

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

Глобальная структура гелиосферы: трёхмерная кинетико-магнитогидродинамическая модель и анализ данных космических аппаратов

В.В. Измоленов

Представлен краткий обзор результатов исследований области взаимодействия солнечного ветра с локальной межзвёздной средой. Это взаимодействие определяет глобальную структуру гелиосферы — области, занятой солнечным ветром, и имеет сложный многокомпонентный характер. Описана трёхмерная кинетико-магнитогидродинамическая модель взаимодействия, которая включает в себя плазменную и нейтральную компоненты межзвёздной среды и солнечного ветра, гелиосферное и межзвёздное магнитные поля, широтные и временные изменения параметров солнечного ветра. При описании результатов особое внимание уделено эффектам, связанным с магнитными полями, в частности магнитному вытеснению плазмы магнитным полем в окрестности гелиопаузы. Описанная модель позволяет объяснить достаточно большое количество экспериментальных данных, полученных на космических аппаратах "Вояджер-1", "Вояджер-2", IBEX (Interstellar Boundary Explorer), SOHO (Solar and Heliospheric Observatory), HST (Hubble Space Telescope) и др. На основе экспериментальных данных и модели удалось определить параметры межзвёздной среды и межзвёздного магнитного поля. Вместе с тем показано, что дать самосогласованное объяснение всем имеющимся данным в рамках существующей модели с одним набором граничных условий не представляется возможным. Возникающие сложности показаны на примере анализа полученных "Вояджером-1" данных по рассеянному солнечному лайман-альфа-излучению.

Ключевые слова: солнечный ветер, межзвёздная среда, межзвёздные атомы, магнитная гидродинамика, ударные волны

PACS numbers: 96.50.Ci, 96.50.Ek, 96.60.Vg

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2017.04.038293>

Содержание

1. Введение (881).
 2. Современная кинетико-магнитогидродинамическая модель взаимодействия солнечного ветра с межзвёздной средой (884).
2.1. Постановка задачи. 2.2. Результаты модели.
 3. Сравнение результатов модели с экспериментальными данными (889).
3.1. Измерения вторичного кислорода космическим аппаратом IBEX-Lo. 3.2. Анализ рассеянного солнечного лайман-альфа-излучения на больших гелиоцентрических расстояниях.
 4. Заключение (892).
- Список литературы (892).

В.В. Измоленов. Институт космических исследований РАН, ул. Профсоюзная 84/32, 117997 Москва, Российская Федерация; Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы 1, 119991 Москва, Российская Федерация; Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики", ул. Мясницкая 20, 101000 Москва, Российская Федерация
E-mail: izmod@iki.rssi.ru

Статья поступила 26 января 2018 г.

1. Введение

Под гелиосферой понимают область, занятую солнечным ветром. Солнечный ветер — это продолжение солнечной короны, верхней части атмосферы Солнца. Температура короны составляет порядка 10^6 К. Поэтому, во-первых, газ в короне является полностью ионизованным, во-вторых, некоторые частицы этого газа имеют достаточно большие скорости для того, чтобы преодолеть силу солнечной гравитации. Именно эти частицы с большими скоростями и создают солнечный ветер — поток солнечной плазмы, заполняющий межпланетное пространство. На больших гелиоцентрических расстояниях солнечный ветер является сверхзвуковым потоком. На орбите Земли число Маха солнечного ветра $\sim 5-10$. Параметры солнечного ветра не являются постоянными и зависят от места его истечения на Солнце (см., например, [1]), а следовательно, от солнечного цикла и гелиошироты.

На больших гелиоцентрических расстояниях (~ 100 астрономических единиц (а.е.)) солнечный ветер взаимодействует с окружающей Солнце межзвёздной средой. Солнце находится на краю одного из спиральных рукавов нашей Галактики (рукава Ориона) и вращается вместе с

другими звёздами и межзвёздным газом вокруг центра Галактики со скоростью $\sim 230 \text{ км с}^{-1}$. Расстояние от Солнца до центра Галактики порядка 26 тыс. световых лет. Однако, для того чтобы определить структуру границы гелиосферы, должны быть известны свойства межзвёздной среды на существенно меньших характеристических масштабах, порядка одного или нескольких парсек. Благодаря спектроскопическим исследованиям свойства окколосолнечной межзвёздной среды изучены достаточно хорошо. В настоящее время Солнце находится на границе небольшого межзвёздного облака, называемого Локальным межзвёздным облаком (ЛМО). Диаметр этого облака несколько парсек, а само облако принадлежит небольшой группе близких к нам межзвёздных облаков с температурами $(5-10) \times 10^3 \text{ К}$ и концентрацией порядка $0,1-0,3 \text{ см}^{-3}$. Считается также, что вся группа локальных облаков находится внутри гипотетического Локального пузыря — области межзвёздного пространства с характерным размером порядка 100 пк, заполненной горячей ионизированной плазмой с температурой порядка 1 млн К. Согласно одной из гипотез Локальный пузырь появился в результате взрыва сверхновой (или нескольких сверхновых) примерно 1 млрд лет тому назад.

Спектроскопические исследования показывают, что Солнце находится практически на границе ЛМО. Ближайшим к нему является G-облако. Параметры газа в G-облаке близки к параметрам ЛМО. В настоящее время неизвестно, примыкают ли ЛМО и G-облако друг к другу, или они разделены участком горячей плазмы Локального пузыря, в котором они оба находятся. В течение следующих 3 тыс. лет Солнце покинет ЛМО и окажется либо в соседнем G-облаке, либо в горячей плазме Локального пузыря.

Важно отметить, что Солнце движется относительно ЛМО. Скорость ЛМО относительно Солнца и его температуру можно определить из измерений параметров межзвёздных атомов гелия, которые имеют большие длины свободного пробега и проникают внутрь гелиосферы, где могут быть измерены космическими аппаратами. Измерения потоков межзвёздных атомов гелия на космических аппаратах Ulysses и IBEX (Interstellar Boundary EXplorer) позволили определить, что скорость относительного движения ЛМО $\sim 26,4 \text{ км с}^{-1}$, а его температура около 6400 К (см., например, [2, 3] и приведённые там ссылки).

В 1961 г. Паркер [4] предложил первые гидродинамические модели взаимодействия солнечного ветра с межзвёздной средой. Паркер теоретически рассмотрел три случая: 1) истечение гиперзвукового звёздного ветра в межзвёздный газ, находящийся в состоянии покоя; 2) истечение гиперзвукового звёздного ветра в сильно дозвуковой (число Маха $M \ll 1$) поток межзвёздной среды; 3) истечение гиперзвукового звёздного ветра в однородное межзвёздное магнитное поле.

Газодинамическая модель взаимодействия солнечного ветра с гиперзвуковым потоком межзвёздного газа была предложена в работе [5]. Качественная картина течения, представленная в [5], показана на рис. 1а. Контактный разрыв, называемый *гелиопаузой*, отделяет солнечный ветер от межзвёздной среды. Гелиопаузу можно рассматривать как препятствие, которое обтекают с внутренней и внешней сторон потоки солнечного ветра и межзвёздной среды соответственно. Так как в модели предполагается, что оба потока являются сверхзвуко-

выми, образуются две ударные волны: головная в межзвёздной среде и гелиосферная в солнечном ветре. Существование гелиосферной ударной волны и гелиопаузы подтверждено в настоящее время данными, полученными космическими аппаратами "Вояджер-1" и "Вояджер-2". Существование головной ударной волны ставится под сомнение.

Область взаимодействия солнечного ветра с локальной межзвёздной средой в литературе часто называют областью гелиосферного интерфейса, а иногда просто — границей гелиосферы. Область между ударными волнами называют гелиосферным ударным слоем. При этом различают внутренний (между гелиосферной ударной волной и гелиопаузой) и внешний (между гелиопаузой и головной ударной волной) ударные слои.

Уже в начале 1970-х годов эксперименты по рассеянию солнечному излучению на длинах волн $\lambda = 1216$ и 584 Å [6–8] доказали существование межзвёздных атомов водорода и гелия, движущихся в окколосолнечном пространстве. В 1975 г. было показано [9], что заряженная и нейтральная компоненты могут влиять друг на друга как в области ударного слоя, так и внутри гелиосферы. Наиболее эффективным механизмом взаимодействия заряженной и нейтральной компонент является перезарядка ($\text{H}^+ + \text{H} = \text{H} + \text{H}^+$). Это взаимодействие имеет два аспекта. Во-первых, область ударного слоя (область между гелиосферной ударной волной (TS) и внешней ударной волной (BS) на рис. 1) является своеобразным фильтром для межзвёздных атомов водорода, проникающих в Солнечную систему из межзвёздной среды. Во-вторых, процесс резонансной перезарядки может влиять на течение заряженной компоненты, структуру области взаимодействия и, в частности, на расстояния от этой области до Солнца. На рисунках 1б, в показано динамическое влияние атомов водорода на положение ударных волн (BS и TS) и гелиопаузы (HP). Из-за влияния атомов гелиосферный интерфейс оказывается ближе к Солнцу. При этом гелиосферная ударная волна принимает форму, более близкую к сферической. Диск Маха и сложная ударная структура в хвостовой области, состоящая из отражённой ударной волны (RS) и тангенциального разрыва, исчезают. Детальное обсуждение этих эффектов можно найти, например, в [10].

Впервые самосогласованная модель взаимодействия солнечного ветра с двухкомпонентной (плазменная компонента и H-атомы) локальной межзвёздной средой (ЛМС) была разработана в [11]. В этой осесимметричной модели межзвёздный ветер рассматривался как плоскопараллельный однородный поток, а солнечный ветер — как сверхзвуковой сферически-симметричный поток на орбите Земли. При таких граничных условиях течение плазмы в гелиосферном интерфейсе является осесимметричным. В модели предполагалось, что заряженная и нейтральная компоненты взаимодействуют главным образом посредством перезарядки. Учитывались также процессы фотоионизации, солнечной гравитации и радиационного давления, влияющие на распределение атомов H в окрестности (10–15 а.е.) Солнца.

Для описания нейтральной компоненты использовался кинетический подход, так как длина свободного пробега атомов водорода сопоставима с характерным размером гелиосферы (см., например, [12]). Для заряженной компоненты решались газодинамические уравнения Эйлера с источниками членами, учитывающими

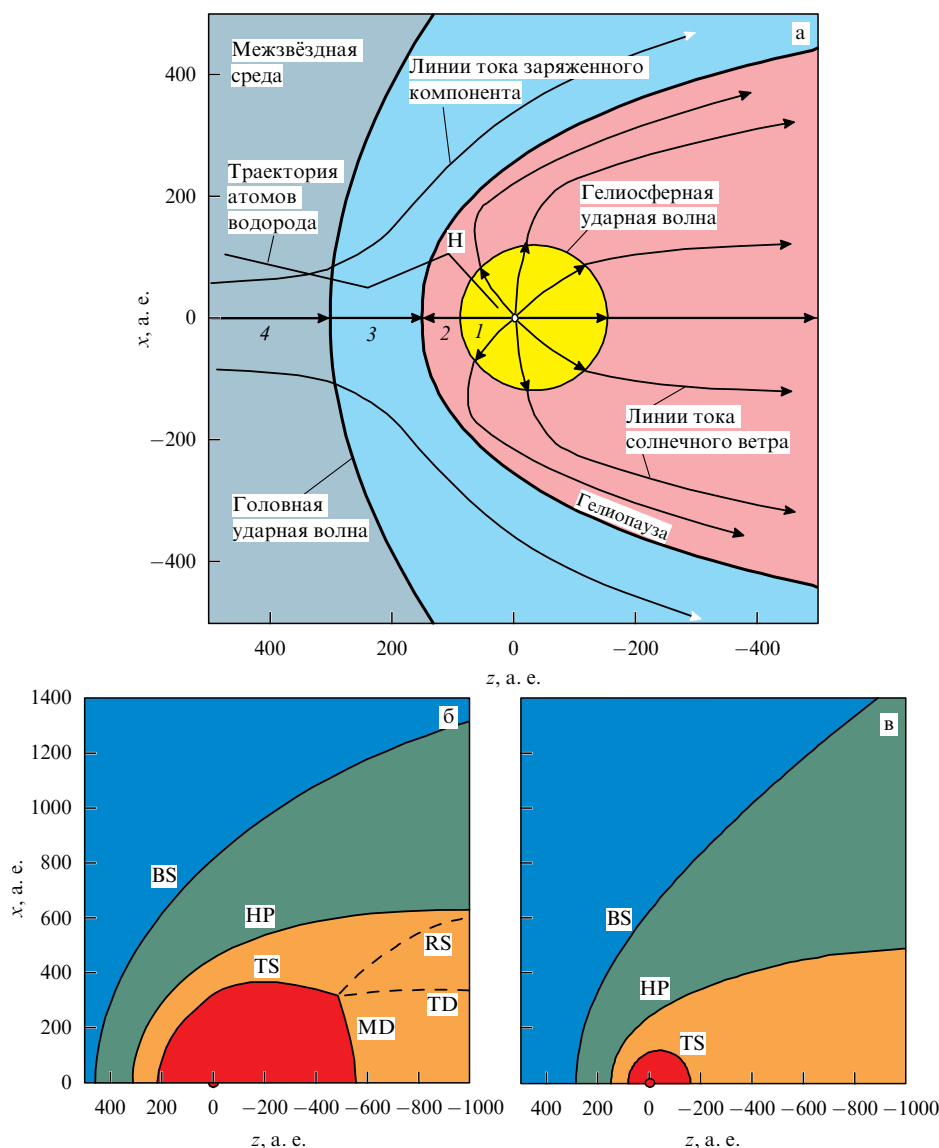


Рис. 1. (а) Гелиосферный интерфейс — область взаимодействия солнечного ветра с локальной межзвёздной средой. Гелиопауза — контактная поверхность, отделяющая плазму солнечного ветра от межзвёздной плазмы. В гелиосферной ударной волне солнечный ветер тормозится от сверхзвуковых скоростей до дозвуковых (при $n_{\text{H, LIS}} \neq 0$). Во внешней ударной волне тормозится и нагревается поток межзвёздной среды. Область гелиосферного интерфейса может быть разделена на четыре подобласти с существенно различными свойствами плазмы в них: 1 — сверхзвуковой солнечный ветер, 2 — дозвуковой солнечный ветер между гелиопаузой и гелиосферной ударной волной (эту область назовём внутренним ударным слоем), 3 — возмущённая межзвёздная плазма между гелиопаузой и внешней ударной волной (эту область часто называют внешним ударным слоем); 4 — сверхзвуковой поток межзвёздной среды. (б) и частично (в) влияние межзвёздных атомов водорода на размер и структуру гелиосферного интерфейса: гелиосферный интерфейс в случаях полностью (б) и частично (в) ионизированной межзвёздной среды (показаны результаты расчётов в рамках модели [11]). BS — внешняя ударная волна, HP — гелиопауза, TS — гелиосферная ударная волна, MD — диск Маха, TD — тангенциальный разрыв, RS — отражённая ударная волна.

обмен импульсом и энергией при перезарядке. Источниковые члены вычислялись методом Монте-Карло с расщеплением траекторий [13]. В 1990–2000-х годах эта модель была принята в качестве "стандартной" и развивалась включением в неё тех или иных физических процессов или компонент. Так, в работах [14, 15] исследовано влияние галактической и аномальной компонент космических лучей. Эволюция функции распределения атомов водорода в рамках осесимметричной модели проанализирована в работе [16]. Динамическое влияние ионов межзвёздного гелия и солнечных альфа-частиц изучалось в работе [17]. Задача о проникновении через область гелиосферного ударного слоя межзвёздных атомов

кислорода и азота рассматривалась в работах [18, 19]. Осесимметричная двухкомпонентная модель была распространена на хвостовую область вплоть до расстояний 30000 а.е. в работе [20]. Нестационарные эффекты, связанные с 11-летним циклом солнечной активности, исследовались в [21, 22]. Эффекты межзвёздного магнитного поля изучались в [23]. Обзор результатов, полученных до 2009 г., дан в [24].

В 2015 г. в работе [25] был сделан следующий шаг в развитии кинетико-магнитогидродинамической модели взаимодействия солнечного ветра с локальной межзвёздной средой. Модель, развитая в [25], позволяет объяснить значительную часть экспериментальных данных, полу-

ченных на различных космических аппаратах. В разделе 2 приводятся математическая постановка задачи в рамках модели [25], а также некоторые важные результаты. Применение этой модели к анализу данных космических аппаратов обсуждается в разделе 3.

2. Современная кинетико-магнитогидродинамическая модель взаимодействия солнечного ветра с межзвёздной средой

2.1. Постановка задачи

Модель, представленная в работе [25], является трёхмерной нестационарной кинетико-магнитогидродинамической (МГД) моделью. В этой модели межзвёздная среда рассматривается как частично-ионизованная, включающая в себя две компоненты: 1) нейтральную компоненту из атомов водорода, 2) заряженную (или плазменную) компоненту, состоящую из протонов, электронов и ионов гелия. Плазма солнечного ветра считается состоящей из протонов, альфа-частиц и электронов. В модели также полагается, что захваченные протоны мгновенно полностью ассимилируются в тепловую плазму. Это допущение является существенным. Как показано в работе [26], ассимиляция захваченных протонов по тепловым скоростям не происходит мгновенно и захваченные протоны необходимо описывать в рамках кинетического приближения.

Так как длина свободного пробега атомов водорода сопоставима с характерным размером задачи или превышает его (см., например, [12]), для описания нейтральной компоненты используется кинетический подход и функция распределения $f_H(t, \mathbf{r}, \mathbf{w}_H)$ определяется из решения следующего кинетического уравнения:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_H}{\partial t} + \mathbf{w}_H \frac{\partial f_H}{\partial \mathbf{r}} + \frac{\mathbf{F}_r + \mathbf{F}_g}{m_H} \frac{\partial f_H}{\partial \mathbf{w}_H} = -v_{ph} f_H(t, \mathbf{r}, \mathbf{w}_H) - \\ - f_H \int |\mathbf{w}_H - \mathbf{w}_p| \sigma_{ex}^{HP}(|\mathbf{w}_H - \mathbf{w}_p|) f_p(t, \mathbf{r}, \mathbf{w}_p) d\mathbf{w}_p + \\ + f_p(t, \mathbf{r}, \mathbf{w}_H) \int |\mathbf{w}_H^* - \mathbf{w}_H| \sigma_{ex}^{HP}(|\mathbf{w}_H^* - \mathbf{w}_H|) f_H(t, \mathbf{r}, \mathbf{w}_H^*) d\mathbf{w}_H^*. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь $\mathbf{F}_r$ и $\mathbf{F}_g$ — силы солнечного радиационного давления и солнечной гравитации соответственно, которые значительно влияют на функцию распределения межзвёздных атомов водорода внутри гелиосферы на расстояниях от Солнца, меньших, чем 10–20 а.е. (см., например, [27]), а на больших расстояниях от Солнца их влияние невелико; $f_p(t, \mathbf{r}, \mathbf{w}_p)$ — локально-максвелловская функция распределения протонов (как солнечного ветра, так и межзвёздной среды), определяемая газодинамическими параметрами: плотностью $\rho(t, \mathbf{r})$, скоростью $\mathbf{V}(t, \mathbf{r})$ и температурой $T(t, \mathbf{r})$; $\sigma_{ex}^{HP}(u)$ — эффективное сечение перезарядки атомов водорода и протонов, которое зависит от модуля относительной скорости следующим образом: $\sigma_{ex}^{HP}(u) = (2,2835 \times 10^{-7} - 1,062 \times 10^{-8} \ln u)^2 \text{ см}^2$ [28], где u — относительная скорость атома и протона в см с^{-1} ; $v_{ph} = 1,67 \times 10^{-7} (R_E/R)^2 \text{ с}^{-1}$ — частота фотоионизации, R_E — обозначение для 1 а.е.

Заряженная компонента описывается как идеальный совершенный нетеплопроводный газ с бесконечной проводимостью. Уравнения магнитной гидродинамики

имеют следующий вид:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{V}) = q_1, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{V}}{\partial t} + \nabla \left[\rho \mathbf{V} \otimes \mathbf{V} + \left(p + \frac{B^2}{8\pi} \right) \mathbf{I} - \frac{\mathbf{B} \otimes \mathbf{B}}{4\pi} \right] = \mathbf{q}_2, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} + \nabla(\mathbf{V} \otimes \mathbf{B} - \mathbf{B} \otimes \mathbf{V}) = 0, \quad \nabla \mathbf{B} = 0, \quad (4)$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \nabla \left[\left(E + p + \frac{B^2}{8\pi} \right) \mathbf{V} - \frac{(\mathbf{V} \mathbf{B})}{4\pi} \mathbf{B} \right] = q_3, \quad (5)$$

где $\mathbf{B}$ — вектор индукции магнитного поля, $\otimes$ — оператор тензорного произведения векторов, $\mathbf{I}$ — единичный тензор, $E = \rho V^2/2 + p/(\gamma - 1) + B^2/(8\pi)$ — полная энергия, $\gamma = 5/3$ — показатель адиабаты. Плотность плазмы определяется как $\rho = m_p n_p + m_{He} n_{He}$, где n_{He} означает концентрацию ионов гелия He^+ в межзвёздной среде и концентрацию альфа-частиц He^{++} в солнечном ветре. Для того чтобы определить концентрации этих компонент, решаются дополнительные уравнения неразрывности для ионов гелия в межзвёздной среде и альфа-частиц в солнечном ветре. Затем определяется концентрация протонов $n_p = (\rho - m_{He} n_{He})/m_p$; p — тепловое давление плазменной компоненты, которое определяется как сумма парциальных давлений компонент $p = (2n_p + 3n_{He^{++}}) k_B T_p$ в солнечном ветре и как $p = 2(n_p + n_{He^+}) k_B T_p$ в межзвёздной среде, T_p — температура плазменной компоненты, k_B — постоянная Больцмана.

Влияние перезарядки протонов на межзвёздных атомах водорода, а также фотоионизации, учитывается в источниковых членах q_1, q_2, q_3 правых частей МГД-уравнений. Источниковые члены выражаются через интегралы от функции распределения атомов и вычисляются методом Монте-Карло:

$$q_1 = m_p n_H v_{ph}, \quad n_H(\mathbf{r}, t) = \int f_H(t, \mathbf{r}, \mathbf{w}_H) d\mathbf{w}_H, \quad (6)$$

$$\begin{aligned} q_2 = \int m_p v_{ph} \mathbf{w}_H f_H(t, \mathbf{r}, \mathbf{w}_H) d\mathbf{w}_H + \iint m_p v_{rel} \sigma_{ex}^{HP}(v_{rel}) \times \\ \times (\mathbf{w}_H - \mathbf{w}) f_H(t, \mathbf{r}, \mathbf{w}_H) f_p(t, \mathbf{r}, \mathbf{w}) d\mathbf{w}_H d\mathbf{w}, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} q_3 = \int m_p v_{ph} \frac{w_H^2}{2} f_H(t, \mathbf{r}, \mathbf{w}_H) d\mathbf{w}_H + \frac{1}{2} \iint m_p v_{rel} \sigma_{ex}^{HP}(v_{rel}) \times \\ \times (w_H^2 - w^2) f_H(t, \mathbf{r}, \mathbf{w}_H) f_p(t, \mathbf{r}, \mathbf{w}) d\mathbf{w}_H d\mathbf{w} + n_H v_{ph} E_{ph}. \end{aligned} \quad (8)$$

Здесь $v_{rel} = |\mathbf{w}_H - \mathbf{w}|$ — относительная скорость атома и протона, E_{ph} — средняя энергия, выделяемая при фотоионизации (4,8 эВ).

Источниковые члены (6)–(8) вычисляются вместе с решением методом Монте-Карло с расщеплением траекторий кинетического уравнения (1) [13]. При реализации этого метода предполагается, что функция распределения протонов является локально-максвелловской, хотя в работе [13] предложено обобщение данного метода для произвольной локально-изотропной функции распределения.

Для завершения постановки задачи сформулируем граничные условия. Внутренние граничные условия ставятся внутри гелиосферы, там, где солнечный ветер является невозмущённым взаимодействием с межзвёздной

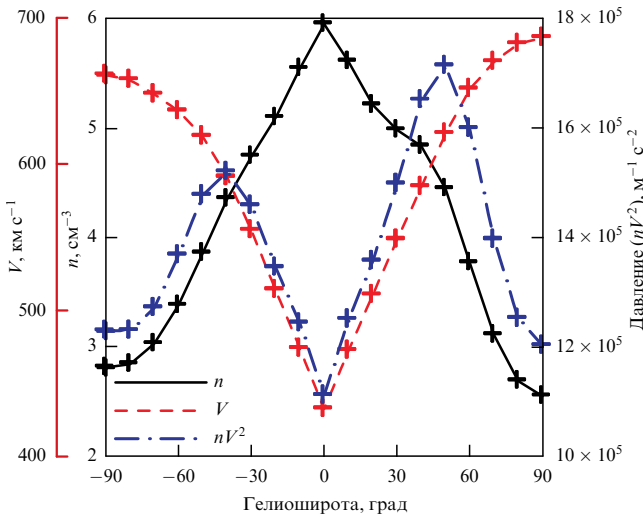


Рис. 2. Плотность n , скорость V и динамическое давление nV^2 солнечного ветра как функции гелиошироты.

средой. В качестве внутренней границы была выбрана орбита Земли (точнее, 1 а.е.). В [25] рассматриваемая задача решалась в стационарной постановке, поэтому параметры солнечного ветра на этой границе в плоскости эклиптики были определены посредством временных усреднений данных по параметрам солнечного ветра, полученных из базы данных Национального управления по аэронавтике США (National Aeronautics and Space Administration, NASA) OMNI-2 (OMNI — Operating Missions as Nodes on the Internet). В модели также учитывалась зависимость параметров солнечного ветра от гелиошироты (рис. 2). Для вычисления гелиоширотной зависимости скорости и плотности частиц использовались данные по межпланетным радиомерцаниям (см. [29]), а также данные по рассеянному солнечному лайман-альфа-излучению, полученные прибором SWAN (Solar Wind ANisotropie) на КА SOHO (Solar and Heliospheric Observatory) [30–32]. Важно отметить, что максимумы динамического давления солнечного ветра приходится на средние гелиошироты (см. рис. 2). Заметим, что нестационарные постановки задач рассматривались в работах [21, 22].

В рассматриваемой модели гелиосферное магнитное поле считалось вмороженным в плазму солнечного ветра. Полагалось, что на внутренней границе компоненты магнитного поля соответствуют классическому решению Паркера [33]:

$$B_R = \pm B_E \left(\frac{R_E}{R} \right)^2, \quad B_\theta = 0, \quad B_\phi = -\beta_s B_R \left(\frac{R}{R_E} \right) \sin \theta. \quad (9)$$

Здесь R, θ, ϕ — сферические координаты, связанные с солнечной экваториальной плоскостью: θ — солнечная широта, отсчитываемая от северного полюса (0°) к южному (180°). При $R = R_E = 1$ а.е. величина $B_E = 37,5$ мГс и параметр $\beta_s = \Omega R_E / V \approx 1$ для скорости солнечного ветра $V = 432$ км с $^{-1}$, Ω — угловая скорость обращения Солнца вокруг своей оси (≈ 25 сут), ϕ — солнечная долгота.

Знак радиальной компоненты B_R в данной точке пространства зависит от положения гелиосферного токового слоя и может изменяться со временем. Однако, так как члены в уравнениях идеальной МГД, в которые входит магнитное поле, не зависят от полярности поля, решение

задачи также не должно зависеть от знака B_R . Токовый слой в рамках идеальной МГД является магнитогидродинамическим разрывом, в котором магнитное поле меняет знак на противоположный. Заметим, что такое допущение вполне подтверждается данными, полученными "Вояджером" [34]. Эти данные показывают быстрое изменение полярности поля при пересечении аппаратом токового слоя и, следовательно, указывают на его малую толщину.

Заметим также, что в рамках идеальной МГД не может происходить пересоединения магнитных силовых линий гелиосферного и межзвёздного полей на гелиопаузе. Этот факт является хорошим тестом для численных моделей (и не выполняется в ряде моделей, разрабатываемых другими группами). В рассматриваемой модели проблемы с пересоединением на гелиопаузе вследствие численных эффектов не существует, поскольку гелиопауза рассматривается как тангенциальный разрыв, с обеих сторон которого выполняется условие $B_n = 0$. В расчётах этот разрыв выделяется численной сеткой. Детали используемой численной схемы и сетки можно найти в [25].

Параметры межзвёздной среды. Внешние граничные условия ставятся в невозмущённой межзвёздной среде. В [25] в качестве внешней границы принималась сфера радиусом ~ 1000 а.е.

Как отмечалось во введении, скорость относительного движения межзвёздной среды V и её температура достаточно хорошо известны. В [25] полагалось $V_{\text{LISM}} = 26,4$ км с $^{-1}$, $T_{\text{LISM}} = 6530$ К (LISM — Local Interstellar Medium), как следует из анализа измерений межзвёздных атомов гелия на КА Ulysses (прибор GAS) [2, 35–37]. Направление относительной скорости межзвёздной среды V_{LISM} имеет (в гелиографической инерциальной системе координат HGI 2000) долготу $-1,02^\circ$ и широту $-5,11^\circ$.

Оставшиеся параметры межзвёздной среды: концентрации атомов водорода, протонов и ионов гелия, а также величина и направление вектора индукции магнитного поля — известны не так хорошо и могут рассматриваться как свободные параметры. Непосредственных измерений невозмущённой (взаимодействием с солнечным ветром) межзвёздной среды не существует — несмотря на то что "Вояджер-1" пересёк гелиопаузу в 2013 г. на расстоянии 122 а.е., он всё ещё находится в области возмущённой межзвёздной среды. Оценить значения указанных величин можно посредством анализа косвенных измерений и результатов многопараметрических модельных расчётов. Такой анализ был проведён в [23, 38]. В [25] представлены следующие значения параметров межзвёздной среды: $n_{\text{H,LISM}} = 0,14$ см $^{-3}$, $n_{\text{p,LISM}} = 0,04$ см $^{-3}$, $n_{\text{He}^+, \text{LISM}} = 0,003$ см $^{-3}$. Величина индукции межзвёздного магнитного поля полагалась равной $B_{\text{LISM}} = 4,4$ мГс. Угол между направлениями векторов скорости межзвёздной среды и индукции межзвёздного магнитного поля $\alpha = 20^\circ$. Также предполагалось, что плоскость, определяемая векторами V_{LISM} и B_{LISM} , совпадает с плоскостью, определяемой векторами скоростей движения межзвёздных атомов гелия и водорода, последний из которых известен из анализа данных по рассеянному (на межзвёздных атомах водорода) солнечному лайман-альфа-излучению, полученных прибором SWAN на КА SOHO (см., [27, 39]).

Причины выбора таких значений свободных параметров задачи обсуждаются в разделе 3. При этих значениях параметров межзвёздная среда является сверхзвуковым субальфеновским потоком. Числа Маха, рассчитанные по скорости звука, скорости Альвена и быстрой магнитозвуковой скорости (в направлении движения межзвёздной среды), составляют соответственно $M=2,17$, $M_A=0,631$ и $M_{Z+,LISM}=0,628$.

2.2. Результаты модели

2.2.1. Система координат. Введём удобную для представления результатов гелиоцентрическую систему координат. Свяжем её с векторами скорости и индукции магнитного поля $\mathbf{V}_{LISM}$ и $\mathbf{B}_{LISM}$. Направим ось z навстречу вектору скорости межзвёздной среды. Выберем ось x в плоскости, определяемой векторами $\mathbf{V}_{LISM}$ и $\mathbf{B}_{LISM}$ (плоскость BV) и перпендикулярной оси z . Для определённости выберем положительное направление оси x так, чтобы проекция вектора индукции магнитного поля на эту ось была отрицательной. Ось y направим так, чтобы система координат была правой. В выбранной системе направление солнечного северного полюса определяется единичным вектором с координатами $(0,6696, -0,7373, 0,089)$.

2.2.2. Влияние межзвёздного магнитного поля. На рисунках 3–5 представлены результаты расчётов, полученные в рамках модели [25]. На рисунке 3а показаны (в плоскости zx) изолинии плотности и линии тока плазменной компоненты, а на рис. 3в — изолинии и силовые

линии магнитного поля для модели, в которой влияние гелиосферного магнитного поля не учитывалось, а солнечный ветер полагался изотропным по гелиошироте. Как видно из рис. 3, именно межзвёздное магнитное поле приводит к асимметричной глобальной структуре гелиосферы (для сравнения см. результаты осесимметричных моделей на рис. 1). Наиболее сильно выражена асимметрия гелиопаузы, которая находится существенно дальше от Солнца в верхней полуплоскости, чем в нижней. Гелиоцентрическое расстояние до гелиопаузы (НР) зависит от соотношения магнитного давления и величины натяжения магнитных силовых линий. Максимальное давление межзвёздное магнитное поле на гелиопаузу оказывает в нижней полуплоскости, там, где магнитные силовые линии параллельны поверхности гелиопаузы.

Изменение формы и положения гелиопаузы приводит к изменению формы гелиосферной ударной волны (TS). Она также становится асимметричной относительно оси z , приближаясь к Солнцу в нижней полуплоскости и отдаляясь в верхней. Именно межзвёздное магнитное поле привело к тому, что "Вояджер-2" пересёк гелиосферную ударную волну на 10 а.е. ближе, чем "Вояджер-1", несмотря на то что угол между направлением движения "Вояджера-2" и направлением оси z (т.е. направлением навстречу вектору скорости межзвёздной среды) существенно больше, чем соответствующий угол для направления "Вояджера-1". То есть в случае осесимметричной гелиосферы следовало бы ожидать, что расстояние до гелиосферной ударной волны будет больше в направле-

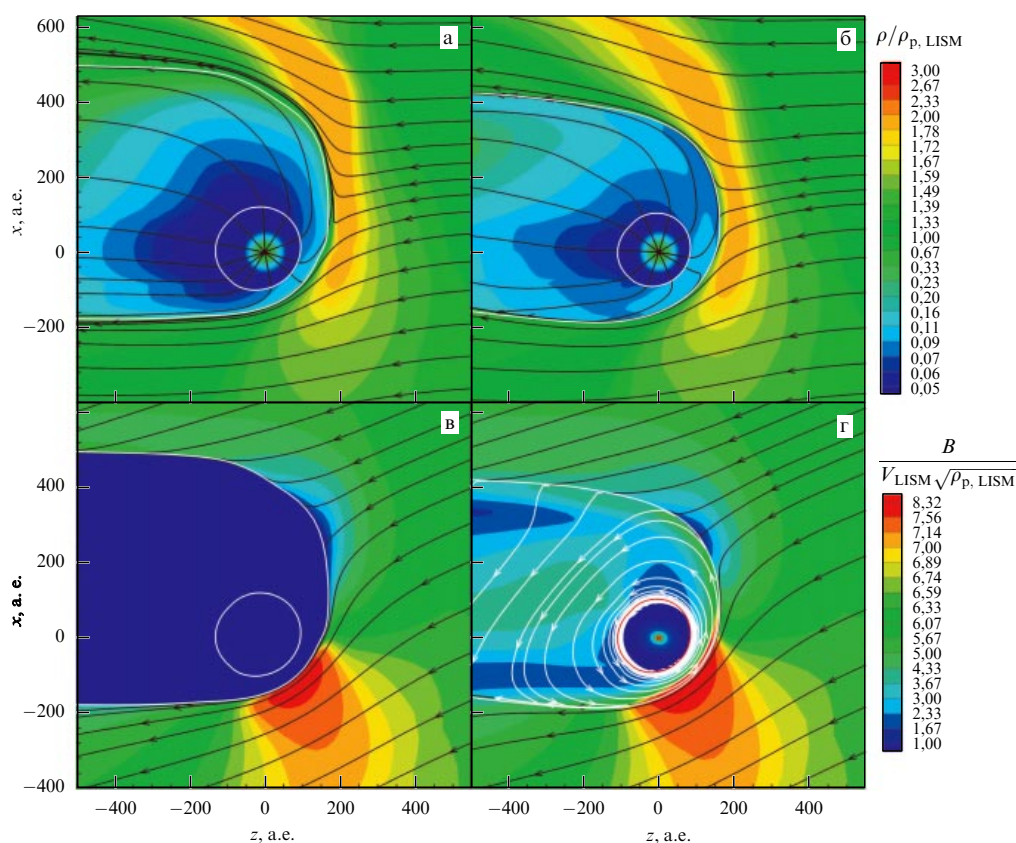


Рис. 3. (В цвете онлайн.) (а, б) Линии тока и изолинии плотности плазменной компоненты. Плотность нормирована на плотность протонов в межзвёздной среде. (в, г) Силовые линии и изолинии абсолютной величины магнитного поля даны в безразмерных единицах. На рисунках а и в приведены результаты расчётов без учёта влияния гелиосферного магнитного поля, на рис. б и г — с учётом поля. Результаты представлены в плоскости zx , которая определяется векторами скорости и магнитного поля межзвёздной среды.

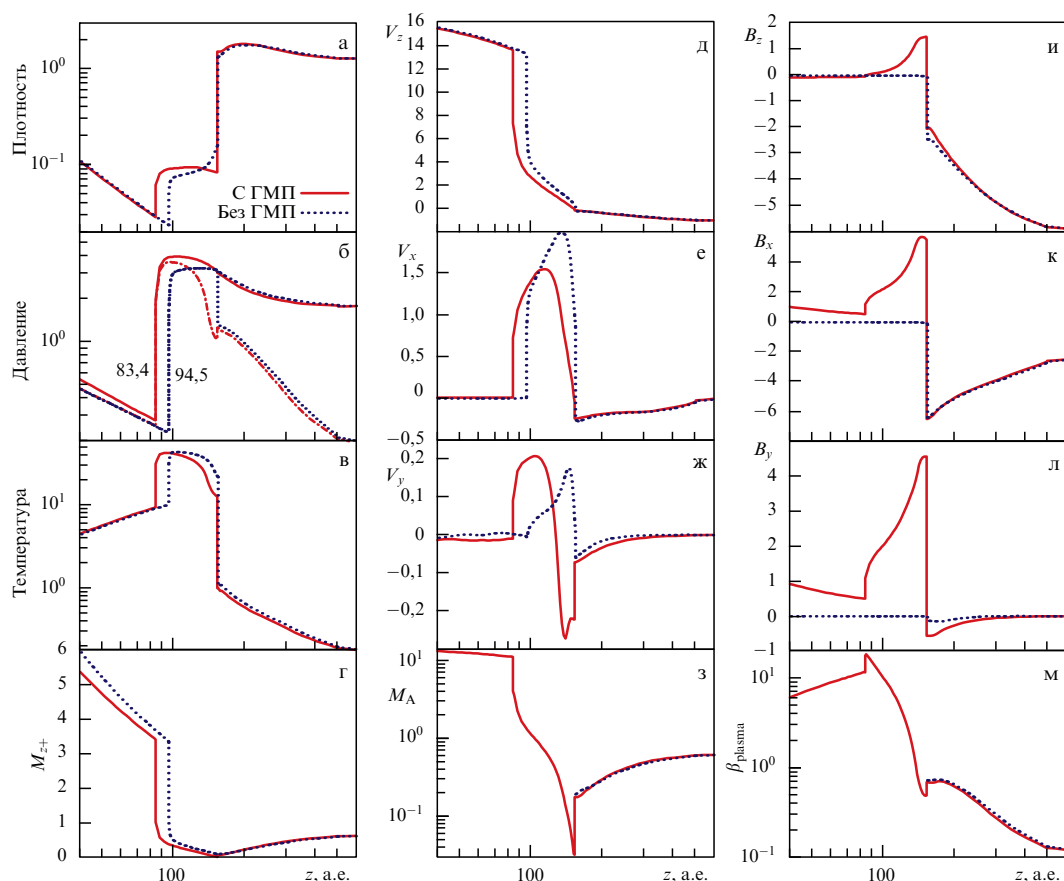


Рис. 4. Плотность (а), давление статическое (штрихпунктирная кривая) и полное (б), температура (в), компоненты скорости (д–ж) плазменной компоненты и компоненты магнитного поля (и–л) (в отн. ед.) в зависимости от гелиоцентрического расстояния (построены вдоль оси z). Сплошные кривые соответствуют результатам модели с учётом влияния гелиосферного магнитного поля (ГМП), пунктирные кривые — без учёта его влияния. (г) Число Маха M_{z+} , рассчитанное по быстрой магнитозвуковой скорости, (з) альфеновское число M_A , (м) плазменный параметр β .

нии "Вояджера-2". Заметим также, что при выбранных значениях межзвёздного магнитного поля головная ударная волна отсутствует. При меньших значениях поля ($\sim 2,5$ мкГс) головная ударная волна существует, но является слабой и находится на существенном удалении от гелиопаузы (т.е. фактически вырождается в характеристику) [21].

Вследствие асимметрии гелиопаузы плотность межзвёздной плазмы в верхней полуплоскости ($x > 0$) больше, чем в нижней ($x < 0$), а точка торможения смещается от оси вверх. В окрестности этой точки плотность плазменной компоненты межзвёздной среды достигает максимума, а вектор скорости имеет значительную компоненту V_x . Поскольку скорость межзвёздных атомов водорода, которые рождаются в этой области в результате перезарядки, соответствует скорости протонопартнёров по перезарядке, у нейтральной компоненты также существует ненулевая составляющая скорости вдоль оси x . В [25] вектор средней скорости атомов водорода V_H вычислялся как момент их функции распределения. Его x -компонента отлична от нуля даже на малых гелиоцентрических расстояниях. Угол между средней скоростью движения атомов водорода внутри гелиосферы и направлением движения межзвёздной среды в расчётах составил $3-5^\circ$ (см. [21, 27]). Такое же отклонение направления движения атомов водорода обнаружено по измерениям рассеянного солнечного излучения в линии лайман-альфа на КА SOHO [31, 39].

2.2.3. Влияние гелиосферного магнитного поля. Область вытеснения плазмы магнитным полем. На рисунке 3б, г показаны результаты расчёта с учётом гелиосферного магнитного поля. Видно, что как глобальная структура гелиосферы, так и пространственные распределения плазмы и магнитного поля в межзвёздной среде качественно не меняются. Однако детальное рассмотрение показывает, что, например, гелиоцентрическое расстояние до ударной волны уменьшается на ~ 10 а.е. (что соответствует примерно трём годам движения "Вояджера"). Количественно влияние гелиосферного магнитного поля показано на рис. 4, где представлены одномерные распределения параметров плазмы и магнитного поля вдоль оси z .

Детальное физическое объяснение полученных результатов дано в [25]. Здесь отметим лишь интересный и важный эффект вытеснения (уменьшения плотности) плазмы магнитным полем в окрестности гелиопаузы. Аналогичный эффект известен и для земной магнитопаузы (см. [40]). Этот эффект связан с увеличением перпендикулярной (движению плазмы) компоненты магнитного поля при приближении потока плазмы к границе области течения, в частности к точке торможения. Образующийся при этом градиент магнитного поля приводит к торможению плазмы. В результате течение изменяется так, что плазма начинает обтекать препятствие в виде магнитной стенки. Этот эффект хорошо виден на рис. 4. Все три компоненты магнитного поля возрастают по

мере приближения к гелиопаузе (рис. 4и–л). Все три компоненты скорости (рис. 4д–ж), а также плотность (рис. 4а) уменьшаются по мере приближения к гелиопаузе начиная примерно с середины гелиосферного ударного слоя. В этой области и альфеновское число Маха, и плазменный параметр β (определяемый как отношение давления плазмы к давлению магнитного поля) становятся меньше единицы. Последнее означает, что магнитное поле является определяющим для течения, т.е. распределение плазмы следует распределению поля. Интересно, что в области вытеснения давление магнитного поля "вытесняет" давление плазмы таким образом, что суммарное давление сохраняется (рис. 4б). Эффект вытеснения играет существенную роль в достаточно большой области носовой части гелиосферы, и он же приводит к уменьшению гелиоцентрического расстояния до гелиопаузы на флангах.

Важно отметить, что эффект вытеснения приводит также к образованию сильного (примерно в 10 раз) скачка плотности при пересечении гелиопаузы. Этот результат противоречит теоретическому представлению о плавном (непрерывном) изменении параметров плазмы на гелиопаузе в окрестности точки торможения вследствие эффекта перезарядки (см. [41]). Одно из возможных объяснений такого противоречия состоит в том, что в трёхмерной геометрии точки торможения внутри и снаружи гелиопаузы не совпадают, а это является необходимым условием для полученного в [41] результата.

Гелиосферное магнитное поле приводит к значительному изменению течения плазмы в области гелиосферного ударного слоя, в особенности в окрестности гелиопаузы. Детальный анализ течения плазмы вдоль гелиопаузы приведён в [25] (см. рис. 5 в этой работе и пояснения к нему). Здесь, однако, важно отметить ещё один эффект, связанный с влиянием гелиосферного магнитного поля. Этот эффект в настоящее время активно обсуждается в гелиосферном научном сообществе.

Как известно из классического решения Паркера [33], на больших гелиоцентрических расстояниях гелиосферное магнитное поле является преимущественно тороидальным (доминирует компонента B_ϕ). В недавних работах [42–44] показано, что при истечении замагниченного солнечного ветра в покоящуюся межзвёздную среду с противодействием (в отсутствие магнитного поля) нарушается симметричность истечения солнечного ветра и образуются два джета вдоль оси вращения Солнца (см. рис. 1 в [43]). В [45] представлены результаты расчёта глобальной структуры гелиосферы и показано, что джеты формируются и в случае реалистичных граничных условий в межзвёздной среде. Гелиопауза при этом имеет форму изогнутой трубки.

Эффект возможной коллимации солнечного ветра в джеты должен воспроизводиться в модели [25], так как влияние гелиосферного магнитного поля в ней учитывалось. Для того чтобы продемонстрировать эффект коллимации солнечного ветра к полюсам, на рис. 5 показана зависимость потока массы (ρV) от положения на замкнутой поверхности, расположенной на некотором расстоянии от гелиосферной ударной волны. Положение на замкнутой поверхности характеризуется двумя углами, один из которых отсчитывается от направления навстречу вектору скорости потока межзвёздной среды (оси z), а другой — от оси x (см. определение системы координат в разделе 2.2.1). В случае расчётов без учёта

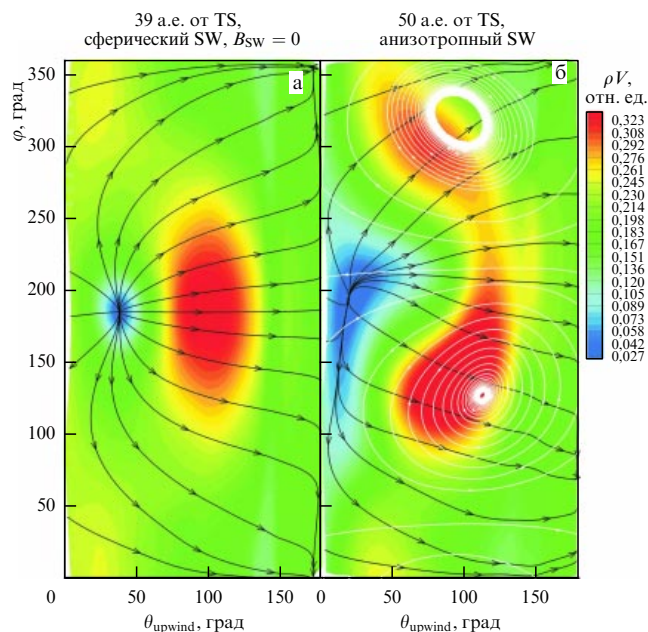


Рис. 5. Поток массы (ρV) солнечного ветра (SW) через замкнутую поверхность, проведённую в области внутреннего ударного слоя на одинаковом удалении от гелиосферной ударной волны. (Upwind — направление навстречу набегающему потоку межзвёздной среды.) Результаты модели без учёта (а) и с учётом (б) гелиосферного магнитного поля. Тёмными кривыми показаны проекции линии тока плазменного компонента на эту поверхность, светлыми — проекции силовых линий магнитного поля.

гелиосферного магнитного поля (рис. 5а) максимум потока наблюдается в направлениях, перпендикулярных направлению движения межзвёздной среды $\theta \sim 100^\circ - 110^\circ$ и $\phi \sim 180^\circ$. В этих направлениях весь солнечный ветер с наветренной стороны переносится в хвост. Магнитное поле приводит к образованию двух максимумов — в северном и южном полушариях (рис. 5б). Эти результаты свидетельствуют о том, что эффект коллимации солнечного ветра в направлении полюсов присутствует в результатах модели [25]. Однако этот эффект является недостаточно сильным для того, чтобы кардинальным образом изменить топологию гелиопаузы (по крайней мере в области радиусом 1000–3000 а.е. вокруг Солнца). Отличие полученных результатов от результатов [45], на наш взгляд, объясняется эффектами, связанными с перезарядкой протонов солнечного ветра на межзвёздных атомах водорода, которые обеспечивают эффективный обмен импульсом между компонентами. Так, при существовании точек торможения плазмы в хвостовой части гелиосферы перезарядка будет приводить к отдалению этой точки от Солнца на очень большие гелиоцентрические расстояния, что делает топологию гелиопаузы в окрестности Солнца неотличимой от "классической".

2.2.4. Влияние гелиоширотной зависимости параметров солнечного ветра. Изменение параметров солнечного ветра с гелиоширотой (см. рис. 2) приводит к ещё более сложному характеру течения солнечного ветра в области гелиосферного ударного слоя. В [25] показано, что гелиоширотная зависимость не приводит к качественному изменению глобальной структуры гелиосферы и распределения параметров плазменной компоненты и магнитного поля. Тем не менее количественные разли-

чия есть. В частности, форма гелиопаузы становится более плоской (blunt): в направлении набегающего потока гелиопауза оказывается ближе к Солнцу на $\sim 10\text{--}15$ а.е. (по сравнению со сферически-симметричным солнечным ветром), а в направлении полюсов отдалается от Солнца примерно на то же расстояние. Такое изменение формы гелиопаузы связано с немонотонным характером динамического давления солнечного ветра, увеличивающегося на 30–50 % на средних широтах и в дальнейшем уменьшающегося по мере приближения к полюсам (см. рис. 2). Немонотонная зависимость динамического давления от гелиошироты приводит к изменению течения плазмы в области гелиосферного ударного слоя, в частности к уменьшению давления в лобовой части гелиосферы.

Форма гелиосферной ударной волны изменяется в соответствии с формой гелиопаузы, и расстояние до неё тоже увеличивается в направлении полюсов. Заметим также, что, так как гелиопауза является препятствием для потока межзвёздной среды, изменение её формы влияет на линии тока межзвёздной плазмы, а изменение распределения плазмы влияет в свою очередь на распределение параметров атомов водорода, рождённых в окрестности гелиопаузы вследствие перезарядки. В [25] показано, что, действительно, V_x -компонента скорости атомов внутри гелиосферы изменяется в расчётах, учитывающих гелиоширотную зависимость солнечного ветра. Это означает, что при анализе данных по рассеянному солнечному лайман-альфа-излучению необходимо учитывать зависимость параметров солнечного ветра от гелиошироты и солнечного цикла не только локально внутри гелиосферы (см. [27]), но и при моделировании движения атомов в области гелиосферного интерфейса.

3. Сравнение результатов модели с экспериментальными данными

Прежде чем перейти к сравнению результатов модели с данными космических экспериментов, полученными в последнее время, необходимо обосновать выбор внешних граничных условий при постановке задачи. Строго говоря, в рассматриваемой нами модели имеется четыре свободных параметра: 1) концентрация протонов, 2) концентрация межзвёздных атомов водорода, 3) величина межзвёздного магнитного поля, 4) направление межзвёздного магнитного поля.

Остальные параметры модели, как было отмечено, являются достаточно хорошо известными из данных космических экспериментов. Рассматривая четыре параметра, мы предполагаем, что магнитное поле лежит в плоскости, определяемой векторами скорости межзвёздных атомов гелия и водорода. Заметим, что, как было показано в модели, такое предположение выполняется лишь приближённо из-за широтных изменений параметров солнечного ветра. Это, конечно, вносит некоторую (небольшую) ошибку в оценку остальных параметров.

Данные, полученные космическими аппаратами, позволяют установить существенные ограничения как на перечисленные свободные параметры модели, так и на характеристики области взаимодействия, которые должны быть описаны в рамках модели. Перечислим основные данные.

1. Расстояния до гелиосферной ударной волны в направлениях космических аппаратов "Вояджер-1" и

"Вояджер-2". Эти значения были определены непосредственно при пересечении космическими аппаратами гелиосферной волны на расстояниях 83,7 и 94,1 а.е. в августе 2004 г. и декабре 2007 г. соответственно.

2. Концентрация межзвёздных атомов водорода на гелиоцентрических расстояниях ($\sim 50\text{--}90$ а.е.), которая составляет $0,10 \pm 0,01 \text{ см}^{-3}$. Эта величина получена независимо из анализа распределений захваченных протонов, измеряемых в солнечном ветре (см., например, [47, 48]), и анализа степени замедления сверхзвукового солнечного ветра на больших ($\sim 50\text{--}90$ а.е.) гелиоцентрических расстояниях из-за перезарядки солнечных протонов на межзвёздных атомах водорода (см. [49]).

3. Величина отклонения межзвёздных атомов водорода от направления движения невозмущённой солнечным ветром межзвёздной среды [23, 31, 39].

4. Плотность и скорость солнечного ветра в области гелиосферного ударного слоя, измерение которых проводится на "Вояджере-2" с помощью прибора Plasma [50] (аналогичный прибор на "Вояджере-1", к сожалению, не работает).

5. Расстояние до гелиопаузы в направлении "Вояджера-1". Это расстояние, которое составляет 122 а.е., было определено при непосредственном пересечении гелиопаузы "Вояджером-1" в конце августа – начале сентября 2012 г. (см., например, [51]).

6. Величина и направление магнитного поля, измеряемые прибором MAG (Magnetometer) на "Вояджере-1" в области гелиосферного ударного слоя [34].

7. Оценки плотности протонов в межзвёздной среде, полученные из анализа плазменных волн в килогерцовом диапазоне, измеренных на "Вояджере-1" [52].

8. Направление центра пояса энергетичных атомов гелиосферного происхождения, который был обнаружен космическим аппаратом IBEX [53]. В литературе этот центр ассоциируется с направлением межзвёздного магнитного поля [54].

Приведённый список данных о свойствах межзвёздной среды и гелиосферного интерфейса не является полным. В нём, например, отсутствует информация о измерениях энергетичных частиц на "Вояджерах" и IBEX. Тем не менее при проведении параметрических исследований становится ясно, что в рамках описанной выше модели невозможно получить хорошее согласие модельных результатов со всеми данными одновременно при одном наборе свободных параметров задачи.

Например, невозможно получить одновременно (в рамках модели с реалистичными граничными условиями) расстояние (в направлении "Вояджера-1") до гелиосферной ударной волны, равное 94 а.е., и расстояние до гелиопаузы, равное 122 а.е. В модели [25], как и в аналогичных моделях других авторов, толщина ударного слоя в этом направлении составляет 50–70 а.е., что существенно превышает толщину слоя в 28 а.е., определённую "Вояджером-1".

Заметим, что хотя изменение параметров солнечного ветра с солнечным циклом приводит к флуктуациям положения гелиосферной волны на 10 а.е. и положения гелиопаузы на 3–4 а.е. [21, 22], такие флуктуации поверхностей разрывов не помогут разрешить указанную проблему. Так как получаемая в модели толщина ударного слоя является следствием законов сохранения массы, импульса и энергии, существенно её уменьшить (примерно в 2 раза) можно, только добавив в рассмот-

рение какой-либо физический процесс, приводящий к уменьшению давления/энергии в области ударного слоя. Так, в [55] показано, что учёт электронной теплопроводности приводит к уменьшению теплового давления в слое и, следовательно, к уменьшению его толщины.

Для того чтобы определить значения межзвёздных параметров, в [25] ограничились данными, указанными в первых трёх пунктах приведённого выше списка. Это объясняется тем, что модель преимущественно применялась для анализа данных, связанных с нейтральной компонентой (см. [27, 56–58]). Проведённое параметрическое исследование показало, что наилучшее согласие результатов модели с данными КА достигается при следующих значениях свободных параметров задачи (которые и были взяты при её постановке): $n_{p,LISM} = 0,04 \text{ см}^{-3}$, $n_{H,LISM} = 0,14 \text{ см}^{-3}$, $B_{LISM} = 4,4 \text{ мкГс}$, $\alpha_{LISM} = 20^\circ$.

На основе представленной модели и её более ранних версий был проведён анализ данных, полученных на различных КА. Так, в [59–65] модель использовалась для анализа спектров поглощения лайман-альфа-излучения в направлениях ближних звёзд, измеренных на космическом телескопе Хаббла (Hubble Space Telescope). В частности, в этих работах доказано существование так называемой водородной стенки — увеличения плотности межзвёздных атомов вокруг гелиопаузы. Это увеличение происходит вследствие перезарядки межзвёздных атомов водорода с замедленными в окрестности точки торможения на гелиопаузе протонами. Получающиеся в результате перезарядки вторичные атомы водорода имеют меньшие скорости (по сравнению со скоростями первичных), поэтому они накапливаются в области вокруг гелиопаузы, образуя "стенку". Существование водородной стенки было теоретически предсказано в работах [11, 66]. Анализ спектров поглощения, полученных на Телескопе Хаббла, также указал на вероятное существование аналогичных стенок вокруг других звёзд, что предоставляет дополнительную возможность изучать свойства их звёздных ветров.

Во многих работах модель гелиосферного интерфейса использовалась для анализа данных по рассеянному солнечному лайман-альфа-излучению. Недавний подробный обзор этих работ дан в [67].

Модель также применялась для анализа измерений захваченных ионов солнечного ветра [18, 19]. Захваченные ионы образуются внутри гелиосферы из межзвёздных атомов вследствие перезарядки и фотоионизации. Их энергетические спектры измеряются на КА Ulysses и ACE (Advanced Composition Explorer) (прибор SWICS (Solar Wind Composition Spectrometer)) (см., например, [47]).

Ряд работ (см., например, [24, 46]) посвящён моделированию и анализу потоков энергетичных атомов водорода и сравнению результатов расчёта с данными IBEX.

Не останавливаясь детально на результатах ранних работ, рассмотрим более подробно анализ измерений потоков межзвёздного кислорода на КА IBEX и рассеянного солнечного лайман-альфа-излучения, проведённый в [57, 58] соответственно.

3.1. Измерения вторичного кислорода космическим аппаратом IBEX-Lo

Межзвёздный атомарный кислород является третьим по содержанию в межзвёздной среде. Так как энергия ионизации атомарного кислорода близка к энергии ионизации водорода, сечение перезарядки атомов кисло-

рода на протонах близко к резонансному: $H^+ + H = H + H^+$. Поэтому следует ожидать, что при прохождении атомов кислорода через область гелиосферного интерфейса в окрестности гелиопаузы образуется кислородная стенка, а внутри гелиосферы будут проникать как первичные (межзвёздные), так и вторичные (образованные в окрестности гелиопаузы при перезарядке) атомы кислорода. Существование вторичных атомов кислорода было предсказано теоретически в работе [68].

В работе [69] представлены первые количественные данные измерений потоков межзвёздных атомов кислорода на IBEX. В [57] на основе описанной выше модели [25] взаимодействия солнечного ветра с локальной межзвёздной средой вычислены потоки межзвёздных атомов кислорода, а также проведено сравнение с данными IBEX. При этом для корректного анализа данных использовалась модель, которая позволяет детально описать движение межзвёздных атомов *внутри* гелиосферы и учитывает временную и гелиоширотную зависимости частот ионизации и перезарядки на протонах солнечного ветра, а также силу солнечного гравитационного притяжения. Проведённое численное моделирование включает в себя реальную геометрию наблюдений КА IBEX, технические спецификации сенсора IBEX-Lo, а также последние результаты его калибровки. Ввиду особенностей сенсора наблюдения IBEX-Lo включают в себя данные о потоке атомов неона, которые также учитывались в расчётах.

На рисунке 6а представлена карта потоков нейтральных атомов кислорода и неона в эклиптических координатах по данным сенсора IBEX-Lo, а на рис. 6б показаны результаты соответствующего численного моделирования. На обеих картах мы видим похожие структуры: от основного потока, показанного красным цветом, в сторону меньших долгот и больших широт уходит так называемый хвост. Результаты расчётов показывают, что основной поток связан с первичными атомами кислорода и неона, а хвост представляет собой потоки вторичной компоненты нейтральных атомов кислорода. Эти результаты подтверждают теоретический результат [68] 1997 года.

3.2. Анализ рассеянного солнечного лайман-альфа-излучения на больших гелиоцентрических расстояниях

Одним из интересных примеров применения модели, имеющих новый неожиданный результат, является анализ данных измерений интенсивности рассеянного солнечного лайман-альфа-излучения во внешней гелиосфере, полученных на "Вояджере-1" в 2003–2014 гг. на расстояниях 90–130 а.е. от Солнца [58]. В это время КА проводил измерения интенсивности лайман-альфа-излучения в направлении, близком к направлению навстречу набегающему потоку межзвёздной среды. Так как КА постоянно удалялся от Солнца, полученные данные позволили исследовать зависимость интенсивности рассеянного солнечного лайман-альфа-излучения от гелиоцентрического расстояния.

На рисунке 7а приведены данные, полученные на "Вояджере-1" за 2003–2014 гг. Интенсивность лайман-альфа-излучения, рассеянного в гелиосфере, пропорциональна потоку солнечных лайман-альфа-фотонов. Поскольку нас интересуют процессы, происходящие на границе гелиосферы, целесообразно исключить временные

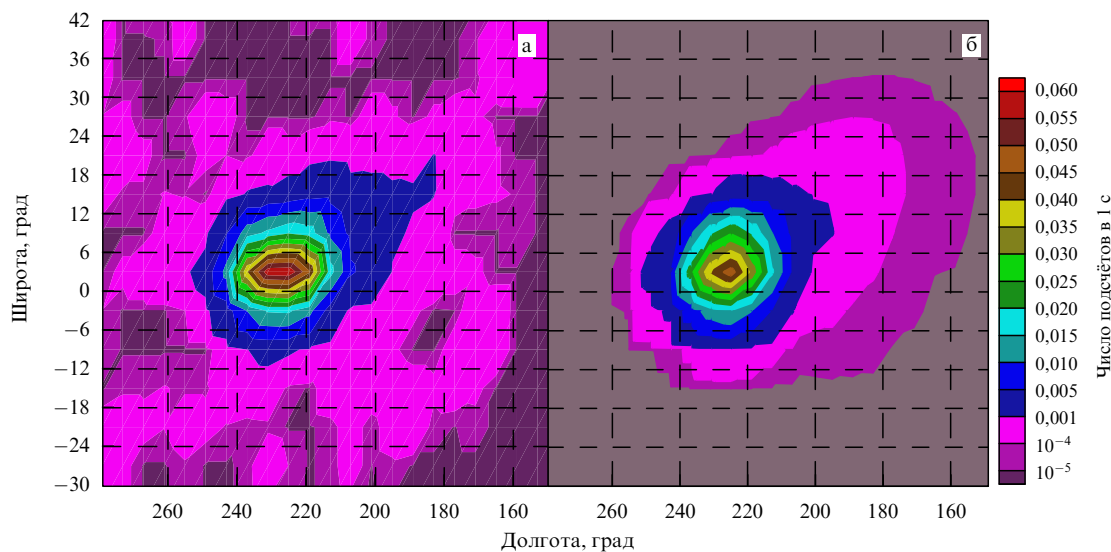


Рис. 6. (В цвете онлайн.) Сравнение данных IBEX-Lo (а) с результатами численных расчётов (б) на энергетическом канале 6. Из карты, построенной по данным IBEX-Lo, вычтена величина фонового потока $b_g = 2,32 \times 10^{-4}$ подсчётов в 1 с (см. табл. 3 в работе [69]). Рисунок представлен в гелиоцентрической эклиптической системе координат (J2000).

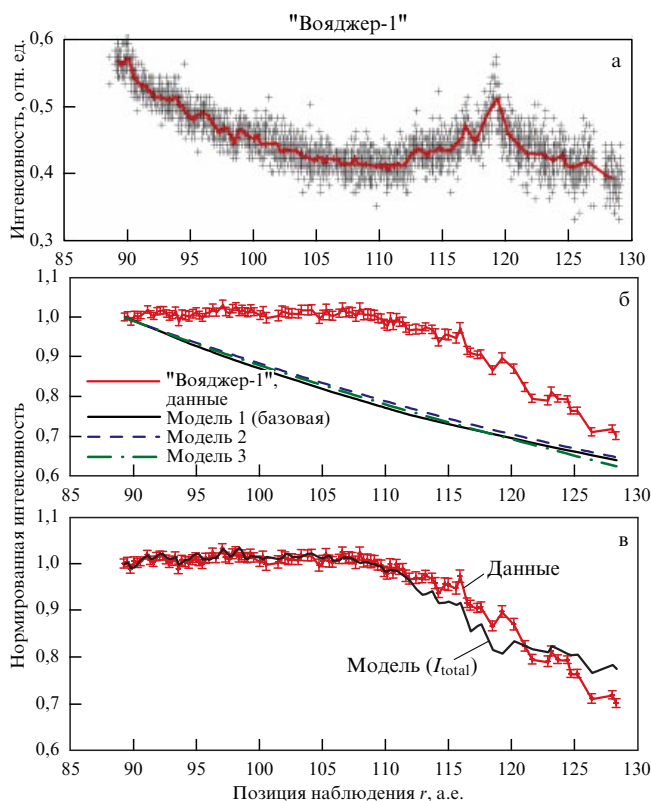


Рис. 7. (В цвете онлайн.) Данные измерений интенсивности лайман-альфа-излучения на "Вояджере-1" (прибор UVS). (а) Интенсивность (красная кривая — данные, усреднённые за 27 сут). (б) Интенсивность, нормированная на солнечный лайман-альфа-поток на орбите Земли; сравнение данных КА "Вояджер-1" с результатами трёх моделей границы гелиосферы с различными параметрами (концентрацией протонов и атомов водорода) в межзвёздной среде. (в) Сравнение результатов модели, в которую была добавлена внегелиосферная компонента излучения интенсивностью 25 Рл, с данными КА "Вояджер-1".

вариации солнечного потока из данных. Для этого будем рассматривать отношение измеряемой интенсивности к

солнечному потоку на орбите Земли. Нормированная таким образом интенсивность показана на рис. 7б. Видно, что с 2003 г. по 2009 г. эта интенсивность была практически постоянной. Сравнение нормированных данных с результатами расчётов показало, что модельная интенсивность монотонно убывает с увеличением расстояния от Солнца. Это не соответствует данным "Вояджера-1" (рис. 7б). В [58] предложены два сценария, в рамках которых можно объяснить эти данные. В первом сценарии необходимо допустить существование постоянного фонового излучения негелиосферного происхождения. Интенсивность такого излучения должна быть порядка 25 Рл (рис. 7в). Такое дополнительное излучение может быть связано с галактическим или внегалактическим фоном лайман-альфа-излучения, который можно заметить только вдали от Солнца, когда гелиосферная компонента излучения становится сравнимой с внегелиосферной. Ранее о регистрации галактического лайман-альфа-излучения сообщалось в [70].

Второе возможное объяснение данных "Вояджера-1" состоит в предположении о существовании уплотнённого слоя атомов водорода, находящегося непосредственно перед или за гелиопаузой. При этом лайман-альфа-фотоны, рассеянные на атомах водорода в слое, должны иметь достаточно большой доплеровский сдвиг по сравнению с таковым для фотонов, рассеянных на обычных межзвёздных атомах, для того, чтобы это излучение не поглощалось гелиосферой и могло быть зарегистрировано "Вояджером-1". В этом случае слой может рассматриваться как дополнительный постоянный источник излучения для наблюдателя, приближающегося к слою. После того как наблюдатель пересекает границу слоя, интенсивность резко убывает из-за поглощения излучения внутри слоя. Данный слой был добавлен в модель в виде дополнительной компоненты атомов водорода, на которых могут рассеиваться солнечные лайман-альфа-фотоны. Расчёты показали, что параметры атомов в слое должны быть примерно следующими: концентрация $\sim 10 \text{ см}^{-3}$, скорость в направлении от Солнца $\sim 50 \text{ км с}^{-1}$, температура $\sim 10^4 \text{ К}$. Физическая природа

такого слоя в настоящее время неизвестна (см., однако, [71]).

4. Заключение

В настоящей статье кратко изложены основные теоретические/модельные представления о взаимодействии солнечного ветра с локальной межзвёздной средой. Показано, что это взаимодействие имеет сложный многокомпонентный характер. Для теоретического описания области взаимодействия требуется развивать кинетико-магнитогидродинамические модели, учитывающие как тепловые компоненты плазмы солнечного ветра и межзвёздной среды, включая описываемые кинетически межзвёздные атомы водорода, так и надтепловые энергетичные частицы (заряженные и нейтральные). Необходимо также учитывать гелиосферное и межзвёздное магнитные поля, а также зависимость параметров солнечного ветра как от времени, так и от гелиошироты.

Численные модели гелиосферы позволяют объяснить значительное количество экспериментальных данных, в том числе и таких "модельно-чувствительных" параметров, как отклонение направления движения межзвёздных атомов водорода от направления движения межзвёздной среды или расстояние до гелиосферной ударной волны в направлениях КА "Вояджер-1" и "Вояджер-2".

Вместе с тем существующие модели не могут согласованно — в рамках одной модели и одного набора определяющих задачу параметров — объяснить все данные, полученные на различных КА. Так, например, измерения, проводимые на "Вояджере-1", свидетельствуют о вероятном наличии диссипативного процесса (например, теплопроводности) в области гелиосферного ударного слоя.

По мнению автора, интерес к исследованию границы гелиосферы будет в дальнейшем возрастать. Этот интерес будет в первую очередь связан с необходимостью понять и дать физическое объяснение данным, получаемым с КА "Вояджер-1", "Вояджер-2" и ИВЕР. Новая существенная информация появится после пересечения гелиопаузы "Вояджером-2", которое ожидается в ближайшее время.

Дальнейшее исследование границы гелиосферы связано с новым космическим проектом Interstellar Probe [72], а также с дальнейшим более детальным исследованием границы гелиосферы с орбиты Земли или точки L1 (миссия NASA IMAP (Interstellar Mapper and Acceleration Probe) [73]).

Автор выражает благодарность своим коллегам Д.Б. Алексахову, И.И. Балюкину и О.А. Катушкиной за совместную работу. Результаты по глобальному моделированию гелиосферы/астросфер получены в рамках проекта 14-12-01096 Российского научного фонда. Часть работы по анализу лайман-альфа-излучения, результаты которого представлены в статье, выполнена при поддержке грантом 16-52-16008 Российского фонда фундаментальных исследований.

Список литературы

1. Xu F, Borovsky J E *J. Geophys. Res. Space Phys.* **120** 70 (2015)
2. Katushkina O A et al. *Astrophys. J.* **789** 80 (2014)
3. McComas D J et al. *Astrophys. J. Suppl.* **220** 22 (2015)
4. Parker E N *Astrophys. J.* **134** 20 (1961)
5. Баранов В Б, Краснобаев К В, Куликовский А Г *ДАН СССР* **194** 41 (1970); Baranov V B, Krasnobaev K V, Kulikovskii A G *Sov. Phys. Dokl.* **15** 791 (1971)
6. Bertaux J L, Blamont J E *Astron. Astrophys.* **11** 200 (1971)
7. Thomas G E, Krassa R F *Astron. Astrophys.* **11** 218 (1971)
8. Weller C S, Meier R R *Astrophys. J.* **193** 471 (1974)
9. Wallis M K *Nature* **254** 207 (1975)
10. Izmodenov V V *Astrophys. Space Sci.* **274** 55 (2000)
11. Baranov V B, Malama Y G *JGR* **98** 15157 (1993)
12. Izmodenov V V et al. *Astrophys. Space Sci.* **274** 71 (2000)
13. Malama Y G *Astrophys. Space Sci.* **176** 21 (1991)
14. Myasnikov A V et al. *J. Geophys. Res. Space Phys.* **105** 5167 (2000)
15. Alexashov D B et al. *Astron. Astrophys.* **420** 729 (2004)
16. Izmodenov V V *Space Sci. Rev.* **97** 385 (2001)
17. Izmodenov V V et al. *Astrophys. J. Lett.* **594** L59 (2003)
18. Izmodenov V V, Lallement R, Geiss J *Astron. Astrophys.* **344** 317 (1999)
19. Izmodenov V et al. *Astron. Astrophys.* **414** L29 (2004)
20. Izmodenov V V, Alexashov D B *Astron. Lett.* **29** 58 (2003)
21. Izmodenov V V, Malama Y G, Ruderman M S *Astron. Astrophys.* **429** 1069 (2005)
22. Izmodenov V V, Malama Y G, Ruderman M S *Adv. Space Res.* **41** 318 (2008)
23. Izmodenov V V, Alexashov D B, Myasnikov A V *Astron. Astrophys.* **437** L35 (2005)
24. Izmodenov V V et al. *Space Sci. Rev.* **146** 329 (2009)
25. Izmodenov V V, Alexashov D B *Astrophys. J. Suppl.* **220** 32 (2015)
26. Malama Y G, Izmodenov V V, Chalov S V *Astron. Astrophys.* **445** 693 (2006)
27. Katushkina O A, Izmodenov V V, Alexashov D B *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **446** 2929 (2015)
28. Lindsay B G, Stebbings R F *J. Geophys. Res. Space Phys.* **110** A12213 (2005)
29. Sokóll J M et al. *Solar Phys.* **285** 167 (2013)
30. Quémerais E et al. *J. Geophys. Res. Space Phys.* **111** A09114 (2006)
31. Lallement R et al. *AIP Conf. Proc.* **1216** 555 (2010)
32. Katushkina O A et al. *J. Geophys. Res. Space Phys.* **118** 2800 (2013)
33. Parker E *Astrophys. J.* **128** 664 (1958)
34. Burlaga L F, Ness N F *Astrophys. J. Lett.* **744** A51 (2012)
35. Witte M *Astron. Astrophys.* **426** 835 (2004)
36. Bzowski M et al. *Astron. Astrophys.* **569** A8 (2014)
37. Wood B E, Müller H R, Witte M *Astrophys. J. Lett.* **801** 62 (2015)
38. Izmodenov V V *Space Sci. Rev.* **143** 139 (2009)
39. Lallement R *Science* **307** 1447 (2005)
40. Zwan B J, Wolf R A *J. Geophys. Res.* **81** 1636 (1976)
41. Belov N A, Ruderman M S *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **401** 607 (2010)
42. Drake J F, Swisdak M, Opher M *Astrophys. J. Lett.* **808** L44 (2015)
43. Golikov E A et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **464** 1065 (2017)
44. Golikov E A et al. *J. Phys. Conf. Ser.* **815** 012035 (2017)
45. Opher M et al. *Astrophys. J. Lett.* **800** L28 (2015)
46. Chalov S V et al. *Astrophys. J. Lett.* **716** L99 (2010)
47. Geiss J, Gloeckler G, Fisk L, in *The Physics of the Heliospheric Boundaries* (ISSI Scientific Reports Series, Vol. 5, Eds V V Izmodenov, R Kallenbach) (Frascati: ESA, 2006) p. 137
48. Bzowski M et al. *Astron. Astrophys.* **491** 7 (2008)
49. Richardson J D et al. *Astron. Astrophys.* **491** 1 (2008)
50. Burlaga L F et al. *Astrophys. J.* **818** 147 (2016)
51. Cummings A C et al. *Astrophys. J.* **831** 18 (2016)
52. Gurnett D A et al. *Science* **341** 1489 (2013)
53. McComas D J et al. *Science* **326** 959 (2009)
54. Funsten H O et al. *Astrophys. J. Lett.* **776** 30 (2013)
55. Izmodenov V V, Alexashov D B, Ruderman M S *Astrophys. J. Lett.* **795** L7 (2014)
56. Katushkina O A et al. *Astrophys. J. Suppl.* **220** 33 (2015)
57. Baliukin I I et al. *Astrophys. J.* **850** 119 (2017)
58. Katushkina O A et al. *J. Geophys. Res. Space Phys.* **122** 10921 (2017)
59. Izmodenov V V, Lallement R, Malama Y G *Astron. Astrophys.* **342** L13 (1999)

60. Izmodenov V, Wood B, Lallement R *J. Geophys. Res. Space Phys.* **107** 1308 (2002)
61. Wood B E et al. *Adv. Space Res.* **34** 66 (2004)
62. Wood B E et al. *Astrophys. J.* **657** 609 (2007)
63. Wood B E et al. *Astrophys. J.* **659** 1784 (2007)
64. Wood B E, Izmodenov V V, Malama Y G *Space Sci. Rev.* **143** 21 (2009)
65. Wood B E et al. *Astrophys. J.* **780** 108 (2014)
66. Baranov V B, Lebedev M G, Malama Y G *Astrophys. J.* **375** 347 (1991)
67. Izmodenov V V et al., in *Cross-Calibration of Far UV Spectra of Solar System Objects and the Heliosphere* (ISSI Scientific Report Series, Vol. 13) (New York: Springer, 2013) p. 7
68. Izmodenov V V, Lallement R, Malama Y G *Astron. Astrophys.* **317** 193 (1997)
69. Park J et al. *Astrophys. J. Suppl.* **220** 34 (2015)
70. Lallement R et al. *Science* **334** 1665 (2011)
71. Lallement R et al. *Astron. Astrophys.* **563** A108 (2014)
72. McNutt R L (Jr.) et al. *Acta Astronautica* **69** 767 (2011)
73. Schwadron N A et al. *J. Phys. Conf. Ser.* **767** 012025 (2016)

Global structure of the heliosphere: 3D kinetic-MHD model and the interpretation of spacecraft data

V.V. Izmodenov

*Space Research Institute, Russian Academy of Sciences,
ul. Profsoyuznaya 84/32, 117997 Moscow, Russian Federation;
Lomonosov Moscow State University,
Leninskie gory 1, 119991 Moscow, Russian Federation;
National Research University "Higher School of Economics",
ul. Myasnitskaya 20, 101000 Moscow, Russian Federation
E-mail: izmod@iki.rssi.ru*

This paper is a brief overview of research into the interaction of solar wind with a local interstellar medium. This interaction determines the global structure of the heliosphere (the region occupied by the solar wind) and has a complex multicomponent character. The paper describes the three-dimensional kinetic-magnetohydrodynamic model of the interaction, which includes plasma and neutral components of the interstellar medium and solar wind, the heliospheric and interstellar magnetic fields, and the latitudinal and temporal variation of solar wind parameters. In describing the results, magnetic-field-related effects are given special attention, in particular, the magnetic-field-driven plasma depletion in the vicinity of the heliopause. The model explains a sufficiently large body of data from Voyager-1 and Voyager-2, Interstellar Boundary Explorer (IBEX), Solar and Heliospheric Observatory (SOHO), Hubble Space Telescope (HST) and other spacecraft. Based on the experimental data and using the model, the parameters of the interstellar medium and those of the interstellar magnetic field are determined. It is shown, however, that a single model using a single set of boundary conditions cannot explain self-consistently all the data available. The Voyager-1 data on the scattered solar Lyman- α radiation is taken as an example to illustrate the difficulties that arise.

Keywords: solar wind, interstellar medium, interstellar atoms, magnetohydrodynamic, shock waves

PACS numbers: 96.50.Ci, 96.50.Ek, 96.60.Vg

Bibliography — 73 references

Received 26 January 2018

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **188** (8) 881–893 (2018)

Physics – Uspekhi **61** (8) (2018)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2017.04.038293>

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2017.04.038293>