

УДК 523.62–726

МОДЕЛЬ ХВОСТОВОЙ ОБЛАСТИ ГЕЛИОСФЕРНОГО ИНТЕРФЕЙСА

© 2003 г. В. В. Измоденов^{1*}, Д. Б. Алексахов^{2**}

¹Московский государственный университет

²Институт проблем механики РАН, Москва

В рамках самосогласованной кинетико-газодинамической модели исследуются процессы в хвостовой части области взаимодействия солнечного ветра с частично ионизованной локальной межзвездной средой. Показано, что резонансная перезарядка атомов водорода на плазменных протонах приводит к исчезновению контактного разрыва на достаточно больших расстояниях от Солнца. Происходит охлаждение плазмы солнечного ветра и, в итоге, параметры плазмы и атомов водорода с увеличением гелиоцентрического расстояния приближаются к соответствующим параметрам невозмущенной межзвездной среды.

Ключевые слова: солнечный ветер, гелиосфера, межзвездная среда.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что Солнце и Солнечная система движутся в частично ионизованной локальной межзвездной среде (ЛМС) (Лаллемен, 1996). На основе прямых измерений межзвездных атомов гелия (Витте и др., 1996) на космическом аппарате “Ulysses” определено, что скорость поступательного движения Солнца относительно ЛМС составляет ≈ 25 км/с, а температура ЛМС составляет ≈ 6000 К. Только эти два параметра ЛМС (скорость и температура) определяются достаточно хорошо в окрестности Солнца. Другие параметры межзвездной среды — степень ионизации, концентрация нейтральной и заряженной компонент, межзвездное магнитное поле — могут быть определены лишь косвенно, на основе теоретической интерпретации различных экспериментов. Среди косвенных измерений можно выделить эксперименты по рассеянному солнечному излучению в линии $L\alpha$ на космических аппаратах SOHO, “Voyager”, “Pioneer”, измерению захваченных ионов на

космических аппаратах “Ulysses” и ACE и измерению параметров солнечного ветра на больших гелиоцентрических расстояниях, наблюдению поглощения в линии $L\alpha$ от ближних звезд и измерению потоков энергичных атомов. Для правильной интерпретации таких измерений необходимо построение адекватной теоретической модели взаимодействия солнечного ветра с ЛМС. Концепция взаимодействия солнечного ветра с плазменной компонентой ЛМС была предложена в пионерской работе Баранова и др. (1970) и разрабатывалась в течении последних 30 лет в нескольких научных коллективах (см., например, обзоры Измоденова, 2000, 2002).

Структура области взаимодействия солнечного ветра с локальной межзвездной средой показана на рис. 1. Контактную поверхность, называемую также гелиопаузой (HP), отделяющую солнечный ветер от плазмы межзвездной среды, можно рассматривать как препятствие, которое обтекается сверхзвуковым (число Маха порядка десяти) солнечным ветром, с одной стороны, и сверхзвуковым (число Маха порядка двух) межзвездным ветром, с другой стороны. Известно, что сверхзвуковое обтекание препятствия сопровождается образованием

* Электронный адрес: izmod@ipmnet.ru; <http://izmod.ipmnet.ru/~izmod/>

** Электронный адрес: alexash@ipmnet.ru

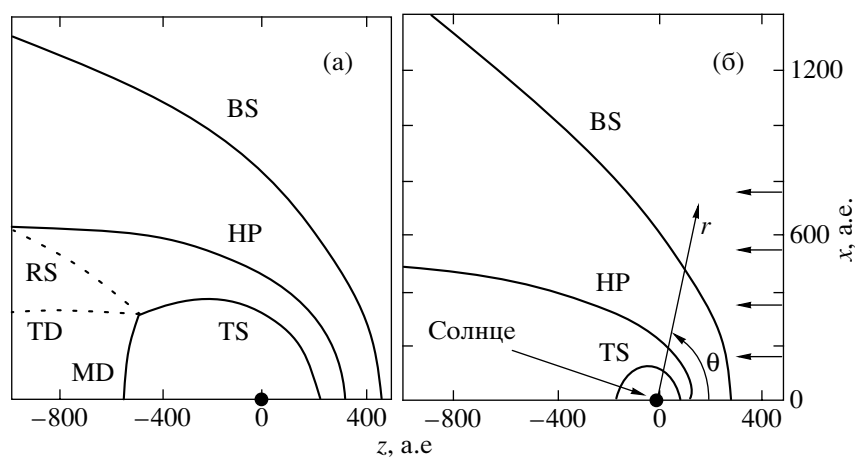


Рис. 1. Структура гелиосферного интерфейса: HP — гелиопауза, TS — гелиосферная ударная волна, BS — внешняя ударная волна, MD — диск Маха, TD — тангенциальный разрыв, RS — отраженная ударная волна. Рис. (a) соответствует расчету без учета влияния межзвездных атомов водорода, (б) — самосогласованному решению с учетом влияния межзвездных атомов водорода.

ударных волн. Сверхзвуковой солнечный ветер, проходя внутреннюю, или гелиосферную ударную волну (TS), становится дозвуковым. Также, после прохождения внешней, или локальной межзвездной ударной волны (BS), становится дозвуковым межзвездный газ. Область взаимодействия солнечного ветра с ЛМС, состоящую из гелиопаузы, TS и BS для краткости будем в дальнейшем называть *гелиосферным интерфейсом*.

Отметим, что в случае без учета влияния нейтральных атомов качественная картина течения в тыловой области является более сложной (рис. 1a). В области между гелиосферной ударной волной и гелиопаузой течение является дозвуковым только в носовой части. Затем течение переходит через звуковую линию (Баранов, Малама, 1993) и становится сверхзвуковым. В результате в хвостовой части области взаимодействия образуется сложная газодинамическая структура с диском Маха (MD), тангенциальным разрывом (TD) и отраженной ударной волной (RS).

Нейтральная компонента межзвездной среды, состоящая в основном из атомов водорода, взаимодействует с плазменной компонентой посредством перезарядки и сильно влияет на положение поверхностей разрыва и на структуру гелиосферного интерфейса. Трудность моделирования гелиосферного интерфейса заключается в том, что длина свободного пробега нейтрального атома сравнима по порядку величины с характерным размером области взаимодействия солнечного ветра с ЛМС, и поэтому для описания движения нейтралов необходимо решать кинетическое уравнение. Самосогласованная модель гелиосферного интерфейса, учитывающая влияние атомов водорода, предложена Барановым и др. (1991) и реализована Барановым,

Маламой (1993). В последней работе также впервые был проведен расчет хвостовой части гелиосферного интерфейса. На рис. 1 показаны положения поверхностей разрыва в случаях с учетом и без учета влияния межзвездных атомов водорода. Влияние атомов приводит к существенному приближению поверхностей разрыва к Солнцу. В хвостовой области структура течения меняется качественным образом. MD исчезает, и гелиосферная ударная волна становится близкой к сферической. Вместе с диском Маха исчезает выходящая из тройной точки отраженная ударная волна (RS) и тангенциальный разрыв (рис. 1).

Модель гелиосферного интерфейса позволяет, в частности, дать ответ на два фундаментальных вопроса. 1. Где находится граница солнечной системы? 2. Как далеко распространяется влияние солнечной системы на окружающую ее межзвездную среду?

Чтобы ответить на первый вопрос, необходимо дать определение границы солнечной системы. Гелиопаузу — поверхность, отделяющую область пространства, заполненного плазмой солнечного ветра, от области, заполненной плазменной компонентой межзвездной среды, можно считать естественной границей Солнечной системы. Заметим, что влияние Солнечной системы на межзвездную среду распространяется существенно дальше гелиопаузы. В этом влиянии существенную роль играют вторичные атомы водорода, получающиеся в результате перезарядки межзвездных атомов на протонах солнечного ветра. Детальное изучение влияния заряженной и нейтральной компонент друг на друга в области взаимодействия солнечного ветра с локальной межзвездной средой было проведено в работах Баранова и Маламы (1993, 1995,

1996), Баранова и др. (1998), Измоденова (2000), Измоденова и др. (1999, 2001). Однако, основное внимание в этих работах было сосредоточено на носовой части гелиосферного интерфейса. Вместе с тем, исследование хвостовой части гелиосферного интерфейса также представляет существенный интерес. Для хвостовой части определение гелиопаузы, как границы Солнечной системы, вообще говоря, неверно. Действительно, из результатов расчетов по модели Баранова—Маламы видно, что гелиопауза не является замкнутой поверхностью и, следовательно, область, занимаемая солнечным ветром, будет занимать неограниченную часть пространства.

Цель настоящей работы состоит в изучении структуры хвостовой области гелиосферного интерфейса, в котором мы уделяем ключевое внимание процессам перезарядки.

МОДЕЛЬ

Для исследования влияния перезарядки на структуру хвостовой части области взаимодействия солнечного ветра с частично ионизованной локальной межзвездной средой использовалась кинетико-газодинамическая модель Баранова—Маламы. В этой модели, солнечный ветер на орбите Земли принимался постоянным и сферически-симметричным, а набегающий межзвездный газ равномерным плоскопараллельным потоком. В этом случае течение в области взаимодействия является стационарным и осесимметричным.

Для описания заряженной компоненты (электроны и протоны) решались гидродинамические уравнения Эйлера с источниковыми членами, которые учитывают влияние нейтральных атомов.

Движение межзвездных атомов в гелиосферном интерфейсе определяется решением кинетического уравнения:

$$\begin{aligned} \mathbf{w}_H \cdot \frac{\partial f_H(\mathbf{r}, \mathbf{w}_H)}{\partial \mathbf{r}} + \frac{\mathbf{F}}{m_H} \cdot \frac{\partial f_H(\mathbf{r}, \mathbf{w}_H)}{\partial \mathbf{w}_H} = & \quad (1) \\ = -f_H(\mathbf{r}, \mathbf{w}_H) \int |\mathbf{w}_H - \mathbf{w}_p| \sigma_{\text{ex}}^{\text{HP}} f_p(\mathbf{r}, \mathbf{w}_p) d\mathbf{w}_p + \\ + f_p(\mathbf{r}, \mathbf{w}_H) \int |\mathbf{w}_H^* - \mathbf{w}_H| \sigma^{\text{HP} \text{ex} f_H}(\mathbf{r}, \mathbf{w}_H^*) d\mathbf{w}_H^* - \\ - (\beta_i + \beta_{\text{impact}}) f_H(\mathbf{r}, \mathbf{w}_H). \end{aligned}$$

Здесь $f_H(\mathbf{r}, \mathbf{w}_H)$ — функция распределения атомов водорода; $f_p(\mathbf{r}, \mathbf{w}_p)$ — локально-максвелловская функция распределения протонов; \mathbf{w}_p и \mathbf{w}_H — индивидуальные скорости протонов и атомов водорода соответственно; $\sigma_{\text{ex}}^{\text{HP}}$ сечение перезарядки атомов водорода на протонах; β_i — частота фотоионизации; m_H — масса атома водорода; β_{impact} — частота ионизации электронным ударом; \mathbf{F} — сумма сил гравитации Солнца и силы радиационного давления.

Заряженная и нейтральная компоненты взаимодействуют в основном посредством перезарядки. Тем не менее, процессы фотоионизации и ионизации электронным ударом также учтены в уравнении (1). Взаимодействие заряженных и нейтральных частиц приводит к обмену массой, импульсом и энергией между компонентами. Источниковый член $Q = (q_1, q_2, z, q_2, r, q_3)^T$ входит в правую часть уравнений Эйлера для заряженной компоненты, где $q_1, q_2 = (q_2, z, q_2, r)^T, q_3$ — источники массы, импульса и энергии для заряженной компоненты. Источниковые члены являются интегралами от функции распределения f_H :

$$q_1 = n_H \cdot (\beta_i + \beta_{\text{impact}}), n_H = \int f_H(\mathbf{w}_H) d\mathbf{w}_H,$$

$$q_2 = \int (\beta_i + \beta_{\text{impact}}) \mathbf{w}_H f_H(\mathbf{w}_H) d\mathbf{w}_H + \int \int u \sigma_{\text{ex}}^{\text{HP}}(u) (\mathbf{w}_H - \mathbf{w}_p) f_H(\mathbf{w}_H) f_p(\mathbf{w}_p) d\mathbf{w}_H d\mathbf{w}_p, \quad (2)$$

$$q_3 = \int (\beta_i + \beta_{\text{impact}}) \frac{\mathbf{w}_H^2}{2} f_H(\mathbf{w}_H) d\mathbf{w}_H + \frac{1}{2} \int \int u \sigma_{\text{ex}}(u) (\mathbf{w}_H^2 - \mathbf{w}_p^2) f_H(\mathbf{w}_H) f_p(\mathbf{w}_p) d\mathbf{w}_H d\mathbf{w}_p. \quad (3)$$

Здесь $u = |\mathbf{w}_H - \mathbf{w}_p|$ — относительная скорость атома и протона.

В качестве граничных условий принималось, что скорость невозмущенного потока межзвездной среды относительно Солнца $V_\infty = 25$ км/с, кон-

центрации атомов водорода и протонов в ЛМС равны 0.2 и 0.07 см $^{-3}$ соответственно. Температура газа в межзвездной среде принималась равной 6000 К. Скорость, плотность и число Маха солнечного ветра на орбите Земли принимались равными

450 км/с, 7 см^{-3} и 10 соответственно. Функция распределения атомов водорода в невозмущенной ЛМС предполагалась максвелловской.

Уравнения Эйлера с источником членом Q решались совместно с кинетическим уравнением. Для получения самосогласованного решения применялся метод итераций. Кинетическое уравнение решалось методом Монте-Карло с расщеплением траекторий (Малама, 1991). В отличие от предыдущих работ, основанных на применении кинетико-газодинамической модели Баранова—Маламы, были проведены численные расчеты взаимодействия солнечного ветра с межзвездной средой с различной протяженностью хвостовой области. В отдельных вариантах размер расчетной области достигал 50 000 а.е. вдоль оси симметрии и 5000 а.е. в направлении, перпендикулярном оси симметрии. Для достижения сходимости итераций использовались сетки с различным разрешением. Зависимость численного решения от условий на выходной границе оценивалась путем изменения протяженности хвостовой области.

КАЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ

В настоящей работе мы рассматриваем влияние процесса перезарядки ($\text{H} + \text{H}^+ \rightarrow \text{H}^+\text{H}$) на течение плазмы в хвостовой области гелиосферного интерфейса. Сверхзвуковой солнечный ветер проходит через гелиосферную ударную волну, где энергия направленного движения солнечного ветра переходит в тепловую. Далее, если считать, что в хвостовой области гелиопауза параллельна направлению набегающего потока межзвездной среды, то солнечный ветер можно рассматривать как течение в канале постоянного сечения. При этом расчеты, проведенные для граничных условий, соответствующих описанной выше модели, показывают, что в случае без атомов давление непосредственно за ударной волной в хвостовой области в несколько раз меньше, чем давление в межзвездной среде. В этих условиях поток солнечного ветра должен замедляться, достигая некоторого минимального значения на бесконечности. В результате получаемое значение скорости определяется только параметрами солнечного ветра за ударной волной и давлением в локальной межзвездной среде и не зависит ни от плотности в ЛМС, ни от относительной скорости движения Солнца и ЛМС. Таким образом, ясно, что в случае без атомов в рамках гидродинамических уравнений возможно решение, в котором солнечный ветер (и, следовательно, солнечная система) распространяется бесконечно далеко в хвостовую область. Подобное рассуждение остается в силе и в том случае, когда гелиопауза расширяется или сужается, так как течение солнечного ветра при этом будет являться течением в расширяющемся или сужающемся сопле.

Качественно другая ситуация осуществляется, когда учитывается влияние межзвездных атомов. Расчеты показывают, что в этом случае давление за гелиосферной ударной волной оказывается больше, чем давление в межзвездной среде. В таком случае скорость солнечного ветра должна увеличиваться за счет градиента давления. Но здесь существенную роль играют межзвездные атомы, которые влияют на течение солнечного ветра посредством перезарядки: имея длины свободного пробега порядка размеров гелиосферного интерфейса, межзвездные атомы водорода заполняют его хвостовую часть. Причем, с увеличением гелиоцентрического расстояния доля первичных (не испытывавших перезарядки в гелиосферном интерфейсе) межзвездных атомов растет. Температура (6000 К) и скорость (25 км/с) межзвездных атомов меньше, чем скорость (100 км/с) и температура (100 000 К) прошедшего гелиосферную ударную волну солнечного ветра. В результате перезарядки рождается ион, имеющий меньшие направленную и тепловую скорости. Таким образом, процесс перезарядки приводит к эффективному охлаждению и торможению солнечного ветра. Разгон солнечного ветра за счет градиента давления, с одной стороны, и торможение солнечного ветра за счет перезарядки, с другой, могут приводить к тому, что гелиопауза в хвостовой области не всегда будет параллельна направлению набегающего потока. Так как с ростом гелиоцентрического расстояния доля первичных атомов растет, то естественно ожидать, что на больших расстояниях от Солнца скорость, плотность и давление солнечного ветра будут приближаться к их межзвездным значениям.

Несмотря на множество предположений, приведенный выше качественный анализ подтверждается проведенными нами численными расчетами. В следующем параграфе приводятся и обсуждаются результаты численных расчетов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты расчетов подтверждают приведенный выше качественный анализ. Распределения плазменных параметров в области гелиосферного хвоста приведены на рис. 2, 3. На рис. 2 представлены распределения плотности и скорости плазмы с двух сторон вдоль гелиопаузы. В классической гидродинамике условиями на тангенциальном разрыве, которым является гелиопауза, являются условие непротекания и условие равенства давлений. Эти условия допускают разрыв плотности и скорости газа при переходе через гелиопаузу. Присутствие атомов водорода приводит в результате перезарядки к переносу импульса и энергии между солнечным ветром и межзвездной средой. Следовательно, скачок в плотности и скорости ослабевает. При $z \approx -3000$ а.е., где z — расстояние,

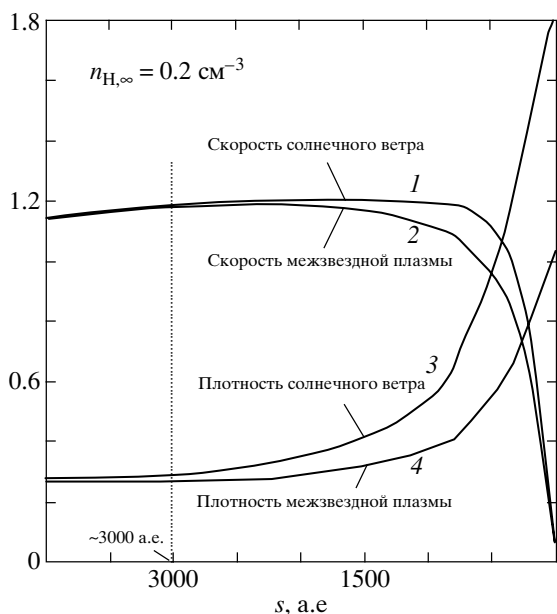


Рис. 2. Распределение скорости (1 и 2) и плотности (3 и 4) плазмы вдоль контактной поверхности. Кривые 2 и 4 соответствуют межзвездной среде, 1 и 3 — солнечному ветру. Здесь скорость и плотность отнесены к невозмущенным межзвездным значениям, s — гелиоцентрическое расстояние вдоль контактной поверхности.

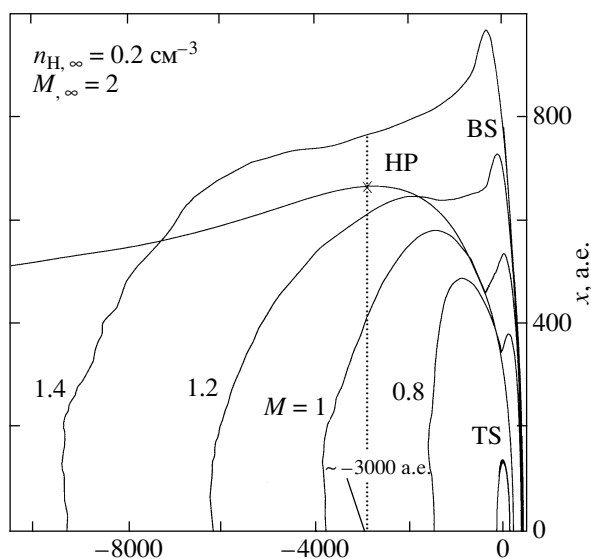


Рис. 3. Линии уровня газодинамического числа Маха (M). На расстояниях, больших 4000 а.е., течение является сверхзвуковым, и с ростом расстояния от Солнца число Маха приближается к своему значению в невозмущенной ЛМС.

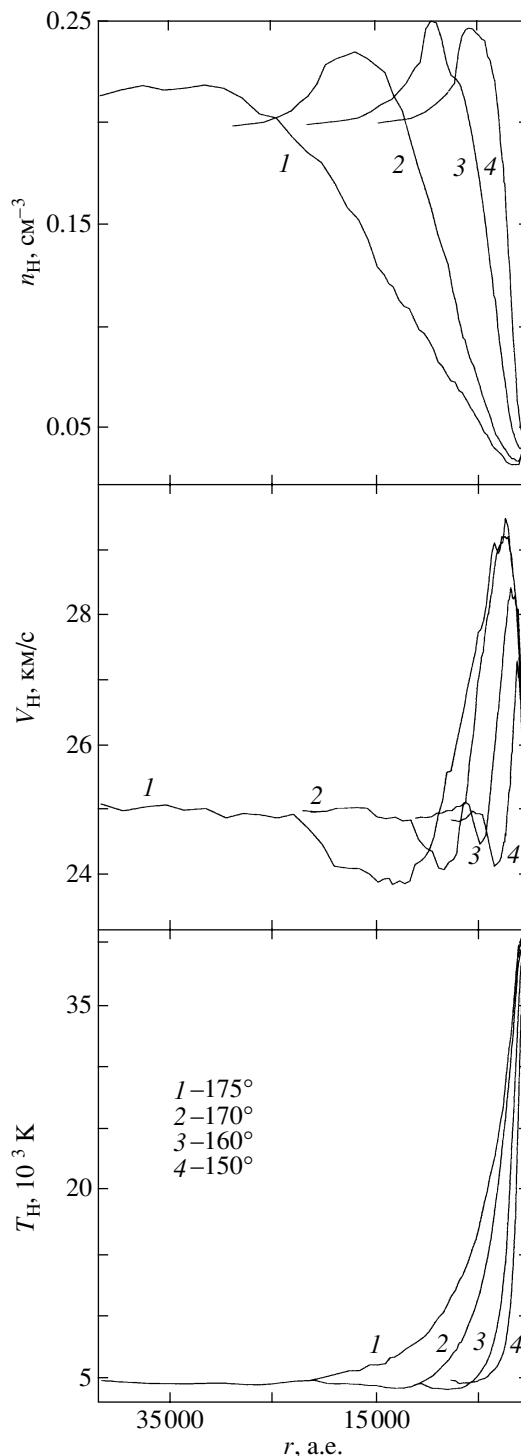


Рис. 4. Изменение концентрации, скорости и температуры атомов водорода в зависимости от расстояния r от Солнца вдоль лучей зрения с углами θ , равными 175° , 170° , 160° и 150° .

отсчитываемое вдоль оси симметрии, а знак минус означает направление вдоль направления потока ЛМС, скачки в плотности и скорости исчезают (рис. 2).

Непосредственно за гелиосферной ударной волной скорость плазмы ≈ 100 км/с, но затем, как следствие перезарядки, скорость плазмы уменьшается, приближаясь к скорости межзвездной сре-

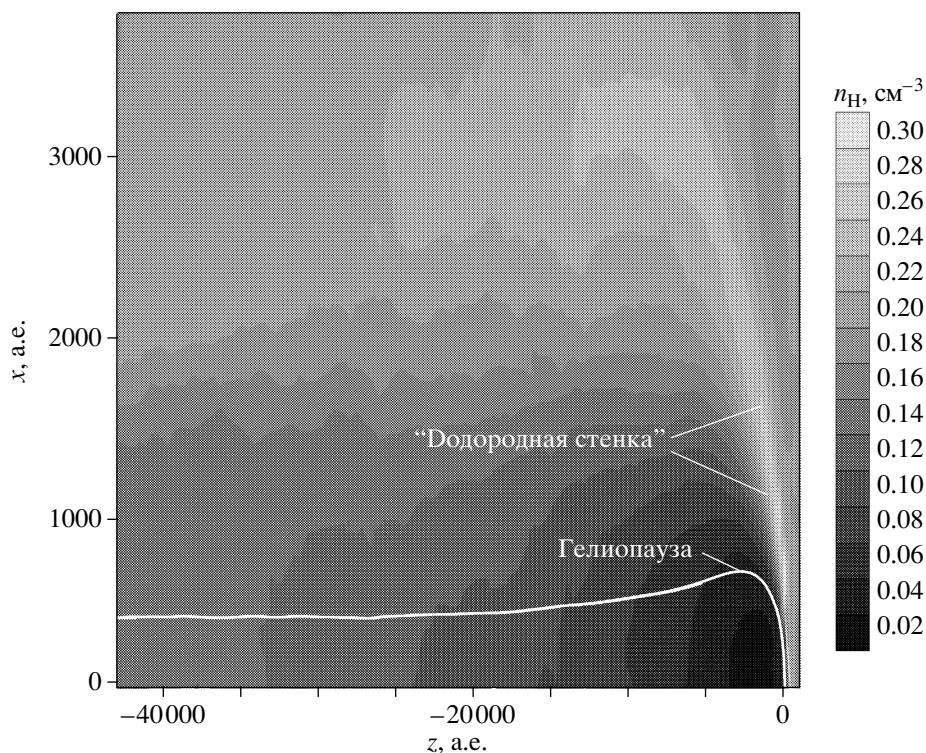


Рис. 5. Двумерное распределение концентрации атомов водорода. На расстоянии 40 000 а.е. концентрация атомов близка к ее значению в невозмущенной ЛМС. На рисунке также видна водородная стенка — увеличение концентрации атомов перед гелиопаузой. Интенсивность водородной стенки падает с увеличением гелиоцентрического расстояния.

ды. Перезарядка также приводит к эффективно-му охлаждению солнечного ветра. Течение межзвездного газа характеризуется числом Маха $M \approx 2$. На рис. 3 показаны линии уровня для чисел Маха. Видно, что на расстояниях $z \approx -4000$ а.е. солнечный ветер переходит скорость звука. Далее, с увеличением расстояния от Солнца числа Маха растут, приближаясь к своему межзвездному значению. На рис. 3 также показана гелиопауза. Линией $z = -3000$ а.е. условно показана граница, за которой нет разрыва плотности и скорости на гелиопаузе.

На рис. 4 и 5 представлены распределения атомов межзвездного водорода в хвостовой части гелиосферного интерфейса. На рис. 4 показаны плотность, скорость и температура атомов вдоль различных лучей зрения. Угол луча зрения θ на этих рисунках откладывается от направления на набегающий поток ЛМС (см. рис. 1). На всех направлениях параметры межзвездных атомов выходят к значениям в ЛМС на расстояниях меньших или порядка 20 000 а.е. Заметим, что выход на межзвездные значения осуществляется более быстро при меньших углах. Интересно также заметить, что водородная стенка — увеличение концентрации атомов водорода в области между гелиопаузой и внешней ударной волной (см. Баранов и др., 1991;

Измоденов, 2000) — заметна даже при больших углах $\theta = 150^\circ - 170^\circ$. Двумерное распределение атомов в хвостовой части гелиосферного интерфейса показано на рис. 5.

Следует заметить, что влияние процесса перезарядки сильно упрощает численное решение поставленной задачи. Важным обстоятельством является выход солнечного ветра на сверхзвуковой режим в хвостовой части гелиосферного интерфейса, что позволяет поставить корректные граничные условия.

Необходимо также отметить, что в настоящей статье мы рассматривали влияние только процесса перезарядки на течение в хвостовой области гелиосферного интерфейса. В дальнейшем, наряду с процессом перезарядки, необходимо также рассматривать влияние гидродинамических и плазменных неустойчивостей на структуру течения. Могут повлиять на структуру течения и внутреннее и внешнее магнитные поля. Также важными могут оказаться процессы пересоединения.

ВЫВОДЫ

В настоящей работе проведено исследование влияния межзвездных атомов водорода на структуру хвостовой части гелиосферного интерфейса. В частности, показано:

1. Нейтральные атомы водорода за счет перезарядки качественно изменяют картину течения солнечного ветра и локальной межзвездной среды в хвостовой области: исчезает диск Маха и гелиосферная ударная волна становится близкой к сферической, при этом также исчезают выходящие из тройной точки отраженная ударная волна RS и тангенциальный разрыв TD (рис. 1). Разрывы, например, гелиопауза, существующие в чисто газодинамическом решении во всей хвостовой области, в решении, учитывающем атомы, ослабевают и на расстояниях, больших 3000 а.е., практически исчезают.

2. Параметры атомов водорода, плазмы солнечного ветра и локальной межзвездной среды в хвостовой области на расстояниях свыше 20 000 а.е. от Солнца за счет перезарядки приближаются к соответствующим значениям в невозмущенной ЛМС. Это позволяет определить степень влияния солнечной системы на окружающую ее межзвездную среду и, следовательно, оценить размер солнечной системы в хвостовой области ($\approx 20000-40000$ а.е.). Граница солнечной системы в хвостовой области имеет диффузионную природу, в отличие от носовой части гелиосферного интерфейса, где границей является гелиопауза.

3. Влияние атомов водорода приводит к выходу солнечного ветра с ростом гелиоцентрического расстояния (от 4000 а.е.) на сверхзвуковой режим, что снимает трудности в постановке граничных условий и позволяет получить корректное численное решение.

Мы благодарим А. В. Мясникова за предоставленную газодинамическую программу, Ю. Г. Маламу за программу Монте-Карло, а также В. Б. Баранова, Ю. Г. Маламу, А. В. Мясникова, С. В. Чалова за плодотворные обсуждения. Работа выполнена

при поддержке гранта INTAS № 2001-0270, грантов РФФИ № 01-02-17551, 02-02-06011, 02-02-06012, 01-01-00759, и Международного Института Космических Исследований (Берн, Швейцария).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов, Малама (V. B. Baranov and Yu. G. Malama), *J. Geophys. Res.* **98**, **A9**, 15157 (1993).
2. Баранов, Малама (V. B. Baranov and Yu. G. Malama), *J. Geophys. Res.* **100**, 14755 (1995).
3. Баранов, Малама (V. B. Baranov and Yu. G. Malama), *Space Sci. Rev.* **78**, 305 (1996).
4. Баранов В.Б., Краснобаев К.В., Куликовский А.Г., Докл. АН СССР **194**, 41 (1970).
5. Баранов и др. (V. B. Baranov, M. G. Lebedev, and Yu. G. Malama), *Astrophys. J.* **375**, 347 (1991).
6. Баранов и др. (V. B. Baranov, V. V. Izmodenov, and Yu. G. Malama), *J. Geophys. Res.* **103**, **A5**, 9575 (1998).
7. Витте и др. (M. Witte, M. Banaszkiwicz, and H. Rosenbauer), *Space Sci. Rev.* **78**, 289 (1996).
8. Измоленов (V. V. Izmodenov), *Astrophys. Space Sci.* **274**, 55 (2000).
9. Измоленов (V. V. Izmodenov), Proc. Special COSPAR Coll. In Honour of Stanislaw Grzedzielski, Leaving Executive Director of COSPAR, COSPAR Coll. Series, in press (2002).
10. Измоленов и др. (V. V. Izmodenov, R. Lallement, and Yu. G. Malama), *Astron. Astrophys.* **342**, L13 (1999).
11. Измоленов и др. (V. V. Izmodenov, M. Gruntman, and Yu. G. Malama), *J. Geophys. Res.* **106**, **A6**, 10681 (2001).
12. Лаллемен (R. Lallement), *Space Science Rev.* **78**, 361 (1996).
13. Малама (Yu. G. Malama), *Astrophys. Space Sci.* **176**, 21 (1991).