

ДВУХКОМПОНЕНТНАЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ХОЛОДНОГО НЕЙТРАЛЬНОГО ГАЗА И ГОРЯЧЕЙ ПЛАЗМЫ С УЧЕТОМ ПРОЦЕССА ПЕРЕЗАРЯДКИ И ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Е. А. Проворникова^{1,3}, В.В. Измоленов^{1,2,3}

¹ Механико-математический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, 119992, Москва Воробьевы горы, 1

² Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, 119526, Москва, проспект Вернадского 101-1

³ Институт космических исследований Российской академии наук, 117997, Москва, ул. Профсоюзная 84/32

Аннотация

В работе представлена газодинамическая двухкомпонентная модель взаимодействия холодного нейтрального газа и горячей плазмы. Под нейтральным газом понимается газ атомарного водорода, плазма считается квазинейтральной. Две компоненты взаимодействуют между собой посредством резонансной перезарядки атомов водорода на протонах плазмы. В начальный момент времени предполагается равенство давлений в двух средах.

Показано течение нейтральной и заряженной компонент, возникающее после соприкосновения масс холодного газа и горячей плазмы. Определена структура сформировавшейся переходной области, разделяющей нейтральный газ и плазму, и распределение газодинамических параметров в ней. Также предложена модель взаимодействия нейтрального газа и плазмы, учитывающая как процесс перезарядки, так и процесс электронной теплопроводности в плазме.

Задача о взаимодействии холодного нейтрального газа с горячей плазмой имеет широкое применение в астрофизике. В частности перезарядка тяжелых ионов, присутствующих в горячей плазме, на атомах водорода приводит к возникновению рентгеновского излучения. В работе представлена оценка величины, характеризующей интенсивность рентгеновского излучения, для всей области, занимаемой смесью заряженных и нейтральных частиц, и показано, что в сформировавшемся переходном слое эта величина достигает максимума именно в сформировавшемся переходном слое.

TWO-COMPONENT GAS-DYNAMIC MODEL OF THE INTERACTION OF COLD NEUTRAL GAS AND HOT PLASMA INCLUDING THE CHARGE EXCHANGE PROCESS AND ELECTRON HEAT CONDUCTION

The gas-dynamic two-component model of the interaction of cold neutral gas and hot plasma is presented. It is assumed in the model that the gas consists of atomic hydrogen. Plasma is assumed to be quasi-neutral and magnetic fields are ignored. The components interact by charge exchange process of the H atoms and plasma protons, also the influence of electron heat conduction on the interface structure are investigated.

We demonstrate distribution of gas-dynamic parameters for plasma and neutral components in the interaction region and investigate time evolution of the interaction interface from the beginning of the interaction between neutral gas and plasma to very large time-intervals. Charge-exchange of atoms with heavy ions is a possible source of the X-ray emission. The charge-exchange rate as function of distance and time is presented. It is shown that in the interface the rate has maximum.

1. ВВЕДЕНИЕ

Области взаимодействия горячей плазмы с холодным нейтральным или частично-ионизованным газом встречаются в различных явлениях в астрофизике. Примерами могут служить: 1) гелиосферный ударный слой - область взаимодействия солнечного ветра с частично-ионизованной локальной межзвездной средой; 2) ударные слои в окрестности других звезд; 3) холодные нейтральные облака (Local Clouds), окруженные горячим разреженным газом Локального Пузыря (Local Bubble), - в одном из таких облаков движется гелиосфера, приближаясь к его границе; 4) области взаимодействия планетных атмосфер (экзосфер) с солнечным ветром; 5) плотные межзвездные облака, движущиеся в горячем газе, окружающем скопления галактик.

Во взаимодействии заряженной и нейтральной компонент важную роль играет процесс перезарядки. В работе Lallement (2004) было показано, что рентгеновское излучение, наблюдаемое от этих объектов,

может быть результатом процесса перезарядки тяжелых ионов и нейтральных атомов или молекул в областях взаимодействия.

При перезарядке между частицами происходит обмен импульсом и энергией, что приводит к существенному влиянию процесса на динамику взаимодействующих компонент. К примеру, в случае гелиосферного интерфейса - области взаимодействия солнечного ветра с межзвездной средой - учет процесса перезарядки во взаимодействии плазмы и нейтральной компоненты привел к теоретическим результатам, которые позднее были экспериментально доказаны (см. например, Baranov & Izmodenov, 2006; Izmodenov and Kallenbach, 2006).

В работе представлены результаты общей одномерной нестационарной задачи о взаимодействии нейтрального газа и плазмы. Результаты, полученные в рамках представленной двухкомпонентной модели, могут быть применены к целому ряду астрофизических объектов.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Задача о взаимодействии нейтрального газа и плазмы рассматривается в рамках двухкомпонентной модели, в которой одна из компонент – плазма, другая – нейтральные атомы Н. Оценки времен свободного пробега по кулоновским столкновениям в плазме и по перезарядке атомов Н на протона плазмы показали, что динамически важными процессами являются процесс перезарядки и процесс электронной теплопроводности в плазме. Далее будет описана постановка задачи и показаны результаты в случае, когда учитывается только процесс перезарядки атомов Н на протонах плазмы. Движение заряженной и нейтральной компонент описывается системой уравнений идеальной гидродинамики. В правых частях уравнений сохранения импульса и энергии стоят члены, отвечающие за передачу импульса и энергии в компоненту при перезарядке. В плазме температура электронов равна температуре протонов и определяется из уравнения состояния $p_p = 2n_p k T_p$, для нейтрального газа – $p_H = n_H k T_H$.

Выражения для членов, описывающих обмен импульсом и энергией при перезарядке, были получены в работе (McNutt, 1998) на основе интеграла столкновений в форме Больцмана в предположении максвелловости функций распределения атомов водорода и плазмы. Оценки длин свободного пробега атомов Н по процессам перезарядки Н-р и упругим столкновениям Н-Н, отнесенных к характерному размеру задачи, показали справедливость предположения распределения Максвелла для атомов водорода.

$$q_{2,p} = -q_{2,H} = n_p v_H (u_H - u_p)$$

$$q_{3,p} = -q_{3,H} = n_p v_H \left(\frac{u_H^2 - u_p^2}{2} + \frac{2U^* k}{U_M^*} \left(\frac{T_H}{m_H} - \frac{T_p}{m_p} \right) \right)$$

где $q_{2,p}$, $q_{3,p}$, $q_{2,H}$, $q_{3,H}$ – источниковые члены в уравнениях, описывающих течение плазмы и нейтральной компоненты соответственно; $v_H = n_H U_M^* \sigma_{ex}^{HP}$ – частота перезарядки. Для простоты мы предполагаем, что сечение процесса перезарядки σ_{ex}^{HP} постоянно. При таком допущении решение не зависит от величины сечения, которое, тем не менее, определяет характерный размер задачи. Характерные параметры задачи будут определены ниже. Начальные условия задаются следующим образом:

$$n_H(x) = \begin{cases} n_{H,1}, x \leq 0; \\ n_{H,2}, x > 0. \end{cases}; \quad T_H(x) = \begin{cases} T_1, x \leq 0; \\ T_2, x > 0. \end{cases}; \quad u_H(x) = 0$$

$$n_p(x) = \begin{cases} n_{p,1}, x \leq 0; \\ n_{p,2}, x > 0. \end{cases}; \quad T_p(x) = \begin{cases} T_1, x \leq 0; \\ T_2, x > 0. \end{cases}; \quad u_p(x) = 0$$

В начальный момент левое полупространство ($x < 0$) заполнено холодным нейтральным газом ($T_1 \sim 10^3$), правое ($x > 0$) – горячей плазмой ($T_2 \sim 10^6$). Решая задачу о взаимодействии нейтрального газа и плазмы, нужно было бы предполагать концентрации $n_{p,1}$, $n_{H,2}$ равными нулю, но численный метод решения требует, чтобы эти значения были ненулевыми. В расчетах они предполагаются близкими к нулю и такие что: $n_{p,1} \ll n_{H,1}$, $n_{H,2} \ll n_{p,2}$. При таких условиях решение не зависит

от значений $n_{p,1}$, $n_{H,2}$. Кроме того, считается, что в начальный момент времени нейтральный газ и плазма находятся в равновесии давлений: $T_1(n_{H1} + 2n_{p1}) = T_2(n_{H2} + 2n_{p2})$. Так как $T_1 \ll T_2$, то $n_{H1} \gg n_{p2}$.

Сформулированную задачу удобно решать в безразмерном виде. В качестве характерной длины выбрана длина свободного пробега атома водорода в плазме по перезарядке: $L = 1/n_{p2} \sigma_{ex}^{HP}$. Характерной скоростью выбрана тепловая скорость протонов горячей плазмы: $c_{p2} = \sqrt{2kT_2/m_p}$. Все концентрации отнесены к концентрации протонов в горячей плазме. Характерные параметры принимают следующие значения: $L \sim 10^{18}$ см, $c_{p2} \sim 10^6$ см/с, $n_{p2} \sim 10^{-3}$ см⁻³.

Решение задачи при таком выборе характерных величин определяется только одним параметром: $\hat{n} = n_{H1}/n_{p2}$. Другие параметры n_{H2}/n_{p2} , n_{p1}/n_{p2} малы и не влияют на решение. В расчетах, представленных в следующем параграфе, значение определяющего параметра предполагалось $\hat{n} = 10^3$. Полученное решение будет соответствовать всем явлениям, когда концентрации нейтрального газа и плазмы связаны соотношением $n_{H1} = n_{p2} * 10^3$. Значение параметра \hat{n} и условие равновесия давлений в начальный момент времени определяют отношение T_1/T_2 , где T_1 – температура нейтрального газа, T_2 – температура плазмы. Следовательно, представленное ниже решение соответствует парам ($T_1; T_2$), когда $T_2 = 500 * T_1$.

Задача решается численно методом Годунова. Разностная схема реализована на подвижной сетке. В процессе расчета выделялись газодинамические разрывы, что существенно повышает качество расчета. При таком подходе координатная сетка перестраивается на каждом шаге по времени в соответствии с распространением фронта волны разрежения, контактного разрыва и ударной волны в одной из компонент. Расчет проводится на сетке, содержащей 410 узлов. В качестве теста для численной схемы использовалась классическая задача о распаде произвольного разрыва.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Для начала следует охарактеризовать течение нейтральной и заряженной компонент, которое возникает после соприкосновения масс холодного газа и горячей плазмы в начальный момент времени. На Рис.1 (А1-А3, В1-В3) изображены распределения плотности, скорости и температуры нейтральной компоненты как функции времени и координаты. Графики (А1-А3) на рис.1 демонстрируют автомодельное решение задачи о распаде разрыва для нейтральной компоненты в случае когда процесс перезарядки нейтралов и протонов не учитывается. Структура течения нейтральной компоненты следующая: ударная волна и контактный разрыв распространяются вправо от точки $x = 0$. Ударная волна разделяет невозмущенный сильно разреженный нейтральный газ с низким давлением и сжатый нагретый газ, движущийся вправо, ограниченный с другой стороны контактным разрывом. Влево от $x = 0$ распространяется волна разрежения. В волне разрежения параметры течения меняются непрерывно от значе-

ний, характеризующих состояние газа слева от контактного разрыва, до начальных значений параметров нейтрального газа в левом полупространстве.

Включение процесса перезарядки атомов H на протонах плазмы существенно меняет описанную выше структуру течения нейтральной компоненты (B1-B3 Рис. 1). На начальных стадиях взаимодействия процесс перезарядки приводит к возникновению новых горячих нейтралов, вследствие этого давление нейтрального газа в переходной области возрастает в сравнении со случаем, когда заряженная и нейтральная компонента не взаимодействуют. Под влиянием сжатого газа контактный разрыв в нейтральной ком-

поненте ускоряется и распространяется быстрее, чем в случае без перезарядки. Максимум скорости течения водородного газа приходится на контактный разрыв (B2 Рис.1). Ускорение контактного разрыва приводит к ускоренному распространению ударной волны, движущейся перед ним, и увеличению ее интенсивности. К переднему фронту волны разрежения примыкает узкая область плотного нейтрального газа высокого давления, распространяющаяся вместе с фронтом. В этой области процесс перезарядки наиболее эффективен в силу большой концентрации нейтралов и протонов плазмы.

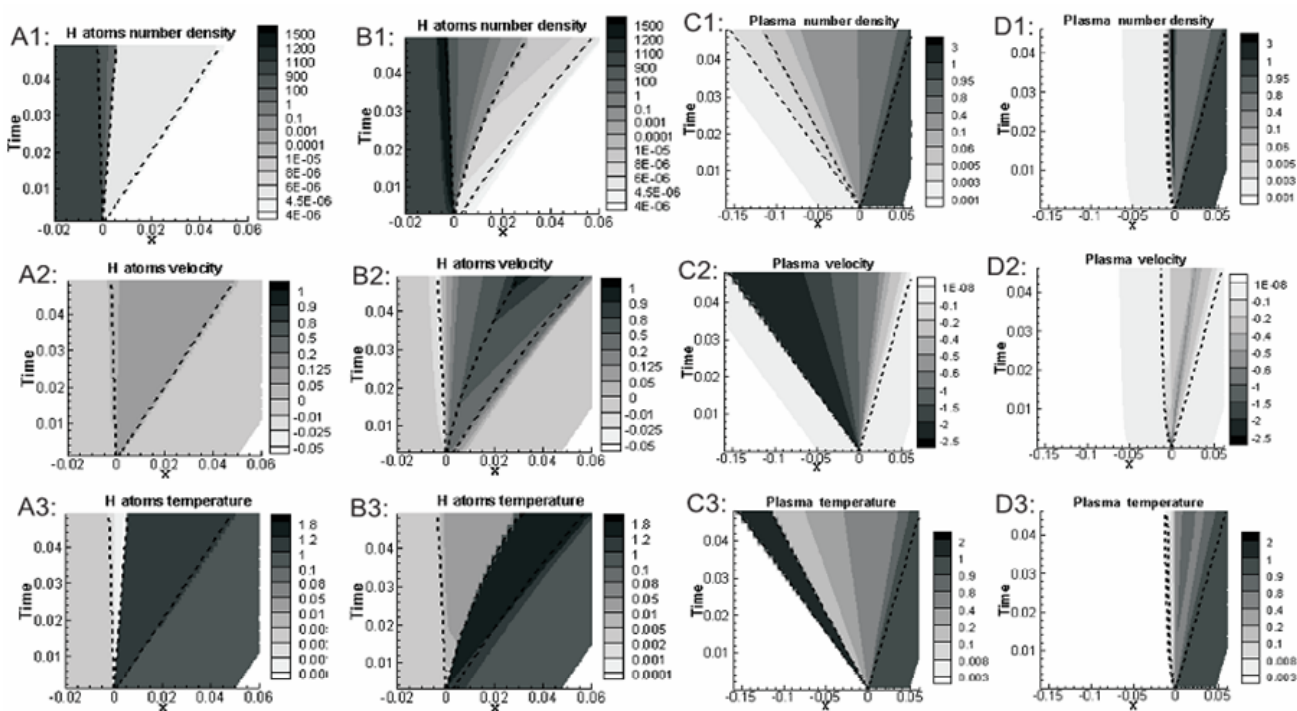


Рис. 1. Распределение безразмерных концентрации, скорости и температуры нейтрального газа (B1-B3) и плазмы (D1-D3) в случае взаимодействия атомов H с протонами посредством перезарядки в сравнении с решением задачи о распаде произвольного разрыва для нейтрального газа (A1-A2) и плазмы (C1-C3). Пунктирными линиями обозначены положения фронта волны разрежения, контактного разрыва и ударной волны: в нейтральном газе вправо от $x=0$ распространяется ударная волна и контактный разрыв, влево – волна разрежения; в плазме влево от $x=0$ – ударная волна и контактный разрыв, вправо – волна разрежения

На графиках C1-C3, D1-D3 Рис. 1 показаны распределения газодинамических параметров плазмы как функции координаты и времени, характеризующие течение заряженной компоненты. Автомодельное решение задачи о распаде разрыва в плазме (C1-C3 Рис. 1) показывает, что образуется ударная волна и контактный разрыв, движущиеся в область, занятую нейтральным газом, и волна разрежения, распространяющаяся в невозмущенную горячую плазму. Влияние нейтралов на течение плазмы при перезарядке проявляется в следующем (D1-D3 Рис.1): газодинамические разрывы в плазме существенно тормозятся, и скачки параметров на разрывах становятся слабыми; обмен импульсом между нейтральной и заряженной компонентами приводит к уменьшению скорости течения плазмы. За счет обмена энергией при перезарядке холодных атомов H и горячих протонов в области взаимодействия образуются новые холодные протоны, что приводит к охлаждению нагретой за ударной волной плазмы.

Из распределений параметров нейтрального газа и плазмы на больших временных интервалах A1-A3, B1-B3 Рис.2 можно сделать вывод, что основные особенности, характеризующие структуру сформировавшейся переходной области, остаются неизменными и на больших временах после начала взаимодействия. Следует отметить следующее: 1) вблизи границы, разделяющей нейтральный газ и плазму при $t=0$, образуется узкая область, где концентрация плазмы достигает максимума; 2) в этой области значительны концентрации как заряженной, так и нейтральной компоненты; 3) температура обеих компонент монотонно изменяется в переходном слое от значения T_1 в холодной нейтральной среде до значения T_2 в горячей плазме. При этом скорости течения нейтральной и заряженной компонент уменьшаются со временем как следствие обмена импульсом при перезарядке.

Если предположить, что в плазме присутствуют тяжелые ионы, то при перезарядке иона и атома H образуется рентгеновский фотон. Интенсивность рентге-

новского излучения, обусловленного перезарядкой, можно охарактеризовать величиной, равной числу актов таких перезарядок:

$$\beta_i = n_i n_H U \sigma_{ex}^{iH} = \frac{n_i}{n_p} \frac{\sigma_{ex}^{iH}}{\sigma_{ex}^{pH}} n_p n_H U \sigma_{ex}^{pH} = \frac{n_i}{n_p} \frac{\sigma_{ex}^{iH}}{\sigma_{ex}^{pH}} \beta.$$

Результаты, представленные выше, позволяют определить величину β для всей области, занимаемой смесью заряженных частиц и нейтралов. Тогда, зная отношения концентраций ионов и протонов в плазме и соответствующих сечений перезарядки, можно вычислить β_i .

На графике C2 Рис.2 показана пространственно-временная зависимость безразмерной величины $\beta = n_p n_H U \sigma_{ex}^{pH}$. Также приведена зависимость этой величины от определяющего параметра задачи (C1 Рис.2) $\hat{n} = n_{H1}/n_{p2}$. Из представленных результатов следует, что в образовавшемся переходном слое величина β , характеризующая интенсивность процесса перезарядки, имеет максимум, значение которого на 3-4 порядка больше, чем в нейтральном газе и горячей плазме.

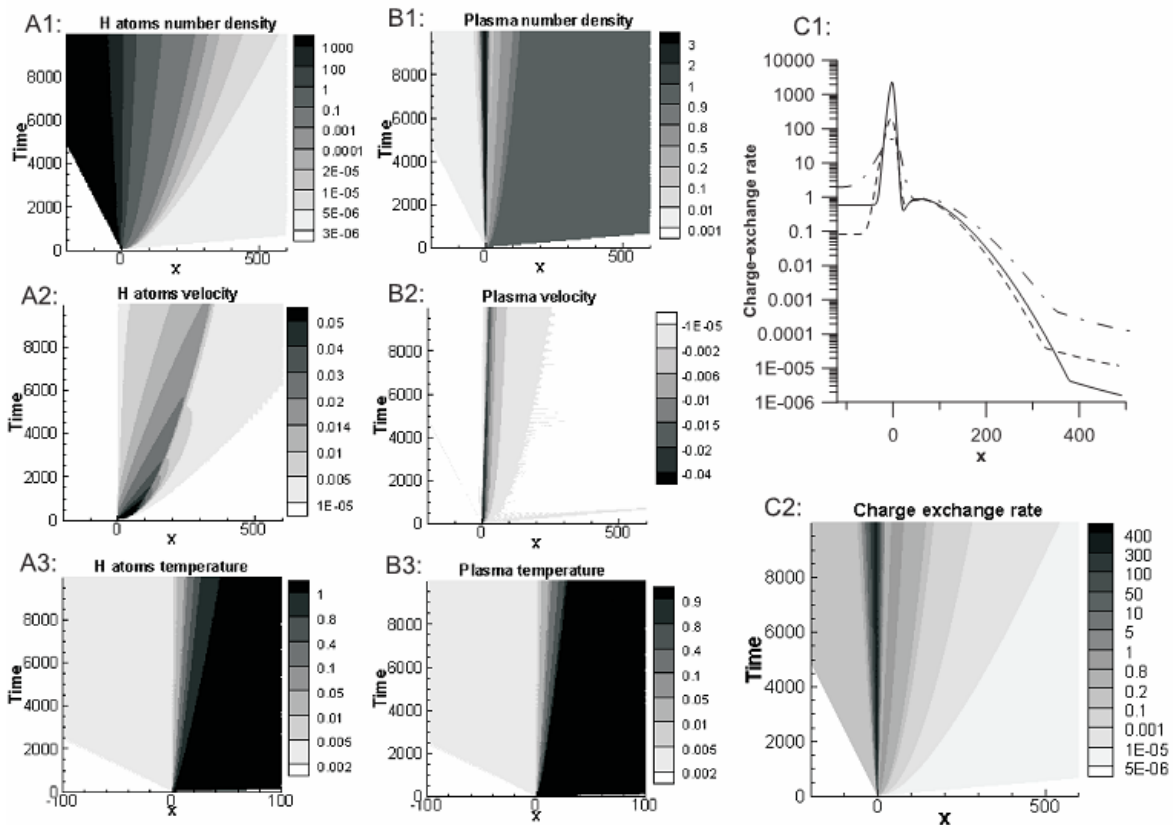


Рис.2. A1-A3, B1-B3: Распределения параметров нейтрального газа (A1-A3) и плазмы (B1-B3) как функции координаты и времени при $\hat{n} \leq 10^4$; C1: Количество актов перезарядок атомов H и протонов плазмы β при $\hat{n} = 10^4$ как функция координаты x: сплошная линия - $\hat{n} = 10^4$, пунктирная линия - $\hat{n} = 10^3$, штрихпунктирная линия - $\hat{n} = 10^2$; C2: Распределение величины β в зависимости от координаты и времени $\hat{n} = 10^3$

Другим важным процессом, который следует учесть и который будет рассмотрен в дальнейшем, является процесс электронной теплопроводности в плазме. Коэффициент электронной теплопроводности сильно зависит от температуры $\chi \sim T^{5/2}$ и при больших значениях T поток тепла $\vec{q} = \chi \text{grad}T$ дает существенный вклад в уравнение сохранения энергии. Чтобы выявить эффект, связанный с электронной теплопроводностью, рассматривается предельный случай, когда течение плазмы считается изотермическим при температуре T_2 . Такой подход объясняется тем, что электронная теплопроводность приведет к быстрому прогреванию плазмы в переходном слое.

Для описания движения смеси нейтралов и протонов используются те же уравнения, кроме уравнения энергии для плазмы. Вместо него записывается условие изотермичности: $T(t, x) = T_2$.

В работе рассматривалась задача о взаимодействии холодного нейтрального газа и горячей плазмы в одномерной постановке. Существенным является то, что предложена двухкомпонентная модель и компоненты взаимодействуют через процесс перезарядки. В дальнейшем планируется исследовать влияние процесса электронной теплопроводности, расширить модель на двумерный случай, рассмотреть задачу о движении холодного нейтрального облака относительно окружающей его горячей плазмы. В дальнейшем задачу также планируется рассмотреть в рамках трехкомпонентной (электроны, протоны, атомы) модели среды.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 05-02-22000, фонда "Династия".

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

n_p – концентрация протонов;
 n_H – концентрация атомов;
 u_p – скорость атомов;
 u_H – скорость протонов;
 T_p – температура протонов;
 T_H – температура атомов;
 k – постоянная Больцмана;
 n_i – концентрация тяжелых ионов;
 σ_{ex}^{pH} – сечение перезарядки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. On the contribution of charge-exchange induced X-ray emission in the ISM and ICM, R. Lallement, 2004, *Astron. Astrophys.* 422, 391 – 400
2. The physics of the heliospheric boundaries (V. V. Izmodenov, R. Kallenbach),ISSI, ESA Publications Division, 2006
3. Simulation of the heliosphere: Model (R. L. McNutt, J. Lyon, C. C. Goodrich), 1998, *J. Geophys. Res.*, V. 103 p. 1905-1912
4. Baranov, V.B., Izmodenov V.V., *Fluid Dynamics*, 2006, Vol. 41, N 5, 689-707