полосах 10 или 30 Гц. После детектирования огибающая с помощью устройства аналог — код квантовалась с частотой выборки 19 Гц и регистрировалась на перфоленгу. При статистической обработке анализировались случайные процессы:  $E(t)$  — напряженность поля,  $I(t) = E^2(t)$  — плотность потока мощности и  $\chi(t) = \ln[E(t)/E_0]$  — логарифм амплитуды (здесь  $E_0$  — амплитуда невозмущенной волны). В ходе обработки определялись следующие статистические характеристики:

дисперсии флуктуаций амплитуды  $\sigma_L^2$ , логарифма амплитуды  $\sigma_\chi^2$  и флуктуаций плотности потока мощности  $\sigma_I^2$ ;

первые четыре момента функции распределения случайных процессов  $E(t)$ ,  $I(t)$ ,  $\chi(t)$ ;

коэффициенты асимметрии  $\beta_E$ ,  $\beta_I$ ,  $\beta_\chi$  и эксцесса  $\gamma_E$ ,  $\gamma_I$ ,  $\gamma_\chi$ . Определение указанных характеристик производилось по реализациям длительностью 27 с. Затем производилось усреднение найденных статистических параметров по 10—30 блокам, что соответствовало обработке реализации длительностью 4—12 минут. Индекс мерцаний  $m_I$  определялся отношением  $m_I = \sigma_I / \langle I(t) \rangle$ , где  $\langle I(t) \rangle$  означало усреднение процесса  $I(t)$  за время, составляющее длительность одного блока.

3. Найденные зависимости индекса мерцаний  $m_I$  от прицельного расстояния радиолуча  $\rho$ , выраженного в единицах радиуса Солнца  $R_0$ , представлены на рис. 1 и 2. Данные, полученные для области приближения радиолуча к Солнцу, изображены на рис. 1, а для участка удаления от Солнца — на рис. 2. Значения  $m_I$  для радиоволн сантиметрового диапазона показаны на обоих рисунках кружками, для радиоволн дециметрового диапазона — квадратами. Эти данные получены на Западном пункте наблюдений. Крестиками нанесены значения  $m_I$  для дециметровых радиоволн, измеренные на Восточном пункте. Величина  $m_I$  по данным Восточного пункта систематически меньше соответствующих данных Западного пункта, что связано с недостаточной шириной полосы частот комплекса регистрации амплитуды на Восточном пункте.

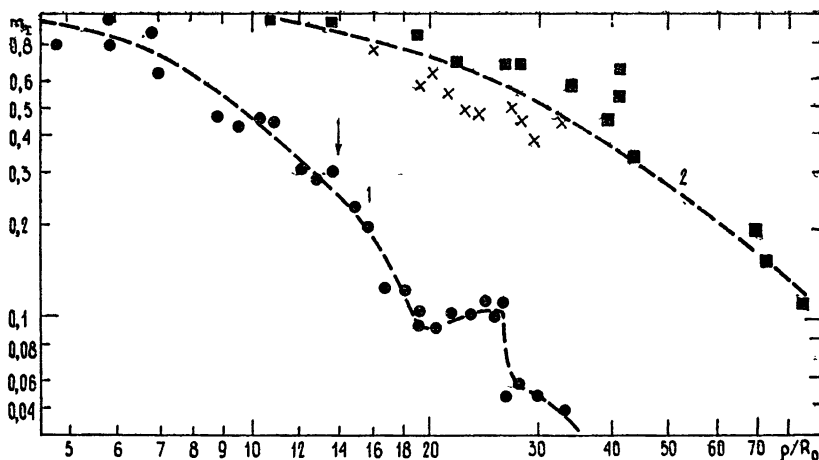


Рис. 1. Зависимости индекса мерцаний  $m_I$  сантиметровых (кривая 1) и дециметровых (кривая 2) радиоволн от  $\rho/R_0$  для участка приближения лучевой линии к Солнцу.

Из рис. 1 и 2 следует, что интенсивность флуктуаций амплитуды сантиметровых и дециметровых радиоволн возрастает с приближением лучевой линии к Солнцу, как с западной стороны (рис. 1), так и с восточной (рис. 2). При дальнейшем анализе мы будем использовать теорию слабых флуктуаций. Она применима в области прицельных расстояний радиолуча, превышающих  $\rho_{кр}$  — критическое расстояние, которое определяется условием  $m_I \leq 0,7$ . При  $\rho < \rho_{кр}$  флуктуации становятся насыщенными, а в более близкой к Солнцу области начинается режим сильных флуктуаций. Для  $\rho > \rho_{кр}$  экспериментальные значения  $m_I$  могут быть аппроксимированы степенной функцией:

$$m_I = A(\rho/R_0)^{-b}.$$

(1)

По нашим данным, для волн сантиметрового диапазона параметры зависимости (1) равняются  $A_1 = 15,7 \pm 1,1$ ,  $b_1 = 1,71 \pm 0,05$ , а критическое расстояние  $\rho_{кр}$  составляет  $5,5R_0$ . Соответствующие параметры для дециметровых волн имеют значения  $A_2 = 132 \pm 12$ ,  $b_2 = 1,58 \pm 0,05$ ,  $\rho_{кр} = 22R_0$ .

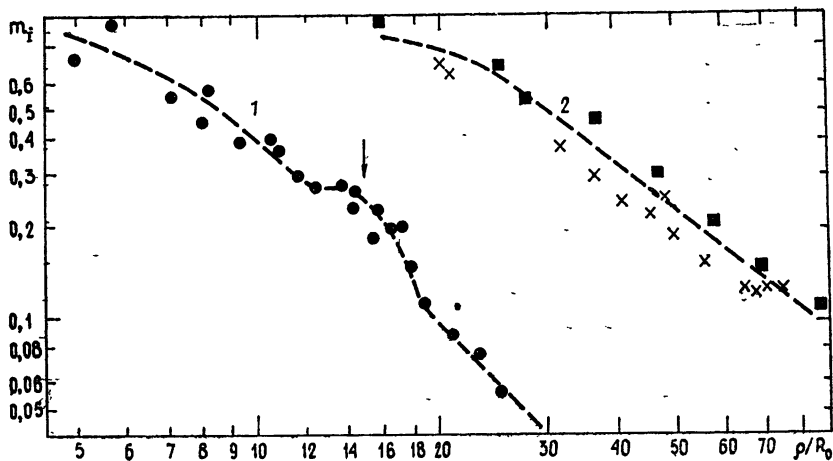


Рис. 2. Зависимости  $m_I$  от  $\rho/R_0$  сантиметровых (кривая 1) и дециметровых (кривая 2) радиоволн для участка удаления лучевой линии от Солнца.

Более детальный анализ позволяет отметить особенности в поведении индекса мерцаний сантиметровых сигналов. В течение 5 дней во время приближения аппаратов к Солнцу с 21 мая 1984 г. ( $\rho = 26,5R_0$ ) по 25 мая 1984 г. ( $\rho = 22,4R_0$ ) регистрировались высокие значения  $m_I$ , в несколько раз превышавшие средний уровень, определяемый зависимостью (1). Повышенные флуктуации в эти дни связаны с нестационарными явлениями, заключающимися в прохождении через трассу распространения радиоволн неоднородных плазменных образований типа облаков или выбросов масс. При зондировании области  $22R_0 < \rho < 27R_0$  во время удаления аппаратов от Солнца особенностей в поведении индекса мерцаний не наблюдалось. Устойчивой особенностью в поведении индекса мерцаний является возрастание уровня флуктуаций в тех сеансах связи, когда трасса распространения радиоволн проходит на расстояниях между 10- и 20-ю радиусами Солнца. Этот участок показан на рис. 1, 2 стрелками. Важно, что повышенные значения  $m_I$  зарегистрированы как на участке приближения аппаратов к Солнцу с 31 мая по 6 июня, так и на участке удаления их от Солнца с 25 июня по 3 июля 1984 г. Отметим также, что эти повышенные значения  $m_I$  приходятся на даты, когда солнечная активность была даже ниже, чем в соседние дни. Так, например, среднесуточные числа солнечных пятен в каждый из дней с 31 мая по 6 июня равнялись соответственно 63, 43, 45, 34, 23, в то время как в предшествующие семь дней эти величины были равны 86, 75, 87, 86, 69, 74, 70. Для представленных на рис. 1 и 2 данных проводилась дополнительная обработка, которая подчеркивала область повышенных значений индекса мерцаний, наблюдавшихся между 10- и 20-ю радиусами Солнца. Для этого определялась разность  $\Delta m$  между измеренными значениями  $m_I$  и значениями  $m_0$ , вычисленными по аппроксимирующей зависимости (1), и нормировалась к уровню  $m_0$ . Величины  $\Delta m/m_0$  представлены на рис. 3 в зависимости от прицельного расстояния радиолуча  $\rho/R_0$ . Светлыми кружками показаны данные для области приближения радиолуча к Солнцу, темными — для области удаления. Из рис. 3 следует, что при малых прицельных расстояниях  $\rho < 10R_0$  и для дистанций

$\rho > 20 R_0$  вариации  $\Delta m/m_0$  не превосходят значений 0,2 в обе стороны от уровня  $\Delta m/m_0 = 0$ . Для области расстояний  $11 R_0 < \rho < 17 R_0$  наблюдаются повышенные значения  $\Delta m/m_0$ , составляющие 0,3—0,5. Таким образом, амплитудные измерения, выполненные с помощью аппаратов «Венера-15, 16», подтверждают сделанный ранее в [10, 11] вывод о наличии в окосолнечном пространстве на расстояниях  $(10 \div 20) R_0$  области повышенной неоднородности.

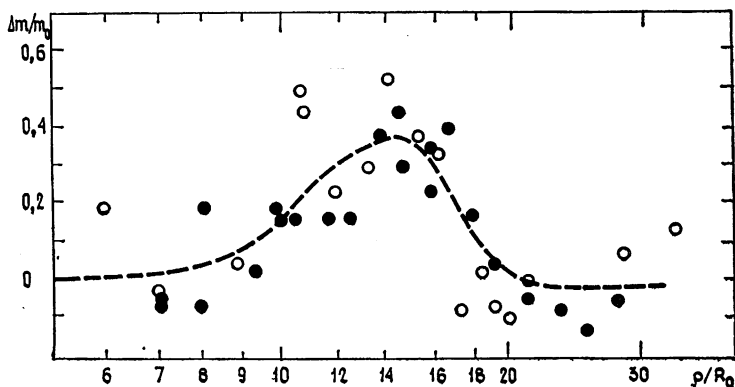


Рис. 3. К выявлению области повышенной неоднородности плазмы.

Из рис. 1 и 2 видно, что имеется интервал радиальных расстояний, где информативными являются одновременные амплитудные измерения дециметровых и сантиметровых сигналов. Этот участок заключен между расстояниями  $25 R_0$  и  $40 R_0$ . Здесь флуктуации дециметровых радиоволн еще не являются насыщенными ( $m_I \leq 0,7$ ), а флуктуации сантиметровых радиоволн имеют уровень, достаточный для их уверенной регистрации. Сравним одновременные измерения индекса мерцаний на двух частотах и определим его частотную зависимость. На рис. 4 представлена зависимость отношения индекса мерцаний  $m_2$  дециметровых волн к индексу мерцаний  $m_1$  сантиметровых волн от прицельного расстояния  $\rho/R_0$ . Из рис. 4 следует, что при  $\rho > 25 R_0$  величина  $m_2/m_1$  равняется  $11,6 \pm 0,8$  и убывает с приближением радиолуча к Солнцу в области  $\rho < 22 R_0$ , где флуктуации дециметровых волн становятся насыщенными.

Из теории слабых флуктуаций следует, что частотная зависимость индекса мерцаний может быть описана степенной зависимостью

$$m_I(\lambda) \sim \lambda^y. \quad (2)$$

Подставляя экспериментальное значение  $m_2/m_1 = 11,6$  в (2), получаем, что  $y = 1,34 \pm 0,10$ . Эта зависимость  $m_I(\lambda)$  существенно сильнее, чем линейный закон ( $y = 1$ ),

который был получен ранее при интерпретации результатов астрономических исследований [12]. Причина разной частотной зависимости индекса мерцаний заключается в том, что  $m_I(\lambda)$  получалась радиоастрономами из усредненных зависимостей  $m_I(\rho/R_0)$ . Такой подход был основан на сопоставлении результатов, относящихся фактически к разным средам, так как по мере удаления от Солнца существенным образом изменяются свойства неоднородностей плазмы.

Действительно, используя усредненные зависимости (1) для сантиметровых и дециметровых волн, мы бы получили величину  $y' = 1,15 + 0,10$ , которая меньше определенной более корректно по результатам одновременных измерений.

4. Рассмотрим далее функции распределения флуктуаций амплитуды. Для исследования функций распределения флуктуаций определялись первые четыре момента  $M$  случайных процессов  $E(t)$ ,  $I(t)$ ,  $\chi(t)$ . По моментам находились коэффициенты асимметрии  $\beta = M_3/M_2^{3/2}$  и эксцесса  $\gamma = M_4/M_2^2 - 3$  для всех трех процессов как для сантиметрового, так и дециметрового сигналов. Найдено, что для прицельных расстояний  $\rho > 10 R_0$ , т.е. в области, где флуктуации сантиметровых волн ненасыщенные, значения коэффициентов  $\beta_E$  и  $\gamma_E$  близки к нулю. Это показывает, что распределение флуктуаций амплитуды при  $\rho > 10 R_0$  близко к нормальному. По мере приближения лучевой линии к Солнцу и увеличения интенсивности флуктуаций коэффициенты асимметрии и эксцесса возрастают, и на расстояниях  $\rho < 3 R_0$  их значения приближаются к характерным для распределения Рэлея  $\beta_E = 0,63$ ,  $\gamma_E = 0,23$ .

Для флуктуаций логарифма амплитуды  $\chi(t)$  сантиметровых волн поведение коэффициентов асимметрии и эксцесса с изменением  $\rho$  является немонотонным. В областях  $\rho < 3 R_0$  и  $\rho > 20 R_0$  значения этих характеристик близки к нулю, а в интервале расстояний между 7- и 10-ю радиусами Солнца наблюдаются экстремумы: минимум функции  $\beta_\chi$  и максимум коэффициента  $\gamma_\chi$ . Коэффициенты  $\beta_I$  и  $\gamma_I$  для функций распределения флуктуаций плотности потока монотонно возрастают с приближением к Солнцу, т.е. с увеличением интенсивности флуктуаций. Связь между  $\beta_I$  и  $m_I$  достаточно хорошо описывается зависимостью  $\beta_I \simeq 1,5 m_I$ .

Коэффициенты асимметрии и эксцесса для функций распределения флуктуаций амплитуды, плотности потока мощности и логарифма амплитуды дециметровых радиоволн в зависимости от прицельного расстояния изменяются следующим образом. В области ненасыщенных флуктуаций дециметровых волн при  $\rho > 20 R_0$  значения  $\beta_E$  и  $\gamma_E$  близки к нулю, т.е. распределение флуктуаций амплитуды близко к нормальному. В интервале расстояний  $30 R_0 < \rho < 40 R_0$  наблюдаются экстремумы: минимум функции  $\beta_\chi$  и максимум коэффициента  $\gamma_\chi$ . Коэффициенты  $\beta_I$  и  $\gamma_I$  возрастают с приближением радиолуча к Солнцу и увеличением интенсивности флуктуаций. Можно сделать вывод, что изменения функций распределения флуктуаций дециметровых волн проявляются подобно функциям распределения флуктуаций в сантиметровом диапазоне, но на больших расстояниях радиолуча от Солнца.

Сопоставим наши экспериментальные данные с теорией. В предположении степенной формы пространственного спектра турбулентности плазмы с использованием гипотезы «вмороженности» неоднородностей в потоки солнечного ветра в [13] получено выражение для индекса мерцаний радиоволн, справедливое при малых флуктуациях:

$$m_I = (2\pi)^{(6-p)/2} \frac{\Gamma[(6-p)/2] \sin(p\pi/4)}{(p-2)(4-p)} c^2(R) r_e^2 \lambda^{(p+2)/4} \times$$

$$\times \left( \frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2} \right)^{(p-2)/4} L_3. \quad (3)$$

Здесь  $p$  — спектральный индекс,  $\Gamma(x)$  — гамма-функция,  $r_e = 2,82 \cdot 10^{-13}$  см — классический радиус электрона,  $L_1$ ,  $L_2$  — расстояния соответственно от аппарата и Земли до точки наибольшего приближения радиолуча к Солнцу,  $L_3 \simeq \rho$  — эффективная длина пути в области рассеяния. Функция  $c^2(R)$  следующим образом связана с интенсивностью флуктуаций электронной плотности  $\alpha_N(R)$ :

$$c^2(R) = \sigma_N^2(R) \frac{p-3}{2\pi^{3,2}} \frac{\Gamma(p/2)}{\Gamma[(p-1)/2]} q_0^{p-3} \quad \text{при } p > 3, \quad (4)$$

$$c^2(R) = \sigma_N^2(R) \frac{q_m^{p-3}}{2\pi \Gamma[(3-p)/2]} \quad \text{при } p < 3.$$

Здесь  $q_0 = 2\pi L_0^{-1}$  и  $q_m = 2\pi l_m^{-1}$  — пространственные волновые числа, определяемые соответственно внешним  $L_0$  и внутренним  $l_m$  масштабами неоднородностей околосолнечной плазмы. Соотношение (3) определяет зависимость индекса мерцаний от длины волны в виде  $m_I \sim \lambda^{(p+2)/4}$ . Из полученного ранее экспериментального значения показателя степени  $y = (p+2)/4 = 1,34 \pm 0,10$  следует, что спектральный индекс должен равняться  $p = 3,36 \pm 0,10$  для области гелиоцентрических расстояний  $25R_0 < R < 35R_0$ .

В ходе обработки данных нашего эксперимента по наклонам временных спектров флуктуаций определялась зависимость спектрального индекса  $p$  от гелиоцентрического расстояния. Было найдено, что  $p$  увеличивается от значения  $2,4 \pm 0,2$  на расстоянии  $6R_0$  до  $3,5 \pm 0,2$  при  $R = 30R_0$ , а при удалении от Солнца на расстояния больше, чем  $40R_0$ , становится равным  $3,7 \pm 0,2$ . Таким образом установлено, что значение  $p = 3,36 \pm 0,10$ , найденное из сопоставления индексов мерцаний в области  $25R_0 < R < 35R_0$  согласуется с величиной  $p = 3,5 \pm 0,2$ , полученной из спектрального анализа флуктуаций.

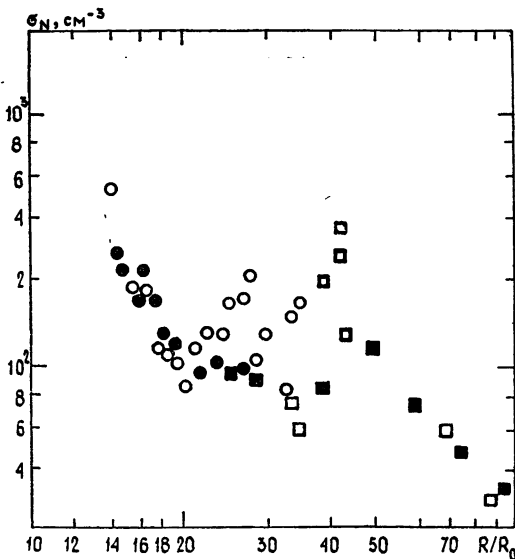


Рис. 5. Зависимость интенсивности флуктуаций электронной концентрации  $\sigma_N$  от гелиоцентрического расстояния  $R/R_0$ .

Используя соотношения (3) и (4) и экспериментальные данные рис. 1 и 2, найдем дисперсию флуктуаций электронной концентрации, которая определяет интенсивность неоднородностей плазмы. При этом учтем внешний масштаб неоднородностей  $L_0 \approx 10^6$  км, а также экспериментальные зависимости внутреннего масштаба  $l_m$  [6] и спектрального индекса  $p$  от гелиоцентрического расстояния. Внутренний масштаб с удалением от Солнца увеличивается от 1,2 км при  $R = 5,5R_0$  до 40 км при  $R = 40R_0$ . Определенная нами зависимость интенсивности флуктуаций электронной концентрации  $\sigma_N$  от гелиоцентрического расстояния представлена на рис. 5. Кружками показаны значения  $\sigma_N$ , полученные по данным зондирования сантиметровыми волнами, а квадратами — по данным, полученным в дециметровом диапазоне. Светлые

символы соответствуют  $\sigma_N$  в западной от Солнца части пространства, темные — в восточной. Видно, что интенсивность флуктуаций электронной концентрации возрастает с уменьшением гелиоцентрического расстояния. В зависимости  $\sigma_N(R/R_0)$  существуют локальные выбросы вверх при  $R=41R_0$ ,  $34R_0$  и  $R=27R_0$  до значений  $\sigma_N=(2\div 3)\cdot 10^2\text{ см}^{-3}$ . Максимумы наблюдались соответственно 7, 14 и 21 мая 1984 г. в области приближения радиолуча к Солнцу. Эти явления могут быть связаны с секторной структурой межпланетного пространства.

Исследования флуктуаций радиоволн при распространении в окосолнечной плазме проводились нами с использованием станции «Венера-10» в 1976 г. [4] в период низкой активности Солнца, когда среднесуточное число солнечных пятен в июне составляло  $W=12$ . Вовремя эксперементов в июне 1984 г. солнечная активность была умеренной и характеризовалась средним числом солнечных пятен  $W=46$ . Возрастание солнечной активности по сравнению с ее минимумом в 1976 г. привело к увеличению индекса мерцаний в 1,3 раза. Это найдено из сравнения значений  $m_f$  для дециметровых волн, наблюдавшихся в июне 1984 г. (рис. 1 и 2), с соответствующими значениями  $m_f$ , приведенными в [4]. Из сопоставления следует эмпирическое соотношение  $m_f \sim W^{0,4\pm 0,1}$ , которое находится в согласии с результатами анализа флуктуаций частоты радиоволн и уширения спектральной линии [14]. Влияние солнечной активности сказалось в 1984 г. и на величине критического расстояния  $r_{кр}$ , которое для дециметровых волн составило  $22R_0$ , а в 1976 г. равнялось  $18R_0$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Goldstein S. J. — Science, 1969, 166, № 3905, p. 598.
2. Яковлев О. И., Трусов Б. П., Виноградов В. В. и др. — Космические исследования, 1974, 12, № 4, с. 600
3. Яковлев О. И., Молотов Е. П., Ефимов А. И. и др. — Радиотехника и электроника, 1977, 22, № 2, с. 260
4. Колосов М. А., Яковлев О. И., Ефимов А. И. др. — Радиотехника и электроника, 1978, 23, № 9, с. 1829
5. Yakovlev O. I., Efimov A. I., Razmanov V. M., Shtrykov V. K. — Acta Astronautica, 1980, 7, p. 235.
6. Яковлев О. И., Ефимов А. И., Разманов В. М., Штрыков В. К. — Астрон. журн., 1980, 57, № 4, с. 790.
7. Bird M. K. — Space Sci. Rev., 1982, 33, № 1/2, p. 99
8. Яковлев О. И. Распространение радиоволн в космосе. — М.: Наука, 1985. — 214 с.
9. Лотова Н. А. — УФН, 1975, 115, № 4, с. 603
10. Ефимов А. И., Яковлев О. И., Разманов В. М., Штрыков В. К. — Письма в Астрон. журн., 1977, 3, № 7, с. 332
11. Блумс Д. Ф., Лотова Н. А. — Геомагнетизм и аэрономия, 1983, 23, № 3, с. 361
12. Readhead A. C., Kemp M. C., Hewish A. — Month. Not. Roy. Astron. Soc., 1978, 185, № 1, p. 207
13. Арманд Н. А., Ефимов А. И., Яковлев О. И. В кн.: Проблемы современной радиотехники и электроники — М.: ИРЭ АН СССР, 1983, с. 94
14. Ефимов А. И., Яковлев О. И., Штрыков В. К., Рогольский В. И. — Радиотехника и электроника, 1984, 29, № 7, с. 1274.

Институт радиотехники и электроники  
АН СССР

Поступила в редакцию  
26 марта 1986 г.

#### AMPLITUDE FLUCTUATIONS OF DECIMETRIC AND CENTIMETRIC RADIOWAVES EMITTED BY THE «VENERA-15» AND «VENERA-16» SPACECRAFTS DURING PROPAGATION THROUGH SOLAR PLASMA

O. I. Yakovlev, A. I. Efimov, E. P. Molotov, S. N. Rubtsov, V. P. Yakubov,  
A. I. Kucheryavenkov, A. S. Kaftonov

The experimental dependences of scintillation index and probability distributions on elongation are given. Dependences of scintillation index on the wavelength and the solar activity are analysed. The dependence of electron fluctuation intensity  $\sigma$  on the distance to the Sun was obtained.