

## СОЛНЕЧНЫЙ ВЕТЕР ЗА ФРОНТОМ ГЕЛИОСФЕРНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ: ИЗМЕРЕНИЯ НА АППАРАТЕ ВОЯДЖЕР-2 И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

С.В. Чалов

*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН,  
Москва, 119526, проспект Вернадского 101-1*

### Аннотация

Измерения параметров тепловой плазмы солнечного ветра на космическом аппарате Вояджер-2 после пересечения гелиосферной ударной волны показали, что течение плазмы за ее фронтом остается сверхзвуковым. Этот результат можно легко объяснить, если принять во внимание то обстоятельство, что протонная компонента солнечного ветра не является равновесной – помимо тепловых протонов с максвелловским распределением по скоростям, которые измеряются плазменными приборами, существуют немаксвелловские протоны высоких энергий. Плотность энергии этих частиц может быть сравнима с плотностью энергии тепловой компоненты. В работе описывается трехкомпонентная модель солнечного ветра (тепловые протоны, тепловые электроны, энергичные протоны), которая на количественном уровне позволяет описать пространственную эволюцию параметров различных компонент за фронтом гелиосферной ударной волны. В модели учитывается процесс перезарядки между протонами и атомами водорода, проникающими в гелиосферу из межзвездной среды. По существу, именно перезарядка является решающим фактором, определяющим свойства плазменного течения во внутреннем ударном слое.

## SOLAR WIND BEHIND THE FRONT OF THE HELIOSPHERIC TERMINATION SHOCK: MEASUREMENTS AT THE VOYAGER-2 SPACECRAFT AND THEORETICAL MODELS

S.V. Chalov

*Institute for problems in mechanics RAS, Russia, Moscow, 119526*

The measurements of parameters of thermal solar wind plasma at the Voyager-2 spacecraft after the crossing of the heliospheric termination shock have shown that the plasma flow behind the shock front remains supersonic. This result can be easily explained if one takes into account the fact that the proton component of the solar wind is not in equilibrium – besides of thermal protons with the Maxwellian velocity distribution, which are measured by the plasma instruments, non-Maxwellian protons of high energy exist. The energy density of these particles can be comparable with the energy density of the thermal component. In the paper a three-component model of the solar wind (thermal protons, thermal electrons, energetic protons) is described. The model allows to describe quantitatively spatial evolution of parameters of the different components behind the termination shock front. The model takes into account the charge exchange processes between protons and hydrogen atoms penetrating the heliosphere from the interstellar medium. Essentially, just the charge exchange determines the properties of the plasma flow in the inner shock layer.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В 1958 году Паркер [1] на основе анализа решений газодинамических уравнений показал, что солнечная корона не может находиться в состоянии гидростатического равновесия и должна расширяться со сверхзвуковой скоростью. Сверхзвуковой поток солнечной плазмы получил название солнечного ветра (СВ). Первое прямое экспериментальное измерение потоков заряженных частиц от Солнца относится к 1960 году [2]. В дальнейшем многочисленные измерения на космических аппаратах (КА) с более качественной и совершенной аппаратурой позволили детально исследовать параметры СВ в широком диапазоне гелиоцентрических расстояний. Солнечный ветер представляет собой электронно-протонную плазму, скорость которой на орбите Земли в зависимости от гелиошироты изменяется в пределах от 400 км/с (вблизи солнечного экватора) до 800 км/с (в приполярных областях), а концентрация электронов от  $10 \text{ см}^{-3}$  до  $1 \text{ см}^{-3}$  соответственно. Число Маха близко к 10, т.е. течение является гиперзвуковым.

В результате столкновения СВ с набегающим потоком локальной межзвездной среды (ЛМС), скорость которого согласно современным данным о параметрах ЛМС [3] также является сверхзвуковой, образуется область взаимодействия двух потоков. Эта область включает ударные волны, на которых происходит торможение сверхзвуковых потоков, и границу (гелиопаузу), разделяющую заряженные компоненты СВ и ЛМС.

Измерения показывают, что ЛМС состоит из частично ионизованного газа и концентрация нейтральных атомов (главным образом атомы водорода) существенно превышает концентрацию заряженной компоненты, причем длина свободного пробега атомов в гелиосфере сравнима с ее размерами. Здесь следует отметить, что главным механизмом взаимодействия атомов водорода с протонами солнечного ветра и межзвездной среды является перезарядка, т.е. именно этот процесс и определяет длину свободного пробега.

На рис. 1 показана качественная картина области взаимодействия СВ с ЛМС, которая основывается на результатах кинетико-газодинамической модели [4].

В рамках этой модели динамика заряженной компоненты описывается в гидродинамическом приближении, а для атомов используется кинетическое уравнение Больцмана для функции распределения по скоростям.

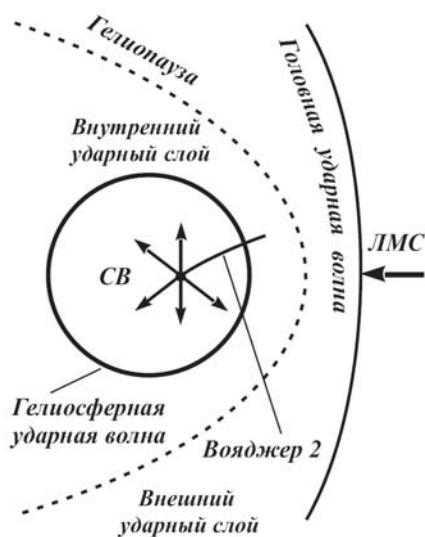


Рис. 1. Схематическое изображение области взаимодействия солнечного ветра (СВ) с локальной межзвездной средой (ЛМС). Показана траектория КА Вояджер 2

На гелиосферной ударной волне происходит торможение и нагрев СВ. Торможение межзвездной плазмы осуществляется на головной ударной волне. Плазменные компоненты СВ и ЛМС разделяются поверхностью тангенциального разрыва скорости и плотности (гелиопаузой). Область нагретого СВ между гелиосферной ударной волной и гелиопаузой называется внутренним ударным слоем. Именно эту область гелиосферы мы будем рассматривать далее. Воздействие атомов на плазменное течение приводит к торможению и нагреву СВ и к приближению ударных волн и гелиопаузы к Солнцу. В 2004 и 2007 гг. КА Вояджер-1 и Вояджер-2 пересекли гелиосферную ударную волну на расстояниях 94 а.е. и 84 а.е. соответственно. На рис. 1 показана схематически траектория КА Вояджер-2, который в настоящее время находится во внутреннем ударном слое и проводит измерения параметров СВ. Вояджер-1 также находится в этой области, однако плазменная аппаратура на этом аппарате вышла из строя еще до пересечения гелиосферной ударной волны.

Измерения на КА Вояджер-2 показали, что течение тепловой плазмы СВ (энергия теплового движения равна нескольким эВ) за фронтом почти прямой ударной волны оставалось сверхзвуковым с числом Маха, близким к 2 [5]. В данной работе этот эффект объясняется в рамках трехжидкостной модели – тепловые протоны, тепловые электроны и энергичные протоны (энергия > 1 кэВ), поведение которых при прохождении ударной волны близко к адиабатическому. Энергичные протоны образуются в СВ в результате ионизации межзвездных атомов, проникающих во внутренние области гелиосферы. Сразу после образования эти протоны «захватываются» гелиосферными электриче-

скими и магнитными полями и движутся вместе с СВ в направлении гелиопаузы. Процесс «захвата» показан на рис. 2. Как уже отмечалось, скорость СВ изменяется в пределах от 400 км/с до 800 км/с, в то время как средняя скорость межзвездных атомов равна примерно 20 км/с. Поэтому для качественных рассуждений скоростью атомов можно пренебречь. Тогда в системе координат, связанной с СВ, скорость атомов равна  $V'_{sw}$ , где  $V'_{sw} = -V_{sw}$ , а  $V_{sw}$  – скорость СВ в неподвижной системе координат. Если в результате перезарядки происходит акт ионизации атома, то вместо него появляется протон, имеющий в начальный момент ту же самую скорость  $V'_{sw}$ . Под влиянием силы Лоренца со стороны межпланетного магнитного поля, замороженного в СВ, дальнейшее движение этого протона будет иметь характер циклотронного вращения вокруг силовой линии, а также, в зависимости от конфигурации силовых линий, движения вдоль этой линии. В начальный момент образовавшиеся протоны имеют сильно анизотропное распределение по скоростям. Такое распределение («кольцевое» или «тороидальное») является неустойчивым. Развитие неустойчивости приводит к генерации альвеновских волн. В результате резонансного взаимодействия захваченных протонов с этими волнами первоначальное анизотропное распределение по скоростям (в движущейся системе координат) достаточно быстро (по сравнению с характерными конвективными временами) эволюционирует в изотропное сферическое распределение. Таким образом, протоны, возникающие в СВ из межзвездных атомов в результате перезарядки, «захватываются» СВ и переносятся во внешние области гелиосферы со скоростью  $V_{sw}$ .

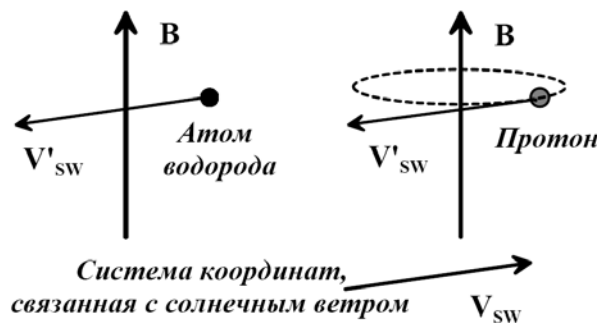


Рис. 2. Иллюстрация «захвата» протона, образовавшегося из межзвездного атома водорода, межпланетным магнитным полем

В настоящей работе описывается процесс прохождения «захваченных» протонов через фронт гелиосферной ударной волны и исследуется пространственная эволюция параметров СВ при удалении от ударной волны в направлении гелиопаузы.

## 2. ПЕРЕСЕЧЕНИЕ ГЕЛИОСФЕРНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ АППАРАТОМ ВОЯДЖЕР-2

Тепловую плазму СВ можно рассматривать как столкновительную среду (кулоновские столкновения) с максвелловским распределением по скоростям. Энергичные протоны являются бесстолкновительными – рассеяние частиц происходит в результате их взаи-

модействия с альвеновскими флуктуациями электромагнитного поля. Измерения на КА и теоретические оценки показывают, что скоростные распределения «захваченных» протонов близки к изотропным (в системе координат, связанной с СВ), однако Н-теорема Больцмана для них несправедлива и эти распределения далеки от максвелловских. Плазменные приборы, установленные на аппарате Вояджер-2, регистрируют только тепловые протоны. «Захваченные» протоны с энергиями от нескольких кэВ до 30 кэВ не измеряются. Заряженные частицы с энергиями выше 30 кэВ регистрируются датчиками энергичных частиц. Таким образом, очень важный диапазон энергий (с точки зрения динамического влияния на картину течения СВ) остается «белым» пятном. Иными словами, параметры частиц из данного диапазона энергий являются свободными параметрами при построении теоретических моделей.

На прямой УВ выполняются следующие соотношения для смеси тепловой плазмы и энергичных «захваченных» протонов:

$$\rho u = \text{const}, \quad (1)$$

$$\rho u^2 + p_{SW} + p_{PUI} = \text{const}, \quad (2)$$

$$\frac{u^2}{2} + \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{p_{SW} + p_{PUI}}{\rho} = \text{const}. \quad (3)$$

В соотношениях (1)–(3)  $u$  и  $\rho$  – скорость и плотность смеси;  $p_{SW}$  и  $p_{PUI}$  – давление тепловой плазмы солнечного ветра (протоны + электроны) и энергичных «захваченных» протонов. Динамическое воздействие магнитного поля на течение не учитывается, хотя оно может влиять на кинематику энергичных протонов. Система уравнений (1)–(3) будет замкнутой, если интересоваться только полным давлением смеси. Однако, как отмечалось выше, КА Вояджер-2 измеряет только тепловые протоны, и для интерпретации этих измерений необходимо рассматривать тепловые и энергичные компоненты раздельно. То есть, для разрешения условий на ударной волне необходимо одно дополнительное соотношение. Для получения этого соотношения мы используем следующие соображения. Ларморовский радиус «захваченных» протонов на порядок превышает толщину гелиосферной УВ [5]. Оценки показывают, что за время пересечения фронта ударной волны их ларморовскими орбитами рассеянием можно пренебречь. В этих условиях для перпендикулярной ударной волны сохраняются 1-й и 2-й адиабатические инварианты:

$$v_{\perp}^2 / B = \text{const}, \quad v_{\parallel} = \text{const}, \quad (4)$$

где  $v_{\perp}$  и  $v_{\parallel}$  – компоненты скорости протонов в сопутствующей системе координат, перпендикулярные и параллельные вектору магнитного поля  $\mathbf{B}$ . Из соотношений (4) видно, что после прохождения разрыва изотропное распределение энергичных протонов по скоростям становится анизотропным. Мы предполагаем, что на относительно малом (по отношению к кривизне ударной волны) расстоянии анизотропное рас-

пределение становится изотропным вследствие рассеяния частиц на альвеновских волнах. Тогда можно показать [6], что необходимое дополнительное соотношение имеет вид:

$$p_{PUI,2} = \frac{s(2s+1)}{3} p_{PUI,1}, \quad (5)$$

где  $s$  – скачок плотности на разрыве. Здесь «1» относится к давлению перед разрывом, «2» – к давлению за разрывом (точнее на некотором малом расстоянии от разрыва).

На рис. 3 показаны числа Маха тепловой плазмы СВ за фронтом ударной волны как функции числа Маха энергичных протонов перед фронтом:

$$M_{SW,PUI} = \left( \frac{\rho_{SW,PUI} u^2}{\gamma p_{SW,PUI}} \right)^{1/2}. \quad (6)$$

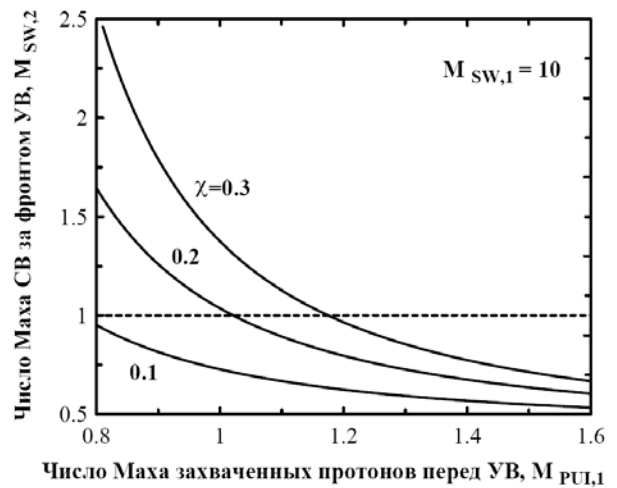


Рис. 3. Число Маха тепловой плазмы СВ за фронтом ударной волны (УВ) как функция числа Маха «захваченных» протонов перед фронтом. Кривые соответствуют различным значениям относительной концентрации «захваченных» протонов

Кривые соответствуют различным значениям концентрации «захваченных» протонов  $\chi = \rho_{PUI} / \rho_{SW}$ . Вблизи гелиосферной ударной волны  $0.2 \leq \chi \leq 0.31$ .

Согласно измерениям на КА Вояджер-2  $M_{SW,1} \approx 10$  [5]. В момент образования «захваченных» протонов вследствие ионизации межзвездных атомов водорода их скорости в подвижной системе координат (тепловые скорости) равны локальной скорости СВ. Таким образом, число Маха «захваченных» протонов близко к единице. Поэтому на рис. 3 мы ограничились довольно узким диапазоном изменения  $M_{PUI,1}$ . Из рисунка видно, что для наиболее вероятных значений параметра  $\chi$  (прямые измерения отсутствуют) течение тепловой плазмы СВ за гелиосферной ударной волной остается сверхзвуковым, если  $M_{PUI,1} \leq 1$ . При этом течение смеси тепловой плазмы и «захваченных» протонов, естественно, является дозвуковым.

### 3. ПЕРЕЗАРЯДКА ВО ВНУТРЕННЕМ УДАРНОМ СЛОЕ И ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ ТРЕХЖИДКОСТНОЙ МОДЕЛИ

#### 3.1. Процессы перезарядки во внутреннем ударном слое

В предыдущем разделе рассматривалась двухжидкостная модель СВ. В рамках трехжидкостной модели заряженные частицы за фронтом ударной волны подразделяются на три типа: тепловые протоны, электроны и «захваченные» протоны. Кроме того, в модели учитывается влияние межзвездных атомов водорода на плазменное течение. Процесс перезарядки оказывает существенное влияние на скорость и температуру СВ за фронтом ударной волны. Перезарядка влияет также на параметры атомов водорода, однако во внутреннем ударном слое концентрация атомов на два порядка превышает концентрацию заряженных частиц, так что в первом приближении влиянием перезарядки на параметры атомов можно пренебречь. Мы считаем, что за фронтом ударной волны  $n_H$ ,  $u_H$  и  $T_H$  постоянны ( $n_H = 0.1 \text{ см}^{-3}$ ,  $u_H = 21 \text{ км/с}$ ,  $T_H = 12000 \text{ К}$ ).

Течение тепловых протонов СВ за фронтом гелиосферной ударной волны сверхзвуковое. Таким образом, перезарядка между протонами и межзвездными атомами водорода приводит к образованию «горячих» протонов, тепловая скорость которых приблизительно равна скорости СВ. Перезарядка между «захваченными» протонами и атомами также приводит к образованию «горячих» протонов с теми же тепловыми скоростями. Эти процессы показаны на рис. 4.

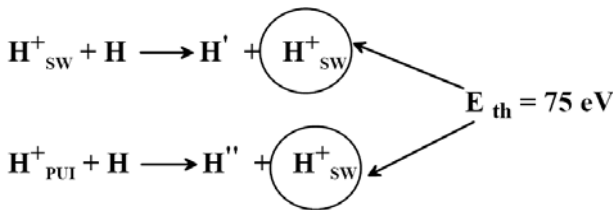


Рис. 4. Основные процессы перезарядки за фронтом гелиосферной ударной волны

Поскольку скорость СВ за фронтом гелиосферной ударной волны согласно измерениям на КА Вояджер-2 равна 120 км/с, тепловая энергия протонов, которые образуются в результате перезарядки между атомами водорода и тепловыми протонами СВ и «захваченными» протонами равна приблизительно 75 эВ. Эта энергия существенно меньше тепловой энергии типичного «захваченного» протона, который образовался в сверхзвуковом СВ и затем прошел через гелиосферную ударную волну (несколько кэВ). Таким образом, вполне оправдано, что протоны, которые образуются во внутреннем ударном слое в результате перезарядки, мы относим к тепловым протонам СВ.

#### 3.2. Трехжидкостная модель течения СВ за фронтом гелиосферной ударной волны

Для описания течения СВ за фронтом гелиосферной ударной волны мы используем одномерную плоско параллельную модель. Очевидно, что такое при-

ближение справедливо лишь на расстояниях, достаточно удаленных от гелиопаузы, вблизи которой течение является существенно неоднородным. Оценки показывают [7], что в направлении набегающего потока ЛМС течение СВ можно рассматривать в рамках одномерного приближения до расстояний 30-40 а.е. от фронта гелиосферной ударной волны (рис. 5).

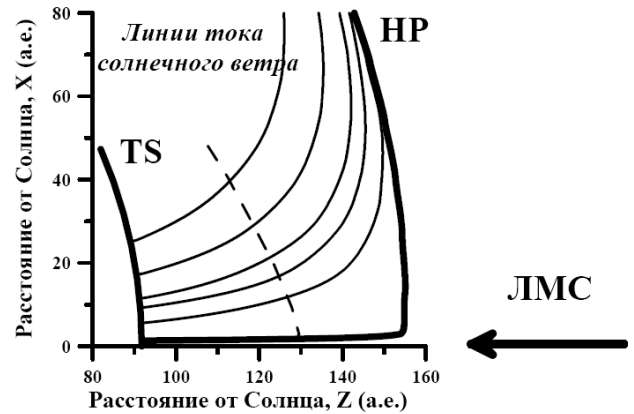


Рис. 5. Линии тока солнечного ветра в головной области внутреннего ударного слоя. Течение между ударной волной и штриховой линией можно рассматривать в рамках одномерной модели

Мы будем рассматривать область внутреннего ударного слоя вблизи оси симметрии (направление движения ЛМС). Вводим декартову систему координат таким образом, чтобы направление скорости СВ  $u$  совпадало с положительным направлением оси  $x$ . Начало координат лежит на гелиосферной ударной волне. Межзвездные атомы движутся в противоположном направлении со скоростью  $u_H$  (эта величина считается положительной). Таким образом, относительная гидродинамическая скорость протонов и атомов равна  $u + u_H$ .

Для описания течения трехкомпонентного СВ с учетом перезарядки используется приближение Хольцера [8].

С учетом результатов, приведенных в разделе 3.1, замкнутая система уравнений может быть записана в виде:

$$\frac{\partial \rho_{\text{SW}}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_{\text{SW}} u) = \rho_{\text{PUI}} v_{\text{PUI}}, \quad (7)$$

$$\frac{\partial \rho_{\text{PUI}}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_{\text{PUI}} u) = -\rho_{\text{PUI}} v_{\text{PUI}}, \quad (8)$$

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial x} = -(u + u_H) \times (\rho_{\text{PUI}} v_{\text{PUI}} + \rho_{\text{SW}} v_{\text{SW}}), \quad (9)$$

$$\frac{\partial p_{\text{SW}}}{\partial t} + u \frac{\partial p_{\text{SW}}}{\partial x} + \gamma p_{\text{SW}} \frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{\rho_{\text{SW}} v_{\text{SW}} k T_{\text{SW}}}{m_p} + \frac{\rho_{\text{SW}} v_{\text{SW}} + \rho_{\text{PUI}} v_{\text{PUI}}}{2} \left[ (\gamma - 1)(u + u_H)^2 + \frac{2kT_H}{m_p} \right], \quad (10)$$

$$\frac{\partial p_{PUI}}{\partial t} + u \frac{\partial p_{PUI}}{\partial x} + \gamma p_{PUI} \frac{\partial u}{\partial x} = - \frac{\rho_{PUI} v_{PUI} k T_{PUI}}{m_p}, \quad (11)$$

$$\frac{\partial p_e}{\partial t} + u \frac{\partial p_e}{\partial x} + \gamma p_e \frac{\partial u}{\partial x} = 0, \quad (12)$$

где теперь  $\rho_{SW,PUI}$ ,  $p_{SW,PUI}$ ,  $T_{SW,PUI}$ ,  $n_{SW,PUI}$  – плотность, давление, температура и концентрация тепловых протонов СВ и «захваченных» протонов;  $p_e$  и  $n_e$  – давление и концентрация электронов;  $n_H$  и  $T_H$  – концентрация и температура межзвездных атомов водорода во внутреннем ударном слое, которые считаются постоянными в данной области. Здесь введены следующие обозначения:

$$p = p_{SW} + p_{PUI} + p_e, \quad \rho = \rho_{SW} + \rho_{PUI},$$

$$n_e = n_{SW} + n_{PUI}, \quad p_{SW,PUI,e} = n_{SW,PUI,e} k T_{SW,PUI,e},$$

$$v_{SW,PUI} = n_H \sigma u_{SW,PUI}^*, \quad (13)$$

$$u_{SW,PUI}^{*2} = (u + u_H)^2 + \frac{64}{9\pi} \left( \frac{2kT_H}{m_p} + \frac{2kT_{SW,PUI}}{m_p} \right). \quad (14)$$

Мы будем рассматривать стационарные решения уравнений (7)–(12). Уравнения (7) и (8) описывают сохранения массы и тепловых и «захваченных» протонов. Из правых частей этих уравнений видно, что в результате перезарядки атомов водорода как с тепловыми протонами СВ, так и с «захваченными» протонами образуются «горячие» протоны (см. рис. 4). Уравнение движения (9) описывает торможение течения в результате перезарядки. Из выражения для частоты перезарядки (уравнения (13) и (14)) видно, что торможение СВ обусловлено главным образом процессом перезарядки между атомами и «захваченными» протонами, поскольку их тепловые скорости существенно превышают тепловые скорости протонов СВ и атомов. Кроме того, они превышают гидродинамическую скорость относительного движения СВ и межзвездных атомов. Уравнение (10) для давления тепловых протонов СВ содержит как источники, так и стоки, а уравнение (11) для давления «захваченных» протонов содержит только стоковый член в соответствии с результатами, представленными на рис. 4. Течение электронов считается адиабатическим. 3.3. Течения СВ за фронтом гелиосферной ударной волны - результаты расчетов

В данном разделе представлены результаты решения системы уравнений (7)–(12). Параметры СВ соответствуют измерениям на КА Вояджер-2 перед фронтом гелиосферной ударной волны и сразу за фронтом. Пространственное поведение в области внутреннего ударного слоя существенно зависит от начального соотношения внутренних энергий тепловых и энергичных протонов. В нашей модели это соотношение определяется числами Маха тепловых протонов  $M_{SW}$  и «захваченных» протонов  $M_{PUI}$ . Согласно выбору системы координат мы должны задать эти величины сразу за фронтом ударной волны ( $x = 0$ ). Из измерений на КА Вояджер-2 следует, что  $M_{SW,0} = 2$  [5], а величину  $M_{PUI,0}$  будем считать свободным параметром. Другой

важный параметр – относительная концентрация «захваченных» протонов за фронтом волны  $\chi_0 = \rho_{PUI,0} / \rho_{SW,0}$ . Будем считать, что  $\chi_0 = 0.3$ . Эта величина соответствует концентрации атомов водорода во внутреннем ударном слое  $n_H = 0.1 \text{ см}^{-3}$ . Числа Маха тепловых протонов СВ и «захваченных» протонов задаются выражениями (6) (только теперь  $p_{SW}$  – давление тепловых протонов). Определим также число Маха смеси тепловых и энергичных заряженных частиц:

$$M = \left( \frac{\rho u^2}{\gamma p} \right)^{1/2}. \quad (15)$$

Очевидно, что «реальной» газодинамической величиной является  $M$ , а  $M_{SW,PUI}$  мы используем для характеристики тепловых скоростей отдельных компонент смеси.

На рис. 6 показана зависимость  $M_{SW}$  от расстояния от ударной волны.

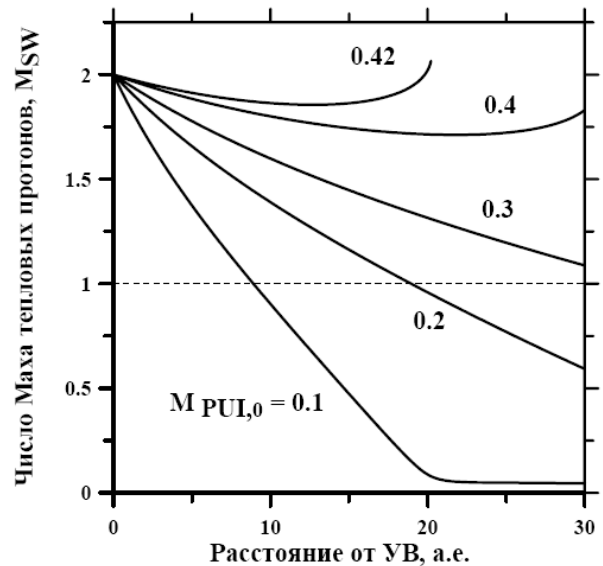


Рис.6. Зависимость чисел Маха тепловых протонов от расстояния от ударной волны (УВ) во внутреннем ударном слое

Кривые соответствуют различным значениям  $M_{PUI,0}$ . Все кривые начинаются со значения  $M_{SW} = 2$ , а затем эта величина уменьшается с расстоянием. Уменьшение  $M_{SW}$  обусловлено следующими двумя причинами: 1) торможением СВ и 2) увеличением средней тепловой скорости протонов СВ из-за перекачки энергии от «захваченных» протонов в результате перезарядки (см. раздел 3.1). При относительно малых значениях  $M_{PUI,0}$  ( $M_{PUI,0} \leq 0.3$ ) течение тепловых протонов становится дозвуковым на некотором расстоянии от ударной волны. Расстояние до звуковой точки зависит от  $M_{PUI,0}$ . Если  $M_{PUI}$  перед фронтом ударной волны близко к 1, что наиболее вероятно по современным представлениям о параметрах течения СВ во внешней гелиосфере, то согласно результатам, приведенным в разделе 2, сразу за фронтом  $M_{PUI,0} = 0.3$ . В этом случае сверхзвуковой характер течения СВ будет сохраняться приблизительно до 30 а.е. от ударной волны.

Поведение некоторых кривых на рис. 3 неожиданное. А именно, при  $M_{PUI,0} > 0.3$  число Маха тепловых протонов СВ на некотором расстоянии начинает возрастать. Расчеты показывают, что и число Маха для смеси  $M$  также растет и достигает критической величины  $M = 1$ , где происходит переход дозвукового течения смеси тепловых и энергичных компонент заряженных частиц в сверхзвуковое течение. Таким образом, при определенных условиях возможно образования второй ударной волны торможения СВ при приближении к границе, разделяющей СВ и ЛМС.

Мы можем предложить следующее физическое объяснение этого эффекта. Скорость торможения СВ за фронтом ударной волны в результате перезарядки между протонами и межзвездными атомами водорода существенно зависит от частоты перезарядки. Частота перезарядки, как отмечалось выше, определяется главным образом температурой «захваченных» протонов – при больших значениях  $T_{PUI}$  (малые значения  $M_{PUI}$ ) торможение сильное, а при малых  $T_{PUI}$  (большие значения  $M_{PUI}$ ) торможение слабое. Это хорошо видно из рис. 7, где приведена зависимость скорости СВ от расстояния от ударной волны.

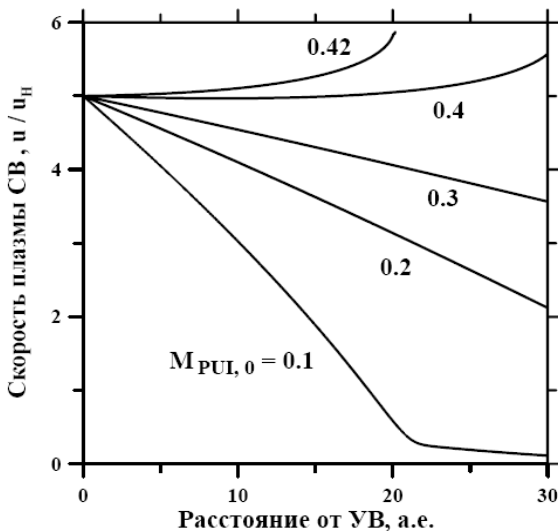


Рис. 7. Зависимость скорости солнечного ветра от расстояния от фронта гелиосферной ударной волны

Существует два конкурирующих процесса, которые влияют на плотность энергии «захваченных» протонов: 1) нагрев, связанный с адиабатическим сжатием в замедляющемся потоке, 2) уменьшение плотности тепловой энергии из-за потерь, связанных с перезарядкой. Таким образом, при малых значениях  $M_{PUI}$  (большие значения  $T_{PUI}$ ) преобладают эффекты торможения и нагрева «захваченных» протонов. То есть, скорость СВ и число Маха смеси  $M$  уменьшаются, а температура протонов возрастает.

При больших значениях  $M_{PUI}$  торможение слабое и энергетические потери, связанные с передачей энергии от «захваченных» протонов к тепловым протонам СВ, являются доминирующими и преобладают над эффектом адиабатического нагрева. Это приводит к уменьшению плотности внутренней энергии «захваченных» протонов с расстоянием. В результате фор-

мируется отрицательный градиент давления энергичных частиц, который, в итоге, приводит к ускорению течения СВ.

На рис. 8 приведены измерения скорости СВ на КА Вояджер-2 за относительно короткий период (около 1/2 года) до пересечения им гелиосферной ударной волны и за более продолжительный период (примерно 4 года), когда аппарат находился в области внутреннего ударного слоя.

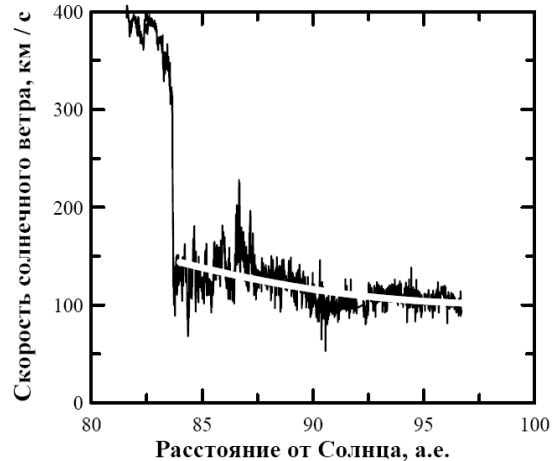


Рис.8. Измерения скорости солнечного ветра на КА Вояджер-2 вблизи гелиосферной ударной волны (84 а.е.) и во внутреннем ударном слое. Жирная белая линия – полиномиальное осреднение

Четко виден скачок скорости на расстоянии 84 а.е. от Солнца – гелиосферная ударная волна. Расстояние, пройденное аппаратом во внутреннем ударном слое, составляло к концу 2011 г. примерно 13 а.е. Скорость СВ при этом уменьшилась приблизительно в 1.4 раз. Возвращаясь к рис. 7 можно заключить, что теоретически такое изменение скорости можно объяснить, считая что  $0.2 < M_{PUI,0} < 0.3$ . Таким образом, теория достаточно хорошо описывает измерения. Термин «достаточно хорошо» вполне оправдан в данном случае, если учесть следующие обстоятельства: 1) нет прямых измерений параметров «захваченных» протонов перед фронтом ударной волны; 2) течение СВ во внутреннем ударном слое является нестационарным (см. рис. 8), а теоретическая модель стационарная.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Измерения параметров СВ на КА Вояджер-2 во время пересечения гелиосферной ударной волны показали, что течение тепловой плазмы за ударным фронтом остается сверхзвуковым. В работе показано, что это обстоятельство легко объяснить, если учесть неравновесный характер заряженных компонент СВ. Помимо тепловых протонов и электронов в СВ присутствуют энергичные протоны, плотность энергии которых во внешних областях гелиосферы превышает плотность внутренней энергии тепловой плазмы. Таким образом, течение смеси тепловых и нетепловых заряженных частиц за фронтом ударной волны дозвуковое.

В рамках трехжидкостной модели (тепловые протоны, тепловые электроны и энергичные протоны)

исследуется пространственная эволюция течения СВ за фронтом гелиосферной ударной волны с учетом эффектов перезарядки между протонами и межзвездными атомами водорода. Показано, что при наиболее вероятных значениях параметров энергичных протонов течение тепловых протонов, измеряемых на КА Вояджер-2, становится дозвуковым приблизительно на расстоянии 30 а.е. от фронта. Это обстоятельство объясняется передачей внутренней энергии от энергичных протонов тепловым протонам вследствие перезарядки.

Работа выполнена при поддержке Программы Фундаментальных Исследований ОЭМПУ РАН и грантов РФФИ № 10-01-00258 и 10-02-01316.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Parker E.N. Dynamics of the interplanetary gas and magnetic fields // *Astrophys. J.* 1958. V. 128. Pp. 664–675.
2. Грингауз К.И., Безруких В.В., Озеров В.Д., Рыбчинский Р.Е. Изучение межпланетного ионизированного газа, энергичных электронов и корпускулярного излучения Солнца при помощи трехэлектродных ловушек заряженных частиц на второй советской космической ракете // *Докл. АН СССР.* 1960. Т. 131. С. 1301–1304.
3. Moebius E., Bzowski M., Chalov S., et al. Synopsis of the interstellar He parameters from combined neutral gas, pickup ion and UV scattering observations and related consequences // *Astron. Astrophys.* 2004. V. 426. Pp. 897–907.
4. Baranov V.B., Malama Yu.G. Model of the solar wind interaction with the local interstellar medium: numerical solution of self-consistent problem // *J. Geophys. Res.* 1993. V. 98. Pp.15157–15163.
5. Richardson J.D., Kasper J.C., Wang C., Belcher J.W., Lazarus A.J. Cool heliosheath plasma and deceleration of the upstream solar wind at the termination shock // *Nature*, 2008, 454, 63–66.
6. Fahr H.J., Chalov S.V. Supersonic solar wind ion flows downstream of the termination shock explained by a two-fluid shock model // *Astron. Astrophys.*, 2008, 490, L35 – L3.
7. Chalov S.V, Fahr H.J., Malama, Y.G. Unexpected sites of efficient stochastic acceleration in the inner heliosheath// *Ann. Geophys.*, 2007, 25, 275–580.
8. Holzer, T.E. Interaction of the solar wind with the neutral component of the interstellar gas // *J. Geophys. Res.*, 1972, 77, 5407–5431.