

НЕСТАЦИОНАРНАЯ КИНЕТИКО-ГАЗОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА С ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ МЕЖЗВЁЗДНОЙ СРЕДОЙ

В.В. Измоленов^{1,2,3}, Ю.Г. Малама^{1,3}, Е.А. Проворникова^{2,3}, О. Катушкина^{2,3}

¹ *Институт проблем механики Российской академии наук, Москва,*

² *Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова*

³ *Институт Космических Исследований Российской Академии Наук*

Аннотация

Рассматривается нестационарная модель взаимодействия сверхзвукового солнечного ветра со сверхзвуковым потоком газа локальной (окружающей Солнце) межзвездной среды. Формулируется математическая постановка задачи и метод ее решения в случае «идеального» модельного солнечного цикла. Рассматривается вопрос о продолжительности влияния сильного возмущения динамического давления солнечного ветра на орбите Земли на положения гелиосферной ударной волны и гелиопаузы. Детально рассматриваются аспекты, связанные с использованием параметров солнечного ветра, измеренных на орбите Земли, в качестве граничных условий в рассматриваемой модели. Результаты, полученные в рамках представленной модели, будут использованы при интерпретации данных, полученных на космических аппаратах Voyager 1 и 2, Pioneer 10 и 11, Ulysses, Hubble Space Telescope, SOHO и др.

AERONON-STATIONARY KINETIC-GASDYNAMIC MODEL OF THE SOLAR WIND INTERACTION WITH LOCAL INTERSTELLAR MEDIUM

Non-stationary model of the solar wind interaction with the partly ionized interstellar medium is considered. Mathematical formulation of the problem and method of its solution is formed in the case of an hypothetical “ideal” solar cycle. The question on influence of a strong and long lasting perturbation of the solar wind dynamic pressure at the Earth's orbit on positions of the heliospheric termination shock and heliopause is studied. Problems connected with employing solar wind data measured at the Earth's orbit as the inner boundary conditions are discussed in details. Results of the presented model will be used in future for interpretation of different spacecraft data.

1. ВВЕДЕНИЕ

Структура и свойства гелиосферы при $r > 5$ а.е. (1 а.е. равна расстоянию от Солнца до Земли) определяются характером взаимодействия солнечного ветра с межзвездным окружением Солнца – частично ионизованным локальным межзвездным облаком (ЛМО). ЛМО движется относительно Солнца со скоростью ~ 26 км/с, имеет температуру $\sim 10^4$ К и концентрацию частиц $\sim 0.2 \div 0.3$ см⁻³. Область взаимодействия солнечного ветра с межзвездной средой принято называть гелиосферным интерфейсом. Внутренней границей гелиосферного интерфейса является гелиосферная ударная волна, которую космический аппарат (КА) Voyager 1 пересек в декабре 2004 года на расстоянии 94 а.е. До настоящего времени основная информация о структуре и свойствах гелиосферного интерфейса получена с помощью методов дистанционного зондирования. Дистанционное зондирование гелиосферного интерфейса проводится в основном с 1 а.е., но также и с больших гелиоцентрических расстояний ($3 \div 100$ а.е.) на КА Ulysses, Voyager 1 и 2, Pioneer 10 и 11.

Для того чтобы на основе измерений с одной или нескольких астрономических единиц определить структуру гелиосферного интерфейса, исследовать происходящие в нем физические процессы, а также предсказать результаты будущих измерений *необходимо построение теоретической модели гелиосферного интерфейса*.

Исторически построение теоретической концепции гелиосферного интерфейса началось с работ Паркера [1] и Баранова, Краснобаева и Куликовского [2]. В модели [2] в ньютоновском приближении тонкого

слоя рассматривается взаимодействие двух сверхзвуковых газодинамических потоков. При этом взаимодействии образуются три поверхности разрыва: гелиопауза – контактная поверхность, разделяющая солнечный ветер и межзвездную среду, гелиосферная ударная волна в солнечном ветре, и головная ударная волна в межзвездной среде (рис.1).

Главная трудность в построении полной адекватной модели гелиосферного интерфейса состоит в многокомпонентной природе как локальной межзвездной среды, так и солнечного ветра. Локальное межзвездное облако состоит, по меньшей мере, из следующих компонент: плазмы (электроны, протоны, ионы гелия), атомов водорода, межзвездного магнитного поля и галактических космических лучей.

Плазменная компонента в гелиосфере состоит из частиц солнечного ветра (протонов, электронов, альфа-частиц и др.), захваченных ионов, АКЛ. Захваченные ионы начинают влиять на течение гелиосферной плазмы начиная с расстояний $20 \div 30$ а.е. от Солнца и далее, а АКЛ влияют на течение плазмы солнечного ветра как в окрестности гелиосферной ударной волны, так и в области внутреннего ударного слоя между гелиосферной ударной волной и гелиопаузой.

Для построения корректной многокомпонентной модели гелиосферного интерфейса необходимо выбрать адекватное теоретическое описание для каждой из компонент межзвездной среды и солнечного ветра. В частности, для описания движения межзвездных атомов внутри гелиосферы необходимо использовать кинетический подход, так как длина свободного пробега атомов водорода сопоставима с характерными размера-

ми гелиосферного интерфейса (число Кнудсена по главному процессу резонансной перезарядки ~ 1).

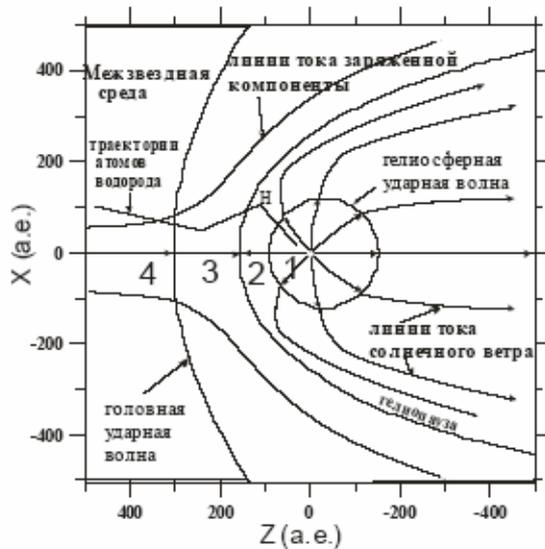


Рис. 1. Гелиосферный интерфейс – область взаимодействия солнечного ветра с локальной межзвездной средой. Гелиопауза – контактная поверхность, разделяющая плазму солнечного ветра от межзвездной плазмы. В гелиосферной ударной волне солнечный ветер тормозится от сверхзвуковых до дозвуковых (при $n_{\text{H,HC}} > 0$) скоростей. Во внешней ударной волне тормозится и нагревается поток межзвездной среды. Область гелиосферного интерфейса может быть разделена на четыре подобласти, с существенно различными свойствами плазмы в них: 1) сверхзвуковой солнечный ветер; 2) область дозвукового солнечного ветра между гелиопаузой и гелиосферной ударной волной (эту область назовем внутренним ударным слоем); 3) область возмущенной межзвездной плазмы между гелиопаузой и внешней ударной волной (эту область часто называют внешним ударным слоем); 4) область сверхзвукового потока межзвездной среды.

Измерения параметров солнечного ветра на космических аппаратах показали, что динамическое давление солнечного ветра меняется примерно в 2 раза при переходе от максимума солнечной активности к её минимуму. Исследование влияния солнечного цикла в области гелиосферного интерфейса проводилось многими авторами. Однако, в большинстве работ не учитывалось влияние межзвездных атомов водорода или же их учет проводился в рамках упрощенных (одно- или многожидкостной) моделей. В [3] показано, что функция распределения атомов водорода внутри гелиосферы не является ни локально-максвелловской, ни суммой локально-максвелловских функций распределения, поэтому многожидкостное описание атомов водорода в области гелиосферного интерфейса приводит к ошибочным результатам.

Для корректного исследования вопроса о влиянии солнечного цикла, необходимо построение нестационарной кинетико-газодинамической модели гелиосферного интерфейса, которая предполагает решение семимерного (в общем случае) кинетического уравнения для атомов водорода. В частном случае осесимметричной задачи кинетическое уравнение становится шестимерным: время, две пространственных координаты, три координаты в пространстве скоростей. Од-

нако, даже в этом случае получение численного решения этого уравнения совместно с системой уравнений Эйлера составляло определенные трудности. Именно с этим и связано развитие упрощенных моделей. Впервые такое самосогласованное решение нестационарного кинетического уравнения совместно с системой уравнений Эйлера в осесимметричном случае было получено в [4].

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассматриваемая модель является нестационарной версией модели гелиосферного интерфейса, в которой учитывается влияние межзвездных ионов гелия и альфа-частиц солнечного ветра. Предполагается, что плазменная компонента межзвездной среды состоит из протонов, электронов и ионов гелия, а солнечный ветер – из протонов, электронов и альфа-частиц. Для заряженной компоненты решается следующая система определяющих задачу уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) &= q_1, \\ \frac{\partial (\rho V)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V V + p \hat{I}) &= q_2, \\ \frac{\partial E}{\partial t} + \nabla \cdot [V(E + p)] &= q_3 \end{aligned} \quad (1)$$

где $\rho = \rho_p + \rho_e + \rho_{\text{He}}$ – общая плотность заряженной компоненты; $p = p_p + p_e + p_{\text{He}}$ – полное давление заряженной компоненты (здесь ρ_{He} обозначает плотность ионов гелия He^+ для межзвездной среды и плотность альфа-частиц He^{++} для солнечного ветра); $E = \rho(\varepsilon + V^2/2)$ – полная энергия в единице объема, $\varepsilon = p/(\gamma - 1)\rho$ – внутренняя энергия; \hat{I} – единичный тензор. Температура заряженной компоненты определяется из уравнения состояния. Уравнение состояния для межзвездной среды

$$p = 2(n_p + n_{\text{He}^+})kT$$

Для солнечного ветра уравнение состояния записывается в следующем виде:

$$p = 2(n_p + n_{\text{He}^{++}})kT$$

где k – постоянная Больцмана; $n_p, n_{\text{He}^+}, n_{\text{He}^{++}}$ – концентрации протонов, межзвездных ионов гелия, альфа-частиц солнечного ветра, соответственно. В дополнение к уравнениям (1) необходимо добавить уравнения неразрывности для альфа-частиц в солнечном ветре и ионов гелия в межзвездной среде:

$$\frac{\partial n_{\text{He}}}{\partial t} + \nabla \cdot (n_{\text{He}} V) = 0 \quad (2)$$

Затем концентрация протонов может быть определена из соотношения

$$n_p = \frac{\rho - m_{\text{He}} n_{\text{He}}}{m_p}$$

Здесь n_{He} означает концентрацию ионов гелия He^+ в межзвездной среде и концентрацию альфа-частиц He^{++} в солнечном ветре. Источниковые члены в правых частях уравнений (1) имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}
 q_1 &= m_p n_H \cdot (\beta_{ph} + \beta_{impact}), \\
 n_H(r, t) &= \int f_H(r, w_H, t) dw_H, \\
 q_2 &= \int m_p (\beta_{ph} + \beta_{impact}) w_H f_H(r, w_H, t) dw_H + \\
 &+ \iint m_p v_{rel} \sigma_{ex}^{HP} (w_H - w) \times \\
 &\times f_H(r, w_H, t) f_p(r, w, t) dw_H dw, \\
 q_3 &= \int m_p (\beta_{ph} + \beta_{impact}) \frac{w_H^2}{2} f_H(r, w_H, t) dw_H + \\
 &+ \frac{1}{2} \iint m_p v_{rel} \sigma_{ex}^{HP} (v_{rel}) (w_H^2 - w^2) \times \\
 &\times f_H(r, w_H, t) f_p(r, w, t) dw_H dw + \\
 &+ n_H (\beta_{ph} E_{ph} - \beta_{impact} E_{ion}),
 \end{aligned}$$

где $f_H(r, w_H)$, n_H – функция распределения и концентрация атомов, соответственно; $f_p(r, w, t)$ – локально-максвелловская функция распределения протонов; β_{ph} – частота фотоионизации; β_{impact} – частота ионизации электронным ударом; $v_{rel} = |w_H - w|$ – относительная скорость атома и протона; E_{ph} – средняя энергия фотоионизации (4.8 эВ) и E_{ion} – потенциал ионизации атомов водорода (13.6 эВ).

Система уравнений (1) решается совместно с нестационарным кинетическим уравнением для функции распределения атомов водорода по скоростям:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial f_H}{\partial t} + w_H \frac{\partial f_H}{\partial r} + \frac{F_r + F_g}{m_H} \frac{\partial f_H}{\partial w_H} = \\
 - (v_{ph} + v_{impact}) f_H(r, w_H) - \\
 - f_H \int |w_H - w_p| \sigma_{ex}^{HP} f_p(r, w_p) dw_p + \\
 + f_p(r, w_H) \int |w_H - w_H| \sigma_{ex}^{HP} f_H(r, w_H) dw_H,
 \end{aligned} \tag{3}$$

где w_H, w_p – индивидуальные скорости атомов и протонов, соответственно; σ_{ex}^{HP} – сечение перезарядки атомов водорода на протонах; v_{ph} – частота фотоионизации; m_H – масса атома водорода; v_{impact} – частота ионизации электронным ударом; F_r, F_g – сила солнечного гравитационного притяжения и сила давления солнечной радиации, соответственно.

Рассмотрим задачу о моделировании идеального солнечного цикла. Исследование идеального солнечного цикла позволяет лучше понять природу отклика гелиосферного интерфейса на периодические колебания параметров солнечного ветра. Также будут приведены результаты моделирования реального солнечного цикла с использованием данных по параметрам солнечного ветра, полученных на космических аппаратах. При моделировании реального солнечного цикла учитывались изменения частоты фотоионизации и силы давления солнечной радиации. Как отмечалось ранее, влияние фотоионизации и силы давления солнечной радиации (как и силы гравитации) важны в окрестности Солнца ($r < 20$ а.е.), но не оказывают никакого влияния на область гелиосферного интерфейса. Поэтому в модельном солнечном цикле частота фотоионизации и величина $\mu = E_{rad}/F_{grav}$ предполагались постоянными. Для завершения постановки задачи необходимо задать начальные и граничные условия. В качестве внешних граничных условий задаются пара-

метры невозмущенной локальной межзвездной среды: скорости V_{LIC} , температуры T_{LIC} , а также значения концентраций протонов $n_{p,LIC}$, ионов гелия $n_{He^+,LIC}$, атомов водорода $n_{H,LIC}$. В расчетах принимались следующие значения этих параметров:

$$\begin{aligned}
 V_{LIC} &= 26.4 \text{ км/сек}, \quad T_{LIC} = 6500 \text{ К}, \\
 n_{H,LIC} &= 0.18 \text{ см}^{-3}, \quad n_{p,LIC} = 0.06 \text{ см}^{-3}, \\
 n_{He^+,LIC} &= 0.009 \text{ см}^{-3}.
 \end{aligned}$$

Влиянием межзвездного магнитного поля и галактических космических лучей пренебрегалось.

Внутренние граничные условия принимаются на орбите Земли. Рассмотрим модельный “идеальный” солнечный цикл, в котором предполагается, что на орбите Земли плотность солнечного ветра меняется по гармоническому закону, а скорость и температура постоянны:

$$\begin{aligned}
 v_E &= v_{p,E;0} \\
 T_E &= T_{E;0} \\
 n_{p,E} &= n_{p,E;0} (1 + \delta_n \sin \omega t) \\
 n_{He^{++},E} &= n_{He^{++},E;0}.
 \end{aligned} \tag{4}$$

Для возмущений солнечного ветра, которые определяются (4), отношение максимального значения динамического давления солнечного ветра к его минимальному значению определяется как

$$\Delta = (1 + \delta_n) / (1 - \delta_n).$$

Следуя работе [3] в расчетах полагалось, что $\delta_n = 1/3$. При этом динамическое давление солнечного ветра меняется в два раза $\Delta = 2$, что соответствует реальным изменениям динамического давления в солнечном цикле. При рассмотрении “идеального” цикла исследовался только один вариант, когда изменение динамического давления обусловлено изменением плотности. Такое ограничение связано с тем, что в работе [4] в рамках упрощенной многожидкостной модели рассматривались два случая, в которых изменение динамического давления было обусловлено как изменением плотности солнечного ветра, так и изменением его скорости. Было показано, что эффекты, связанные с изменением динамического давления в солнечном цикле, не зависят от причины изменения давления. При расчетах использовались следующие значения параметров солнечного ветра:

$$n_{p,E;0} = 8 \text{ см}^{-3}, \quad v_{p,E;0} = 445 \text{ км/сек}, \quad M = 10.$$

Как уже отмечалось, исследование идеального солнечного цикла позволяет более ясно изучить природу отклика гелиосферного интерфейса на периодические колебания параметров солнечного ветра. Более того, именно предположение о периодичности граничных условий позволяет нам использовать эффективный метод решения задачи, который состоит в следующем. Для того чтобы получить решение системы уравнений Эйлера (1) совместно с нестационарным кинетическим уравнением (3) и описанными выше граничными условиями, включая условия на орбите Земли (4), делается предположение о периодичности решения. Пред-

положение о периодичности решения позволяет воспользоваться методом глобальных итераций, аналогичным методу, который был использован при решении стационарной задачи [2]. На первом шаге этой итеративной процедуры решаются нестационарные уравнения Эйлера с постоянными источниками членами q_1, q_2 и q_3 , взятыми из решения соответствующей стационарной задачи. Граничные условия для уравнений Эйлера ставятся в соответствии с (4). Численное решение уравнений Эйлера проводится в течение примерно 300 солнечных циклов до наступления полной периодичности решения. В результате получены распределения параметров заряженной компоненты в области гелиосферного интерфейса, а также положения гелиопаузы и ударных волн. Забегая вперед, заметим, что, как и ожидалось, в расчетах была установлена строгая 11-летняя периодичность в распределении параметров плазмы. На втором шаге решается кинетическое уравнение (3), при этом используются полученные на предыдущем шаге периодические распределения параметров протонов. Уравнение решается методом Монте-Карло с расщеплением траекторий [4]. Для увеличения эффективности метода Монте-Карло и увеличения точности статистических расчетов необходимо задать период, который будет иметь решение кинетического уравнения. Так как входящие в уравнения коэффициенты (n_p, V_p, T_p) являются периодическими, то следует ожидать, что и решение уравнения (3) имеет тот же самый период. В результате расчетов методом Монте-Карло было получено пространственно-временное распределение параметров атомов водорода, а также источников членов q_1, q_2 и q_3 .

На третьем шаге опять решаются уравнения Эйлера с граничными условиями (4) и источниками членами, полученными на предыдущем шаге. Газодинамические расчеты проводились до тех пор, пока решение окончательно не установилось. Для этого потребовалось более 300 солнечных циклов. В результате было получено периодическое решение с периодом 11 лет. Полученное распределение плазменных параметров использовалось для решения кинетического уравнения на следующем шаге. Итерационный процесс продолжался до тех пор, пока результаты двух последних итераций практически совпали (заметим, что для этого потребовалось всего 4 итерации). Указанная выше процедура позволила получить самосогласованное периодическое решение системы (1)–(3), удовлетворяющее граничным условиям (4). Вместе с тем, вся система определяющих задачу уравнений является нелинейной. Нелинейная природа системы может привести к тому, что 11-летние возмущения граничных условий, которые являются внешними возмущениями по отношению к системе, могут провзаимодействовать с характерными возмущениями, присущими самой системе. В результате этого взаимодействия в самосогласованном решении системы могут (гипотетически) возникнуть колебания системы с периодом отличным от одиннадцатилетнего. В расчетах, результаты которых представлены ниже, мы увеличили период, для которого ищется решение системы определяющих уравнений с граничным условием (4) в 6 раз, до 66 лет. (Нами были проведены также и дополнительные

расчеты с различными периодами (например, 55 лет, 110 лет), но результаты дополнительных расчетов совпадают с результатами, представленными здесь, для $T=66$ лет. Увеличение периода на времена много большие 110 лет невозможно в силу ограниченности компьютерных ресурсов.) Увеличение периода при поиске решения должно было бы позволить нам найти возможные решения с периодами отличными от 11-летнего (например, с периодами 5.5, 22, 33 года), если бы такие решения существовали. Провести аналогичное исследование в модели с реальными граничными условиями, в которых параметры солнечного ветра, строго говоря, не периодичны, было бы невозможно, так как при этом трудно было бы говорить о какой-либо дополнительной периодичности. Для получения решения кинетического уравнения методом Монте-Карло необходимо выбрать интервал времени, по которому можно проводить осреднение. В представленных результатах осреднение проводилось за интервал $t_{mc}=1$ год. Было проверено, что осреднение за меньший период $t_{mc}=0.5$ года не привело к изменению полученного самосогласованного решения.

Ситуация с постановкой задачи в случае реального солнечного цикла требует дополнительных пояснений. Эти пояснения необходимо дать до представления результатов расчетов для идеального солнечного цикла, так как одновременно с представлением этих результатов будут представлены также и результаты специальных тестовых расчетов. Проведение тестового расчета связано с рассмотрением реального солнечного цикла.

При моделировании реального солнечного ветра существует несколько дополнительных проблем. Первой трудностью является то, что в данных по параметрам солнечного ветра, которые регистрируются на космических аппаратах, нет точной периодичности. Солнечный цикл в таком случае можно рассматривать как квазипериодические изменения динамического давления солнечного ветра. В этом случае наиболее правильным методом решения поставленной задачи являлось бы нахождение не периодического решения, а нахождение полностью нестационарного решения при постоянно меняющихся граничных условиях. Однако при этом возникает две существенных проблемы. В настоящее время данные по параметрам солнечного ветра ограничиваются измерениями в течение ~ 40 лет, а характерное время пребывания межзвездного атома в системе составляет $t=L/V_H=75\div 100$ лет, $L=300\div 400$ а.е. – характерный размер интерфейса, $w_H=20$ км/с = 4 а.е. в год. Таким образом, чтобы решать задачу без учета периодичности, у нас нет достаточной информации о параметрах солнечного ветра в прошлом. Однако, как будет показано ниже, этого в реальности и не требуется.

Второй проблемой при решении в полном смысле нестационарной задачи является то, что в этом случае описанный выше метод глобальных итераций работать не будет, а кинетическое уравнение необходимо будет решать одновременно с уравнениями Эйлера, вычисляя источники членов на каждом временном шаге. При этом подходе, чтобы сохранить приемлемую статистическую (2–4%) погрешность в методе Монте-Карло, необходимо одновременно на каждом времен-

ном шаге сохранять в системе порядка $10^8 \div 10^{10}$ частиц. Имеющиеся в нашем распоряжении компьютеры не имеют необходимой для этого оперативной памяти. Для того чтобы избежать обозначенных выше проблем, мы используем следующий подход. Считаем, что периодичность в параметрах солнечного ветра существует, а отличия одного солнечного цикла от другого обуславливаются накладываемыми на периодические колебания флуктуациями. Причем амплитуда и протяженность этих флуктуаций могут быть достаточно большими. При таком подходе важно исследовать вопрос о том, как флуктуации, которые были в прошлом, влияют на распределение параметров в будущем. Для ответа на этот вопрос нами были проведены специальные тестовые расчеты, в которых была рассмотрена задача о «испорченном» солнечном цикле. В этой задаче на орбите Земли ставились следующие граничные условия: рассматривалось решение с 66-летним периодом, что соответствует шести 11-летним солнечным циклам. При $t = [11 \text{ г.}, 65 \text{ г.}]$, брались граничные условия в соответствии с (4), а в течение первого солнечного цикла с $t = [0, 10]$ динамическое давление солнечного ветра было увеличено в 1.5 раза:

$$n_{p,E} = 1.5n_{p,E;0} (1 + \delta_n \sin \omega t)$$

$$v_E = v_{p,E;0} \quad (5)$$

$$T_E = T_{E;0} = \text{const.}$$

Цель расчетов с «испорченным» солнечным циклом состояла в том, чтобы понять, насколько изменение (достаточно сильное и продолжительное) параметров солнечного ветра на орбите Земли повлияет на распределения параметров плазмы и атомов водорода в гелиосфере, а также на положение контактной поверхности и ударных волн. Данное исследование позволит понять, насколько параметры солнечного ветра в прошлом могут повлиять на распределение атомов и протонов в настоящее время. Если результаты этого тестового расчета покажут, что «испорченный» солнечный цикл влияет на распределения параметров плазмы и атомов очень продолжительное время (больше 20–30 лет), то тогда отсутствие данных по параметрам солнечного ветра в прошлом (ранее 70-х) является существенным. Если же влияние даже столь сильной флуктуации солнечного цикла окажется кратковременным, то тогда расчеты по предложенному выше сценарию имеют смысл: глобальные периодические колебания системы заложены в предположении о цикличности всего решения, а флуктуации (пусть даже и большие по амплитуде и продолжительности) имеют достаточно локальное влияние. Далее в расчетах с реальными данными будет заложен 22-летний цикл.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ: ИДЕАЛЬНЫЙ ЦИКЛ

Было получено самосогласованное решение системы уравнений (1)–(2) для заряженной компоненты совместно с кинетическим уравнением (3) для атомов водорода для «идеального» и «испорченного» модельных солнечных циклов. В случае «идеального» солнечного цикла система определяющих уравнений решалась

с граничным условием (4). В этом случае было получено периодическое решение с периодом 11 лет. Основные результаты, полученные нами для плазменной компоненты, состоят в следующем (рис.2 см. также [4]):

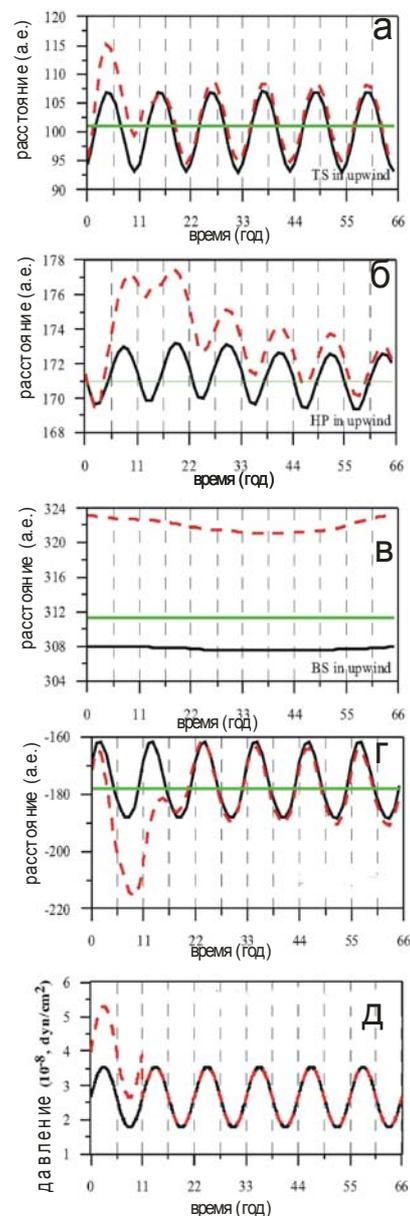


Рис. 2. Изменение положения гелиосферной ударной волны (а), гелиопаузы (б) и внешней ударной волны (в) в направлении к набегающему потоку межзвездной среды, а также расстояние до гелиосферной ударной волны в направлении в хвост гелиосферы (г). Изменение динамического давления $\rho_E V_E^2$ солнечного ветра на орбите Земли как функция времени (д). Штриховые линии соответствуют «испорченному» модельному циклу, а сплошные линии соответствуют «идеальному» циклу

- Гелиосферная ударная волна совершает 11-летние периодические колебания с амплитудой 7 а.е. в лобовой части гелиосферы. В хвостовой части амплитуда колебаний растет и составляет 12.5 а.е.
- Амплитуда колебаний гелиопаузы меньше и составляет 2 а.е. в лобовой части гелиосферы.
- Колебания внешней ударной волны пренебрежимо малы. Колебания гелиопаузы приводят к образованию серии ударных волн и волн разряжения в об-

ласти внешнего ударного слоя между гелиопаузой и внешней ударной волной. Дополнительный нагрев плазмы во внешнем ударном слое на ударных волнах мал и не обнаружен в результатах расчетов. Результаты численных расчетов в области между гелиопаузой и внешней ударной волной подтверждаются результатами аналитической модели распространения нелинейных волн, основанной на ВКБ приближении.

Для нейтральной компоненты были получены следующие результаты:

- Параметры атомов водорода также меняются с 11-летним периодом, вызванным изменением параметров солнечного ветра.
- Изменение концентрации атомов водорода во внешней гелиосфере не превышает 10 %. Амплитуда колебаний концентрации атомов водорода увеличивается при приближении к Солнцу до 30 %.
- Показано, что при моделировании “испорченного” солнечного цикла, распределения атомов водорода внутри гелиосферы релаксируют к значениям, полученным для “идеального” цикла, через 8–9 лет после окончания испорченного цикла. Этот результат обосновывает возможность использования разработанной нами периодической модели для интерпретации данных по рассеянному солнечному Ly-alpha излучению при условии учета параметров солнечного ветра за 9–10 лет, предшествующих моменту измерений.
- Колебания концентраций трех сортов атомов водорода – первичных и вторичных межзвездных атомов (сорта 4 и 3, соответственно) и атомов сорта 2, которые рождаются в области внутреннего ударного слоя, имеют когерентный характер во всей области сверхзвукового солнечного ветра. Когерентный характер флуктуаций в этой области обусловлен тем, что концентрации атомов в этой области определяются процессами, связанными с потерей атомов. Рождения атомов в этой области не происходит. В областях же, где наряду с потерями происходит и рождение атомов сопутствующего сорта, когерентный характер флуктуаций теряется.
- Результаты численных расчетов показывают, что массовые скорости и температуры атомов третьего и четвертого сортов с солнечным циклом практически не меняются. Это обусловлено кинетической природой движения атомов в гелиосфере. Однако, массовая скорость и температура атомов сорта 2, образованных в области внутреннего ударного слоя, изменяются в солнечном цикле на 10–12 %. Эти флуктуации связаны с флуктуациями параметров плазмы в окрестности гелиопаузы. Существует качественная разница полученных нами результатов по сравнению с результатами работ [5] и [6], которая обусловлена использованием многожидкостного [6] и одножидкостного [5] подхода для описания атомов водорода. Использование многожидкостного подхода для нестационарной задачи еще менее приемлемо, чем в стационарной задаче. Действительно, число Кнудсена в нестационарной задаче оказывается больше, чем число Кнудсена в стационарной задаче.

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕАЛЬНОГО СОЛНЕЧНОГО ЦИКЛА

4.1 Выбор граничных условий и параметров задачи

Как обсуждалось выше, постановка задачи моделирования реального солнечного цикла отличается от постановки идеального модельного солнечного цикла лишь заменой граничных условий (4) на реальные, а также выбором длины цикла (кратного 11 годам). В представленных ниже результатах ищется решение с 22-летним периодом. В расчетах использовались данные параметров солнечного ветра с середины 1983 года до середины 2005 года. Нами также проводились расчеты с периодом 33 года, в которых данные брались с 1972 года по 2005 г. Результаты двух расчетов для периода с 1996 по 2006 г. практически совпали. В периоды, когда для того или иного параметра данных не имелось, мы использовали линейную интерполяцию.

Внутренняя граница расчетной области, как и прежде, принималась 1 а.е. Полагалось, что солнечный ветер на орбите Земли является сферически симметричным, то есть не зависит ни от гелиошироты, ни от гелиодолготы. В качестве граничных условий принимаются значения параметров солнечного ветра, измеренных на космических аппаратах IMP-8, Wind и других. Для получения данных по параметрам солнечного ветра мы использовали интернет-сервис NASA OMNIWeb, в котором данные измерений параметров солнечного ветра, полученные на различных космических аппаратах, обработаны и доступны для конечного пользователя. Мы используем для последующей обработки данные с временным разрешением в 1 час. На основе этих часовых данных вычисляются значения, осредненные по промежуткам времени 1 месяц и 1 год. Эти осредненные данные затем используются в расчетах.

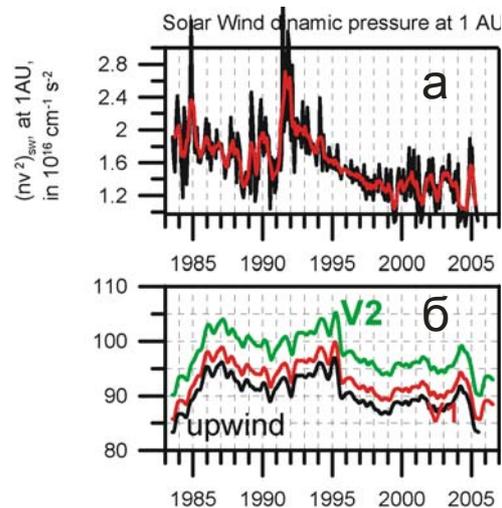


Рис. 3. а) Динамическое давление солнечного ветра на орбите Земли как функция времени, б) Положение гелиосферной ударной волны как функция времени в направлениях движения КА Voyager 1 (красная кривая), Voyager 2 (зеленая кривая) и в направлении навстречу набегающему потоку межзвездной среды

Важно отметить, что при вычислении средних значений необходимо проводить осреднение потоков массы, импульса и энергии, а только потом использовать

полученные средние потоки для вычисления средних значений величин плотности, скорости и температуры. Альтернативный метод получения средних величин состоит в простом арифметическом осреднении самих величин плотности, скорости и температуры. Однако, простое арифметическое осреднение приводит к заниженному значению величины осредненного динамического давления, так как $\langle a \rangle \langle b \rangle \neq \langle ab \rangle$.

Для того чтобы оценить эффекты, связанные с различными способами осреднения параметров солнечного ветра, нами были проведены специальные тестовые одномерные расчеты. В этих расчетах решалась задача об истечении нестационарного сверхзвукового сферически-симметричного источника (солнечного ветра) в среду с противодавлением. Влиянием нейтральной компоненты межзвездной среды в данном случае пренебрегаем. Рассмотрим сначала стационарный источник. Картина течения в этом случае состоит из расходящегося потока сверхзвукового солнечного ветра, движущегося с постоянной скоростью (приближенное решение: $V \sim \text{const}, n_p \sim 1/r^2$), ограниченного ударной волной, за которой поток становится дозвуковым, а течение близким к несжимаемому (приближенное решение: $V \sim 1/r^2, n_p \sim \text{const}$).

Положение ударной волны определяется равенством давления за скачком давлению в межзвездной среде. В случае нестационарного источника на описанное решение накладываются колебания, обусловленные изменениями граничных условий. При этом положение ударной волны будет также подвергаться колебаниям. В численных экспериментах мы сравнивали результаты следующих одномерных расчетов с различными граничными условиями: 1) расчеты с использованием неосредненных данных на орбите Земли. Для этого мы помимо данных с часовым разрешением использовали также данные с 30-секундным разрешением, которые доступны на сайте CA Wind; 2) расчеты с использованием данных, осредненных по первому способу осреднения (т.е. через вычисление потоков), 3) расчеты с использованием второго способа осреднения (простое арифметическое осреднение данных). Тесты показали, что результаты расчетов 1) и 2) практически идентичны. В расчетах 3) положение ударной волны существенно смещалось. Такой же эффект был обнаружен и в двухмерных расчетах. Если воспользоваться простым арифметическим осреднением, то при переходе от использования осреднения по периоду 1 месяц к осреднению по периоду 1 год происходит смещение положения гелиосферной ударной волны на 5 а.е. При осреднении по потокам такого смещения обнаружено не было.

В расчетах, результаты которых представлены на рис.3, были использованы осредненные за день значения параметров солнечного ветра. Так как эти данные являются сильно флуктуирующими, то для наглядности презентации показанное на рис.3а динамическое давление дополнительно усреднено по периоду в 27 дней.

Для завершения постановки задачи необходимо указать, как в расчетах с реальным солнечным циклом менялись частота фотоионизации, а также величина

$$\mu(V_r, r, t) = \left| \overline{F_{rad}} \right| / \left| \overline{F_{grav}} \right|,$$

которая представляет собой отношение силы радиационного солнечного давления и силы гравитационного притяжения Солнца. В модели полагается, что

$$\mu(V_r, r, t) = \mu_0(t) / \mu_1(V_r),$$

где $\mu_0(t)$ – изменение значения величины μ в центре линии при $V_r = 0$; $\mu_1(V_r)$ – спектр солнечного излучения в линии Ly- α . Здесь V_r имеет следующую связь с длиной волны λ : $V_r = c_0(\lambda - \lambda_0) / \lambda_0$, $\lambda_0 = 12.16$ нм – длина волн в центре линии; c_0 – скорость звука. Функции μ_0 и μ_1 приведены в работе [7]. Остальные граничные условия и параметры задачи принимались такими, как было описано в параграфе 2.

4.2 Реальный солнечный цикл: результаты и выводы

Расчеты с реальным солнечным циклом показали, что все основные выводы, которые были сделаны при исследовании идеального солнечного цикла, остаются в силе. Не повторяя их, мы ограничимся лишь рассмотрением двух частных результатов, которые являются важными для интерпретации экспериментальных данных.

На рис. 3,б показано изменение положения гелиосферной ударной волны в зависимости от времени. Видно, что в направлении навстречу набегающему потоку межзвездной среды в течение двух последних солнечных циклов ударная волна меняет свое положение от ~84 а.е. до ~97 а.е. Таким образом, ударная волна флуктуирует с амплитудой 6.5 а.е. вокруг своего среднего положения, которое находится на расстоянии 90.5 а.е. Одиннадцатилетнего периода, с которым ударная волна совершает колебания при «идеальном» солнечном цикле, в расчетах с реальным циклом не наблюдается. Флуктуации положения гелиосферной ударной волны повторяют флуктуации динамического давления солнечного ветра на 1 а.е. (рис. 3,а). Задержка флуктуаций положения гелиосферной ударной волны в направлении навстречу набегающему потоку межзвездной среды составляет 1 год. Например, максимум динамического давления в начале 2003 года приводит к максимальному удалению гелиосферной ударной волны в начале 2004 г. Быстрое уменьшение динамического давления в конце 2003, начале 2004 г. приводит к быстрому движению гелиосферной ударной волны в направлении Солнца, которое происходит годом позже. В самом деле, максимум скорости в направлении Солнца гелиосферная ударная волна достигает в декабре 2004 – январе 2005, т.е. в период, который включает в себя 15 декабря, день, когда космический аппарат Voyager 1 пересек гелиосферную ударную волну. В середине декабря скорость ударной волны была ~80 км/сек.

На рис. 3,б также показаны положения гелиосферной ударной волны в направлениях движения космических аппаратов Voyager 1 и Voyager 2. Из рис. 3,б видно, что расстояние до гелиосферной ударной волны в направлении космического аппарата Voyager 1 примерно на 2 а.е. больше, чем это расстояние в направлении навстречу набегающему потоку межзвезд-

ной среды. В направлении движения космического аппарата Voyager 2 расстояние до гелиосферной ударной волны на 4 а.е. дальше, чем расстояние в направлении КА Voyager 1. Как видно из рис. 3,б-в максимумы и минимумы расстояний до ударной волны в направлениях КА Voyager 1 и 2 имеют некоторую временную задержку по сравнению с максимумами и минимумами в направлении навстречу набегающему потоку межзвездной среды. Задержка происходит из-за большего гелиоцентрического расстояния до гелиосферной ударной волны в направлениях КА Voyager 1 и 2 и составляет ~1 месяц в направлении КА Voyager 1 и два месяца в направлении КА Voyager 2.

Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных исследований ОЭММПУ РАН № 3 «Интегрированные модели физической механики», грантов РФФИ № 07-01-00291, 05-02-22000-НЦНИ_а. В.И. был также поддержан грантами фондов «Династия» и «Поддержки отечественной науке».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Parker, E.N., The stellar-Wind regions, *Astrophys.J.* 134, 20-27, 1961.
2. Баранов В.Б., Куликовский А.Г., Краснобаев К.В. Модель взаимодействия солнечного ветра с межзвездной средой // ДАН СССР - 1970. - т.194. №1.
3. Izmodenov V., Velocity distribution of interstellar H atoms in the heliospheric interface // *Space Sci. Rev.* – 2001. - V.97(1/4) pp.385–388.
4. Izmodenov, V., Malama Yu. G., Ruderman M. Solar cycle influence on the interaction of the solar wind with Local Interstellar Cloud // *Astron. Astrophys.* – 2005a. - V.429. pp.1069–1080.
5. Scherer, K., Fahr, H. J., Solar cycle induced variations of the outer heliospheric structures, *Geophys. Res. Let.* 30, doi: 10.1029/2002GL016073, 2003
6. Zank G.P., Muller H.-R. The dynamical heliosphere // *J.Geophys. Res.* 2003. V. 108. № A6.P.SSH 7-1. CiteID 1240, DOI 10.1029/2002JA009689.
7. Izmodenov, V., Malama Yu. G., Ruderman M., Modeling of the outer heliosphere with the realistic solar cycle, *J. Adv. Space Res.* (2007), doi:10.1016/j.asr.2007.06.033.