

УДК 533.951.2

*Г. А. Котова, Е. И. Грингауз, В. В. Безруких,
М. И. Веригин, Л. А. Швачунова, В. Ридлер,
К. Швингеншу*

**ЗАВИСИМОСТЬ СКОРОСТИ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА
ОТ РАССТОЯНИЯ ДО ГЕЛИОСФЕРНОГО ТОКОВОГО СЛОЯ
ПО ДАННЫМ СПУТНИКА «ПРОГНОЗ-9»**

Сопоставляется крупномасштабная структура рекуррентных высокоскоростных потоков солнечного ветра, регистрировавшихся на спутнике «Прогноз-9» в 1983–1984 гг., с крупномасштабной структурой гелиосферного токового слоя. Количественно исследована зависимость скорости солнечного ветра V от углового расстояния λ до этого образования. Определенная по полному массиву измерений V на спутнике «Прогноз-9», зависимость $V(\lambda)$ аппроксимируется выражением V (км/с) = $410 + 305 \sin^2 \lambda$. Показано, что разброс экспериментальных точек относительно аппроксимирующей кривой уменьшается, если учесть, что средняя скорость солнечного ветра на пути от Солнца до Земли меньше скорости V , измеренной на орбите Земли.

Измерения солнечного ветра на спутнике «Прогноз-9» в период с июля 1983 г. по февраль 1984 г. пришлись на фазу спада 21-го цикла солнечной активности. Как известно, на фазе спада предыдущего 20-го солнечного цикла в плоскости эклиптики наблюдались крупные рекуррентные высокоскоростные потоки солнечного ветра, сохранявшиеся на протяжении 5–6 оборотов Солнца. В работе [1] по данным «Прогноза-9» был сделан вывод о возобновлении регулярной структуры высокоскоростных потоков солнечного ветра на фазе спада текущего цикла солнечной активности. В настоящей работе будет сопоставлена крупномасштабная структура таких потоков с крупномасштабной структурой гелиосферного токового слоя и исследована зависимость скорости солнечного ветра от углового расстояния до этого образования.

Зависимость параметров солнечного ветра от углового расстояния до гелиосферного токового слоя λ , проявляющаяся на некоторых фазах 11-летнего солнечного цикла как гелиоширотная зависимость, активно обсуждается в настоящее время (см., например, [2–5]). По вполне понятным причинам, связанным с ограниченностью прямых измерений солнечного ветра плоскостью эклиптики, с интегральным характером измерений его скорости методом межпланетных сцинтилляций, а также с изменениями в межпланетной среде, генерированными транзиентами во внешней короне Солнца (движущимися наружу облаками плазмы, ударными волнами, эруптивными протуберанцами и т. п.), зависимость параметров солнечного ветра от λ установлена не вполне надежно.

То обстоятельство, что измерения солнечного ветра на «Прогнозе-9» проводились на фазе спада солнечной активности, когда структура гелиосферного токового слоя наиболее регулярна и токовый слой наблюдается на значительных удалениях от плоскости эклиптики, способствует выявлению

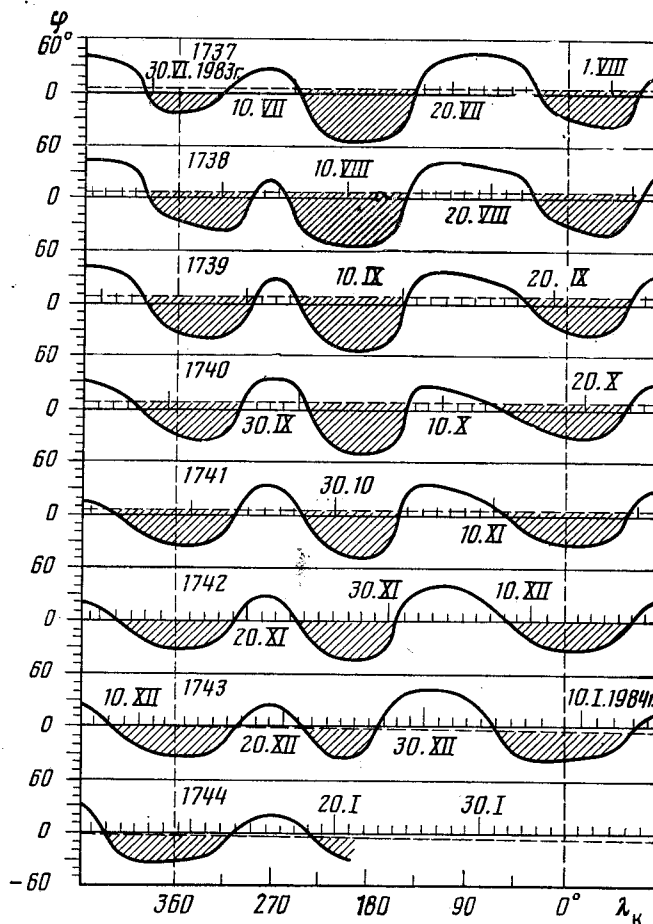


Рис. 1. Положение гелиосферного токового слоя в 1983–1984 гг. в координатах кэррингтоновская долгота λ_k – кэррингтоновская широта φ_k . По оси абсцисс указаны также даты по мировому времени. Вертикальными штриховыми линиями отмечены границы кэррингтоновских оборотов Солнца с 1737 по 1744

нию зависимости параметров солнечного ветра от угловых расстояний до этого образования. (В период минимума солнечной активности гелиосферный токовый слой ограничен низкими широтами и в значительной мере нерегулярен в фазе максимума [6].)

1. Анализ экспериментальных данных. Как отмечалось в предыдущей работе [1], уникально высокая орбита спутника «Прогноз-9» позволяет получать практически непрерывную информацию о крупномасштабных образованиях в солнечном ветре. Измерения ионного компонента плазмы на этом спутнике проводились при помощи широкоугольного энергоспектрометра модуляционного типа Д-137А. Подробное описание особенностей плазменного эксперимента и метода обработки данных приведено в работах [1, 7].

Регулярная структура высокоскоростных потоков солнечного ветра, наблюдавшаяся в период активной работы спутника «Прогноз-9» (см. рис. 2 в [1]), очевидно, должна быть связана с регулярным характером крупномасштабного магнитного поля Солнца в этот период времени, поскольку вблизи его поверхности R_c магнитное поле контролирует движение плазмы и линии тока близки к магнитным силовым линиям. Для анализа этой связи удобно воспользоваться представлениями о концентрической «поверхности источника» R_n , развитыми в работах [8, 9].

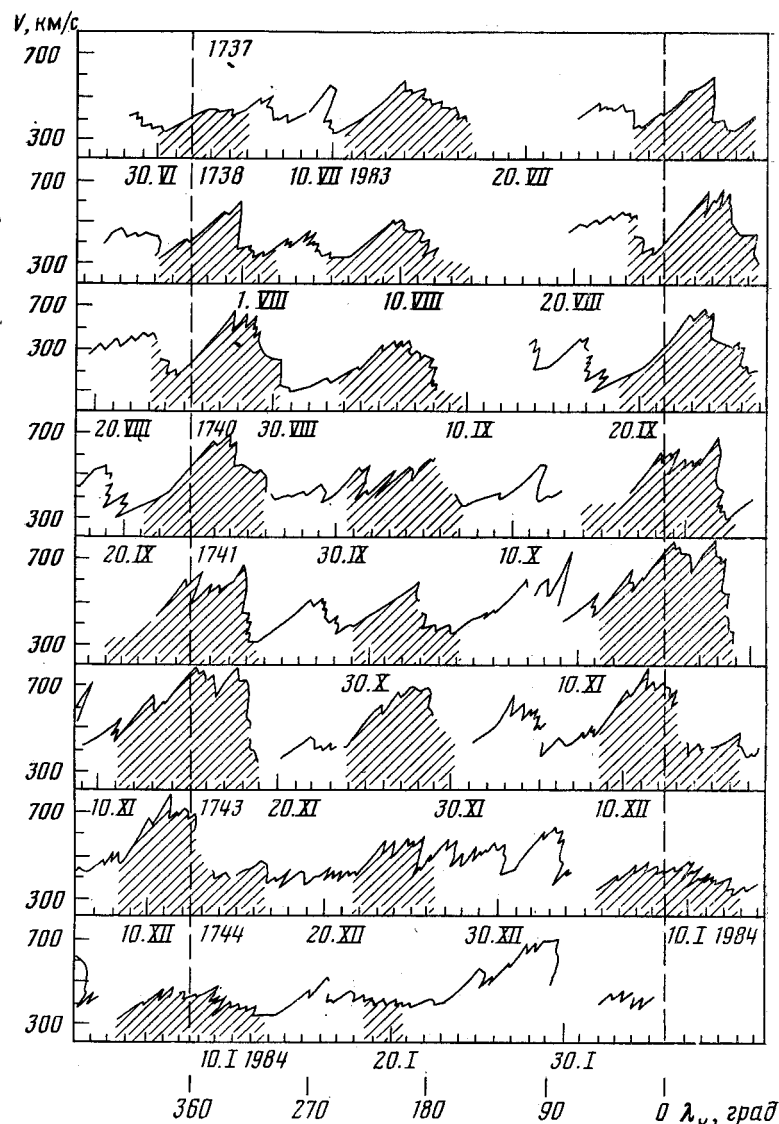


Рис. 2. Распределение скорости солнечного ветра по данным «Прогноза-9» вдоль проекции траектории спутника на «поверхность источника»
 Обозначения те же, что и на рис. 1

В приближенной модели с «поверхностью источника» предполагается, что в сферической оболочке $R_c < r < R_n$ влиянием плазмы на магнитную конфигурацию за счет электрических токов можно пренебречь и магнитное поле \mathbf{B} получить из скалярного магнитного потенциала, удовлетворяющего уравнению Лапласа. При $r > R_n$ влияние плазмы преобладает, а силовые линии принимают спиральную форму, определяющуюся общим радиальным расширением плазмы. Решение потенциальной задачи в оболочке $R_c < r < R_n$ требует выбора подходящих граничных условий. В качестве граничного условия на $r = R_n$ обычно выбирается требование постоянства магнитного потенциала на этой поверхности, т. е. чтобы магнитное поле (и поток плазмы) было чисто радиальным. В качестве граничного условия на $r = R_c$ берутся данные фотосферных магнитных наблюдений.

На рис. 1 для анализируемого интервала времени приведены результаты расчетов положения гелиосферного токового слоя, выполненных

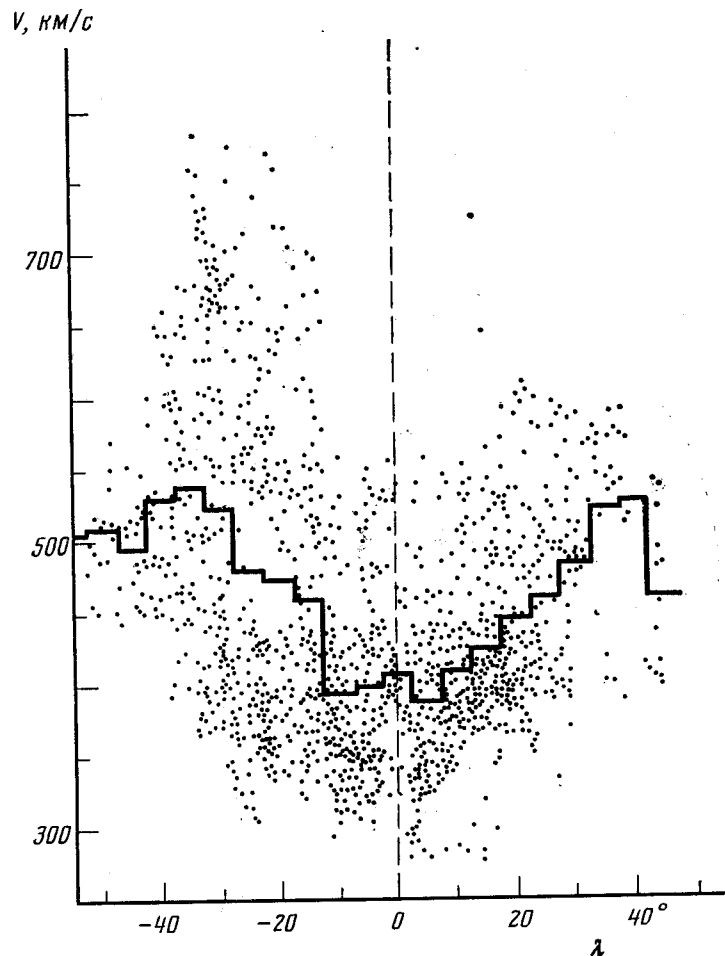


Рис. 3. Распределение трехчасовых средних значений скорости солнечного ветра в зависимости от углового расстояния до токового слоя

в работе [10] в рамках модели с «поверхностью источника» при $R_n = 2,5 R_c$. В качестве внутренних граничных условий в этих расчетах брались результаты измерений магнитного поля вдоль луча зрения, проведенных в Стэнфордской солнечной обсерватории. Штриховой линией на рис. 1 показана проекция орбиты Земли на поверхность R_n , заштрихованы интервалы времени, когда эта проекция приходилась на северное полушарие Солнца относительно межпланетного токового слоя. На фазе спада 21-го цикла солнечной активности крупномасштабное магнитное поле в северном полушарии Солнца было направлено «от Солнца».

Для того чтобы сравнить результаты измерения скорости солнечного ветра на «Прогнозе-9», с рассчитанным в работе [10] положением межпланетного токового слоя, необходимо определить гелиографическую долготу места на «поверхности источника», откуда был испущен солнечный ветер. Если предположить, что его скорость не изменялась на расстоянии L от «поверхности источника» до орбиты Земли, то на момент регистрации солнечного ветра со скоростью V разность гелиографических долгот источника этого ветра и Земли будет составлять $\Delta\lambda = \Omega_c L / V$, где $\Omega_c = 14,18$ град/сут — угловая скорость вращения Солнца. Поскольку относительно «поверхности источника» Земля движется с угловой скоростью $\Omega_c - \Omega_z$, задержка между временем прохождения Земли над областью ис-

точника солнечного ветра со скоростью V и временем регистрации испущенной им плазмы составляет

$$\Delta t = \frac{\Delta \lambda}{\Omega_c - \Omega_3} = \frac{\Omega_c}{\Omega_c - \Omega_3} \cdot \frac{L}{V}, \quad (1)$$

где $\Omega_3 = 0,98$ град/сут — угловая скорость орбитального движения Земли. Отметим, что эта задержка превышает время распространения солнечного ветра от «поверхности источника» до орбиты Земли, равное L/V .

С учетом выражения (1) каждое из трехчасовых средних значений скорости солнечного ветра V , измеренное на спутнике «Прогноз-9» в интервал времени t , было последовательно «спроектировано» на «поверхность источника»: $(V, t) \Rightarrow (V, t - \Delta t(V))$. Результаты такого «проектирования» приведены на рис. 2. Их можно интерпретировать как рассчитанное в кинематическом приближении (невзаимодействующие частицы)

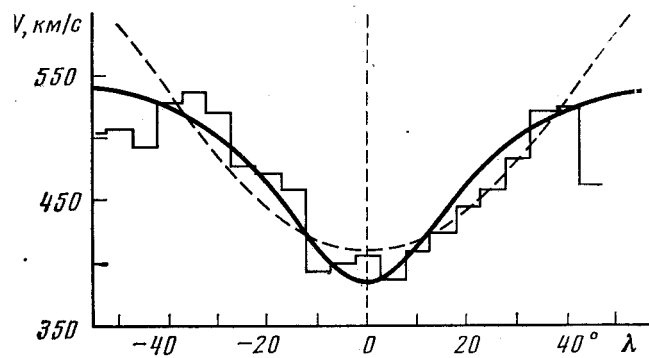


Рис. 4. Эмпирические зависимости скорости солнечного ветра от углового расстояния до токового слоя $V = 410 + 305 \sin^2 \lambda$ — штриховая линия, $V = 552 - 167 / \text{ch}(\lambda / 16,3)$ — сплошная

распределение скорости солнечного ветра вдоль проекции траектории спутника (штриховая линия на рис. 1) на «поверхность источника». На рис. 2, как и на рис. 1, штриховкой отмечены интервалы времени, когда «Прогноз-9» находился в северном относительно гелиосферного токового слоя полушария Солнца; переход от незаштрихованного участка к заштрихованному и обратно соответствует пересечению токового слоя (на R_n). Как можно видеть из рис. 2, в большинстве случаев скорость солнечного ветра увеличивается при удалении от токового слоя.

Для количественного описания этого эффекта будем использовать представление об угловом расстоянии λ до токового слоя, определив его как кратчайшее угловое расстояние между токовым слоем и проекцией положения спутника на R_n в момент $t - \Delta t(V)$, причем $\lambda < 0$, если эта проекция находится в северном полушарии относительно токового слоя и $\lambda > 0$, если в южном. На рис. 3 с использованием приведенного на рис. 1 положения гелиосферного токового слоя и «спроектированной» на «поверхность источника» скорости солнечного ветра V (рис. 2), показана зависимость V от углового расстояния до токового слоя λ для всех 1390 трехчасовых средних значений скорости солнечного ветра по данным спутника «Прогноз-9». Ломаной линией на рис. 3 показаны результаты усреднения V по 5°-интервалам λ .

Как можно видеть из рис. 3, скорость солнечного ветра имеет тенденцию к увеличению при удалении от токового слоя возрастая в среднем

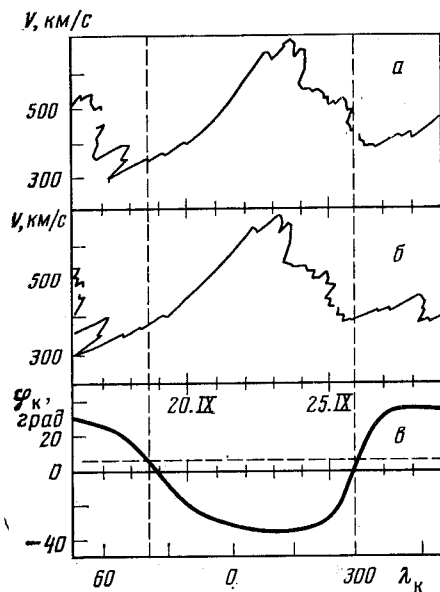


Рис. 5. Распределение скорости солнечного ветра «спроектированное» на «поверхность источника» при условии $\langle V \rangle = V$ (а) и $\langle V \rangle = 0,85 V$ (б) и положение токового слоя (в)

Проекция траектории спутника показана горизонтальной штриховой линией (в). Вертикальными штриховыми линиями отмечены моменты пересечения токового слоя

сти.) Для сравнения на этом же рисунке показаны, как и на рис. 3, результаты усреднения V по 5° -интервалам λ .

Обращает на себя внимание следующая особенность распределения «спроектированной» на «поверхность источника» скорости солнечного ветра. Как можно видеть из рис. 2, наибольшие значения V в среднем достигаются не при максимальном удалении от токового слоя, а ближе к выходу из северного или южного полушария Солнца относительно межпланетного токового слоя. Отмеченное обстоятельство, по-видимому, связано с тем, что на самом деле средняя скорость солнечного ветра $\langle V \rangle$ до спутника меньше, чем V , измеренная на орбите Земли:

$$\langle V \rangle = L \int_{R_H}^{R_H+L} \frac{dr}{V(r)} < V. \quad (2)$$

На рис. 5 проведено сравнение результатов «проектирования» скорости солнечного ветра на «поверхность источника» с использованием в выражении (1) вместо V в первом случае $\langle V \rangle = V$ и во втором случае $\langle V \rangle = 0,85 V$. Как можно видеть из этого сравнения, в последнем случае профиль V расположен более симметрично относительно моментов пересечения токового слоя.

Использование при «проектировании» на «поверхность источника» предположения $\langle V \rangle < V$ до некоторой степени устраняет гистерезис зависимости $V(\lambda)$, связанный с несимметрией профиля V относительно моментов пересечения токового слоя при $\langle V \rangle = V$. На рис. 6 для того же интервала времени, что и на рис. 5, показана зависимость скорости солнечного

от $350 \div 400$ км/с при $\lambda = 0^\circ$ до $500 \div 550$ км/с при $\lambda = 40^\circ$. Теоретическое выражение для описания зависимости $V(\lambda)$ отсутствует, а весьма значительный разброс экспериментальных данных позволяет использовать для аппроксимации $V(\lambda)$ эмпирические выражения только с небольшим числом свободных параметров. В работах [5, 11, 12] для описания подобной зависимости использовались, например, эмпирические выражения: $V(\lambda) = a + b \sin^2 \lambda$, $V(\lambda) = a + b / \operatorname{ch}(\lambda/c)$ и $V(\lambda) = a + b / \exp(\lambda/c)^2$. Можно показать, что лучшими значениями параметров a , b и c в этих выражениях, минимизирующими среднеквадратичные отклонения экспериментальных точек (рис. 3) от аппроксимирующей кривой, являются следующие: V (км/с) $= 410 + 305 \sin^2 \lambda$, V (км/с) $= 552 - 167 / \operatorname{ch}(\lambda/16^\circ, 3)$, V (км/с) $= 530 - 144 / \exp(\lambda/23^\circ, 4)^2$. В первом случае коэффициент корреляции $R_1 = 0,434$ естественно несколько ниже, чем во втором и в третьем, где соответственно $R_2 = 0,475$ и $R_3 = 0,478$. Первая и вторая эмпирические зависимости приведены на рис. 4 соответственно штриховой и сплошной линиями. (Третья зависимость не показана, так как ее график очень мало отличается от графика второй зависимости.)

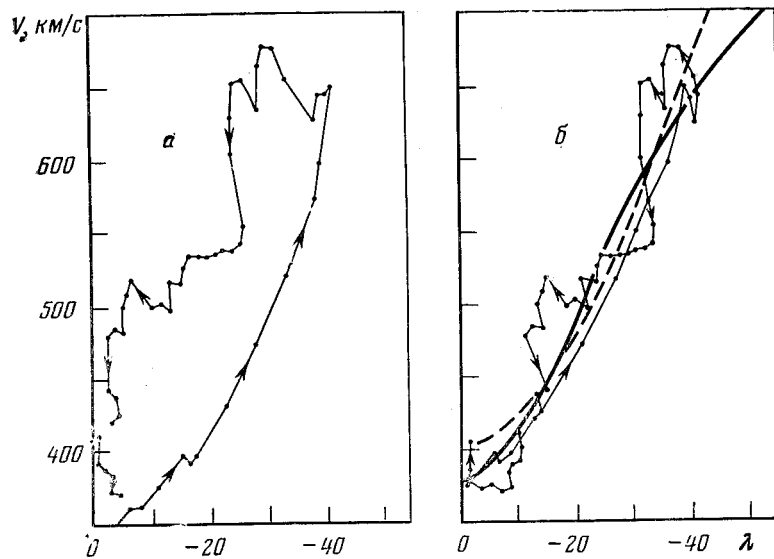


Рис. 6. Зависимость скорости солнечного ветра (по данным «Прогноза-9» за период 24.IX–2.X 1983 г.) от углового расстояния до токового слоя, полученная при условии $\langle V \rangle = V$ (а) и $\langle V \rangle = 0,85 V$ (б). Штриховой и сплошной линиями (б) показаны соответственно эмпирические зависимости: $V = 401 + 664 \sin^2 \lambda$ и $V = 787 - 407 / \operatorname{ch}(\lambda / 22^\circ, 9)$

ветра от углового расстояния до токового слоя λ , полученная, как и ранее, при $\langle V \rangle = V$ и при $\langle V \rangle = 0,85 V$. Видно, что во втором случае «гистерезис» зависимости $V(\lambda)$ практически устраняется, восходящая и нисходящая ветви этой зависимости расположены существенно ближе друг к другу. Разброс экспериментальных точек относительно эмпирических выражений V (км/с) $= 401 + 664 \sin^2 \lambda$ и V (км/с) $= 787 - 407 / \operatorname{ch}(\lambda / 22^\circ, 9)$ в случае $\langle V \rangle = 0,85 V$ относительно невелик (рис. 6), и коэффициенты корреляции для обоих выражений равны соответственно $R_1 = 0,93$ и $R_2 = 0,94$, т. е. практически свидетельствуют не о корреляционной, а о функциональной связи.

2. Обсуждение. В последнее время появилось около десятка публикаций, в которых рассматривается зависимость скорости солнечного ветра от углового расстояния до токового слоя. В данной работе методически наиболее близка работа [4]. Ее авторы также использовали расчеты положения гелиосферного токового слоя, выполненные в работе [13] на основе измерений фотосферного магнитного поля в Стэнфордской солнечной обсерватории, и «проектировали» на «поверхность источника» измеренную на орбите Земли скорость солнечного ветра.

Корреляционная зависимость V (км/с) $= 408 + 473 \sin^2 \lambda$ ($R = 0,384$), полученная в работе [4] несколько круче, чем в настоящей работе (V (км/с) $= 410 + 305 \sin^2 \lambda$ ($R = 0,434$)), и получена по данным, относящимся к периоду минимума 20-го цикла солнечной активности (май 1976 г. — август 1977 г.). Однако вследствие довольно большого разброса исходных данных (см. рис. 4а из работы [4] и рис. 3) вряд ли целесообразно связывать это различие с различием фаз цикла солнечной активности. (Об этом говорит и анализ проведенный в работе [5].)

Вообще, сравнение полученных разными авторами выражений для зависимости $V(\lambda)$ чрезвычайно затруднено в силу неоднородности используемого исходного материала. Например, кроме прямых измерений V используются измерения скорости солнечного ветра методом межпланетных скантлляций [11], положение межпланетного токового слоя определяется по кривым максимальной яркости K -короны или подбирается таким образом, чтобы соответствовало наблюдаемым скоростям солнечного ветра [12, 2, 11]. Определения λ , используемые в различных работах, также

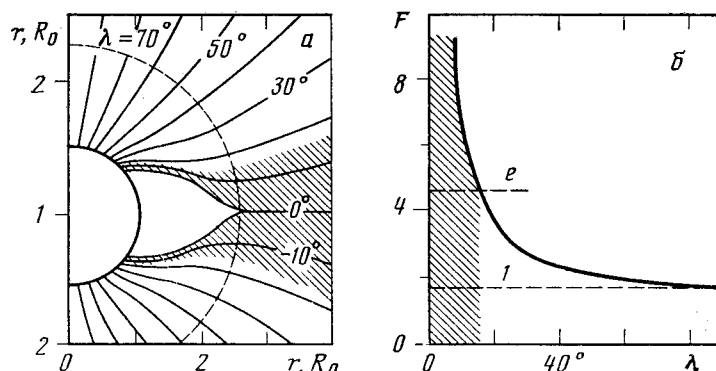


Рис. 7. Упрощенная модель распределения магнитного поля в окрестности Солнца (а) (штриховая линия – «поверхность источника») и фактор расширения магнитной силовой трубки F для упрощенной модели на больших расстояниях от Солнца (б). Указаны наименьший фактор (1) и фактор, превышающий его в e раз

весьма различны. Имея в виду отмеченное выше различие методик, приведем, тем не менее, результаты других определений зависимости $V(\lambda)$: $V(\text{км/с})=400+1000 \sin^2 \lambda$ [2]; $V(\text{км/с})=350+800 \sin^2 \lambda$, $\lambda < 35^\circ$, $=600$, $\lambda > 35^\circ$ [11]; $V(\text{км/с})=1000-700/\text{ch}(\lambda/16^\circ, 7)$ [12]; $V(\text{км/с})=624-241/\text{exp}(\lambda/15^\circ)^2$ [5].

Как нетрудно убедиться, при не слишком больших λ численные значения V довольно близки для всех приведенных выше зависимостей $V(\lambda)$, хотя наиболее пологая зависимость получена по массиву данных спутника «Прогноз-9». Сама надежность установления факта роста V с увеличением λ сомнения не вызывает, однако количественные характеристики этого роста и зависимость их от условий в солнечной короне еще нельзя считать выясненными.

Главной причиной, препятствующей установлению точных количественных характеристик зависимости $V(\lambda)$, является трудность разделения пространственных (связанных с удалением от токового слоя) и временных (из-за присутствия транзиентов) вариаций скорости солнечного ветра на 1 а.е. Прямое использование полного массива измерений V приводит к довольно большому разбросу экспериментальных точек относительно аппроксимирующей кривой (рис. 3) и, следовательно, к искажению ее формы. Проведенное в работе [14] устранение из массива скоростей солнечного ветра участков, связанных с транзиентами, привело к улучшению корреляционной связи между V и λ даже в период максимума солнечной активности 1979 г.

Уменьшить влияние присутствия транзиентов в солнечном ветре и солнечной короне на установление вида зависимости $V(\lambda)$ можно также путем анализа этой зависимости, подобного выполненному в настоящей работе, на основе результатов измерения солнечного ветра на спутнике «Прогноз-9» в течение сравнительно короткого интервала времени с 24.IX по 2.X 1983 г. (рис. 6). Как можно видеть из этого рисунка, учет ускорения солнечного ветра при $r > R_{\text{и}}$ существенно уменьшает разброс точек относительно аппроксимирующей кривой и увеличивает ее крутизну.

В настоящей работе не решалась задача нахождения оптимальной интегральной характеристики процесса ускорения солнечного ветра $\langle V \rangle / V$. Эта задача также может быть решена с помощью анализа отдельных интервалов измерения солнечного ветра. Действительно, отношение $\langle V \rangle / V$ можно рассматривать как дополнительный свободный параметр и выбрать такую его величину, чтобы минимизировать среднеквадратичные отклонения экспериментальных точек от аппроксимирующей кривой (рис. 6).

В работах [10, 14] кроме исследования зависимости $V(\lambda)$ изучается также зависимость скорости солнечного ветра от радиального компонента

магнитного поля B_r на «поверхности источника» R_n . Принципиального различия между обоими подходами нет, так как и распределение λ , и распределение B_r вдоль проекции траектории спутника на R_n рассчитываются в потенциальном приближении на основе одних и тех же измерений фотосферных магнитных полей. Обе эти величины минимальны в окрестности токового слоя и возрастают при удалении от него.

В заключение кратко остановимся на физических процессах, определяющих формирование минимума скорости солнечного ветра в окрестности межпланетного токового слоя. Как можно видеть из приведенных на рис. 3, 4, 6 данных, характерная угловая ширина профиля $V(\lambda)$ в окрестности гелиосферного токового слоя $\sim 30 \div 40^\circ$, что на 1 а.е. составляет $\sim 10^8$ км. Столь крупномасштабное образование, по-видимому, определяется глобальной гидродинамикой расширения солнечной короны в целом.

Для иллюстрации этого соображения на рис. 7, а представлена упрощенная модель распределения магнитного поля (и линий тока плазмы) в окрестности Солнца:

$$B_r = \frac{2M \sin \lambda}{R_c^3} \left[\left(\frac{R_c}{r} \right)^3 + \frac{1}{2} \left(\frac{R_c}{R_n} \right)^3 \right], \quad B_\lambda = \frac{M \cos \lambda}{R_c^3} \left[\left(\frac{R_c}{r} \right)^3 - \left(\frac{R_c}{R_n} \right)^3 \right], \quad (3)$$

удовлетворяющая уравнению Лапласа при $R_c < r < R_n$, условию постоянства магнитного потенциала на $r = R_n$ и близка к дипольному полю при $r = R_c$. На рис. 7, б приведен фактор расширения площади силовой трубки магнитного поля $F = S(R_n) R_c^2 / R_n^2 S(R_c)$ в зависимости от углового расстояния λ до токового слоя. Как можно видеть из этого рисунка в рамках использованной модели (3), фактор расширения практически постоянен при $|\lambda| > 30^\circ$ и очень быстро возрастает в окрестности токового слоя при $|\lambda| \leq 15^\circ$. Характерная угловая величина области больших значений фактора расширения $\sim \pm 15^\circ$ (заштрихованная область на рис. 7) близка к характерной угловой ширине профиля $V(\lambda)$ в окрестности гелиосферного токового слоя $\sim 30^\circ$.

Вообще говоря, в окрестности межпланетного токового слоя на 1 а.е. наблюдаются процессы трех разных масштабов. Изменение направления магнитного поля для многих секторных границ происходит в течение ~ 1 мин, другие секторные границы пересекаются космическими аппаратами за время около 1 ч и более. Соответствующий масштаб расстояний составляет $10^4 \div 10^6$ км. Характерная продолжительность наблюдающегося в окрестности гелиосферного токового слоя роста концентрации солнечного ветра (NCDE) $\approx 0,5$ сут [15], что соответствует пространственному масштабу $(1 \div 2) \cdot 10^7$ км. Пространственный масштаб минимума V , как уже отмечалось $\sim 10^8$ км. Если пространственный масштаб минимума V определяет глобальная гидродинамика солнечной короны, а пространственный масштаб скачка магнитного поля на токовом слое определяют протекающие в его окрестности плазменные процессы, то остается неясным вопрос, какие процессы отвечают за формирование в окрестности межпланетного токового слоя NCDE с промежуточным характерным масштабом.

Выводы

На основе измерений солнечного ветра на спутнике «Прогноз-9» в период с июля 1983 по февраль 1984 г. на фазе спада 21-го цикла солнечной активности количественно исследована зависимость скорости солнечного ветра V от углового расстояния λ до межпланетного токового слоя.

Зависимость $V(\lambda)$, определенная по полному массиву измерений V на спутнике «Прогноз-9», может быть аппроксимирована следующим эмпирическим выражением: V (км/с) $= 410 + 305 \sin^2 \lambda$ (см. также ч. 1).

Показано, что использование предположения о том, что средняя скорость солнечного ветра на пути L от «поверхности источника» R_n до ор-

биты Земли $\langle V \rangle = L \int_{R_H}^{R_H+L} \frac{dr}{V(r)}$ меньше, чем V измеренная на 1 а.е., умень-

шает разброс экспериментальных точек относительно аппроксимирующей кривой.

Предложен способ оценки отношения $\langle V \rangle / V$ — интегральной характеристики процесса ускорения солнечного ветра по измерениям его параметров на 1 а.е.

ЛИТЕРАТУРА

1. Грингауз К. И., Безруких В. В., Веригин М. И., Котова Г. А. Наблюдения рекуррентных высокоскоростных потоков солнечного ветра на фазе спада 21-го цикла солнечной активности при помощи широкоугольного энергоспектрометра ионов на спутнике «Прогноз-9». — Космич. исслед., 1986, наст. выпуск.
2. Zhao X.-P., Hundhausen A. J. Organization of solar wind plasma properties in a tilted heliomagnetic coordinate system. — J. Geophys. Res., 1981, v. 86, № A7, p. 5423.
3. Rickett B. J., Coles W. A. Solar cycle evolution of the solar wind in three dimensions. — In: Solar wind five (Ed. by Neugebauer M., NASA CP-2280, 1983, p. 315.
4. Hakamada K., Munakata Y. A cause of the solar wind speed variations: An update. — J. Geophys. Res., 1984, v. 89, № A1, p. 357.
5. Newkirk G., Jr., Fisk L. A. Variation of cosmic rays and solar wind properties with respect to the heliospheric current sheet. 1. Five-Gev protons and solar wind speed. — J. Geophys. Res., 1985, v. 90, № A4, p. 3391.
6. Crooker N. Solar cycle variations of the solar wind. — In: Solar wind five/Ed. by Neugebauer M. NASA CP-2280, 1983, p. 303.
7. Крикулов Ю. Д., Безруких В. В. и др. Широкоугольный энергоспектрометр заряженных частиц для исследования солнечного ветра на спутнике «Прогноз-9». — В кн.: Научная аппаратура для космических исследований. М.: Наука, 1986.
8. Schatten K. H., Wilcox J. M., Ness N. F. A model of interplanetary and coronal magnetic fields. — Solar Phys., 1969, v. 6, № 3, p. 442.
9. Altschuler M. D., Newkirk G., Jr. Magnetic fields and the structure of the solar corona. — Solar Phys., 1969, v. 9, № 1, p. 131.
10. Hoeksema J. T. Structure and evolution of large scale solar and heliospheric magnetic fields. — Ph. D. Dissertation, CSSA-Astro-84-07, Stanford, California, 1984.
11. Zhao X.-P., Hundhausen A. J. Spatial structure of solar wind in 1976. — J. Geophys. Res., 1983, v. 88, № A1, p. 451.
12. Hakamada K., Akasofu S.-I. A cause of solar wind speed variations observed at 1 AU. — J. Geophys. Res., 1981, v. 86, № A3, p. 1290.
13. Hoeksema J. T., Wilcox J. M., Scherrer P. H. Structure of heliospheric current sheet in the early portion of sunspot cycle 21. — J. Geophys. Res., 1982, v. 87, № A12, p. 10331.
14. Suess S. T., Wilcox J. M. et al. Relationship between a potential field-source surface model of the coronal magnetic field and properties of the solar wind at 1 AU. — J. Geophys. Res., 1984, v. 89, № A6, p. 3957.
15. Borrini G., Wilcox J. M. et al. Solar wind helium and hydrogen structure near the heliospheric current sheet: A signal of coronal streamers at 1 AU. — J. Geophys. Res., 1981, v. 86, № A6, p. 4565.

Поступила в редакцию
10.XI.1985