

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТОКОВ ЭНЕРГИЧНЫХ АТОМОВ ВОДОРОДА В ГЕЛИОСФЕРЕ С УЧЕТОМ МНОГОКОМПОНЕНТНОСТИ ПЛАЗМЫ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

С.В. Чалов¹, Д.Б. Алексашов^{1,2}, В.В. Измоленов^{1,2,3}, Ю.Г. Малама^{1,2}

¹ *Институт проблем механики им. А.Ю. Иилинского Российской академии наук, Москва, 119526, проспект Вернадского, д.101-1*

² *Институт космических исследований Российской академии наук, Москва, 117997, ул. Профсоюзная 84/32*

³ *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, 119899, Воробьевы горы*

Аннотация

Столкновение сверхзвукового солнечного ветра с локальной межзвездной средой приводит к образованию сложной области взаимодействия. Эта область включает гелиосферную ударную волну, на которой происходит торможение солнечного ветра, гелиопаузу – тангенциальный разрыв, разделяющий заряженные компоненты солнечного ветра и межзвездной среды, и головную ударную волну торможения набегающего потока межзвездной среды. Межзвездная среда является частично ионизованной, причем длина свободного пробега нейтральных атомов водорода сравнима с размерами гелиосферы. Перезарядка между протонами солнечного ветра и межзвездными атомами водорода приводит к образованию “горячей” популяции протонов, так что заряженные частицы представляют собой многокомпонентную среду. Численные кинетико-газодинамические модели позволили предсказать и объяснить множество физических эффектов и явлений в солнечном ветре и локальной межзвездной среде. В настоящей работе на основе кинетико-магнетогидродинамической модели проводится интерпретация измерений потоков энергичных атомов водорода из удаленных областей гелиосферы, проведенных на космическом аппарате IBEX (Interstellar Boundary Explorer) в 2009–2010 гг.

NUMERICAL MODELING OF ENERGETIC HYDROGEN ATOM FLUXES IN THE HELIOSPHERE FOR MULTI-COMPONENT SOLR WIND PLASMA

S.V. Chalov¹, D.B. Alexashov^{1,2}, V.V. Izmodenov^{1,2,3}, Yu.G. Malama^{1,2}

¹ *Institute for Problems in Mechanics Russian Academy of Sciences, Russia, Moscow, 119526*

² *Space Research Institute Russian Academy of Sciences, Russia, Moscow, 117997*

³ *Lomonosov Moscow State University, Russia, Moscow, 119899*

Collision of the supersonic solar wind with the local interstellar medium results in formation of a complicated interaction region. This region includes the heliospheric termination shock decelerating the solar wind flow, the heliopause – tangential discontinuity separating charged components of the solar wind and interstellar medium, and the bow shock decelerating the interstellar plasma flow. The interstellar medium is a partly ionized medium and the mean-free length of hydrogen atoms is comparable with the heliospheric size. The charge exchange between solar wind protons and interstellar hydrogen atoms leads to formation of hot population of protons. Thus the charged particles are the multi-component medium. Numerical kinetic-gasdynamic models allow to predict and explain a great number of physical effects and phenomena in the solar wind and in the local interstellar medium. In the present work in the framework of a kinetic-magnetohydrodynamic model we give interpretation of the measurements of energetic hydrogen fluxes from the outer heliospheric regions obtained at the IBEX (Interstellar Boundary Explorer) spacecraft.

1. ВВЕДЕНИЕ

Локальное межзвездное облако, в котором в настоящее время находится Солнце, состоит из частично ионизованного газа, причем концентрация нейтральных атомов (в основном это атомы водорода) существенно превышает концентрацию заряженной компоненты. В результате «столкновения» сверхзвукового солнечного ветра с набегающим потоком локальной межзвездной среды (ЛМС), скорость которого согласно современным данным о параметрах ЛМС [1] также является сверхзвуковой, образуется область взаимодействия двух потоков (гелиосферный интерфейс). Эта область имеет достаточно сложную структуру, включающую ударные волны, на которых происходит торможение потоков, и границу (тангенциальный разрыв),

разделяющую заряженные компоненты солнечного ветра и межзвездной среды. Впервые модель взаимодействия солнечного ветра со сверхзвуковым потоком полностью ионизованной межзвездной среды была предложена в [2] в приближении тонкого слоя, т.е. считалось, что характерная толщина области взаимодействия намного меньше гелиоцентрического расстояния до этой области. Наиболее адекватная теоретическая модель гелиосферного интерфейса, корректно описывающая движение межзвездных атомов водорода и процесс их взаимодействия с заряженной компонентой, была разработана в [3]. Здесь следует отметить, что главным механизмом взаимодействия атомов с протонами солнечного ветра и межзвездной среды является перезарядка. Основная сложность при по-

строении такого рода моделей состоит в том, что длина свободного пробега атомов в гелиосфере сравнима с ее размерами. Другими словами, если динамику заряженной компоненты можно описывать в рамках гидродинамического приближения, то для атомов необходимо использовать кинетическое уравнение для функции распределения по скоростям. Именно такой подход был реализован в кинетико-газодинамической модели [3].

На рис. 1 показана качественная картина области взаимодействия солнечного ветра (СВ) с ЛМС. Торможение и нагрев сверхзвукового солнечного ветра происходит на гелиосферной ударной волне.

Торможение межзвездной плазмы осуществляется на головной ударной волне. Плазменные компоненты солнечного ветра и межзвездной среды разделяются поверхностью тангенциального разрыва скорости и плотности (гелиопаузой). Область нагретого солнечного ветра между гелиосферной ударной волной и гелиопаузой называется внутренним ударным слоем. Воздействие атомов на плазменное течение приводит к торможению и нагреву сверхзвукового солнечного ветра и к приближению ударных волн и гелиопаузы к Солнцу. В 2004 и 2007 гг. космические аппараты Вояджер-1 и Вояджер-2 пересекли гелиосферную ударную волну на расстояниях 94 а.е. и 84 а.е. соответственно. Расстояние до гелиосферной ударной волны с точностью до нескольких процентов было предсказано в рамках кинетико-газодинамической модели [3] задолго до моментов пересечения. Различия в расстояниях, обнаруженное на аппаратах Вояджер-1/2, объясняется влиянием межзвездного магнитного поля [4], которое нарушает симметрию течения.

Помимо отмеченных выше эффектов ионизация межзвездных атомов водорода приводит к образованию в солнечном ветре специфической популяции энергичных протонов – “захваченных” межзвездных протонов.

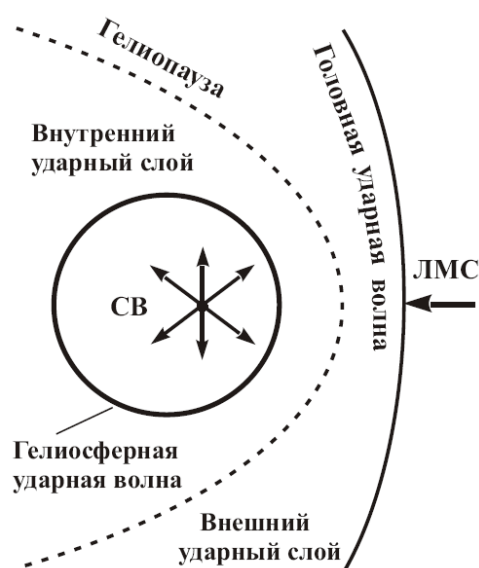


Рис. 1. Схематическое изображение области взаимодействия солнечного ветра (СВ) с локальной межзвездной средой (ЛМС)

В системе координат, связанной с солнечным ветром, скорости этих протонов в момент образования равны локальной скорости солнечного ветра. Первоначально считалось, что обмен энергией между захваченными ионами и ионами солнечного ветра происходит достаточно быстро, так что они практически мгновенно становятся неотличимыми. Однако, прямые измерения захваченных ионов гелия и захваченных протонов показали, что скоростные распределения захваченных ионов очень сильно отличаются от скоростных распределений оригинальных ионов солнечного ветра, т.е. они являются особой очень горячей компонентой. Исследование процессов переноса и ускорения захваченных ионов представляет большой интерес для физики гелиосферы, поскольку в ее внешних областях, начиная с нескольких десятков а.е., термодинамика солнечного ветра полностью определяется захваченными межзвездными протонами из-за их высоких тепловых скоростей и достаточно высокой концентрации (до 30 % от концентрации солнечных протонов перед фронтом гелиосферной ударной волны). Таким образом, структура и интенсивность гелиосферной ударной волны существенно зависят от свойств захваченных ионов.

Хотя измерения на аппаратах Вояджер 1/2 дали и дают в настоящее время очень ценную информацию о свойствах ударной волны и параметрах плазменного течения во внутреннем ударном слое, эта информация является “одномерной” в том смысле, что измерения проводятся только вдоль траектории. Кроме того, на аппарате Вояджер-1 вышла из строя вся плазменная аппаратура. В 2008 г. был произведен запуск космического аппарата IBEX (Interstellar Boundary Explorer). Основная цель проекта – измерение на 1 а.е. от Солнца потоков энергичных нейтральных атомов (ЭНА) водорода ($0.3 \div 6$ кэВ), рождающихся за фронтом гелиосферной ударной волны в результате перезарядки между “захваченными” протонами, а также солнечными протонами, нагретыми на ударной волне, и первичными межзвездными атомами водорода. Отметим, что энергия первичных межзвездных атомов всего лишь несколько электронвольт. Так как процесс перезарядки состоит только в передаче электрона от атома к протону, а скорости частиц при этом остаются неизменными, то ЭНА имеют такие же скоростные распределения, как и протоны, из которых они образовались. Таким образом, по скоростным распределениям ЭНА, измеряемым на IBEX можно восстановить скоростные (энергетические) распределения протонов за фронтом гелиосферной ударной волны. Все эти рассуждения относятся, разумеется, и к пространственным распределениям.

В настоящей работе анализируются результаты первых измерений на космическом аппарате IBEX и приводится кинетико-магнитогидродинамическая (МГД) модель, которая позволяет объяснить основные результаты измерений.

2. ИЗМЕРЕНИЯ ЭНЕРГИЧНЫХ АТОМОВ НА КОСМИЧЕСКОМ АППАРАТЕ IBEX

Энергичные атомы, которые образуются в сверхзвуковом солнечном ветре в результате перезарядки между солнечными протонами и первичными межзвездными атомами, движутся вместе с солнечным ветром в сторону от Солнца (нейтральный солнечный

ветер). Эти атомы, следовательно, не могут быть «видны» приборами, установленными на аппарате IBEX, поскольку приборы измеряют потоки, направленные из внешних областей гелиосферы к Солнцу. На гелиосферной ударной волне происходит передача энергии направленного движения солнечного ветра тепловому движению протонов и электронов. Таким образом, энергичные атомы, рождающиеся во внутреннем ударном слое (см. рис. 1), будут двигаться во всех направлениях, и, в том числе, в направлении Солнца.

Аппарат IBEX устроен так, что за полгода полета проводится сканирование всего неба. Иными словами, за этот промежуток времени получают двухмерные пространственные распределения потоков ЭНА на небе в семи энергетических интервалах от 0.3 до 6 кэВ. Как уже отмечалось, основной целью проекта было получение пространственных и энергетических

распределений ЭНА из внутреннего ударного слоя для последующего «восстановления» с помощью адекватной теоретической модели пространственных и энергетических распределений протонов в этой области. Все теоретические модели гелиосферного интерфейса – области взаимодействия солнечного ветра с ЛМС – предсказывали абсолютный максимум потоков ЭНА из носовой области внутреннего ударного слоя (со стороны набегающего потока ЛМС), уменьшение потоков из фланговых областей и небольшой локальный максимум в хвостовой области.

Карта неба, построенная на основе первых измерений на IBEX [5], показана на рис. 2. Здесь приведена проекция небесной сферы на плоскость. Показано направление на набегающий поток ЛМС (NOSE). Хвостовая область гелиосферы (TAIL) – комбинация левой и правой частей рисунка. На рисунке приведены потоки ЭНА в диапазоне энергий 0.8 ÷ 1.4 кэВ.

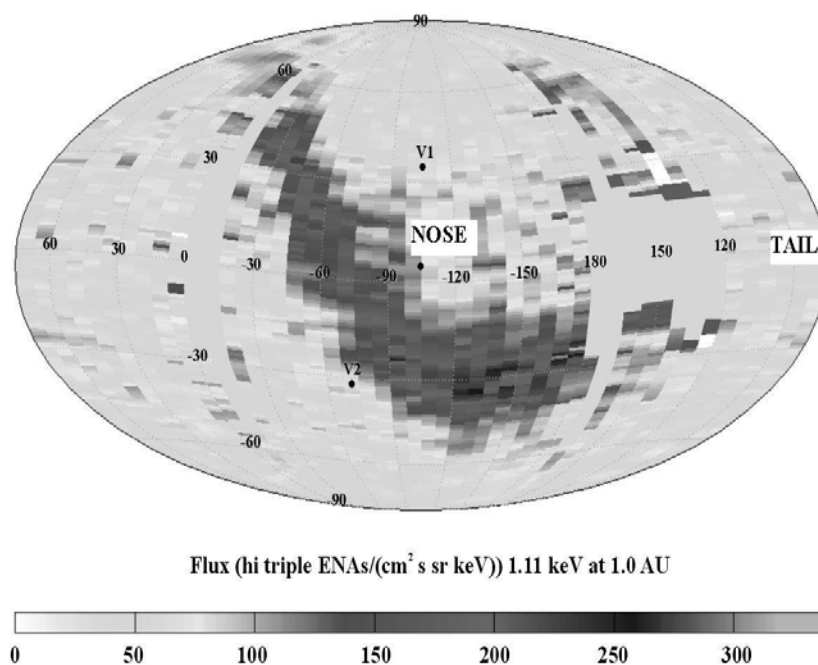


Рис. 2. Потоки энергичных атомов водорода с энергиями 0.8-1.4 кэВ – измерения на космическом аппарате IBEX на 1 а.е. в первой половине 2009 года. На рисунке приводится проекция небесной сферы на плоскость. Числа обозначают широту и долготу в гелиосферной системе координат. Показано направление на набегающий поток ЛМС (NOSE). Хвостовая область гелиосферы (TAIL) – комбинация левой и правой частей рисунка. Лентообразная структура повышенных потоков ЭНА проходит через все небо

Результаты измерений оказались совершенно неожиданными для всего гелиосферного сообщества. Вместо ожидаемого кругового распределения потоков с максимумом вблизи точки “NOSE” область максимальных потоков образовывала лентообразную структуру (“ribbon”), проходящую почти через все небо. В работе [5] было обращено внимание на следующее обстоятельство. В направлении на “ribbon” радиальная компонента межзвездного магнитного поля, полученного в результате численного моделирования с использованием наблюдательных данных о направлениях движения межзвездных атомов водорода и гелия, близка к нулю. Это обстоятельство наводит на мысль, что лентообразная структура связана с внешним ударным слоем или с областью за гелиопаузой (головная

ударная волна, вообще говоря, может отсутствовать, если межзвездное магнитное поле достаточно велико). Но тогда возникает вопрос – откуда во внешнем ударном слое берутся энергичные атомы? Энергия межзвездных атомов и протонов составляет всего лишь несколько электронвольт. Существование потоков ЭНА из внешнего ударного слоя было предсказано в [4] еще до появления первых данных IBEX. Дело в том, что ЭНА, рождающиеся в сверхзвуковом солнечном ветре или во внутреннем ударном слое, естественно, проникают в ЛМС. Там в результате перезарядки этих атомов с межзвездными протонами образуются энергичные протоны – «захваченные» протоны (их энергия такая же, как и у исходных ЭНА). Таким образом, протоны во внешнем ударном слое также образу-

ют две популяции – холодные межзвездные протоны с энергиями несколько эВ и «захваченные» протоны с энергиями от сотен эВ до нескольких кэВ.

В результате перезарядки «захваченных» протонов во внутреннем ударном слое с первичными межзвездными атомами водорода образуются ЭНА, которые могут проникать в области, близкие к Солнцу. На 1 а.е. эти атомы могут быть зафиксированы аппаратами ИВЕХ.

3. КИНЕТИКО-МГД МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА С ЛМС

3.1. Система уравнений

Система уравнений идеальной магнитной гидродинамики, описывающих взаимодействие многокомпонентного потока солнечного ветра с ЛМС в стационарном случае, может быть записана в следующем виде:

$$\nabla \cdot \rho \mathbf{V} = q, \quad (1)$$

$$(\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{1}{4\pi\rho} (\nabla \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B} + \mathbf{F}_1, \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \left[\rho \mathbf{V} \left(\frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{p}{\rho} + \frac{V^2}{2} + \frac{1}{4\pi} \mathbf{B} \times [\mathbf{V} \times \mathbf{B}] \right) \right] = F_2, \quad (3)$$

$$\nabla \times (\mathbf{V} \times \mathbf{B}) = 0, \quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (4)$$

Здесь \mathbf{V} – скорость заряженных компонент (в рамках данной модели массовые скорости тепловых и «захваченных» протонов одинаковы); $\rho = \rho_p + \rho_i$, $p = p_p + p_e + p_i$; \mathbf{B} – магнитное поле; индексы p, e, i относятся к тепловым протонам, электронам и «захваченным» протонам соответственно. Источник q в правой части уравнения неразрывности (1) описывает процесс образования протонов в результате фотоионизации атомов и ионизации электронным ударом. Члены

$$\mathbf{F}_1 = \mathbf{F}_1 [f_H(\mathbf{r}, \mathbf{v}_H), f_p(\mathbf{r}, v_p), f_i(\mathbf{r}, v_i)]$$

$$F_2 = F_2 [f_H(\mathbf{r}, \mathbf{v}_H), f_p(\mathbf{r}, v_p), f_i(\mathbf{r}, v_i)]$$

в правых частях уравнений (2) и (3) описывают изменение импульса и энергии плазмы, связанные с перезарядкой между атомами и протонами. Эти члены интегральным образом зависят от функций распределения атомов f_H , тепловых протонов f_p и «захваченных» протонов f_i по скоростям. Выражения для \mathbf{F}_1 и F_2 достаточно громоздки, поэтому мы ограничимся ссылками на работы [6] и [7], где они выписаны полностью. Отметим только, что скоростные распределения f_p и f_i изотропны в системе координат, связанной с солнечным ветром, поэтому они, в отличие от f_H , зависят только от модуля тепловой скорости. Кроме того, считается, что f_p – максвелловское распределение.

К уравнениям (1)–(4) необходимо добавить кинетические уравнения для функций распределения атомов и «захваченных» протонов:

$$\mathbf{v}_H \cdot \frac{\partial f_H}{\partial \mathbf{r}} + \frac{\mathbf{F}}{m_H} \frac{\partial f_H}{\partial \mathbf{v}_H} = S_H [f_H, f_p, f_i], \quad (5)$$

$$\mathbf{V} \cdot \frac{\partial f_i}{\partial \mathbf{r}} - \frac{v_i}{3} \frac{\partial f_i}{\partial v_i} \text{div} \mathbf{V} = S_i [f_H, f_i] \quad (6)$$

Здесь также мы не выписываем интегральные выражения для правых частей, которые можно найти, например, в работах [6] и [7]. Величина \mathbf{F} – сумма сил гравитационного притяжения и радиационного давления.

3.2. Численная модель

Система уравнений (1)–(6) является замкнутой. Эта система описывает взаимодействие солнечного ветра с частично ионизированной межзвездной средой. В рамках данной модели нейтральная компонента (атомы водорода) описываются уравнением Больцмана (5), где роль столкновений выполняет процесс перезарядки. Тепловая заряженная компонента (протоны и электроны) имеет максвелловское распределение по скоростям и описывается магнитогидродинамическими уравнениями (1)–(4), в которые входят «источники», связанные с перезарядкой, а также давление нетепловой заряженной компоненты – «захваченных» протонов. Функция распределения «захваченных» протонов изотропна в подвижной системе координат (см. уравнение (6)).

При нахождении численных решений системы уравнений (1)–(6) использовались следующие упрощения. Во-первых, пренебрегалось динамическим влиянием солнечного магнитного поля на плазменное течение, т.е. в уравнениях (2) и (3) учитывалось только межзвездное поле. Во-вторых, «захваченные» протоны во внешнем ударном слое (или в ЛМС) учитываются только в кинематическом приближении, т.е. в области за гелиопаузой $\rho_i = 0$ и $p_i = 0$. Как отмечалось выше, существование «захваченных» протонов в ЛМС было предсказано сравнительно недавно [4], поэтому в настоящее время самосогласованные модели находятся в стадии разработки.

В кинематическом приближении для «захваченных» протонов в ЛМС можно рассматривать два крайних случая: 1) изотропное распределение по скоростям (случай сильного рассеяния частиц по питч-углам), 2) анизотропное распределение с полным отсутствием рассеяния. Расчеты, проведенные для случая изотропного распределения «захваченных» протонов в ЛМС, показали, что потоки ЭНА имеют «стандартный» вид, т.е. какие-либо признаки лентообразной структуры отсутствуют. В данной работе рассматривается второй предельный случай – отсутствие рассеяния частиц в ЛМС. Здесь необходимо обратить внимание на следующее важное обстоятельство. Процесс изотропизации «захваченных» протонов (рассеяния по питч-углам) обусловлен их взаимодействием с альвеновскими волнами. Наличие этих волн в солнечном ветре связано с процессами, происходящими на Солнце и в солнечной атмосфере, а также с различного типа неустойчивостями в неоднородном потоке солнечного ветра. Измерения на космических аппаратах Улисс и ACE (Advanced Composition Explorer) показали, что скоростное распределение «захваченных» протонов в сверхзвуковом солнечном ветре близко к изотропному (в подвижной системе координат). Интенсивность плазменных волн в ЛМС неизвестна. Есть основания полагать, что она существенно ниже, чем в солнечном ветре

(там нет источников). Это обстоятельство натолкнуло на мысль рассмотреть предельный случай, когда рассеяние полностью отсутствует. Заметим, что тепловая плазма в ЛМС является столкновительной (по Кулону).

В случае, когда рассеяние отсутствует, движение «захваченных» протонов состоит из вращения вокруг силовых линий магнитного поля и свободного движения вращающихся центров вдоль этих линий. На рис. 3 показано пространственное распределение межзвездного магнитного поля в межзвездной среде в окрестности гелиопаузы в плоскости \mathbf{BV} , где \mathbf{V} - вектор скорости межзвездной среды на большом расстоянии от гелиопаузы. Стрелки показывают направление магнитного поля, а оттенки серого цвета его величину. На рисунке схематически показан процесс образования ЭНА в межзвездной среде. Энергичный атом, образовавшийся в гелиосфере (ЕНА1), проникает в межзвездную среду. Вследствие перезарядки между ЕНА1 и тепловым межзвездным протоном образуется «захваченный» протон, который начинает двигаться вдоль силовой линии магнитного поля. В какой-то момент может произойти перезарядка между этим «захваченным» протоном и первичным межзвездным атомом. В результате этой перезарядки образуется новый энергичный атом (ЕНА2). При определенных условиях ЕНА2 может подлететь достаточно близко к Солнцу и быть зафиксированным измерительной аппаратурой ИВЕХ.

На рис. 1 видны области с максимальными значениями магнитного поля и области с минимальными значениями. Движение захваченных протонов существенно зависит от распределения интенсивности магнитного поля. Области повышенной интенсивности можно рассматривать как магнитные зеркала или области торможения.

При приближении к этим областям скорости частиц вдоль силовой линии уменьшаются, и некоторая их часть может отразиться. Действительно, скорость «захваченного» протона v_i можно представить в виде суммы двух скоростей: скорости движения вдоль силовой линии магнитного поля $v_{i\parallel}$ и скорости вращения $v_{i\perp}$. В том случае, когда рассеяние отсутствует, магнитный момент заряженных частиц, движущихся в медленно меняющихся магнитных полях, является адиабатическим инвариантом. Кроме того, мы можем не учитывать дрейфового движения «захваченных» протонов, так как дрейфовая скорость на порядок меньше их собственной скорости. Тогда кроме магнитного момента сохраняется и кинетическая энергия «захваченных» протонов. Таким образом, мы можем написать следующие соотношения:

$$v_{i\perp}^2/B = \text{const}, \quad v_{i\perp}^2 + v_{i\parallel}^2 = \text{const} \quad (7)$$

Уравнения (7) определяют движение «захваченных» протонов в магнитном поле \mathbf{B} . Если частицы движутся вдоль силовой линии в направлении возрастания магнитного поля, $v_{i\parallel}$ уменьшается, а $v_{i\perp}$ возрастает. Для некоторых частиц $v_{i\parallel}$ может обратиться в ноль и тогда эти частицы отражаются от области повышенной интенсивности поля. На рис. 3 показаны два «магнитных зеркала». Таким образом, параллельные скорости частиц вблизи максимумов магнитного поля малы, так что «захваченные» протоны проводят отно-

сительно много времени в этих областях. Следовательно, потоки ЭНА будут максимальными именно из этих областей. На рис. 3 четко выделяется обширный максимум интенсивности магнитного поля, вплотную примыкающий к гелиопаузе. Из рисунка также видно, что радиальная компонента магнитного поля (т.е. компонента в направлении на Солнце) в области максимума близка к нулю. Так как параллельные скорости «захваченных» протонов в этой области малы, т.е. их основное движение связано с вращением вокруг силовой линии, то направления скоростей ЭНА, образующихся из них в результате перезарядки, будут иметь не сферическое распределение, а кольцевое. Причем, что очень важно, это «кольцо» ориентировано на Солнце. Как показывают расчеты, положение максимумов интенсивности магнитного поля совпадает с наблюдаемым положением лентообразной структуры потоков ЭНА, наблюдаемой на аппарате ИВЕХ.

На рис. 3 изображены два «магнитных зеркала», хотя их может быть гораздо больше. Заряженная частица может быть «заперта» в области между этими двумя зеркалами до тех пор, пока перезарядка не приведет к образованию энергичного атома.

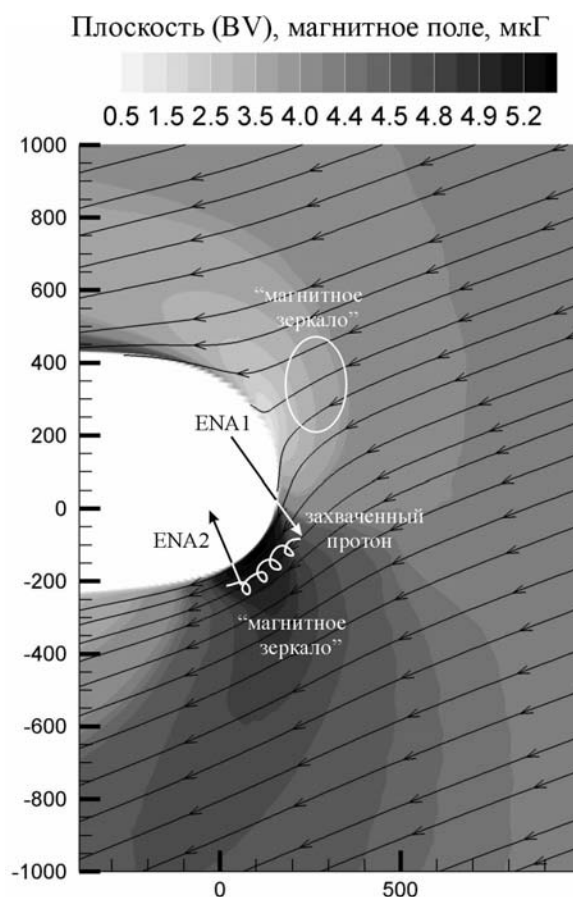


Рис.3. Пространственное распределение межзвездного магнитного поля вокруг гелиопаузы в \mathbf{BV} плоскости. Стрелки указывают направление магнитного поля, а оттенки серого цвета его величину. Угол между вектором магнитного поля и вектором скорости на больших расстояниях от гелиопаузы равен 20°

Заметим, что ЭНА, образующиеся из протона вблизи второго «зеркала» (обозначено овалом), не могут вносить вклад в наблюдаемую лентообразную структуру, так как векторы их скоростей не направлены на Солнце. Однако, это «магнитное зеркало» позволяет протонам вернуться к другому максимуму, где магнитное поле перпендикулярно радиальному направлению (направлению на Солнце).

3.3. Результаты расчетов

Система уравнений (1)–(6) решается методом глобальных итераций. Вначале методом Годунова решается система МГД уравнений (1)–(4) с нулевыми «источниковыми» членными и нулевым давлением «захваченных» протонов. Затем решается интегральное уравнение Больцмана (5) для функции распределения атомов. Для этого используется усовершенствованный метод Монте-Карло с расщеплением траекторий, разработанный в [8]. По известной функции распределения атомов из (6) находится функция распределения «захваченных» протонов и их давление, а также «источниковые» члены для уравнений (1)–(4). Далее процедура повторяется – снова решаются уравнения (1)–(4), но уже с учетом источников, связанных с перезарядкой, и давления «захваченных» протонов. Цикл

заканчивается, когда решение перестает зависеть от номера итерации. Описанная процедура относится только к гелиосферным «захваченным» протонам.

Во внешнем ударном слое, как мы уже подчеркивали, движение эти протоны описывается в кинематическом приближении. Для описания их движения, рождения и гибели (из-за перезарядки) используется метод Монте-Карло и уравнения (7).

Граничные условия на орбите Земли:

$$n_{p,e,E} = 7 \text{ см}^{-3}, \quad V_E = 450 \text{ км с}^{-1}, \quad M_E = 10.$$

Граничные условия в ЛМС (на достаточно большом расстоянии от гелиопаузы):

$$n_{p,e,\infty} = 0.07 \text{ см}^{-3}, \quad V_\infty = 26 \text{ км с}^{-1}, \quad M_\infty = 2,$$

$$n_{H,\infty} = 0.14 \text{ см}^{-3}, \quad B_\infty = 4.4 \text{ мкГс}.$$

Результаты расчетов потоков ЭНА на 1 а.е. из внешнего ударного слоя с энергиями около 1 кэВ представлены на рис. 4 (см. [9]). На рисунке четко выделяется лентообразная структура, подобная той, что обнаружена на аппарате IBEX (см. рис. 2).

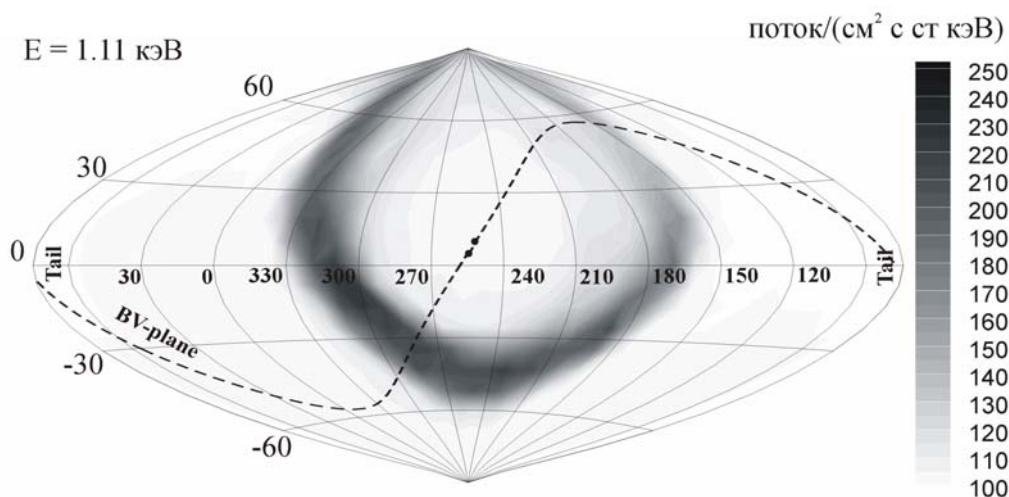


Рис. 4. Рассчитанные потоки энергичных атомов водорода с энергиями 0.8-1.4 кэВ на 1 а.е. На рисунке приводится проекция небесной сферы на плоскость (см. рис. 2).

Детальное исследование результатов расчетов показало, что основной вклад в измеряемые на 1 а.е. потоки ЭНА с энергиями в диапазоне $0.8 \div 1.4$ кэВ вносят ENA1 (см. рис. 3), образовавшиеся в сверхзвуковом солнечном ветре (нейтральный солнечный ветер). Различия между измерениями и результатами численного моделирования можно объяснить, по крайней мере, следующими факторами: 1) величина и наклон (относительно направления скорости межзвездной среды) магнитного поля сильно влияют на потоки ЭНА, однако значения этих величин довольно плохо известны; 2) прямые измерения характеристик «захваченных» протонов проводились лишь во внутренних областях солнечной системы (до 5 а.е.), и их свойства, например, во внутреннем ударном слое совершенно не изучены.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлена новая модель взаимодействия солнечного ветра с ЛМС, в рамках которой «захваченные» протоны в области за гелиопаузой (т.е. вне гелиосферы) описываются в кинематическом приближении без учета рассеяния по питч-углу.

«Захваченные» протоны образуются в межзвездной среде в результате перезарядки между энергичными атомами водорода, которые рождаются в гелиосфере и относительно свободно проникают в межзвездную среду, и тепловыми межзвездными протонами. Результаты численных расчетов потоков энергичных атомов водорода из ЛМС дают качественное и количественное объяснение измерениям на космическом аппарате IBEX.

Газовая динамика – наука экспериментальная. Измерения на IBEX являются тестом для теоретических моделей взаимодействия солнечного ветра с межзвездной средой. Данные, полученные на космическом аппарате IBEX, и результаты численного моделирования позволят уточнить величину и направление межзвездного магнитного поля в окрестности солнечной системы. Кроме того, результаты измерений способствуют исследованиям фундаментальных вопросов распространения заряженных частиц в межпланетных и межзвездных магнитных полях (эффективность рассеяния по питч-углу, стохастическое ускорение и т.д.)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Баранов В.Б., Краснобаев К.В., Куликовский А.Г. Модель взаимодействия солнечного ветра с межзвездной средой // *Докл. АН СССР.* 1970. Т. 194. С. 41–44.
3. 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. Vol. 98. Pp. 15157–15163.
4. Izmodenov V.V., Malama Y.G., Ruderman M.S., et al. Kinetic-gasdynamic modeling of the heliospheric interface // *Space Sci. Rev.* 2009. V. 146. Pp. 329–351.
5. McComas D.J., Allegrini F., Bochsler P., et al. Global observations of the interstellar interaction from the Interstellar Boundary Explorer (IBEX) // *Science.* 2009. V. 326. Pp. 959–962.
6. Баранов В.Б., Измоленов В.В. Модельные представления о взаимодействии солнечного ветра со сверхзвуковым потоком межзвездной среды. Предсказание и интерпретация экспериментальных данных // *Изв. АН. Сер. МЖГ.* 2006. № 5. С. 19–40.
7. Malama Y.G., Izmodenov V.V., Chalov S.V. Modeling of the heliospheric interface: multi-component nature of the heliospheric plasma // *Astron. Astrophys.* 2006. V. 445. Pp. 693–701.
8. Malama Y.G. Monte Carlo simulation of neutral atom trajectories in the solar systems // *Astrophys. Space Sci.* 1991. V. 176. Pp. 21–46.
9. Chalov S.V., Alexashov D.B., McComas D., et al. Scatter-free pickup ions beyond the heliopause as a model for the Interstellar Boundary Explorer ribbon // *Astrophys. J.* 2010. V. 716. Pp.L99–L102.