

УДК 537.877+523.6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ, КОНЦЕНТРАЦИИ, МОЩНОСТИ И УСКОРЕНИЯ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА МЕТОДОМ РАДИОПРОСВЕЧИВАНИЯ ОКОЛОСОЛНЕЧНОЙ ПЛАЗМЫ СИГНАЛАМИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

*О. И. Яковлев**

Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, г. Фрязино, Россия

Дан анализ разных способов определения скорости и концентрации околосолнечной плазмы методом радиопросвечивания с использованием высокостабильных сигналов космических аппаратов. Представлены результаты исследований характеристик солнечного ветра на гелиоцентрических расстояниях от 3 до 50 радиусов Солнца. Приведены экспериментальные данные о скорости, концентрации, мощности и ускорении плазмы для указанных расстояний.

ВВЕДЕНИЕ

В 1955 году В. В. Виткевич и А. Хьюиш при наблюдении радиоизлучения Крабовидной туманности с помощью радиоинтерферометра обнаружили наличие плазмы на расстояниях больше размеров короны Солнца. После открытия квазаров оказалось возможным использовать эффект флуктуаций интенсивности радиоволн для зондирования плазмы на ещё больших расстояниях от Солнца. Измерения флуктуаций интенсивности радиоволн в нескольких далеко разнесённых пунктах позволили определить скорость и направление потоков плазмы на расстояниях $60 \div 100$ радиусов Солнца и показать, что скорость плазмы не зависит от гелиоцентрического расстояния, в среднем равна $300 \div 400$ км/с и направлена примерно радиально. Следующий этап исследований солнечного ветра связан с работами К. И. Грингауза и А. Д. Хундхаузена, которые впервые осуществили непосредственные измерения параметров плазмы с помощью приборов, установленных на космических аппаратах, и показали, что около Земли плазма движется от Солнца.

К началу первых радиоастрономических исследований плазмы Е. Н. Паркером были сформулированы основы теории солнечного ветра [1]. Эта феноменологическая теория использует законы газовой динамики и сохранения энергии, включающей тепловую, кинетическую и потенциальную энергию вещества в гравитационном поле Солнца. Было показано, что при высокой температуре у основания короны Солнца энергия плазмы достаточна для выноса вещества в межпланетное пространство и её разгона до больших скоростей. Стало ясно, что существование межпланетной плазмы обусловлено постоянными потоками ионизованного газа, истекающего из фотосферы Солнца.

Дальнейшее развитие теории солнечного ветра было направлено на уточнение граничных условий у основания солнечной короны и у орбиты Земли с учётом новых экспериментальных данных о температуре и концентрации плазмы и магнитном поле. При этом вскрылась принципиальная трудность теории: оказалось, что начальной энергии плазмы у основания короны недостаточно для получения приемлемой концентрации плазмы и её скорости у орбиты Земли. Для устранения этой трудности вводился гипотетический распределённый по гелиоцентрическому расстоянию источник дополнительной энергии, обусловленный, по-видимому, волновыми процессами в фотосфере [1–3].

*oiy117@ire216.msk.su

В книге [2] подведён итог различных вариантов теории солнечного ветра, развитых к 1972 году. Автор отмечает, что затруднительно выбрать достоверную модель солнечного ветра на базе «скудных экспериментальных данных», полученных для двух областей — в основании короны и вблизи орбиты Земли. Кроме того, отмечено, что «наибольшего прогресса можно ожидать тогда, когда наблюдения солнечного ветра будут проводиться в более широком интервале гелиоцентрических расстояний». В монографии [4], изданной в 2008 году, приведены результаты новых исследований солнечного ветра, а в разделе 3.2 этой книги сделан следующий вывод: «Зависимости параметров солнечного ветра от расстояния до Солнца в области ускорения имеют ключевое значение для понимания физических механизмов его формирования».

В 1964–1967 годах при подготовке полётов космических аппаратов к Марсу были начаты исследования распространения монохроматических высокостабильных радиоволн в межпланетном пространстве. В теоретических работах было показано, что при связи с космическими аппаратами должны наблюдаться флуктуации фазы, частоты и амплитуды таких волн, уширение их энергетического спектра и появление дополнительного группового запаздывания радиоволн, особенно сильные при прохождении лучевой линии в окосолнечном пространстве.

Первые экспериментальные данные [5–7] о влиянии межпланетной и окосолнечной плазмы на монохроматические радиоволны были получены с помощью аппаратов «Маринер-4», «Пионер-6», «Марс-2» и «Венера-10». В ходе этих миссий были получены предварительные данные о скорости солнечного ветра на разных расстояниях от Солнца, качественно совпадающие с результатами теории Паркера. Стало ясно, что анализ эффектов влияния плазмы на монохроматические радиоволны даёт новые возможности исследований солнечного ветра в области его основного ускорения.

Начиная с 1968 года метод радиопросвечивания окосолнечной плазмы регулярно используется при межпланетных полётах космических аппаратов. Российская система космической связи использовала радиоволны с длиной $\lambda_1 = 32$ см и $\lambda_2 = 5,07$ см, а аналогичная система США — $\lambda_3 = 13$ см и $\lambda_4 = 3,6$ см, что позволило эффективно осуществлять зондирование плазмы на расстояниях $r = (3 \div 50)a$, где a — радиус Солнца. На этих расстояниях происходит основное ускорение плазмы, а электронная концентрация изменяется примерно в 300 раз.

Цель данной работы состоит в анализе радиометодов и экспериментальных данных о характеристиках плазмы солнечного ветра в области его ускорения на гелиоцентрических расстояниях $r = (3 \div 50)a$ и выяснении на этой основе закономерностей изменения концентрации, скорости, мощности и ускорения солнечного ветра. Будут определены характеристики плазмы для фиксированных гелиоцентрических расстояний и найдены простые аналитические зависимости скорости, концентрации, мощности и ускорения солнечного ветра от параметра r/a . Необходимо подчеркнуть, что солнечный ветер — нестационарное явление. Характеристики солнечного ветра, полученные методом радиопросвечивания, относятся к довольно условному среднему состоянию потока плазмы.

1. СКОРОСТЬ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

Для измерений скорости солнечного ветра V методом радиопросвечивания с помощью сигналов космических аппаратов используют несколько способов. Они основаны на анализе характеристик радиоволн, принимаемых в одном или двух разнесённых наземных пунктах. Первый способ, разработанный в статьях [8–10], использует особенности флуктуаций частоты принимаемого сигнала в двух центрах космической связи, разнесённых на большое расстояние $|BB_1|$ (см. рис. 1).

В области наибольшего приближения лучевых линий к Солнцу, соответствующей прицель-

Третий способ [5] применялся ранее радиоастрономами и основан на связи скорости переноса неоднородностей среды через линию радиосвязи AB с характерной особенностью частотного спектра флуктуаций амплитуды радиоволн, зарегистрированных в одном пункте. В теории распространения волн в статистически неоднородных средах показано, что по спектрам флуктуаций амплитуды можно определить характерную частоту флуктуаций F_0 , зависящую от скорости V . Согласно теории частота F_0 и скорость V связаны следующим образом:

$$V = F_0 \left(\frac{2\pi l_1 l_2 \lambda}{l_1 + l_2} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

где λ — длина волны излучения. Теория предполагает, что скорость движения среды одинакова в разных точках пространства, а флуктуации интенсивности излучения малы. Поскольку этим способом скорость V определяется по флуктуациям амплитуды радиоволн, то считают, что скорость относится к неоднородностям плазмы с масштабами порядка диаметра первой зоны Френеля, т. е. с характерными размерами несколько сотен километров.

При значениях $p/a \leq 7$ бывает затруднительно использовать описанные методы определения скорости солнечного ветра. В связи с этим был разработан четвёртый способ [12], который применялся при малых параметрах p . Данный способ основан на эффекте изменения ширины спектральной линии или дисперсии флуктуаций частоты радиоволн при изменении расстояния от лучевой линии до Солнца.

В работе [12] было показано, что дисперсия флуктуаций частоты σ_f^2 или квадрат ширины энергетического спектра радиоволн (ширины спектральной линии) $(\Delta F)^2$ связаны со скоростью перемещения неоднородностей среды через трассу радиосвязи V_1 соотношением

$$\sigma_f^2 \propto (\Delta F)^2 \propto V_1^{\alpha-2}, \quad (2)$$

где α — показатель пространственного спектра неоднородностей плазмы. Скорость V_1 в выражении (2) равна сумме или разности скорости солнечного ветра V и скорости $U = |dp/dt|$ приближения или удаления лучевой линии от Солнца вследствие движения аппарата и Земли. Из формулы (2) следует, что ширина

$$\sigma_f \propto \Delta F \propto (V \pm U)^{(\alpha-2)/2}, \quad (3)$$

где знак плюс соответствует приближению трассы связи к Солнцу, а знак минус — её удалению от Солнца. Соотношение (3) позволяет определить скорость солнечного ветра, если величины V и U сравнимы, а ширина σ_f или ΔF определена как на участке приближения лучевой линии к Солнцу ($\sigma_{f\text{прибл}}$ и $F_{\text{прибл}}$), так и при её удалении от Солнца ($\sigma_{f\text{удал}}$ и $F_{\text{удал}}$).

Экспериментальные зависимости $\sigma_f(p)$ или $\Delta F(p)$, полученные для этих двух относительных движений, позволяют найти их отношение $\beta = \sigma_{f\text{прибл}}/\sigma_{f\text{удал}} = \Delta F_{\text{прибл}}/\Delta F_{\text{удал}}$. При параметрах $p/a < 10$ полагают показатель $\alpha = 3$, поэтому из выражения (3) следует скорость

$$V = U \frac{\beta^2 + 1}{\beta^2 - 1}. \quad (4)$$

По данным о траектории космического аппарата известна зависимость $U(p)$, поэтому формула (4) и экспериментальные значения β позволяют найти скорость V солнечного ветра.

Неточность этого метода связана с тем, что скорость V может претерпевать сильные изменения; в результате при одинаковых параметрах p во время приближения луча к Солнцу или при

удалении луча от него скорость V может быть разной. Этот метод даёт удовлетворительные результаты при отношении $p/a < 7$ в период спокойного Солнца, когда скорость V не претерпевает сильных изменений в течение месяца.

Был предложен и реализован ещё один способ [13] определения скорости V при малых гелиоцентрических расстояниях p , основанный на различии рефракции дециметровых и сантиметровых радиоволн. Для сантиметровых волн эффект рефракции мал и соответствующая точка C расположена почти на прямой AB . Для дециметровых волн лучевые линии в околосолнечной плазме изгибаются так, что точка C оказывается ближе к Солнцу. Таким образом, лучевые линии волн разных диапазонов из-за рефракции оказываются разнесены на некоторое расстояние Δ , хотя приём сигналов осуществляется в одном пункте. Для определения временного интервала τ , соответствующего перемещению неоднородностей плазмы на расстояние Δ , используется корреляционный анализ флуктуаций частоты сантиметровых и дециметровых волн, а скорость солнечного ветра определяется по соотношению $V = \Delta/\tau$. Угол рефракции претерпевает большие изменения, поэтому трудность этого способа нахождения скорости солнечного ветра связана с тем, что рефракция лучевых линий и расстояние Δ приходится определять по модельным зависимостям электронной концентрации от гелиоцентрического расстояния $N(r)$, а реальная зависимость $N(r)$ изменчива.

С 1976 по 1997 год было осуществлено несколько серий экспериментов по определению зависимости $V(p)$, результаты которых представлены на рис. 2 и 3. На этих графиках значения скорости, найденные описанными способами, обозначены разными символами. Данные, полученные первым способом, обозначены квадратами, вторым способом — треугольниками, третьим способом — кружками, четвёртым способом — крестиками.

Достоверная зависимость скорости солнечного ветра от гелиоцентрического расстояния в области основного ускорения солнечного ветра была получена по сигналам аппарата «Венера-10» в работах [8, 9, 12, 14]. На рис. 2а приведены результаты определения скорости солнечного ветра с помощью этого аппарата. Измерения осуществлялись в период минимума солнечной активности в апреле–июле 1976 года с использованием радиоволн с длиной $\lambda_1 = 32$ см. Была проанализирована регистрация сигналов в 48 сеансах радиосвязи, при которых нормированное расстояние p/a изменялось в пределах от 3 до 58. Для определения скорости V при отношении $p/a = 18 \div 58$ применялся третий способ, основанный на анализе спектра флуктуаций амплитуды, при $p/a = 6 \div 21$ применялся первый способ, основанный на анализе флуктуаций частоты при приёме сигналов в двух разнесённых центрах дальней космической радиосвязи, а при малых расстояниях $p/a = 3 \div 12$ использовалось различие размытия спектральной линии при приближении и удалении лучевой линии от Солнца (четвёртый способ). Из рис. 2а следует, что при изменении гелиоцентрического расстояния в пределах $p/a = 30 \div 60$ не наблюдается регулярного изменения скорости, её среднее значение $V = (380 \pm 80)$ км/с. При уменьшении расстояния от $p/a = 20$ до $p/a = 6$ зарегистрировано сильное уменьшение скорости, для $p/a = 3 \div 6$ средняя скорость солнечного ветра равна (42 ± 20) км/с.

С октября 1976 года по январь 1977 года (минимум солнечной активности) скорость околосолнечной плазмы также определялась в экспериментах [15] с помощью аппарата «Викинг». В этих экспериментах удалось получить сведения только о флуктуациях амплитуды радиоволн с длиной $\lambda_3 = 13$ см при изменении расстояния в пределах от $p/a = 45$ до $p/a = 6$. Анализ спектров флуктуаций амплитуды радиоволн и определение по ним частоты флуктуаций F_0 позволил найти скорость V третьим способом. Соответствующая зависимость представлена по материалам статьи [15] на рис. 2б. Согласно работе [15] для расстояния $p/a = 24 \div 40$ скорость V колеблется в пределах $240 \div 320$ км/с, а для $p/a = 7 \div 9$ скорость равна (74 ± 30) км/с. Из рис. 2 видно, что для расстояний $p/a = 7 \div 20$ наблюдается хорошее соответствие данных, полученных с помощью

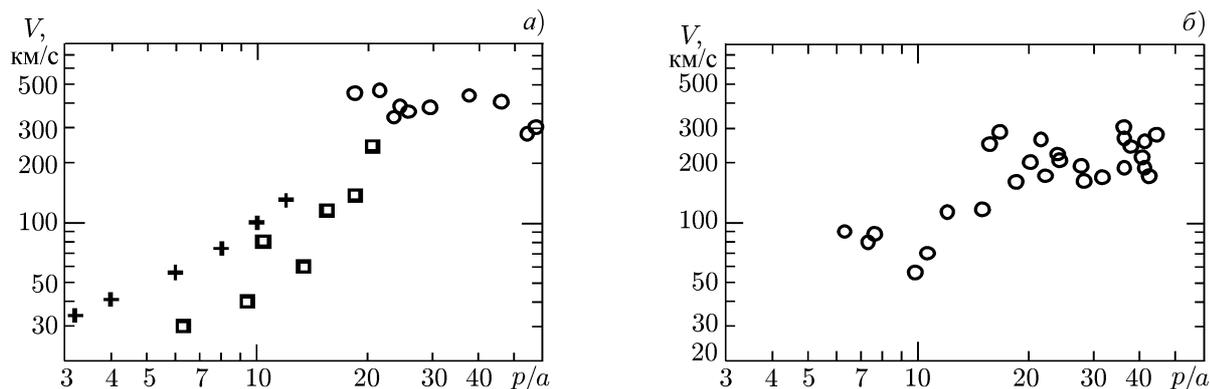


Рис. 2. Экспериментальные зависимости скорости солнечного ветра от гелиоцентрического расстояния при низкой солнечной активности по данным космических аппаратов «Венера-10» (1976 год, а) и «Викинг» (1976 год, б)

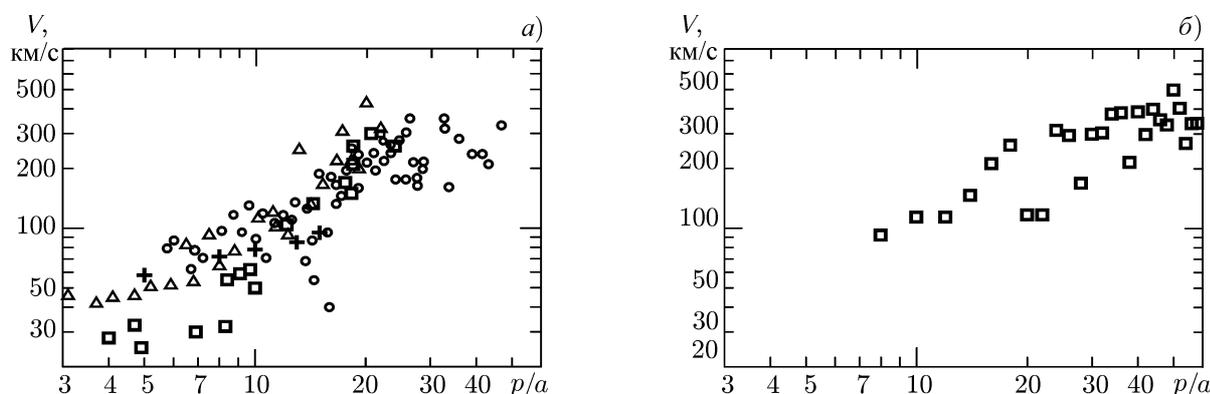


Рис. 3. Скорость плазмы на разных расстояниях p/a при умеренной солнечной активности по данным космических аппаратов «Венера-15», «Венера-16» (1984 год, а) и «Галилео» (1997 год, б)

аппаратов «Венера-10» и «Викинг». В частности, происходит значительный рост скорости V при увеличении расстояния p . При отношении $p/a = 30 \div 50$ по данным миссий «Венера-10» и «Викинг» скорость V не зависит от расстояния p , хотя значения скорости, полученные в апреле и октябре 1977 года, отличаются, что может быть связано с различием солнечной активности. При отношении $p/a < 10$ значения скорости, определённые третьим способом (рис. 2б), завышены.

Большой объём экспериментальных данных был получен с помощью аппаратов «Венера-15» и «Венера-16» в марте–сентябре 1984 года при умеренной солнечной активности. При измерениях использовались линии космической связи дециметровых ($\lambda_1 = 32$ см) и сантиметровых ($\lambda_2 = 5$ см) волн, а скорость V определялась всеми четырьмя способами. Использование двух диапазонов радиоволн, большое число сеансов радиопросвечивания плазмы и применение четырёх способов определения скорости позволили получить надёжные сведения о зависимости $V(p)$. Описание особенностей этого цикла экспериментов по определению скорости солнечного ветра дано в статьях [10, 11, 16–20], а сводные результаты представлены на рис. 3а. Как и в предыдущем исследовании, было получено, что скорость V примерно постоянна и равна (280 ± 50) км/с при отношении $p/a = 36 \div 50$ и быстро уменьшается до $V = (50 \pm 20)$ км/с при $p/a = 4 \div 6$. Одновременное использование разных способов определения скорости V позволило более объективно оценить точность измерений. Было показано, что при относительном расстоянии $p/a > 16$ различные способы дают одинаковые значения V , а при $p/a < 9$ амплитудные данные (третий способ) дают систематически завышенные значения скорости по сравнению с частотными дан-

ными (первый и второй способы).

На рис. 3б представлена экспериментальная зависимость скорости солнечного ветра от гелиоцентрического расстояния, полученная в работе [21] по сигналам аппарата «Галилео» (длина волны $\lambda_3 = 13$ см) при умеренной солнечной активности в январе–феврале 1997 года. Скорость V была найдена первым способом — путём анализа флуктуаций частоты, зарегистрированных в нескольких далеко разнесённых пунктах. Авторы работы [21] отмечают изменчивость скорости V : в течение пяти часов регистрировались значения V , варьирующиеся в пределах от 160 до 600 км/с. Для определения средней зависимости $V(p)$ на рис. 3б даны значения скорости, полученные путём усреднения десяти–двадцати значений V , найденных для интервала расстояний $\Delta p = 2a$. Видно, что при изменении отношения p/a в пределах $40 \div 60$ средняя скорость солнечного ветра не имела явной зависимости от гелиоцентрического расстояния и в среднем была равна (370 ± 40) км/с. В интервале $p/a = 7 \div 30$ наблюдается явно выраженное увеличение скорости с ростом расстояния p , при $p/a = 8 \div 10$ средняя скорость солнечного ветра равна (100 ± 30) км/с.

Рассмотрим далее результаты [22, 23] определения скорости V по данным анализа сигналов аппарата «Улисс», зарегистрированных при радиопросвечивании плазмы в августе–сентябре 1991 года, когда наблюдалась сильная солнечная активность. В этих экспериментах использовались две линии космической связи на длинах волн λ_3 и λ_4 . В публикации [22] был применён первый, а в [23] — второй способ определения скорости солнечного ветра. По данным этих публикаций наблюдался сильный разброс значений V при близких расстояниях p/a , указывающий на большую изменчивость скорости V .

При анализе корреляционной функции флуктуаций частоты, зарегистрированных в двух разнесённых пунктах, было отмечено, что в ряде сеансов наблюдались два корреляционных максимума [24]. Авторы этой работы находят для таких сеансов радиопросвечивания два значения V , что интерпретируется как одновременное наличие двух разных потоков плазмы.

Скорость солнечного ветра были определена новыми способами также в статьях [13, 25]. Проведённый в этих работах дополнительный анализ подтвердил сильную изменчивость скорости V . Необходимо отметить, что траектория аппарата «Улисс» была такова, что при уменьшении расстояния $p = |OC|$ увеличилась гелиоширота области радиопросвечивания плазмы, так что найденные значения V при отношении $p/a < 10$ относятся к околополярной области Солнца. При высокой солнечной активности для относительного расстояния $p/a = 23 \div 34$ средняя скорость $V = (390 \pm 100)$ км/с, а для $p/a = 7 \div 8$ среднее значение скорости составило $V = (130 \pm 40)$ км/с.

Обсудим средние экспериментальные значения скорости солнечного ветра V_e для различных гелиоцентрических расстояний при низкой и умеренной активности Солнца для гелиошироты $-50^\circ < \varphi < 50^\circ$. Необходимо отметить, что эффекты влияния плазмы на радиоволны обусловлены её наличием на протяжённом участке лучевой линии и зависят от прицельного расстояния p . Предполагается, что среда оказывает основное влияние на участке лучевой линии, наиболее близком к Солнцу, поэтому полагают $V(p) = V(r)$. Отметим, что ошибка однократного измерения скорости δV не превышает 30 %.

Найдём подходящую функцию $V_a(r)$, аппроксимирующую средние экспериментальные значения скорости солнечного ветра. Эта функция должна правильно описывать сильное увеличение скорости для расстояний $p/a = 4 \div 20$ и незначительное изменение скорости V для $p/a > 20$. В качестве такой функции можно использовать гиперболический тангенс:

$$V_a(r) = V_m \operatorname{th}(x), \quad (5)$$

где $x = \eta r/a$, V_m — скорость плазмы в районе орбиты Земли, при $r/a = 215$.

Используя материалы книги [4] и описанные выше экспериментальные данные, можно положить $V_m = 300$ км/с, тогда аппроксимация (5) имеет один свободный параметр η . Подберём его величину путём наилучшего согласования средних экспериментальных V_e и вычисленных по формуле (5) значений скорости V_a ; таким образом было установлено, что $\eta = 0,04$. Численный анализ показал, что в пределах вариаций δV_e , обусловленных изменчивостью скорости и ошибками измерений, предложенная аппроксимация $V_a(r)$ хорошо описывает скорость солнечного ветра для интервала расстояний $r/a = 3 \div 50$, а для $r/a > 50$ формула (5) даёт значение $V_a = V_m$. Параметры $V_m = 300$ км/с и $\eta = 0,04$ соответствуют периоду малой или умеренной солнечной активности и гелиошироте $|\varphi| < 50^\circ$.

2. КОНЦЕНТРАЦИЯ ПЛАЗМЫ

Первые исследования концентрации плазмы в околосолнечном пространстве были осуществлены с помощью коронографов путём регистрации интенсивности свечения короны. Было показано, что для расстояний $r > 2a$ среднее радиальное распределение концентрации плазмы $N(r)$ в плоскости эклиптики может быть аппроксимировано степенной зависимостью:

$$N(r) = A (a/r)^6 + B (a/r)^2. \quad (6)$$

Приближённая зависимость (6) справедлива при коэффициентах $A = 1,3 \cdot 10^8$ см⁻³ и $B = 1,1 \times 10^6$ см⁻³.

После открытия пульсара, который расположен приблизительно в плоскости эклиптики, был разработан новый метод [26] определения электронной концентрации, основанный на измерении запаздывания радиоволн в плазме. При этом измерялась разность времён прихода импульсов радиоизлучения пульсара на двух частотах, которая пропорциональна интегральной электронной концентрации на лучевой линии. Предполагая сферически-симметричное распределение плазмы и зависимость $N(r)$ в виде (6), по запаздыванию радиоволн удалось определить электронную концентрацию на нескольких расстояниях r . Трудность такого способа определения зависимости $N(r)$ связана с сильным мешающим влиянием радиоизлучения Солнца, что не позволило получить экспериментальную зависимость $N(r)$ для области основного ускорения плазмы.

Первые результаты определения зависимости электронной концентрации от гелиоцентрического расстояния с помощью сигналов космических аппаратов были изложены в статье [27]. Авторы этой работы использовали одночастотную линию радиосвязи с аппаратами «Маринер-6» и «Маринер-7» для измерения запаздывания радиоволн в плазме. Для этой цели использовался режим когерентного ответа, когда модулированные радиоволны проходят сначала по трассе Земля—аппарат, а затем по линии космический аппарат—Земля.

Радиосистема с когерентным ответом позволяет с высокой точностью определять доплеровское изменение частоты и расстояние до аппарата. Эти данные в совокупности с законами небесной механики позволяют найти траекторию аппарата, а следовательно, расстояние между наземным пунктом B и аппаратом A (рис. 1). При приближении трассы AB к Солнцу появляется кажущееся увеличение этого расстояния, обусловленное запаздыванием радиоволн в плазме. Запаздывание пропорционально удвоенной интегральной электронной концентрации на трассе AB . Определение интегральной электронной концентрации одночастотным методом по запаздыванию радиоволн затруднено из-за неточностей данных о траектории аппарата [27].

Эксперименты позволили определить интегральную электронную концентрацию на расстояниях $r/a = 4 \div 14$ в апреле–мае 1970 года (в период минимума солнечной активности). Для оценки электронной концентрации в работе [27] по аналогии с выражением (6) использовалась

следующая аппроксимация:

$$N(r) = A(a/r)^6 + B(a/r)^\xi. \quad (7)$$

По сигналам аппарата «Маринер-6» было найдено, что коэффициенты $A = 0,69 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$, $B = 0,54 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$, показатель степени $\xi = 2,05$, а по сигналам аппарата «Маринер-7» — $A = 1,3 \times 10^8 \text{ см}^{-3}$, $B = 0,66 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$, $\xi = 2,08$. Заметим, что коэффициент A был определён весьма приближённо. Авторы сопоставили найденную зависимость $N(r)$ со значениями концентрации плазмы, полученными по данным коронографа, и показали их удовлетворительное соответствие. По данным работы [27] для расстояния $r = 10a$ получена приближённая оценка $N = 5 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$.

Более надёжные сведения о зависимости $N(r)$ удалось получить при использовании двухчастотной линии связи, в которой неточности определения траектории слабо влияют на оценки интегральной электронной концентрации. Двухчастотный метод позволяет с высокой точностью измерять разность запаздываний радиоволн $\Delta t_{3,4}$ на двух частотах f_3 и f_4 при приближении и удалении трассы AB от Солнца. Экспериментальная зависимость $\Delta t_{3,4}(p)$ определяет интегральную электронную концентрацию J на линии AB для разных прицельных расстояний p , а зависимость $J(p)$ позволяет найти радиальное распределение электронной концентрации $N(r)$.

Коэффициент преломления плазмы на высоких частотах связан с электронной концентрацией соотношением $n = 1 - \chi N f^{-2}$, поэтому запаздывание радиоволн в плазме пропорционально интегральной электронной концентрации J :

$$\Delta t = \chi f^{-2} c_0^{-1} \int_A^B N(r) dl = c_0^{-1} \chi f^{-2} J(p). \quad (8)$$

Из формулы (8) следует, что разность запаздываний радиоволн $\Delta t_{3,4}$, измеренных на частотах f_3 и f_4 , связана с интегральной электронной концентрацией следующим образом:

$$J(p) = \frac{c_0^{-1} \Delta t_{3,4}(p)}{\chi (f_3^{-2} - f_4^{-2})}. \quad (9)$$

В этих соотношениях постоянная $\chi = 40,4 \text{ м}^3 \cdot \text{Гц}^2$, c_0 — скорость радиоволны в вакууме в м/с, f — частота в герцах, N_0 — электронная концентрация в м^{-3} .

Учитывая, что элемент длины dl на линии AB связан с гелиоцентрическим расстоянием r соотношением $dl = (r^2 - p^2)^{-1/2} r dr$, имеем

$$J(p) = 2 \int_p^{cb} \frac{N(r)r dr}{(r^2 - p^2)^{1/2}}. \quad (10)$$

В формуле (10) сделано несущественное приближение $|CB| \approx |CA|$, т. е. интеграл по линии AB равен удвоенному интегралу по отрезку $|CB| \approx 215a$ (рис. 1). В этом интегральном соотношении функция $J(p)$ известна по экспериментальным данным, а найти необходимо концентрацию $N(r)$. Согласно работам [5, 28] строгое решение этой задачи даёт интегральное преобразование Абеля, в которое входит производная dJ/dp :

$$N(r) = -\frac{1}{\pi} \int_r^{cb} \frac{dJ}{dp} \frac{dp}{(r^2 - p^2)^{1/2}}. \quad (11)$$

В формуле (8) интегрирование осуществляется вдоль лучевой линии от космического аппарата до наземного пункта (точки A и B на рис. 1). В выражении (10) интегрирование проводится вдоль радиального направления r от $r_{\min} = p$ до $r_{\max} = CB$ (рис. 1).

Поскольку зависимость $J(p)$ определяется по ограниченному числу измерений, имеющих значительные ошибки, то найти производную dJ/dp по экспериментальным данным затруднительно. Поэтому часто используют подходящую аппроксимацию $N(r)$ и по формуле (10) находят её параметры. При расстояниях $p > 4a$ считается возможным использовать аппроксимацию

$$N(r) = B (a/r)^\xi F(\varphi). \quad (12)$$

Здесь $F(\varphi)$ — модельная зависимость концентрации плазмы от гелиошироты φ , отличающаяся у разных авторов. Если аппарат движется почти в плоскости эклиптики и $|\varphi| < 40^\circ$, то полагают $F = 1$.

Зависимость (12) имеет два параметра: B и ξ . Если для расстояний $p > 40a$ можно считать, что скорость солнечного ветра не зависит от расстояния r , то концентрация должна удовлетворять соотношению $N(r) \propto r^{-2}$, тогда $\xi = 2$. Из предыдущего раздела следует, что скорость солнечного ветра V увеличивается в $5 \div 7$ раз при изменении расстояния r от $7a$ до $25a$, поэтому в этой области расстояний показатель степени ξ должен быть отличен от 2. Авторы работ [28–35] путём подбора находят параметры B и ξ , соответствующие экспериментальным зависимостям $J(p)$. Такой способ определения $N(r)$ затрудняет оценку точности измерения электронной концентрации.

Радиоопросвечивание околосолнечной плазмы с привлечением двухчастотного метода было впервые реализовано в эксперименте [28] с помощью аппарата «Викинг», на котором функционировали линии космической связи на частотах f_3 и f_4 . Эксперименты проводились в ноябре–декабре 1976 года в период минимума солнечной активности, когда удалось измерить разность запаздывания радиоволн $\Delta t_{3,4}$ при изменении прицельного расстояния в пределах $p = (4 \div 170)a$ как при приближении, так и при удалении линии AB от Солнца.

Авторы работы [28] приводят экспериментальную зависимость запаздывания радиоволн от расстояния p и находят, что эта зависимость хорошо соответствует формуле

$$\Delta t_{3,4}[\text{нс}] = 1,2 \cdot 10^5 (a/p)^{1,7} + 2,55 \cdot 10^4 (a/p). \quad (13)$$

На этом основании в публикации [28] радиальная зависимость электронной концентрации аппроксимируется соотношением

$$N(r) = D (a/r)^{2,7} \exp(-\varphi^2/\varphi_1^2) + B (a/r)^2. \quad (14)$$

В формуле (14) экспоненциальный множитель у первого слагаемого при $\varphi_1 = 8^\circ$ описывает предполагаемое уменьшение концентрации N с ростом гелиошироты, а при $|\varphi| < 40^\circ$ его можно полагать равным единице. Авторы находят значения параметров D и B , наилучшим образом соответствующие экспериментальным данным: $D = 1,32 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$, $B = 2,3 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$.

Более объективная зависимость $N(r)$ была получена с использованием преобразования (11). Производная dJ/dp находилась численно после усреднения экспериментальной зависимости $J(p)$ скользящим окном с шириной $\Delta p = 2a$. Оба метода дали одинаковый результат, что свидетельствует о надёжности полученной зависимости $N(r)$. По этим данным на расстоянии $r = 10a$ концентрация плазмы равна $6 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$, а для $r/a = 20$ концентрация $N = 10^3 \text{ см}^{-3}$. При радиусе $r > 40a$ экспериментальные данные хорошо соответствуют зависимости $N(r) \propto r^{-2}$. При удалённости $r < 20a$ наблюдается систематическое превышение экспериментальных значений концентрации над зависимостью $N(r) \propto r^{-2}$, что свидетельствует о снижении скорости солнечного ветра при уменьшении r .

В кратком сообщении [29] приведены результаты определения величины $\Delta t_{3,4}$ и зависимости $J(p)$ по данным радиопросвечивания плазмы с помощью аппарата «Вояджер-2» в ноябре–декабре 1985 года при низкой солнечной активности. Этот аппарат двигался в плоскости эклиптики так, что радиопросвечивание осуществлялось для гелиоширот $|\varphi| < 8^\circ$. В экспериментах удалось получить ограниченное число значений $\Delta t_{3,4}$, когда прицельное расстояние p изменялось от $6a$ до $38a$. При определении зависимости $N(r)$ авторы используют аппроксимацию (12) при коэффициенте $F(\varphi) = 1$ и находят параметры B и ξ .

Оказалось, что в период измерений наблюдалась сильная асимметрия распределения концентрации плазмы: на участке приближения лучевой линии AB к Солнцу показатель степени $\xi_1 = 2,6$, а при удалении от Солнца $\xi_2 = 2$; также было зарегистрировано существенное отличие множителя B при измерениях на участках приближения и удаления лучевой линии от Солнца. Для участка приближения линии AB при относительном расстоянии $r/a = 10$ электронная концентрация $N = 6 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$, а при удалении $N = 9,5 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$. В работе [30] эти результаты проанализированы с привлечением данных о состоянии короны Солнца, полученных с помощью коронографа. Было показано, что асимметрия и значительное увеличение электронной концентрации обусловлены мощными выбросами плазмы, произошедшими во время радиопросвечивания.

В декабре 1988 года при высокой солнечной активности удалось осуществить ещё одно радиопросвечивание плазмы [31] с помощью аппарата «Вояджер-2». Основные измерения запаздывания радиоволн были проведены при изменении расстояния p в пределах от $10a$ до $87a$ и гелиошироте $|\varphi| \leq 20^\circ$. В результате обработки данных с использованием аппроксимации (12) было получено по два значения параметров: $\xi_1 = 2,08 \pm 0,05$, $B_1 = (2,93 \pm 0,07) \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$ и $\xi_2 = 2,28 \pm 0,05$, $B_2 = (7,08 \pm 0,24) \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$. Для расстояний $r < 10a$ данных было мало, но всё же удалось получить оценку параметров: $\xi_1 = 2,7 \pm 0,2$, $B_1 = (2,1 \pm 0,4) \cdot 10^7 \text{ см}^{-3}$. По материалам этих экспериментов электронная концентрация на расстоянии $r = 10a$ была равна $3,4 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$, а для $r = 20a$ концентрация $N = 5,8 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$, что свидетельствует о значительном увеличении электронной концентрации в период высокой солнечной активности.

В период с мая по сентябрь 1991 года при высокой солнечной активности осуществлялось радиопросвечивание плазмы [32, 33] с помощью аппарата «Улисс». Было проведено 56 измерений разности запаздывания радиоволн $\Delta t_{3,4}$ при изменении расстояния в пределах $p = (5 \div 40) a$ и $|\varphi| < 20^\circ$. В шести измерениях была определена интегральная электронная концентрация для высоких широт, что потребовало учёта широтной зависимости $F(\varphi)$. Используя аппроксимацию (12) и экспериментальные данные, были определены параметры B и ξ : для участков приближения лучевой линии к Солнцу $\xi_1 = 2,54 \pm 0,05$; $B_1 = (3,61 \pm 0,04) \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$, для участков удаления лучевой линии $\xi_2 = 2,42 \pm 0,05$; $B_2 = (2,26 \pm 0,03) \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$. При этих значениях параметров концентрация плазмы на расстоянии $r = 20a$ равна $(1,7 \pm 0,1) \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$. Авторы работ [32] и [33] отмечают нерегулярные отклонения зависимости $J(p)$ от аппроксимирующей функции (12) и связывают их с активными областями на Солнце.

В публикациях [34, 35] изложены результаты ещё одного радиопросвечивания плазмы, осуществлённого в феврале–марте 1995 года с помощью аппарата «Улисс». В этом эксперименте околополярная область зондировалась при изменении расстояния в небольшом интервале $p = (21 \div 30) a$ и больших вариациях широты от $\varphi = 84^\circ$ до $\varphi = 30^\circ$, что позволило по экспериментальным данным оценить широтную зависимость $F(\varphi)$. Авторы сопоставляют экспериментальную зависимость концентрации плазмы от широты с различными модельными функциями $F(\varphi)$ и отмечают сильное влияние активных областей Солнца на зависимость $F(\varphi)$. По-видимому, зависимость $F(\varphi)$ изменчива, что не позволило определить её в рамках единственного эксперимента по радиопросвечиванию околополярной области Солнца.

В результате многократных измерений концентрации плазмы были получены экспериментальные зависимости $N(r)$ для гелиошироты $|\varphi| < 40^\circ$ при разном уровне солнечной активности, при этом не выявлено ясной зависимости средней электронной концентрации от уровня солнечной активности. При высокой активности Солнца нерегулярно наблюдается увеличение концентрации N в $3 \div 5$ раз. Если исключить такие события, можно принять следующие средние значения концентрации плазмы солнечного ветра: $N = 1,4 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ при относительном расстоянии $r/a = 20$ и $N = 6,7 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ при $r/a = 10$. Показатель ξ степенной зависимости (12) по данным разных авторов изменяется от 2,05 до 2,6; чем ближе удаётся расположить лучевую линию AB к Солнцу, тем большее значение ξ следует из экспериментальных данных. Зависимости $N(r)$ представляются авторами степенной функцией, что находится в противоречии с результатами измерений скорости солнечного ветра, описанными в предыдущем разделе.

Найдём аппроксимацию радиальной зависимости электронной концентрации с учётом закономерностей скорости солнечного ветра. Для этого используем выражение для полного потока плазмы L через сферу, охватывающую Солнце:

$$L = 4\pi (r/a)^2 V N = 4\pi (215)^2 V_m N_m, \quad (15)$$

здесь N_m — электронная концентрация в районе орбиты Земли. Если считать поток плазмы L постоянным и пренебречь зависимостью величин N и V от гелиошироты, то из формул (5) и (15) следует

$$N_a = N_m (215)^2 / \left[\left(\frac{r}{a} \right)^2 \text{th}(x) \right]. \quad (16)$$

Согласно выражению (16) в области $r/a > 40$, где скорость солнечного ветра не зависит от гелиоцентрического расстояния, концентрация $N(r) \propto r^2$, а при $r/a < 20$ имеем отличие профиля $N(r)$ от простой степенной зависимости.

Положим, что концентрация $N_m = 8 \text{ см}^{-3}$; коэффициент $\eta = 0,04$ в формуле (5) и найдём по формуле (16) аппроксимирующие значения N_a . Вычисленные таким образом значения N_a и экспериментальные данные о средней концентрации N_e при низкой солнечной активности находятся в удовлетворительном соответствии.

3. МОЩНОСТЬ И УСКОРЕНИЕ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

Из экспериментальных данных следует, что область основного ускорения солнечного ветра соответствует расстояниям $r/a = 3 \div 40$, для которых получены надёжные зависимости $V(r)$ и $N(r)$. Проанализируем мощность W и ускорение солнечного ветра, используя аппроксимации (5) и (16). Полную мощность солнечного ветра выразим через темп потери массы Солнца dM/dt и скорость V в соответствии с известными соотношениями

$$W = \frac{dM}{dt} \frac{V^2}{2}, \quad (17)$$

$$\frac{dM}{dt} = 4\pi r^2 m V(r) N(r). \quad (18)$$

Здесь dM/dt — величина, не зависящая от r , m — масса протона. По нашим данным для расстояния $r = 10a$ средняя скорость и концентрация солнечного ветра составляют $V = 100 \text{ км/с}$ и $N = 7 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ соответственно, поэтому $dM/dt = 0,7 \cdot 10^9 \text{ кг}$. Если для удалённости $r = 215a$ положить $V_m = 300 \text{ км/с}$, $N_m = 8 \text{ см}^{-3}$, то получим известное значение $dM/dt = 1,1 \cdot 10^9 \text{ кг}$.

Используя выражения (5) и (17), найдём мощность солнечного ветра в области его ускорения:

$$W = \frac{dM}{dt} \frac{V_m^2}{2} \text{th}^2(x). \quad (19)$$

На рис. 4 кривая 1 соответствует найденной по формуле (19) зависимости мощности W от гелиоцентрического расстояния. Видно, что при изменении параметра r/a от 4 до 40 мощность солнечного ветра увеличивается в 30 раз.

Ускорение плазмы

$$A = \frac{dV}{dt} = \frac{dV}{dr} \frac{dr}{dt} = \frac{dV}{dr} V \quad (20)$$

найдем с использованием соотношения (5):

$$A = \frac{4\eta V_m^2}{a} \frac{\text{th}(x)}{[\exp(x) + \exp(-x)]^2}, \quad (21)$$

где параметр $4\eta V_m^2/a = 20,6 \text{ м/с}^2$ при коэффициенте скорости $\eta = 4 \cdot 10^{-2}$ и $V_m = 300 \text{ км/с}$. На рис. 4 кривая 2 соответствует зависимости (21) ускорения плазмы от расстояния. Видно, что в области $4 < r/a < 30$ происходит основное ускорение плазмы, максимальное ускорение, равное $2,7 \text{ м/с}^2$, достигается при отношении $r/a \approx 15$.

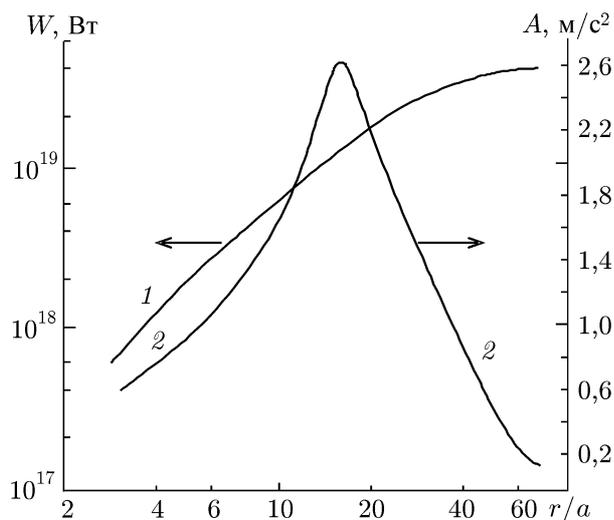


Рис. 4. Зависимости мощности W (кривая 1) и ускорения A (кривая 2) солнечного ветра от гелиоцентрического расстояния в области основного разгона плазмы

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе приведены эмпирические закономерности для концентрации, скорости, мощности и ускорения солнечного ветра при низкой или умеренной солнечной активности для гелиоцентрических расстояний $3a < r < 40a$. В этой области температура плазмы изменяется незначительно, поэтому удалось найти удобные аналитические представления указанных характеристик плазмы. По данным работ [2, 4] на расстояниях $r < 1,5a$ резко возрастает температура от $6 \cdot 10^3 \text{ К}$ у фотосферы до 10^6 К при $r \approx 1,5a$ и действуют гипотетические, слабо обоснованные механизмы передачи энергии плазмы. Поэтому представленные в этой статье соотношения нельзя распространять на область $r < 3a$. Было отмечено, что при отношении $r/a > 40$ скорость V не зависит от расстояния и совпадает со значением V_m , регистрируемым другими методами вблизи орбиты Земли. К этому замечанию следует относиться с осторожностью, т.к. ошибки измерений скоростей V и V_m могут достигать 30 %. Можно полагать, что на расстояниях $40 < r/a < 215$ происходит небольшое ускорение плазмы, скрытое неточностями экспериментальных данных.

В настоящее время развито несколько вариантов теории солнечного ветра, включающих гипотетические, мало обоснованные источники и стоки энергии в процессе ускорения плазмы [2–4]. Эти варианты теории используют хорошо обоснованные граничные условия для характеристик плазмы на расстоянии $r = 215a$ (на орбите Земли) и их ориентировочные значения вблизи фотосферы или в нижней части короны Солнца. Неточности граничных условий и неясность факторов, обуславливающих ускорение плазмы до сверхзвуковой скорости, не позволяют сформулировать «окончательную» теорию солнечного ветра. В данной работе указаны характеристики плазмы в области её ускорения, найденные методом радиопросвечивания. Данные характеристики должны учитываться при сопоставлении результатов различных вариантов теории. Особое

значение для понимания причин разгона солнечного ветра до сверхзвуковой скорости имеет определение ускорения, что с учётом концентрации плазмы позволяет найти сумму сил, действующих на среду.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Паркер Е. Н. Динамические процессы в межпланетной плазме. М.: Мир, 1965.
2. Хундхаузен А. Расширение короны и солнечный ветер. М.: Мир, 1976.
3. Коваленко В. А. Солнечный ветер. М.: Наука, 1983.
4. Плазменная гелиогеофизика. Т. 1. / Под ред. Л. М. Зелёного, И. С. Веселовского. М.: Физматлит, 2008.
5. Яковлев О. И. Космическая радиофизика М.: Научная книга, 1998.
6. Yakovlev O. I., Efimov A. I., Razmanov V. M., Shtrykov V. K. // *Acta Astronautica*. 1980. V. 7. P. 235.
7. Kolosov M. A., Yakovlev O. I., Efimov A. I., et al. // *Radio Sci.* 1982. V. 17, No. 3. P. 664.
8. Ефимов А. И., Яковлев О. И., Штрыков В. К. и др. // *Радиотехника и электроника*. 1981. Т. 26, № 2. С. 311.
9. Яковлев О. И., Ефимов А. И., Разманов В. М., Штрыков В. К. // *Астрон. журн.* 1980. Т. 57, № 4. С. 790.
10. Яковлев О. И., Ефимов А. И., Якубов В. П. и др. // *Изв. вузов. Радиофизика*. 1989. Т. 32, № 5. С. 531.
11. Якубов В. П., Яковлев О. И., Ефимов А. И., Ерофеев А. П. // *Изв. вузов. Радиофизика*. 1991. Т. 34, № 6. С. 615.
12. Ефимов А. И., Яковлев О. И., Разманов В. М. // *Письма в Астрон. журн.* 1977. Т. 3, № 7. С. 322.
13. Efimov A. I., Bird M. K., Rudas V. K., et al. // *Adv. Space Res.* 2005. V. 35. P. 2189.
14. Колосов М. А., Яковлев О. И., Ефимов А. И. и др. // *Доклады АН*. 1978. Т. 241, № 3. С. 555.
15. Tyler G. L., Vesecky J. F., Plume M. A., et al. // *Astrophys. J.* 1981. V. 249. P. 318.
16. Яковлев О. И., Ефимов А. И., Рубцов С. Н. // *Космич. исслед.* 1987. Т. 25, № 2. С. 251.
17. Ефимов А. И., Яковлев О. И., Рубцов С. Н. и др. // *Радиотехника и электроника*. 1987. Т. 32, № 10. С. 2025.
18. Ефимов А. И., Чашей Н. В., Шишов В. Н., Яковлев О. И. // *Космич. исслед.* 1990. Т. 28, № 4. С. 581.
19. Рубцов С. Н., Яковлев О. И., Ефимов А. И. // *Космич. исслед.* 1987. Т. 25, № 4. С. 620.
20. Яковлев О. И., Ефимов А. И., Рубцов С. Н. // *Астрон. журн.* 1988. Т. 65, № 6. С. 1290.
21. Ефимов А. И., Луканина Л. А., Самознаев Л. Н. и др. // *Радиотехника и электроника*. 2009. Т. 54, № 7. С. 773.
22. Wohlmuth R., Plettmeier D., Edenhofer P., et al. // *Radio Sci.* 1997. V. 32. P. 617.
23. Janardhan P., Bird M., Edenhofer P., et al. // *Solar Physics*. 1999. V. 184. P. 157.
24. Chashei I. V., Efimov A. I., Samoznaev L. N., et al. // *Adv. Space Res.* 2005. V. 36, No. 8. P. 1454.
25. Efimov A. I., Bird M. K., Chashei I. V. // *Adv. Space Res.* 2003. V. 32. P. 485.
26. Dollfus A., Mouradian Z. // *Solar Phys.* 1981. V. 70, No. 1. P. 3.
27. Muhleman D. O., Esposito P. B., Anderson J. D. // *Astrophys. J.* 1977. V. 211, No. 3. P. 943.
28. Muhleman D. O., Anderson J. D. // *Astrophys. J.* 1981. V. 247, No. 3. P. 1093.
29. Anderson J. D., Krisher T. P., Borutzki S. E., et al. // *Astrophys. J.* 1987. V. 323, No. 2. P. 141.
30. Woo R. // *Astrophys. J.* 1996. V. 458. P. 87.
31. Krisher T. P., Anderson J. D., Morabito D. D., et al. // *Astrophys. J.* 1991. V. 375, No. 1. P. 57.

32. Bird M. K., Volland H., Patzold M., et al. // *Astrophys. J.* 1994. V. 426, No. 1. P. 373.
33. Patzold M., Bird M. K., Edenhofer P., et al. // *Geophys. Res. Lett.* 1995. V. 22. P. 3313.
34. Bird M. K., Patzold M., Edenhofer P., et al. // *Astron. Astrophys.* 1996. V. 316. P. 441.
35. Patzold M., Bird M. K. // *Geophys. Res. Lett.* 1998. V. 25. P. 1845.

Поступила в редакцию 17 декабря 2013 г.; принята в печать 17 января 2014 г.

**DETERMINATION OF THE VELOCITY, DENSITY, POWER, AND
ACCELERATION OF SOLAR WIND BY THE METHOD OF RADIO SOUNDING
OF THE NEAR-SOLAR PLASMA BY THE SPACECRAFT SIGNALS**

O. I. Yakovlev

Different approaches for determining the velocity and density of near-solar plasma by the method of radio sounding using the high-stability signals of spacecraft are analyzed. The results of studying the characteristics of solar wind at heliocentric distances of 3–50 solar radii are presented. Experimental results on the velocity, density, power, and acceleration of plasma for the specified distances are given.