

УДК 523.62-726

## МАГНИТНАЯ ГИДРОДИНАМИКА КОСМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЫ И ПАРАДОКСЫ СОЛНЕЧНО-ЗЕМНОЙ ФИЗИКИ

С.А. Гриб

### SPACE PLASMA MAGNETOHYDRODYNAMICS AND SOLAR-TERRESTRIAL PHYSICS PARADOXES

S.A.Grib

Кратко обсуждается история исследований космического пространства по измерениям значений параметров плазмы на аппаратах и с помощью магнитогидродинамической теории.

Указывается на парадоксально верное описание как стационарного, так и нестационарных потоков межпланетной плазмы в рамках представлений о сплошной МГД-среде при сильно бесстолкновительном характере этой среды. Выделяются также некоторые еще нерешенные проблемы солнечно-земной физики.

The history of space research connected with the observations of the in situ plasma parameters and the magnetohydrodynamic theory is briefly discussed. The correct in paradoxical way description of both stationary and unsteady flows of space collisionless plasma in the frame of MHD medium is indicated. Some still unsolved problems of solar-terrestrial physics are underlined.

#### Введение

Представляется интересным проследить за основными вехами развития исследований космической плазмы, заполняющей межпланетное пространство от поверхности Солнца до межзвездной среды.

Еще в 50-х г. 20-го века заговорили о возможном наполнении межпланетного пространства плазмой солнечного происхождения, непосредственно связанной с короной Солнца. В 1951 г. Л. Бирман [1] на основе изучения ионизированных хвостов комет предположил присутствие в космическом пространстве солнечного корпускулярного излучения. В октябре 1957 г. в СССР был запущен первый искусственный спутник Земли, и тогда же Е.А. Пономарёв в своей кандидатской диссертации указал на возможность существования корпускулярного потока протонов и ионов, истекающего из короны Солнца [2]. В 1958 г. американский учёный Ю. Паркер приближенно получил решение, описывающее сверхзвуковое истечение корональной плазмы из Солнца в гидродинамическом приближении [3, 4]. Течение было названо солнечным ветром. Затем в 1959 г. группа учёных под руководством К.И. Грингауза (Москва, СССР) на основе данных советских аппаратов «Луна-2» и «Луна-3» подтвердила теорию Паркера. В 1962 г. данные американского аппарата «Маринер-2» также подтвердили теорию солнечного ветра. В 1980-е г. исследования движущихся от Солнца по стационарному потоку солнечного ветра волн и разрывных структур осуществлялись под руководством М.Драйера (США, Булдэ) по проекту STIP (Study of Travelling Interplanetary Phenomena, или Изучение движущихся межпланетных явлений). В 1990-е г. эта работа была продолжена в рамках проекта SOLTIP (Solar Connection with Transient Interplanetary Phenomena).

Основным результатом этих исследований, включающих экспериментальные исследования, проводимые на космических аппаратах, и эффективное использование численных и аналитических методов магнитной гидродинамики (МГД), является

непосредственное обнаружение для ряда событий связи между внезапным возмущением солнечной плазмы на поверхности, в хромосфере и в короне Солнца с ударным возмущением солнечного ветра, приводящим к сжатию магнитосферы Земли.

Две тысячи седьмой год объявлен Международным гелиофизическим годом, связанным с изучением стационарных и нестационарных явлений, происходящих во всей области гелиосферы, окружающей Солнце со всеми планетами солнечной системы и заполненной потоком солнечного ветра.

На рис. 1 схематически [5] даётся модель гелиосферы с вытекающим из короны Солнца солнечным ветром и с межпланетным магнитным полем, образующим спираль Архимеда. Показана граница гелиосферы, или гелиопауза, и возможное положение двух ударных фронтов: внутри гелиосферы (из-за торможения сверхальфвеновского потока солнечного ветра) и перед гелиопаузой со стороны апекса.

#### Главные звенья теории

Интересно обратить внимание на то, что первоначально [4] Ю. Паркер не учитывал влияния магнитного поля на поток плазмы, исходящий из высокотемпературной короны Солнца, решая известное в гидродинамике уравнение Бернулли, и при этом получил результат, указывающий на возникновение

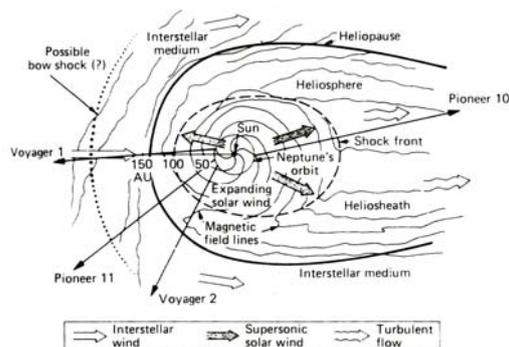


Рис. 1. Модель гелиосферы.

сверхзвукового потока солнечного ветра. На самом деле именно влияние магнитного поля, переносимого потоком, заставляло во многом идеально проводящую электрический ток бесстолкновительную плазму вести себя гидродинамически как сплошная среда. Позднее, после получения Паркером сверхзвукового решения, было построено много модификаций теории солнечного ветра и дано обоснование применения гидродинамики и магнитной гидродинамики к описанию поведения межпланетной плазмы.

Пользуясь стационарным гидродинамическим уравнением движения и уравнением состояния, можно [6] записать уравнение Бернулли для скорости солнечного ветра и газокINETического давления  $p$  с использованием гравитационной постоянной  $G$  и с обычным показателем политропы  $\alpha$ , а также с учетом уравнения неразрывности в виде

$$\frac{1}{2}v^2(r) - \frac{GM_{\odot}}{r} + \frac{\alpha}{\alpha-1} \frac{p_0 v_0 A_0}{\rho_0 v A} = \frac{1}{2}v_0^2 - \frac{GM_{\odot}}{r} + \frac{\alpha}{\alpha-1} \frac{p_0}{\rho_0}.$$

Введя безразмерные величины

$$\xi = \frac{r}{r_0}, \quad u^2 = \frac{\rho_0 v^2}{2p_0}, \quad H = \frac{GM_{\odot} \rho^2}{r_0 p_0},$$

перепишем это уравнение в виде

$$u^2 + \frac{\alpha}{\alpha-1} \left( \frac{u_0}{u\xi} \right)^{\alpha-1} - \frac{H}{\xi} = u_0^2 + \frac{\alpha}{\alpha-1} - H \equiv u_1^2,$$

где  $u_1^2$  – константа, зависящая от начальных условий на некотором фиксированном уровне отсчёта  $r_0$ .

Общий вид асимптотических численных решений при стремлении расстояния (в безразмерном виде) к 0 и к бесконечности даётся на рис. 2, из которого видно, что физически реализуемым является только проходящее через критическую точку, т. е. указывающее на возникновение сверхзвукового потока. Именно это приближенное решение было подтверждено непосредственным наблюдением на космических аппаратах.

Первым парадоксом солнечно-земной физики можно считать удивительное и верное предсказание

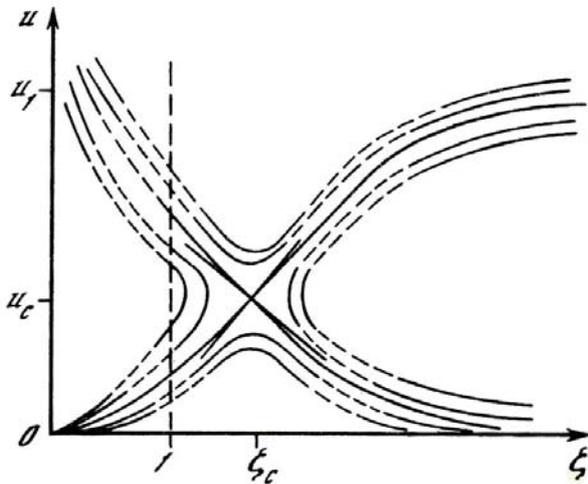


Рис. 2. Кривые, представляющие решение уравнения Бернулли для потока корональной плазмы.

истечения корональной плазмы, достигающей сверхзвуковой (или сверхальфвеновской) скорости на расстоянии в несколько радиусов Солнца от его поверхности и имеющей скорость бесстолкновительного потока протонов солнечного ветра порядка 400 км/с вблизи от орбиты Земли, на основании простого решения уравнений столкновительной гидродинамики.

Очевидно, что «вмороженное» межпланетное магнитное поле при радиусе Лармора порядка 100 км для протонов, вращающихся вокруг силовых линий, заставляет поток вести себя как сплошная среда при характерных размерах задачи, много больших радиуса Лармора.

После описания поведения стационарного потока солнечной плазмы гидродинамическими и МГД дифференциальными уравнениями представилось возможным применить МГД-представления о стационарных и нестационарных сильных разрывах к описанию разрывных структур короны Солнца и солнечного ветра.

Уже непосредственные наблюдения короны Солнца во время солнечных затмений показали наличие стационарных разрывных структур [7, 8]. Так, во время затмения в феврале 1980 г. С. Кучми указал на возможное наличие тангенциальных разрывов не только в солнечном ветре, но и в короне Солнца [7].

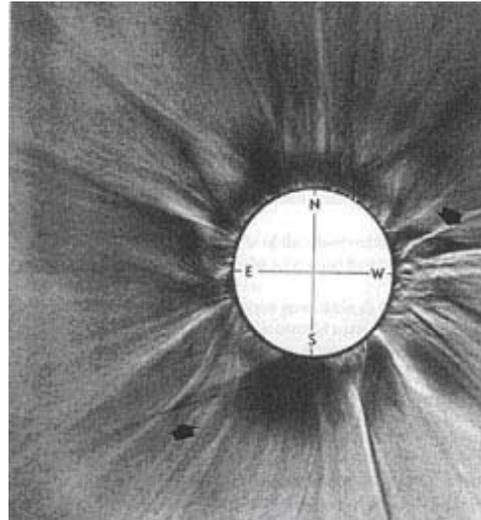


Рис. 3. Плазменные структуры короны Солнца с границами типа тангенциальных разрывов.

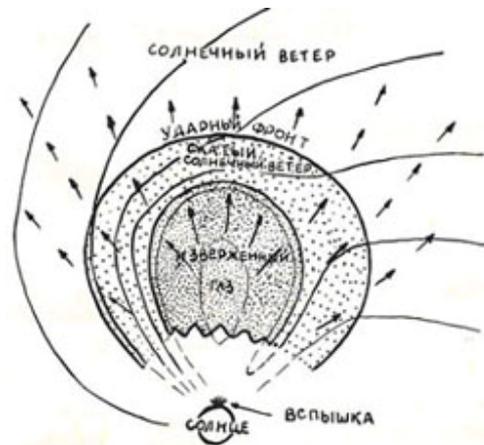


Рис. 4. Модель возникновения вспышечной ударной волны.

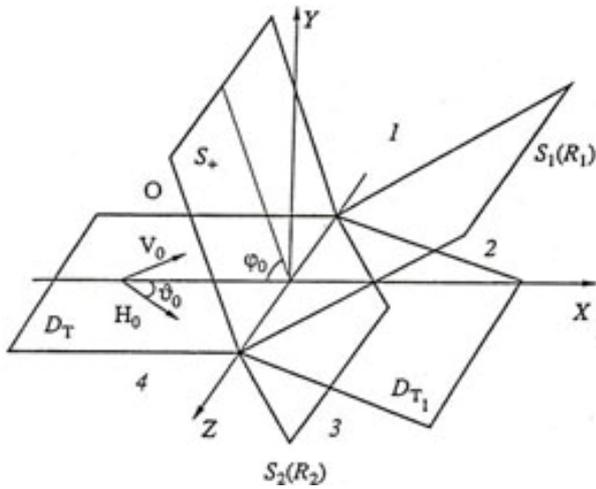


Рис. 5. Модель взаимодействия солнечной быстрой ударной волны с корональным тангенциальным разрывом.

В силу того что на Солнце часто возникают ударные возмущения как от хромосферных вспышек, так и от других внезапных всплесков энергии [9], интересно изучить взаимодействие солнечной быстрой ударной волны с корональным тангенциальным разрывом. Рисунок 4 демонстрирует модель А. Хундхаузена, описывающую возникновение солнечной вспышечной ударной волны [9].

Солнечная быстрая ударная волна  $S^+$  будет взаимодействовать с корональным тангенциальным разрывом ДТ по схеме, представленной на рис. 5 [7, 8]. Столкновение солнечной ударной волны с тангенциальным разрывом приведёт к возникновению преломлённой быстрой или медленной (в редких случаях [8]) ударной волны и отраженной быстрой волны разрежения (при падении величины плотности на начальном тангенциальном разрыве) или быстрой ударной (при росте величины плотности на тангенциальном разрыве) волны, сдуваемой потоком от Солнца.

Граница корональной дыры может быть так же, как и граница коронального стримера, представлена в виде тангенциального разрыва, и наклонное падение на неё солнечной быстрой ударной волны может привести к возникновению преломлённой медленной ударной волны [7, 8]. При малой величине плазменного параметра  $\beta$ , характеризующего отношение газокINETического давления плазмы к давлению магнитного поля, медленные ударные волны могут быть относительно устойчивыми, испытывая сильное затухание в потоке солнечного ветра при значении величины параметра  $\beta$ , близком к 1 [10].

Вторым парадоксом солнечно-земной физики можно считать присутствие устойчивых МГД-разрывов в короне Солнца и в бесстолкновительной среде солнечного ветра при наличии плазменных волн и неустойчивостей, определяющих структуру разрыва. При отсутствии сильных разрывов поток будет описываться классическими дифференциальными МГД-уравнениями [11], допускающими использование решения Римана для простой волны. Для изучения поведения космической плазмы, анизотропной по давлению, при наличии поперечной компоненты магнитного поля можно использовать

дифференциальные уравнения анизотропной МГД в приближении Чу–Гольдберга–Лоу [12]. Эти уравнения переходят в классические МГД-уравнения в случае изотропии газокINETического давления плазмы. В то же время сильные разрывы, подчиняясь интегральным законам сохранения и уравнениям Максвелла, будут удовлетворять условиям динамической совместности, которые для МГД ударной волны выглядят следующим образом [11]:

$$\{\rho v_n\} = 0,$$

$$\{p + \rho V_n^2 + H_\tau^2 / 8\pi\} = 0,$$

$$\{\rho V_n \bar{V}_\tau - H_n \bar{H}_\tau / 4\pi\} = 0,$$

$$\left\{ \rho V_n \left( \frac{p}{\gamma - 1} + \frac{V^2}{2} \right) + p V_n + \frac{H_\tau^2}{4\pi} - \frac{H_n (\bar{H}_\tau \bar{V}_\tau)}{4\pi} \right\} = 0,$$

$$H_n \{\bar{V}_\tau\} = \{\bar{H}_\tau \bar{V}_\tau\},$$

$$\{H_n\} = 0,$$

где  $n$  – нормаль к плоскости волны;  $\tau$  – касательное направление,  $\{\dots\}$  – означают скачок величины, заключенной в скобках, при переходе через разрыв.

В МГД-приближении при рассмотрении проблемы Римана–Кочина можно численно изучить падение солнечного вращательного разрыва А на границу неоднородности, представляемой как контактный разрыв С, и показать [13] возникновение диссипативной ударной волны S в короне Солнца за счёт преломления солнечного бездиссипативного вращательного разрыва А через контактный разрыв С в переходной области от хромосферы к короне:  $AC \rightarrow RC'S$  ( $R$  – отражённая быстрая волна разрежения). Возможно, такой результат указывает на физический механизм, лежащий в основе парадоксального нагрева корональной плазмы.

К настоящему времени в связи с наблюдениями за корональными выбросами массы, раньше называемыми транзиентами, накопилось много данных по макроскопическому движению объектов типа магнитных облаков по потоку солнечного ветра. Особенности магнитных облаков являются сильные (по сравнению с газокINETическим давлением) магнитные поля, плавное вращение направления магнитного поля при переходе через границу и часто понижение величины концентрации частиц [14]. Приход магнитных облаков к области системы головная ударная волна – магнитосфера Земли часто сопровождается развитием геомагнитной бури, и поэтому учёт таких плазменных образований имеет большое значение при изучении космической погоды.

Некоторые авторы [15] обратили внимание на возмущение магнитного облака бегущей от Солнца быстрой ударной волной и при этом указали на возможную аналогию между столкновением ударной волны с магнитным облаком и столкновением с магнитосферой Земли. В этой аналогии существенным является предположение о границе облака и магнитопаузы как о МГД тангенциальном разрыве.

Расчет затухания быстрых ударных волн в магнитосферной плазме

$M$	$r_1$	$r_2$	$r_3$	$r_4$	$M_{e1}$	$M_{e2}$	$M_{e3}$	$M_{e4}$
1.5	1.008	1.006	1.005	1.004	1.007	1.005	1.004	1.004
3.5	1.041	1.030	1.025	1.021	1.031	1.023	1.019	1.017
4.5	1.053	1.039	1.032	1.028	1.040	1.030	1.025	1.022
5.5	1.062	1.045	1.037	1.032	1.047	1.034	1.029	1.025
8	1.081	1.062	1.051	1.044	1.064	1.047	1.039	1.034
9	1.095	1.070	1.058	1.050	1.072	1.053	1.044	1.038

Магнитные облака во многом парадоксально просто описываются в рамках классической МГД [15].

Далее, в заключение обсуждения некоторых особенностей короны Солнца, солнечного ветра и солнечных медленных ударных волн, сильно подверженных затуханию Ландау [10], можно указать ещё на одну не до конца решённую проблему. Неоднократно предполагалось, что отсоединенная медленная ударная волна перед плазменным сгустком, движущимся от Солнца, из-за справедливости теоремы компланарности для компонент магнитного поля по отношению к ударному фронту будет иметь выпуклость по направлению к Солнцу, как в случае обратной ударной волны, но, к сожалению, из-за отсутствия достаточного количества данных это предположение не является до конца проверенным. Эту проблему уже скоро можно будет решить по данным проекта СТЕРЕО.

**Взаимодействие разрывов солнечного ветра с магнитосферой Земли**

Проблема взаимодействия солнечных ударных волн с системой головная ударная волна–магнитосфера Земли решалась как задача о распаде произвольного разрыва – и для головного фронта, и для магнитосферы Земли [16] – с использованием МГД аналитических методов. Недавно проделанный численный расчёт [17] подтвердил полученный ранее результат [16], говорящий об отражении солнечной быстрой ударной волны  $S_2$  от магнитопаузы  $C_m$  в виде быстрой волны разрежения  $R_5$  и преломлении внутрь магнитосферы с сохранением ударного диссипативного характера (рис. 6).

Движение МГД ударной волны, преломлённой в магнитосферу Земли, при наличии поперечного геомагнитного поля можно описать обобщённым законом Крюссара–Ландау [18], указывающим на зависимость скачка полного давления от начального значения, расстояния  $r$  и постоянной  $A$ :

$$\overline{\Delta p} = \frac{(\overline{\Delta p})_0}{\sqrt{1 + \frac{3}{2}Ar}}$$

Можно обратить внимание на численное соответствие данного закона моделям ISPM и HAF, используемым для прогноза космической погоды. Расчёт затухания преломлённых в магнитосферу волн

представлен в виде таблицы, из которой следует сохранение ударного диссипативного характера у преломлённых волн (эффективное число  $M$  больше 1). Здесь  $r_1, r_2, r_3, r_4$  – величины изменения напряженности на фронте волны для расстояний в  $R_E, 2R_E, 3R_E$  и  $4R_E$  от магнитопаузы,  $M$  – число Маха волны в потоке солнечного ветра,  $M_{ei}$  – эффективное число Маха для соответствующего  $r_i$ . Приведенные значения соответствуют  $A = \text{tg}30^\circ = 0.58$  и изменению плотности на границе магнитосферы, равному 10. В заключение отметим наличие [19] асимметрии «заря–сумерки» наклонного МГД-взаимодействия солнечной ударной волны с фронтом головной волны перед магнитосферой Земли, показанное в плоскости  $xu$  на рис. 7, где падающая ударная волна обозначена как  $S_f$ , точки пересечения с головным фронтом –  $D_i$ , вращательный разрыв как  $A$ , волна разрежения как  $R$  и контактный разрыв как  $C$ .

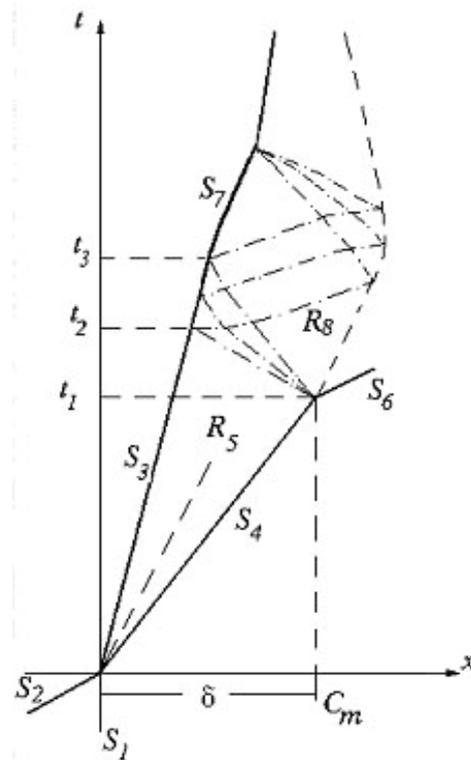


Рис. 6. Схема взаимодействия солнечной ударной волны  $S_2$  с системой головная ударная волна  $S_1$  – магнитопауза  $C_m$  на плоскости  $xt$ .

