

Лекция 4.

СОЛНЕЧНЫЙ ВЕТЕР, МЕЖПЛАНЕТНОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

В 4-ой лекции рассмотрены вопросы, касающиеся солнечного ветра и межпланетного магнитного поля. В лекции используется обзор по физике солнечного ветра профессора М.И. Пудовкина.

Солнечный ветер (СВ) - поток плазмы, электронов и ионов, преимущественно протонов, из солнечной короны. Истечение солнечной плазмы (только во время солнечных вспышек) было предсказано английским геофизиком С. Чепмэн и его коллегой В. Ферраро в 1931г. для объяснения природы магнитных бурь.

Общие характеристики

Солнечный ветер имеет *бимодальный* характер, это смесь медленного, спокойного и быстрого, скоростного потоков. Скоростной поток в свою очередь делится на квазистационарные и спорадические потоки, имеющие разную природу.

Спокойный солнечный ветер - постоянный поток солнечной плазмы над *корональными стримерами*. Скорость спокойного солнечного ветра 300-500км/с, плотность 10-15 см⁻³.

Давление — величина производная от скорости и плотности плазмы солнечного ветра и вычисляется по формуле:

$$P = 1.6726 \cdot 10^{-6} \cdot n \cdot V^2,$$

где P – давление [нПа], n – плотность частиц [см⁻³], V – скорость частиц [км/с].

Квазистационарные высокоскоростные потоки солнечной плазмы, ответственные за рекуррентные геомагнитные возмущения, наблюдаются над *корональными дырами*. Скорость здесь повышена до 700-1000 км/с, плотность понижена (3-4 см⁻³).

Рекуррентные потоки, с 27-дневной периодичностью, связывались с определенными областями на Солнце, которые раньше назывались *М-областями* (отсюда и *М-потоки* солнечного ветра) а теперь называются корональными дырами.

В минимуме солнечной активности эти два потока солнечного ветра пространственно разделены: стримеры и спокойный поток СВ наблюдаются ближе к плоскости экватора, тогда как корональные дыры смещены к полюсам, выше 70°. Это видно по наблюдениям на КА ULISUS, орбита которого поднималась над плоскостью эклиптики.

Хотя корональные дыры в основном приполюсные, однако значимый вклад в магнитную активность вносят КД, вытянутые с полюса через экватор. Особенно велика их активность на спадающей ветви цикла.

Там, где скоростной поток догоняет медленный, образуется ударная волна, где плотность частиц и напряженность магнитного поля выше, чем в остальной части потока. Поскольку рекуррентные потоки высокоскоростного солнечного ветра существуют в течение нескольких 27-дневных оборотов Солнца, и поскольку может одновременно существовать 2- 4 потока, разнесенных по долготе, в солнечном ветре образуется т.н. *секторная структура* с несколькими фронтами, приход которых к Земле вызывает *рекуррентные магнитные возмущения* - серии суббурь или умеренные магнитные бури.

Спорадические высокоскоростные потоки - относительно кратковременные и сложные по структуре образования, ответственные за спорадические магнитосферные возмущения, в частности с ними связаны большие магнитные бури.

Скорость солнечного ветра в спорадических потоках достигает 1200 км/с; на переднем фронте и впереди его образуется ударная волна, здесь происходит ряд процессов, приводящих, в частности, к ускорению энергичных частиц.

Долгое время предполагалось, что спорадические потоки в солнечном ветре обусловлены солнечными вспышками, в настоящее время в качестве источника чаще называют *корональные выбросы массы* (CME, *Coronal Mass Ejection*), хотя роль солнечных вспышек полностью отвергать нет оснований.

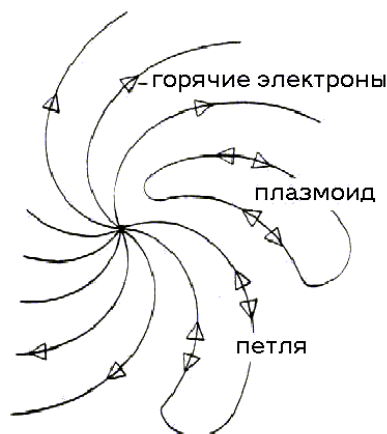


Рис. 1. Межпланетное магнитное поле

Межпланетное магнитное поле (ММП, IMF)

Плазма солнечного ветра обладает высокой проводимостью настолько, что магнитные силовые линии солнечной короны выносятся ею в межпланетное пространство. Динамическое давление плазмы (или плотность энергии) много выше магнитного давления в результате чего магнитное поле вытягивается в виде спирали Архимеда (Спираль Паркера). Идеальная геометрия нарушается в присутствии одного или нескольких скоростных потоков.

В вакууме магнитное дипольное поле Солнца (10^{-4} тесла) должно убывать как расстояние в кубе и на орбите Земли имеет порядок 10^{-11} тесла. Но по измерениям оно составляет около 10^{-9} тесла. По МГД (MHD) теории движение проводящей жидкости в магнитном поле индуцирует электрическое поле, которое в свою очередь создает магнитное поле (МГД-динамо).

МГД генератор, создающий электрическое поле, работает в магнитосфере и ионосфере равно как и во многих галактических магнито-плазменных объектах и является одним из основных элементов возбуждения магнитосферных возмущений, магнитных бурь и суббурь.

Воздействие солнечного ветра на магнитосферу вызывает поджатие магнитосферы в головной части и возрастание напряженности поля. Эта проблема рассматривается в рамках задачи Чепмэна-Феррарио (1931 г.).

Агентом, создающим сжатие, является электрически нейтральная плазма солнечного ветра. Когда облако плазмы встречает внешнее магнитное поле Земли, отдельные протоны и электроны отражаются под действием силы, перпендикулярной к магнитному полю и направлению движения частиц. Движение большого числа протонов и электронов создает электрический ток, который в свою очередь создает собственное магнитное поле. Индуцированное поле уничтожает нормальное геомагнитное поле в облаке и усиливает нормальное поле в области между облаком и Землей. Облако

продолжает продвигаться до тех пор, пока его энергия не израсходуется на сжатие геомагнитного поля.

Возникшая в результате граница называется головной ударной волной.

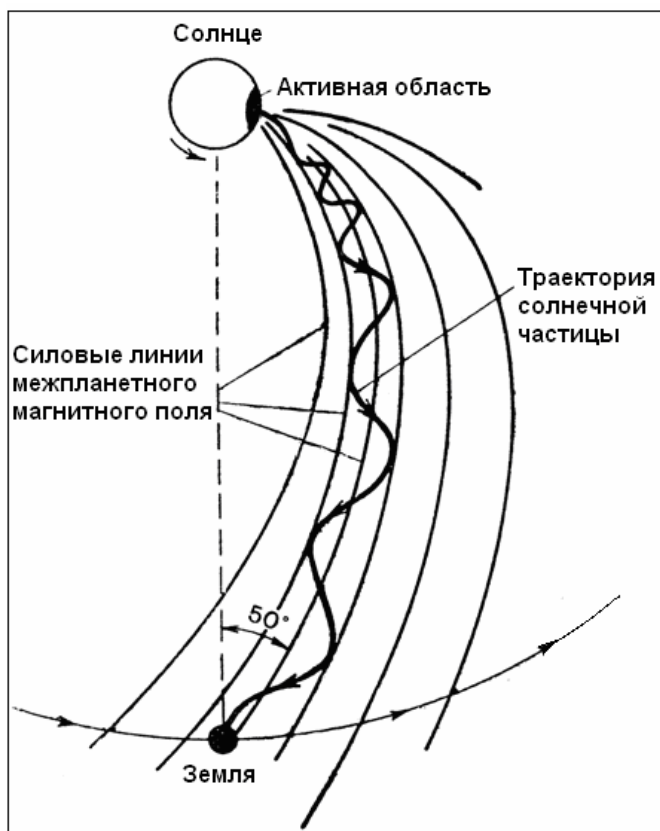


Рис. 2. Солнце, солнечный ветер, межпланетное магнитное поле и Земля.

СОЛНЕЧНЫЙ ВЕТЕР.

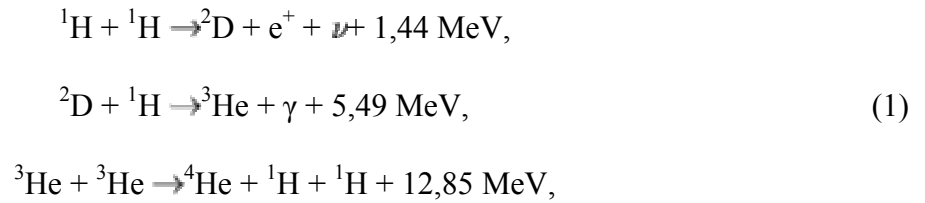
(проф. М.И.ПУДОВКИН, Санкт-Петербургский государственный университет).

Как показывают наблюдения, выполненные на борту спутников Земли и других космических аппаратов с высоким апогеем орбиты, межпланетное пространство заполнено чрезвычайно активной средой - плазмой солнечного ветра. Солнечный ветер зарождается в верхних слоях атмосферы Солнца, и его основные параметры определяются соответствующими параметрами солнечной атмосферы. Однако связь между физическими характеристиками солнечного ветра вблизи орбиты Земли и физическими явлениями в атмосфере Солнца оказывается чрезвычайно сложной и, кроме того, меняется в зависимости от уровня солнечной активности и конкретной ситуации на Солнце. Поэтому для простоты описания предполагается, что наблюдаемый вблизи орбиты Земли солнечный ветер состоит из трех в первом приближении независимых компонент:

1. спокойный солнечный ветер - постоянно существующий поток солнечной плазмы, заполняющий все межпланетное пространство вплоть до границ гелиосферы (50-200 а.е.);
2. квазистационарные высокоскоростные потоки солнечной плазмы, ответственные за рекуррентные геомагнитные возмущения;
3. спорадические высокоскоростные потоки - относительно кратковременные, чрезвычайно неоднородные и сложные по структуре образования, ответственные за спорадические магнитосферные возмущения.

Следуя этой схеме, рассмотрим морфологические характеристики и механизм формирования указанных компонент солнечного ветра.

Спокойный солнечный ветер. Согласно современным представлениям, энергия в недрах Солнца вырабатывается в ходе процессов ядерного синтеза:



где e^+ обозначает позитрон, ν - нейтрино и γ - γ -квант. В результате перечисленных процессов 1,0078 г водорода переходит в 1,0000 г гелия, а оставшаяся масса превращается в кинетическую энергию частиц и энергию радиации. Скорость выделения энергии в ходе реакций протон-протонного цикла определяется выражением

$$\epsilon_{pp} = 2,5 \cdot 10^6 \rho X^2 \left(\frac{10^6}{T}\right)^{2/3} \exp[-33,8 \left(\frac{10^6}{T}\right)^{1/3}] \text{ эрг}/(\text{г} \cdot \text{с}), \quad (2)$$

где ρ - плотность солнечного вещества, X - относительное содержание в нем ядер водорода и T - температура. Принимая во внимание, что как плотность вещества, так и его температура возрастают к центру Солнца, можно показать, что около 99% солнечной энергии генерируется в ядре Солнца с радиусом $R_c = 0.25 R_{\odot}$

Известно, что в звездах типа Солнца теплопроводность играет незначительную роль, так что произведенная в недрах Солнца энергия передается к его поверхности в основном путем радиационного переноса, то есть в результате ее поглощения и последующего переизлучения.

Однако радиационный перенос солнечной энергии становится малоэффективным в верхних слоях Солнца. Дело в том, что по мере уменьшения температуры солнечного вещества степень его ионизации уменьшается и присутствие в нем нейтральных атомов водорода заметно снижает его прозрачность. Это, в свою очередь, приводит к еще более быстрому уменьшению температуры Солнца с расстоянием от центра, вследствие чего любой элементарный объем солнечного вещества, всплывающий из недр Солнца, обладает большей температурой и меньшей плотностью, чем окружающая плазма, что приводит к развитию так называемой конвективной неустойчивости. Условия ее возбуждения уверенно выполняются в поверхностных слоях Солнца $r > 0.86 R_{\odot}$, где энергия переносится главным образом в форме тепловой энергии плазмы, заключенной в элементах вещества, поднимающихся из недр Солнца.

Развитие интенсивной турбулентности в поверхностных слоях Солнца не только обеспечивает перенос энергии к его поверхности, но и приводит к развитию явлений, играющих ключевую роль в солнечно-земной физике. Прежде всего, развитие конвективной турбулентности в плазме сопровождается генерацией интенсивных магнитозвуковых волн. Распространяясь в атмосфере Солнца, где плотность плазмы быстро уменьшается с высотой, звуковые волны трансформируются в ударные. Они эффективно поглощаются веществом, в результате чего температура последнего увеличивается, достигая величины $(1 - 3) \cdot 10^6 \text{ K}$ в солнечной короне. При этом значительная часть протонов в короне Солнца не может удерживаться его гравитационным полем, что приводит к непрерывному расширению короны в космическое пространство, то есть к генерации солнечного ветра.

В современной форме модель солнечного ветра была разработана Е. Паркером. Краткое изложение этой модели представлено ниже.

В стационарном сферически-симметричном случае уравнения газодинамики могут быть записаны в следующей форме:

Уравнение движения

$$v(r) \frac{dv(r)}{dr} = -\frac{1}{\rho(r)} \frac{dp(r)}{dr} + \frac{M_{\odot} G}{r^2}, \quad (3)$$

Где $v(r)$ - скорость солнечного ветра, $\rho(r)$ и $p(r)$ - его плотность и давление; M_{\odot} - масса Солнца и G - гравитационная постоянная;

Уравнение неразрывности потока вещества

$$\rho(r)v(r)A(r) = \rho_0 v_0 A_0, \quad (4)$$

где $A(r) = A_0(r/r_0)^2$ - площадь поперечного сечения потоковой трубки, индексом 0 отмечены значения переменных на некотором исходном расстоянии r_0 от центра Солнца;

Уравнение газового состояния

$$p(r) = p_0 \left(\frac{\rho(r)}{\rho_0} \right)^{\alpha}, \quad (5)$$

где α - показатель политропы, $\alpha \leq 5/3$ отличный от $5/3$ (показатель адиабаты) при наличии дополнительных источников энергии в солнечном ветре, о них речь пойдет ниже.

Подставляя равенства (4) и (5) в уравнение (3) и интегрируя последнее по r , получаем уравнение Бернулли (при $\alpha \neq 1$) в форме

$$\frac{1}{2}v^2 - \frac{GM_{\odot}}{r} + \frac{\alpha}{\alpha-1} \frac{p_0 v_0 A_0}{\rho_0 v A} = \frac{1}{2}v_0^2 - \frac{GM_{\odot}}{r_0} + \frac{\alpha}{\alpha-1} \frac{p_0}{\rho_0} \quad (6)$$

Переходя к безразмерным переменным

$$\zeta = \frac{r}{r_0}, \quad u^2 = \frac{1}{2} \frac{\rho_0}{r_0} v^2, \quad H = \frac{GM_{\odot} \rho_0}{r_0 p}, \quad (7)$$

перепишем уравнение (6) в виде

$$u^2 + \frac{\alpha}{\alpha-1} \left(\frac{u_0}{u \zeta^2} \right)^{\alpha-1} - \frac{H}{\zeta} = u_0^2 + \frac{\alpha}{\alpha-1} - H \equiv u_1^2, \quad (8)$$

где u_1 - константа интегрирования, зависящая от граничных условий на поверхности $r = r_0$.

Уравнения (6) или (8) определяют изменение скорости солнечного ветра с расстоянием от Солнца. Решение этих уравнений неоднократно рассматривалось в литературе. Здесь приводится лишь краткое обсуждение полученных результатов. Уравнения (6) или (8) не

имеют точного аналитического решения, поэтому Паркер исследует асимптотику решения на больших $\zeta \gg 1$ и малых $\zeta \ll 1$ расстояниях от Солнца.

Большие расстояния

Очевидно, что при $\zeta \rightarrow \infty$, $u(\zeta)$ может либо неограниченно возрастать, либо стремиться к какой-либо постоянной величине или к нулю. Нетрудно видеть, что $u \rightarrow \infty$ не удовлетворяет уравнению (8). Действительно, первый член в левой части уравнения неограниченно возрастает, второй и третий члены стремятся к нулю, тогда как в правой части (8) $u_1^2 = \text{const}$.

Вариант $u(\zeta \rightarrow \infty) = \text{const}$ оказывается возможным. В этом случае $u(\zeta \rightarrow \infty) \rightarrow u_1$. (9а)

Решение $u(\zeta \rightarrow \infty) \rightarrow 0$ также удовлетворяет уравнению (8). В этом случае первый и третий члены в левой части уравнения (9) стремятся к нулю и

$$u|_{\zeta \rightarrow \infty} \rightarrow \frac{u_0}{\zeta^2} \left(\frac{\alpha}{\alpha - 1} \frac{1}{u^2} \right)^{\frac{1}{\alpha - 1}}. \quad (9б)$$

Таким образом, решение уравнения (8) на больших расстояниях имеет две ветви: верхнюю ($u \rightarrow u_1$) и нижнюю ($u \rightarrow 0$). Для того чтобы выбрать решение, приемлемое с физической точки зрения, вычислим плотность плазмы, соответствующую этим решениям.

Из равенства (4) следует

$$\rho(r) = \rho_0 \frac{1}{\zeta^2} \frac{u_0}{u}. \quad (10)$$

Подставляя в (10) величину u из (9а), (9б), находим

$$u|_{\zeta \rightarrow \infty} \rightarrow \begin{cases} 0 & \text{— верхняя ветвь,} \\ \rho_0 \left[\frac{(\alpha - 1) u_1^2}{\alpha} \right]^{\frac{1}{\alpha - 1}} & \text{— нижняя ветвь.} \end{cases} \quad (11)$$

Из равенств (11) видно, что в случае, когда $u(\zeta)$ соответствует нижней ветви решения, плотность плазмы при $u \rightarrow \infty$ стремится к конечной и относительно большой величине, что противоречит экспериментальным данным. В то же время верхняя ветвь решения соответствует $\rho(\zeta \rightarrow \infty) \rightarrow 0$, что удовлетворяет условиям модели. Таким образом, на больших расстояниях от Солнца физический смысл имеет лишь верхняя ветвь решения уравнения Паркера.

Малые расстояния ($\zeta \rightarrow 0$)

При $\zeta \rightarrow 0$ третий член в левой части равенства (8) неограниченно возрастает. Поскольку в правой части уравнения постоянная величина, это означает, что неограниченное возрастание $(H/\zeta) \zeta \rightarrow 0$ должно быть скомпенсировано одним из первых двух членов в левой части (8), то есть опять имеют место две ветви решения:

$$u|_{\zeta \rightarrow 0} \rightarrow \begin{cases} \left(\frac{H}{\zeta}\right)^{1/2} \rightarrow \infty & \text{— верхняя ветвь,} \\ u_0 \left[\frac{\alpha}{\alpha-1} \frac{1}{H}\right]^{\frac{1}{\alpha-1}} \zeta^{\frac{1}{\alpha-1}-2} & \text{— нижняя ветвь.} \end{cases} \quad (12)$$

Первое решение, соответствующее неограниченному возрастанию скорости солнечного ветра при $\zeta \rightarrow 0$, физически неприемлемо. Второе решение дает разумный результат $u(\zeta) \rightarrow 0$ при значениях показателя политропы, определяемых неравенством $1/(\alpha-1) - 2 > 0$, то есть $\alpha < 3/2$.

Таким образом, стационарное решение короны оказывается возможным лишь в том случае, если показатель политропы α меньше адиабатического ($\alpha = 5/3$), то есть если имеет место непрерывный приток энергии в корону и солнечный ветер. В первоначальной модели Паркера предполагалось, что необходимый приток энергии обеспечивается высокой теплопроводностью солнечной плазмы. Однако, как будет показано ниже, одного лишь потока тепловой энергии недостаточно для ускорения солнечного ветра, и требуются дополнительные источники энергии.

Итак, мы видим, что физически разумным граничным условиям при больших ζ удовлетворяет верхняя ветвь решения уравнения Паркера, а при малых ζ - нижняя. Сращивание этих двух ветвей решения зависит от поведения решения в окрестностях некоторой критической точки, положение которой на плоскости (ζ, u) определяется следующим образом.

Продифференцируем уравнение (8) по ζ :

$$\left(2u - \frac{\alpha u_0^{\alpha-1}}{u^{\alpha} \zeta^{2(\alpha-1)}}\right) \frac{du}{d\zeta} = \frac{2\alpha u_0^{\alpha-1}}{u^{\alpha-1} \zeta^{2(\alpha-1)+1}} - \frac{H}{\zeta^2}. \quad (13)$$

Определим критическую точку (ζ_c, u_c) как точку, где правая часть уравнения (13) и коэффициент при $du/d\zeta$ в левой части уравнения одновременно равны нулю. Тогда

$$u_c^2 \zeta_c = \frac{H}{4}, \quad \zeta_c = \left(\frac{H}{4}\right)^{\frac{\alpha+1}{2\alpha}} \left(\frac{2}{\alpha u_0^{\alpha-1}}\right)^{\frac{2}{\alpha-1}}.$$

Топология решения уравнения (8) в окрестностях критической точки показана на рис. 3. Решение представляет собой семейство гипербол. При этом существует лишь одно решение, удовлетворяющее граничным условиям, как на больших, так и на малых расстояниях от Солнца. Этому решению соответствует кривая, проходящая через критическую точку (критическое решение).

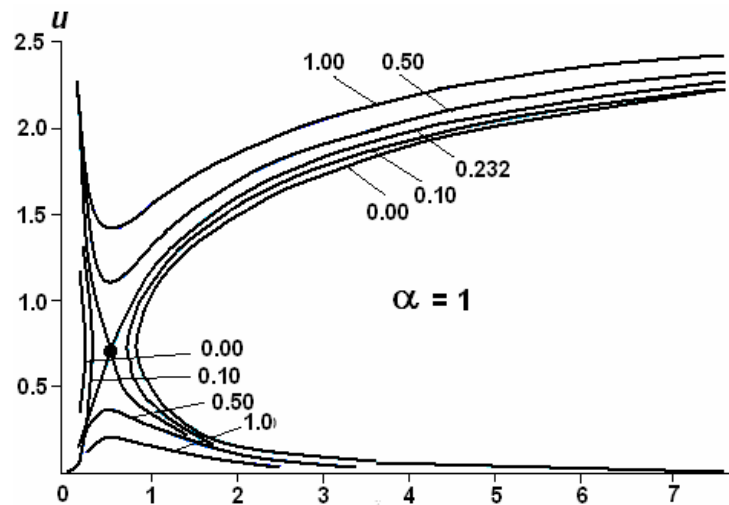


Рис. 3. Семейство кривых решения уравнения Паркера в окрестности критической

точки.

Радиальные профили скорости солнечного ветра в случае изотермической ($\alpha = 1$) короны при различной температуре последней представлены на рис. 4. Из приведенных кривых видно, что решение достаточно чувствительно к граничным условиям. Так, например, при $T_0 = 0,5 \cdot 10^6$ К скорость солнечного ветра на орбите Земли оказывается равной 260 км/с, а при $T = 4 \cdot 10^6$ К - около 1150 км/с, что в целом не противоречит экспериментальным данным (см. табл. 1). В то же время рассчитанная плотность плазмы на орбите Земли $25\text{-}40 \text{ см}^{-3}$ вместо реальных $5\text{-}10 \text{ см}^{-3}$.

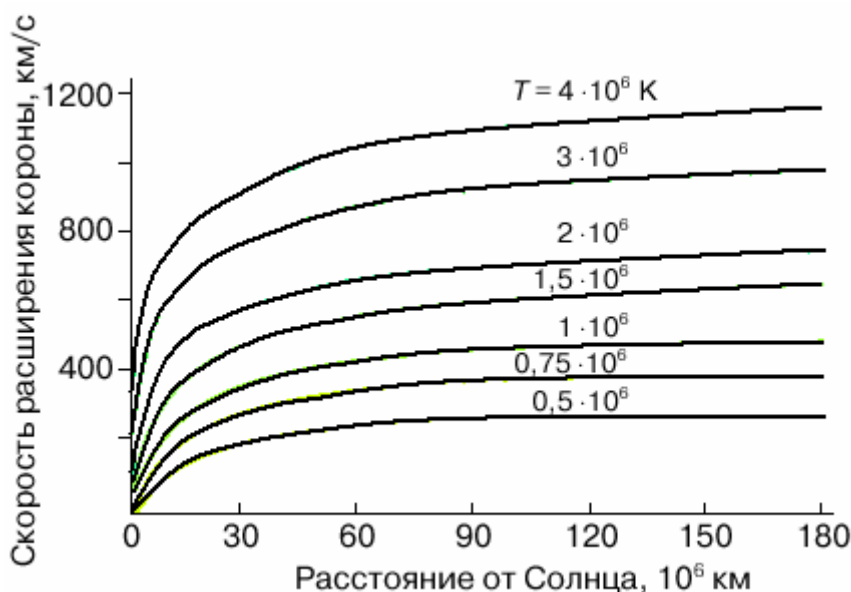


Рис. 4. Радиальные профили скорости солнечного ветра в модели Паркера при различных температурах T короны.

Как видно из таблицы, скорость солнечного ветра меняется в достаточно широком диапазоне - от ~ 300 до ~ 700 км/с. Казалось бы, эти вариации легко объяснимы в рамках модели Паркера соответствующими вариациями температуры короны (см. рис. 4). Однако непосредственные наблюдения свидетельствуют, что источником рекуррентных высокоскоростных потоков являются корональные дыры (см. ниже), в которых температура короны существенно ниже средней. В связи с этим обратим внимание на то, что, согласно модели, скорость солнечного ветра помимо температуры короны зависит также от величины показателя политропы α : чем больше α , тем меньше скорость солнечного ветра на орбите Земли. Наилучшее соответствие между модельными расчетами и экспериментальными данными получено Паркером при $\alpha = 1,1$ вблизи Солнца и $\alpha = 5/3$ на больших расстояниях от него.

Однако в связи с малой величиной показателя α возникает затруднение следующего рода: при $\alpha \rightarrow 1$ градиент температуры $\partial T / \partial r \rightarrow 0$. При этом поток тепла, обусловленный теплопроводностью, также стремится к нулю. Таким образом, для поддержания достаточно высокой температуры солнечного ветра требуются дополнительные нетепловые источники энергии, связанные, скорее всего, с диссипацией энергии альфвеновских волн.

Вклад МГД-волн в тепловую энергию и импульс солнечного ветра обсуждаются в ряде публикаций. Обзор этих исследований и их дальнейшее развитие даны И. Чашеим и В. Шишовым (1987 год). Выбрав соответствующим образом интенсивность и спектр МГД-волн в основании короны, можно получить не только соответствующую

экспериментальным данным скорость солнечного ветра на орбите Земли, но и необходимую плотность плазмы.

Вместе с тем модель, развиваемая в рамках одножидкостной гидродинамики, не в состоянии объяснить наблюдаемую разность электронной и ионной температур в солнечном ветре (см. табл. 1).

Таблица 1. Параметры солнечного ветра на орбите Земли

Параметр, размерность	Средняя величина	Солнечный ветер	
		медленный	высоко скоростной
n , см ⁻³	8,7	11,9	3,9
W , км/с	468	327	702
nW , см ⁻² с ⁻¹	$3,8 \cdot 10^8$	$3,9 \cdot 10^8$	$2,7 \cdot 10^8$
T_p , К	$7 \cdot 10^4$	$3,4 \cdot 10^4$	$2,3 \cdot 10^5$
T_e , К	$1,4 \cdot 10^5$	$1,3 \cdot 10^5$	$1,0 \cdot 10^5$
T_e / T_p	1,9	4,4	0,45

Следует заметить, что одножидкостные модели гидродинамики применимы в физике плазмы лишь в том случае, когда частота столкновений электронов с ионами достаточно велика, что обеспечивает эффективный обмен импульсом между электронной и ионной компонентами плазмы и соответственно равенство их температур. Р.А. Sturrock и R.E. Hartle (1966 год) обратили внимание на то, что в солнечном ветре вследствие быстрого убывания плотности плазмы с расстоянием от Солнца последнее условие может не выполняться и температура ионов может существенно отличаться от температуры электронов. При этом, поскольку ионная теплопроводность относительно мала, протонная компонента короны Солнца расширяется почти адиабатически и соответственно быстро охлаждается. В то же время теплопроводность электронной компоненты плазмы относительно велика, в связи с чем, температура последней падает с расстоянием достаточно медленно, что в целом не противоречит экспериментальным данным (см. табл. 1).

Такое относительно независимое существование электронной и ионной компонент плазмы описывается в рамках двухжидкостной гидродинамики. При этом в уравнении движения (3) газовое давление следует заменить суммой давлений электронного и ионного газов $P = P_e + P_i = nk(T_e + T_i)$. Кроме того, в случае двухжидкостной гидродинамики уравнение газового состояния обычно заменяют уравнением сохранения энергии, записанным отдельно для электронной и ионной компонент, так что система уравнений (2) - (4) принимает вид:

$$nm_i v \frac{dv}{dr} = -\frac{d}{dr}(nk(T_e + T_i)) - nm_i \frac{GM_\odot}{r^2}; \quad (15)$$

$$n_0 A = n_0 v_0 A_0; \quad (16)$$

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left[nm_i v r^2 \left(\frac{1}{2} v^2 + \frac{3}{2} \frac{P_i}{nm_i} \right) \right] = -\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} (P_i v r^2) - nm_i v \frac{GM_\odot}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 k_i \frac{dT_i}{dr} \right) + \frac{3}{2} v n K (T_e - T_i); \quad (17)$$

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left[nm_e v r^2 \left(\frac{1}{2} v^2 + \frac{3}{2} \frac{P_e}{nm_e} \right) \right] = -\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} (P_e v r^2) - \quad (18)$$

$$-mm_e v \frac{GM_\odot}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 k_e \frac{dT_e}{dr} \right) + \frac{3}{2} \nu n K (T_i - T_e);$$

здесь m_i и m_e - масса иона и электрона соответственно, T_i и T_e - ионная и электронная температура; k_i , k_e - коэффициенты ионной (электронной) теплопроводности, K - постоянная Больцмана и ν - частота столкновений ионов с электронами.

Результаты численного интегрирования системы уравнений (15)- (18) представлены на Рис. 3. Кривая 1 соответствует одножидкостной модели, кривые 2 и 3 показывают изменение с расстоянием электронной и ионной температуры солнечного ветра в двухжидкостной модели. Как видно из рисунка, на орбите Земли ($r = 215R_\odot$), $T_p = 4,4 \cdot 10^3$ К и $T_e = 3,4 \cdot 10^5$ К.

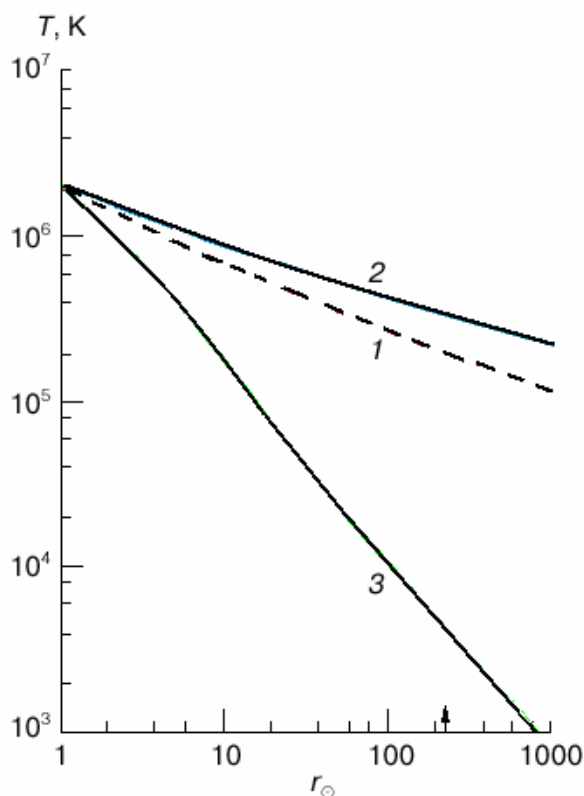


Рис. 5. Изменение с расстоянием от Солнца r температуры T солнечного ветра в одножидкостной модели (1), электронной (2) и ионной (3) температур в двухжидкостной модели.

Таким образом, предсказываемая моделью температура электронов оказывается вдвое больше, а температура протонов - на порядок меньше реальной температуры частиц в солнечном ветре (см. табл. 1). Такое несоответствие теоретических и экспериментальных данных можно устранить, предположив существование дополнительных источников нагрева плазмы, причем преимущественно ее ионной компоненты. Этому требованию удовлетворяют упомянутые выше альфвеновские волны. Дело в том, что, хотя сами альфвеновские волны в солнечном ветре почти не поглощаются, они эффективно трансформируются в ходе четырехволнового взаимодействия в магнитозвуковые волны. Последние же в условиях, характерных для

солнечного ветра, диссипируют в результате резонансного взаимодействия с протонами, которые при этом заметно нагреваются.

Параметры солнечного ветра на орбите Земли, полученные А. Barnes и др. в 1971 году в рамках двухжидкостной модели с учетом дополнительного источника энергии в виде МГД-волн, представлены в табл. 2.

Таблица 2. Параметры солнечного ветра на орбите Земли в двухжидкостной модели Барнеса

Плотность плазмы n , см^{-3}	15
Скорость v , км/с	330
Поток кинетической энергии, эрг $\cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}$	0,46
Протонная температура T_p , К	$3,2 \cdot 10^4$
Электронная температура T_e , К	$2,2 \cdot 10^5$
Отношение T_e / T_p	6,9

Рассчитанные параметры солнечного ветра на орбите Земли оказываются близкими к наблюдаемым параметрам медленного солнечного ветра (см. табл. 1). В то же время параметры высокоскоростных потоков в солнечном ветре заметно отличаются от предсказываемых моделью. В частности, температура протонов в этих потоках оказывается выше температуры электронов, что, по-видимому, свидетельствует о повышенной интенсивности альфвеновских волн в области их источника на Солнце. Рассмотрим подробнее высокоскоростной солнечный ветер и обсудим его возможные источники.

Высокоскоростной солнечный ветер

Как видно из данных, представленных в табл. 1, высокоскоростной солнечный ветер характеризуется повышенной скоростью (около 700 км/с), пониженной плотностью плазмы ($n = 4 \text{ см}^{-3}$) и повышенной ионной температурой. Однако, прежде чем обсуждать возможные источники этих потоков, напомним, что существуют по меньшей мере два рода таких потоков: рекуррентные и спорадические.

Рекуррентные потоки высокоскоростного солнечного ветра отличаются прежде всего тем, что существуют в течение многих месяцев, регулярно появляясь в окрестностях Земли примерно через 27 дней (период оборота Солнца), что свидетельствует об относительно большом времени жизни их источников. В течение многих лет происхождение этих потоков оставалось загадкой, поскольку им не соответствовали какие-либо видимые особенности на поверхности Солнца. Однако в настоящее время можно считать доказанным, что обсуждаемые потоки зарождаются на Солнце в области так называемых корональных дыр.

Корональные дыры отчетливо видны на получаемых на космических аппаратах фотографиях Солнца в рентгеновском и крайнем ультрафиолетовом диапазонах спектра солнечного излучения (см. рис.6), где они фиксируются как обширные области пониженной (в несколько раз) интенсивности излучения, простирающиеся от полярных широт до экватора или даже в противоположное полушарие.

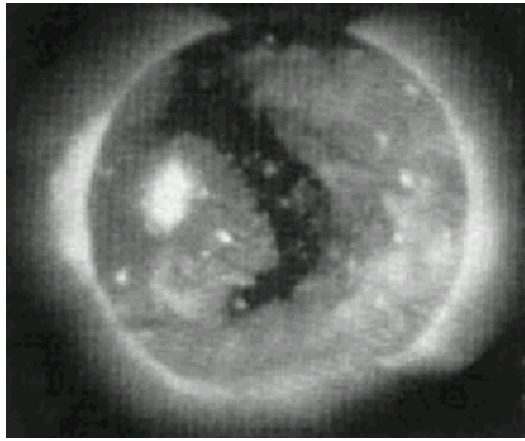


Рис. 6. Фотография Солнца в рентгеновском излучении 21 августа 1973 года.

Протяженность корональных дыр по долготе составляет $30^\circ - 90^\circ$. Соответственно время прохождения корональной дыры через центральный меридиан Солнца (вследствие вращения последнего) составляет 3-6 суток, что вполне согласуется с длительностью существования соответствующих высокоскоростных потоков в окрестностях Земли. Пониженная интенсивность рентгеновского излучения в области корональных дыр может определяться как пониженной плотностью плазмы в этих областях, так и ее пониженной температурой. Действительно, наземные наблюдения короны во время солнечных затмений показывают, что в короне существуют, в особенности в высоких широтах, области с относительно низкой плотностью плазмы. В то же время температура плазмы в области корональных дыр оказывается существенно пониженной. Так, например, при наблюдениях излучения Солнца в радиодиапазоне яркостная температура в области корональных дыр составляет около $0,8 \cdot 10^6$ К, что существенно ниже температуры спокойной короны, и плотность плазмы в корональной дыре составляет 0,25 плотности спокойной короны.

Таким образом, корональные дыры действительно представляют собой области пониженной плотности плазмы и ее относительно низкой температуры. Чем вызываются указанные особенности короны в этих областях, не совсем ясно. В связи с этим обращает на себя внимание то, что корональные дыры, как правило, совпадают с областями униполярного магнитного поля с квазирадиальными или слегка расходящимися силовыми линиями. Открытые силовые линии магнитного поля не препятствуют радиальному расширению корональной плазмы, что может объяснить пониженную плотность последней в области дыр и увеличение скорости генерируемого в них солнечного ветра. Вместе с тем увеличение скорости ветра, обусловленное благоприятной конфигурацией силовых линий магнитного поля, не может компенсировать ее уменьшения, связанного с низкой температурой плазмы в рассматриваемых областях, и для объяснения появления высокоскоростных потоков опять приходится предположить наличие в корональных дырах мощного источника МГД-волн. К сожалению, прямых подтверждений существования таких волн в области корональных дыр пока не получено.

Спорадические высокоскоростные потоки. Второй тип высокоскоростных потоков в солнечном ветре - это кратковременные (время пробега мимо Земли $\tau = 1-2$ суток), часто чрезвычайно интенсивные (скорость солнечного ветра до 1200 км/с) потоки, имеющие весьма большую долготную протяженность. Двигаясь в межпланетном пространстве, заполненном плазмой относительно медленного спокойного солнечного ветра, высокоскоростной поток как бы сгребает эту плазму, в результате чего перед его фронтом образуется движущаяся вместе с ним отошедшая ударная волна. Пространство между фронтом потока и фронтом отошедшей ударной волны заполнено относительно плотной (несколько десятков частиц в 1 см^3) и горячей плазмой.

Ранее предполагалось, что спорадические потоки в солнечном ветре обусловлены солнечными вспышками и им подобными явлениями. Однако в последнее время общественное мнение на этот счет изменилось, и большинство исследователей, в особенности зарубежных, придерживаются точки зрения, согласно которой спорадические высокоскоростные потоки в солнечном ветре обусловлены так называемыми корональными выбросами.

Корональные выбросы, наиболее отчетливо наблюдаемые вблизи лимба Солнца, представляют собой некоторые относительно протяженные плазменные образования, движущиеся в короне Солнца вверх от ее основания. Вывод о том, что спорадические потоки в солнечном ветре связаны именно с корональными выбросами (или СМЕ), а не со вспышками, основан на следующих экспериментальных фактах:

1) несмотря на статистически значимую связь между спорадическими потоками и солнечными вспышками, однозначная связь между ними отсутствует, то есть, с одной стороны, наблюдаются вспышки, не вызывающие межпланетных ударных волн, и, с другой - наблюдаются высокоскоростные потоки, не предваряемые вспышками, и 2) солнечные вспышки непосредственно не связаны с корональными выбросами. Связь между межпланетными ударными волнами, корональными выбросами и солнечными вспышками детально исследовалась N. Sheeley и др. (1985 год), которые, в частности, показали, что 72% ударных волн, наблюдавшихся на борту космического аппарата "Helios-1", были связаны с большими низкоширотными корональными выбросами. В то же время лишь 52% тех же ударных волн были связаны с солнечными вспышками. В результате подробного анализа этих данных удалось показать, что если исключить из списка ударные волны, наблюдаемые за лимбом Солнца, то число волн, связанных со вспышками, возрастает до 85%, то есть связь ударных волн со вспышками оказывается ничуть не хуже, чем с корональными выбросами. Кроме того, как показали Harrison и др. (1990 год), корональные выбросы и вспышки связаны с одними и теми же активными областями на Солнце, и быстрые выбросы (со скоростью порядка 1000 км/с), с которыми обычно связана межпланетная ударная волна, начинают свое движение в короне одновременно с началом вспышки.

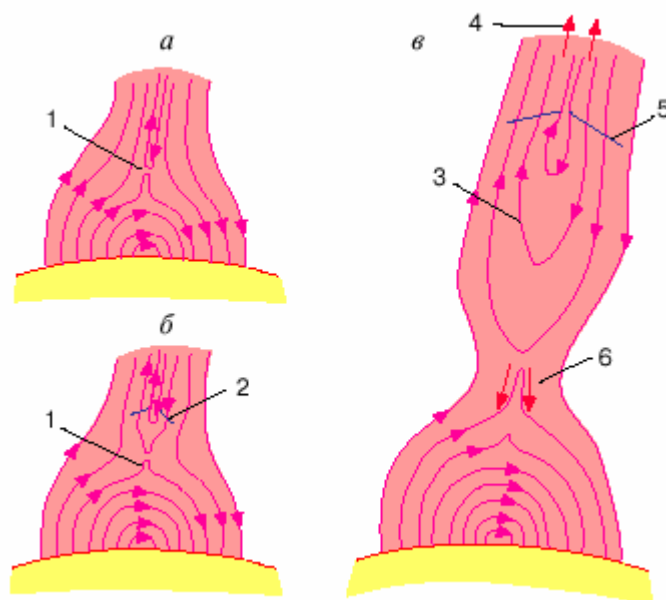


Рис. 7. Развитие вспышки в модели Старрока: 1 - линия пересоединения, 2 - формирующаяся ударная волна, 3 - эжектируемая плазма, 4 -

высокоэнергичные частицы, 5 - ударная волна, 6 - быстрые электроны.

Таким образом, вывод о непричастности солнечных вспышек к межпланетным ударным волнам представляется не вполне убедительным, и мы по-прежнему будем считать солнечные вспышки одним из основных источников высокоскоростных спорадических потоков в солнечном ветре.

Что касается механизма генерации самих вспышек (и, естественно, связанных с ними потоков), то наиболее популярной в настоящее время является предложенная в 1964 году Петчеком модель вспышки, основанная на гипотезе о магнитном пересоединении. Развитие солнечной вспышки в рамках модели Петчека представлено на рис. 7.

В этой модели силовые линии магнитного поля активной области оказываются, начиная с некоторого уровня, разорванными и образуют две силовые трубки с антипараллельными полями, разделенными токовым слоем. В некоторый момент из-за развития ионно-звуковой или ионно-циклотронной неустойчивости проводимость плазмы в некоторой точке *l* (рис. 5а) в плазменном слое резко падает, в результате чего токовый слой разрывается и силовые линии магнитного поля пересоединяются. Магнитная энергия быстро переходит в кинетическую и тепловую энергию плазмы и происходят интенсивный разогрев и ускорение плазмы (рис. 7б). Ускоренные частицы, двигаясь вдоль открытых силовых линий магнитного поля, покидают хромосферу и выбрасываются в межпланетное пространство (рис. 7в). При этом движущиеся вверх энергичные электроны, проходя через корону и взаимодействуя с ней, могут вызывать всплески радиоизлучения. Частота радиоизлучения вследствие уменьшения концентрации фоновой плазмы быстро уменьшается по мере движения электронов вверх (что соответствует так называемым всплескам радиоизлучения III типа).

Частицы, движущиеся вдоль силовых линий магнитного поля к Солнцу, нагревают плазму в нижней хромосфере и фотосфере, вызывая увеличение яркости водородных эмиссий и образование высокотемпературного коронального облака. Плазма, ускоренная в направлении от Солнца, формирует высокоскоростной поток и связанную с ним ударную волну.

Заключение

Суперпозиция описанных выше потоков солнечной плазмы и их взаимодействие и создают ту сложную и непрерывно изменяющуюся систему, которая называется солнечным ветром.

В кратком обзоре современных представлений о морфологии и механизмах генерации солнечного ветра мы смогли обсудить лишь самые общие и наиболее полно исследованные характеристики этих процессов, что может создать несколько ложное представление о действительном состоянии проблемы. В связи с этим следует еще раз подчеркнуть, что нами опущены многие, в том числе и весьма существенные, детали рассматриваемых процессов (например, механизм формирования межпланетного магнитного поля), без отчетливого понимания которых представленная выше модель солнечного ветра остается не более чем гипотезой, хотя и весьма вероятной.

МЕЖПЛАНЕТНОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Движение заряженных частиц направляется магнитным полем. Для того чтобы проследить, как заряженные частицы, входящие в состав солнечного ветра, двигаются от Солнца к Земле, надо прежде всего рассмотреть свойства преодолеваемого ими пространства (межпланетного пространства). Основное свойство его — это наличие в этом пространстве магнитного поля.

Магнитное поле Солнца отличается от магнитного поля Земли. Оно весьма беспорядочно, хаотично и не поддается такому простому описанию, как дипольное поле Земли. Строго говоря, Солнце в целом обладает магнитным полем дипольного типа, которое направлено противоположно земному диполю. Измерения дают величину магнитного поля Солнца около 1 Гс. Это вдвое больше магнитного поля Земли. Но общее магнитное поле на Солнце является далеко не единственным. На него накладываются магнитные поля, которые связаны с солнечными пятнами. Эти местные поля имеют величину в несколько тысяч гаусс. Поэтому дипольным полем Солнца можно пренебречь.

Мы видели, что магнитные поля солнечных пятен направлены не произвольно, а подчиняются определенным законам. В Северном полушарии силовые линии магнитного поля выходят из восточного пятна и входят в западное пятно. В Южном полушарии, наоборот, силовые линии выходят из западного пятна и входят в восточное. По истечении солнечного цикла, т. е. через 11 лет, все направления магнитных полей меняются на обратные. А еще через 11 лет они снова станут такими же, как и 22 года назад. Т. е. если основные характеристики активности Солнца меняются с периодом в 11 лет, то направление магнитных полей солнечных пятен меняется с периодом в 22 года. Из области солнечных пятен выбрасывается солнечная плазма, которая устремляется с поверхности Солнца в радиальном направлении. Поскольку Солнце вращается, то потоки плазмы закручиваются подобно струям воды, истекающим из вращающегося поливального устройства.

Движущаяся от Солнца плазма (солнечный ветер) уносит магнитное поле солнечного пятна в межпланетное пространство. Плазма представляет собой хороший проводник электрического тока. Из физики известно, что особенностью всех хороших проводников является их противодействие изменениям магнитного поля. При изменении магнитного поля в проводнике будут создаваться (индуцироваться) токи, которые направлены так, что их магнитное поле противодействует этому изменению. В солнечной короне и межпланетном пространстве потери энергии на нагревание очень малы, и плазма ведет себя как идеальный проводник. Поэтому она противодействует любому изменению магнитного потока. В таких случаях говорят, что диффузия магнитного поля в плазму или из плазмы отсутствует.

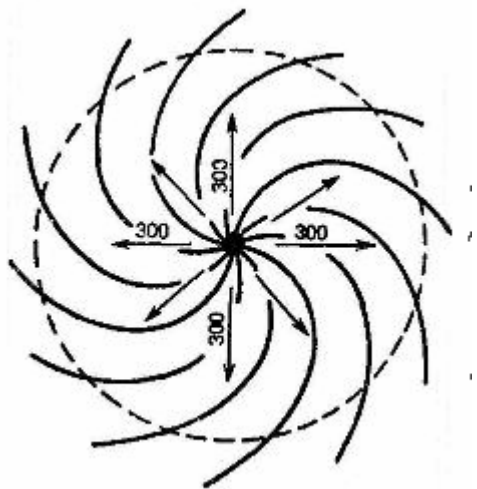


Рис. 8. Спиральное солнечно-межпланетное поле в плоскости солнечного экватора (или в плоскости эклиптики) для спокойного Солнца. Предполагается, что солнечный ветер движется радиально от Солнца со скоростью 300 км/с

Межпланетное пространство занято солнечной плазмой, которая является идеальным проводником. Этот проводник «выметает» на своем пути любые

встречающиеся магнитные поля (они не могут проникнуть внутрь потока плазмы), и в межпланетном пространстве остается только то магнитное поле, которое солнечная плазма тянет от Солнца.

Так как же выглядит межпланетное магнитное поле? Если магнитные поля солнечных пятен направлены по-разному (и к Солнцу и от него), то это поле, вытянутое потоком солнечной плазмы, в межпланетном пространстве будет в разных местах направлено по-разному (или к Солнцу или от Солнца). Для нас важно, каким оно является в плоскости эклиптики. В первом приближении, оно имеет форму спиралей Архимеда, как это показано на рис. 8.

Исходя из величины скорости плазмы, магнитного поля на Солнце, расстояния от Солнца до Земли и др., можно оценить: угол наклона потока плазмы и магнитного поля к солнечному радиусу вблизи орбиты Земли составляет около 45° . (Скорость солнечной плазмы на расстоянии орбиты Земли равна примерно 440 км/с.)

На рис. 8. показана только форма магнитных силовых линий в межпланетном пространстве. Направление их противоположно в различных секторах. На рис. 9 показано направление межпланетного магнитного поля на орбите Земли, измеренное на спутнике за время трех оборотов. Границы между секторами проведены в виде спиралей Архимеда.

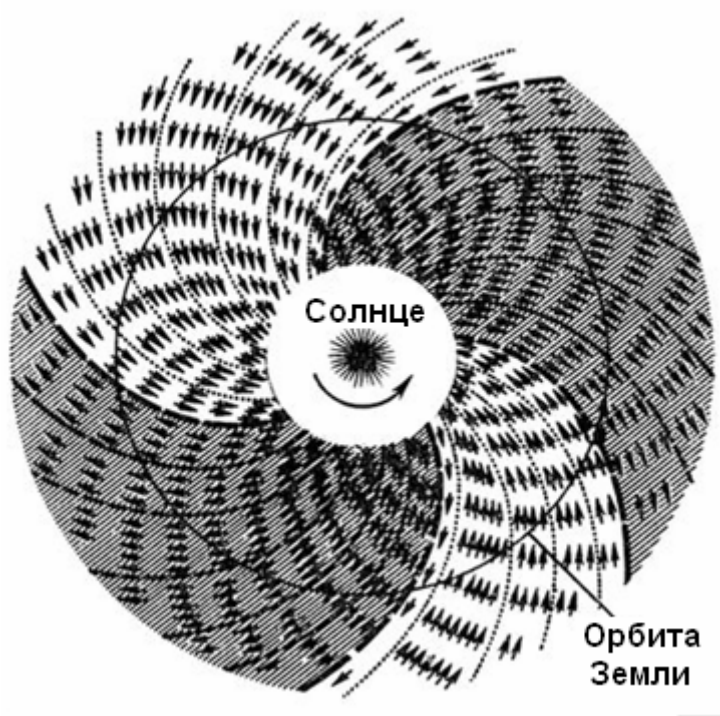


Рис. 9. Секторная структура межпланетного магнитного поля, измеренная на спутнике IMP-1.

То, что магнитное поле межпланетного пространства имеет секторную структуру, очень важно для возникновения и протекания магнитных бурь на Земле и даже для формирования погоды. Измерения с помощью ракет показали, что скорость солнечного ветра и плотность частиц систематически изменяются. На границе секторов эти параметры резко увеличиваются. В конце второго дня после прохождения границы сектора плотность плазмы очень быстро увеличивается, а затем через два или три дня

начинает медленно уменьшаться. Скорость солнечного ветра медленно уменьшается на второй или третий день после достижения максимума.

Секторная структура межпланетного магнитного поля и указанные выше изменения скорости и плотности солнечной плазмы тесно связаны с магнитосферными возмущениями. Эта структура устойчива. Она вращается с Солнцем, по крайней мере, в течение нескольких солнечных оборотов, проходя над Землей приблизительно через каждые 27 дней. Схема межпланетного магнитного поля, показанная на рис. 8, идеализирована. На самом деле реальное распределение скоростей потока солнечной плазмы и форма силовых линий магнитного поля очень неоднородны.

Измерения с помощью спутников показали, что на спиральное магнитное поле наложены значительные нерегулярности. Если измерения кратковременны (не превышают по крайней мере нескольких дней), то трудно выявить спиральную структуру межпланетного магнитного поля. Эта нерегулярность межпланетного магнитного поля очень сильно влияет на весь комплекс солнечно-земных связей.

Измерения, проведенные на спутниках, показали, что магнитная буря наступает тогда, когда в межпланетном пространстве магнитное поле больше в десятки раз и имеет более нерегулярный характер, чем в спокойные периоды. Это происходит в результате усиления солнечного ветра. Потоки плазмы уносят из возмущенных областей Солнца в межпланетное пространство более интенсивные и более нерегулярные поля, что и приводит к появлению нерегулярностей в спокойном магнитном межпланетном поле. Это было подтверждено спутниковыми измерениями.

Экспериментально установлено, что имеется самая тесная связь между характером межпланетного магнитного поля (его величиной и степенью нерегулярности) и солнечной активностью. По величине этой связи можно оценить среднюю скорость распространения возмущения. Она оказалась равной около 1000 км/с.

ВАРИАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ - временные и пространственные изменения потока космических лучей (КЛ) галактического и солнечного происхождения, непрерывно бомбардирующих земную атмосферу.



Рис. 10. Схема солнечного межпланетного магнитного поля при вспышке на Солнце. Стрелками показано направление силовых линий поля.

На поверхности Земли интенсивность космических лучей зависит от температуры и давления воздуха, широты пункта наблюдения и состояния геомагнитного поля, электромагнитной обстановки в Солнечной системе и физических условий в Галактике. В соответствии с этим ВКЛ, обусловленные изменением указанных факторов, делят на три

класса. Вариации I и II классов (метеорологического происхождения и обусловленные изменениями магнитного поля Земли) с помощью специальной методики могут быть исключены из данных наблюдений, что позволяет в чистом виде находить вариации III класса, т. е. вариации первичных КЛ, которые представляют наибольший интерес. К III классу ВКЛ относятся, в частности, внезапные мощные возрастания потока КЛ, связанные с солнечными вспышками.

Амплитуда вариаций первичных КЛ зависит от энергии частиц и напряжённости межпланетных магнитных полей. Поэтому исследование ВКЛ является эффективным средством зондирования межпланетного пространства как вблизи земной орбиты, так и в масштабах Солнечной системы и Галактики.

Большинство вариации III класса (периодические 11-летние, 27-дневные, солнечно-суточные, а также т. н. эффект Форбуша и др.) обусловлено "выметанием" КЛ из Солнечной системы неоднородными магнитными полями ("магнитными облаками", рис. 10), движущимися от Солнца вместе с солнечным ветром (поток плазмы из атмосферы Солнца). Солнечная активность изменяется с периодом около 11 лет. Аналогичным образом колеблется мощность солнечного ветра и количество "магнитных облаков". Интенсивность КЛ колеблется с близким периодом (11-летняя вариация), причём интегральный поток галактических КЛ вблизи орбиты Земли уменьшается примерно вдвое при переходе от минимума к максимуму солнечной активности. "Выметание" КЛ из околоземного пространства в максимуме солнечной активности наиболее эффективно для частиц с энергией $\leq 10^9$ эВ. Существенную роль в 11-летней ВКЛ играют крупномасштабная структура и динамика гелиомагнитосферы. 27-дневная ВКЛс амплитудой $\leq 10\%$ в межпланетном пространстве на орбите Земли соответствует периоду вращения Солнца и обусловлена асимметрией потока магнитных неоднородностей в солнечном ветре.

СОЛНЕЧНЫЙ ВЕТЕР И МЕЖПЛАНЕТНЫЕ МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ

В конце 50-х гг. XX в. американский астрофизик Юджин Паркер пришёл к выводу, что, поскольку газ в солнечной короне имеет высокую температуру, которая сохраняется с удалением от Солнца, он должен непрерывно расширяться, заполняя Солнечную систему. Результаты, полученные с помощью советских и американских космических аппаратов, подтвердили правильность теории Паркера.

В межпланетном пространстве действительно мчится направленный от Солнца поток вещества, получивший название солнечный ветер. Он представляет собой продолжение расширяющейся солнечной короны; составляют его в основном ядра атомов водорода (протоны) и гелия (альфа-частицы), а также электроны. Частицы солнечного ветра летят со скоростями, составляющими несколько сот километров в секунду, удаляясь от Солнца на многие десятки астрономических единиц — туда, где межпланетная среда Солнечной системы переходит в разреженный межзвёздный газ. А вместе с ветром в межпланетное пространство переносятся и солнечные магнитные поля.

Общее магнитное поле Солнца по форме линий магнитной индукции немного напоминает земное. Но силовые линии земного поля близ экватора замкнуты и не пропускают направленные к Земле заряженные частицы. Силовые линии солнечного поля, напротив, в экваториальной области разомкнуты и вытягиваются в межпланетное пространство, искривляясь подобно спиральям. Объясняется это тем, что силовые линии остаются связанными с Солнцем, которое вращается вокруг своей оси. Солнечный ветер вместе с «вмороженным» в него магнитным полем формирует газовые хвосты комет, направляя их в сторону от Солнца. Встречая на своём пути Землю, солнечный ветер сильно деформирует её магнитосферу, в результате чего наша планета обладает длинным

магнитным «хвостом», также направленным от Солнца. Магнитное поле Земли чутко отзывается на обдувающие её потоки солнечного вещества.

БОМБАРДИРОВКА ЭНЕРГИЧНЫМИ ЧАСТИЦАМИ

Помимо непрерывно «дующего» солнечного ветра наше светило служит источником энергичных заряженных частиц (в основном протонов, ядер атомов гелия и электронов) с энергией 10^6 — 10^9 электронвольт (эВ). Их называют солнечными космическими лучами. Расстояние от Солнца до Земли — 150 млн. километров — наиболее энергичные из этих частиц покрывают всего за 10—15 мин. Основным источником солнечных космических лучей являются хромосферные вспышки.

По современным представлениям, вспышка — это внезапное выделение энергии, накопленной в магнитном поле активной зоны. На определённой высоте над поверхностью Солнца возникает область, где магнитное поле на небольшом протяжении резко меняется по величине и направлению. В какой-то момент силовые линии поля внезапно «пересоединяются», конфигурация его резко меняется, что сопровождается ускорением заряженных частиц до высокой энергии, нагревом вещества и появлением жёсткого электромагнитного излучения. При этом происходит выброс частиц высокой энергии в межпланетное пространство и наблюдается мощное излучение в радиодиапазоне.

Хотя «принцип действия» вспышки учёные, по-видимому, поняли правильно, детальной теории вспышек пока нет. Вспышки — самые мощные взрывоподобные процессы, наблюдаемые на Солнце, точнее в его хромосфере. Они могут продолжаться всего несколько минут, но за это время выделяется энергия, которая иногда достигает 10^{25} Дж. Примерно такое же количество тепла приходит от Солнца на всю поверхность нашей планеты за целый год.

Потоки жёсткого рентгеновского излучения и солнечных космических лучей, рождающиеся при вспышках, оказывают сильное влияние на физические процессы в верхней атмосфере Земли и околоземном пространстве. Если не принять специальных мер, могут выйти из строя сложные космические приборы и солнечные батареи. Появляется даже серьёзная опасность облучения космонавтов, находящихся на орбите. Поэтому в разных странах проводятся работы по научному предсказанию солнечных вспышек на основании измерений солнечных магнитных полей.

Как и рентгеновское излучение, солнечные космические лучи не доходят до поверхности Земли, но могут ионизовать верхние слои её атмосферы, что сказывается на устойчивости радиосвязи между отдалёнными пунктами. Но действие частиц этим не ограничивается. Быстрые частицы вызывают сильные токи в земной атмосфере, приводят к возмущению магнитного поля нашей планеты и даже влияют на циркуляцию воздуха в атмосфере.

Наиболее ярким и впечатляющим проявлением бомбардировки атмосферы солнечными частицами являются полярные сияния. Это свечение в верхних слоях атмосферы, имеющее либо размытые (диффузные) формы, либо вид корон или занавесей (драпри), состоящих из многочисленных отдельных лучей. Сияния обычно бывают красного или зелёного цвета: именно так светятся основные составляющие атмосферы — кислород и азот — при облучении их энергичными частицами. Зрелище бесшумно возникающих красных и зелёных полос и лучей, беззвучная игра цветов, медленное или почти мгновенное угасание колеблющихся «занавесей» оставляют незабываемое впечатление. Подобные явления лучше всего видны вдоль овала полярных сияний, расположенного между 10° и 20° широты от магнитных полюсов. В период максимумов солнечной активности в Северном полушарии овал смещается к югу, и сияния можно наблюдать в более низких широтах.

Частота и интенсивность полярных сияний достаточно чётко следуют солнечному циклу в максимуме солнечной активности редкий день обходится без сияний, а в

минимуме они могут отсутствовать месяцами. Наличие или отсутствие полярных сияний, таким образом, служит неплохим показателем активности Солнца. И это позволяет проследить солнечные циклы в прошлом, за пределами того исторического периода, когда проводились систематические наблюдения солнечных пятен.

Солнечный ветер у орбиты Земли сильно разрежён и непостоянен — средняя концентрация частиц в нём составляет около $1\text{--}10\text{ см}^{-3}$, скорость — $250\text{--}1000\text{ км/с}$, величина межпланетного магнитного поля — $(1\text{--}10)\cdot 10^{-9}$ тесла. Так как заряженные частицы неохотно меняют силовые линии магнитного поля, поток солнечного ветра не смешивается с геомагнитным полем и околоземным плазменным населением, а обтекает их, образуя геомагнитную полость — магнитосферу Земли. Граница магнитосферы — магнитопауза — проходит там, где давление солнечного ветра уравнивается давлением геомагнитного поля. В подсолнечной точке она находится в среднем на расстоянии девяти радиусов Земли ($55\text{--}60$ тысяч километров) от её центра. Полное усилие, которое солнечный ветер оказывает на магнитосферу, ничтожно, оно примерно равно весу воды в большом бассейне, но тем не менее внешние области магнитосферы, заполненные слабым геомагнитным полем, сильно искажены относительно начальной — дипольной — формы. Со стороны Солнца (дневной стороны) магнитосфера сплющивается, а с противоположной — ночной — вытягивается, образуя магнитный хвост, тянущийся на сотни радиусов Земли, более миллиона километров. А поскольку поток солнечного ветра сверхзвуковой, то перед магнитосферой, как перед сверхзвуковым самолетом, образуется ударная волна.

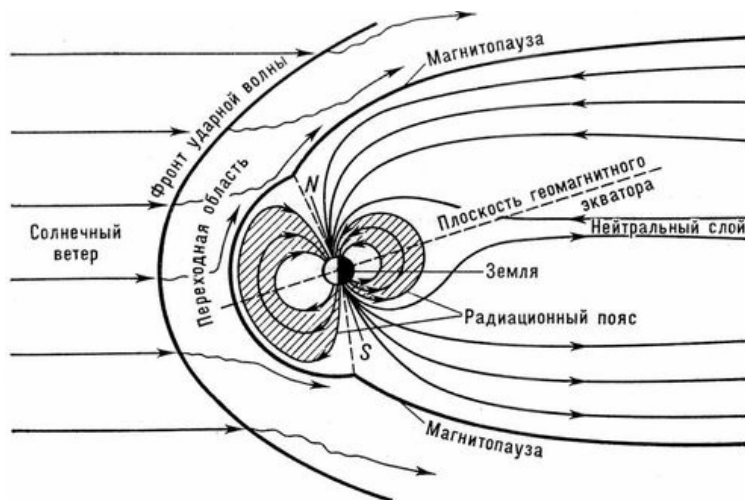


Рис. 11. Структура магнитосферы Земли

Внешняя магнитосфера содержит разрежённую (менее 1 см^{-3}) плазму солнечного и ионосферного происхождения, нагретую до миллионов и сотен миллионов градусов. Но при таких низких плотностях понятие температуры как меры теплоты объекта, находящегося в термодинамическом равновесии, становится бессмысленным и вместо температуры используют величину средней энергии заряженных частиц, выраженную в электрон-вольтах (эВ). Частица с единичным зарядом приобретает (или теряет, в зависимости от знака заряда) один электрон-вольт энергии, пройдя разность потенциалов 1 В . Температура плазмы в этих единицах составляет от 1 до 100 кэВ .

Несмотря на то, что полная масса горячих частиц внешней магнитосферы составляет всего около тонны, их роль в построении магнитосферы очень важна. Только простейшие конфигурации магнитного поля типа дипольной могут существовать

в пространстве сами по себе, в создании же более сложных форм, к которым принадлежит и магнитосфера, согласно уравнениям Максвелла, должны участвовать электрические токи. Такую замкнутую систему токов, текущих по большей части в местах резких изменений направления магнитного поля — вокруг Земли вдоль магнитопаузы (ток Чепмена-Ферраро), поперёк магнитного хвоста и некоторых других, и формируют частицы плазмы.

Силовые линии из более удалённых областей подходят к Земле в более близких к полюсам районах. Приполярные районы — „полярные шапки“ — всегда заполнены так называемыми „открытыми“ силовыми линиями, другой конец которых уходит в межпланетное пространство. Все более близкие к экватору силовые линии замкнуты, и оба их конца упираются в Землю. Линии, наиболее удалённые точки которых находятся в окрестностях магнитопаузы и в магнитном хвосте — самых динамичных областях магнитосферы, сильно реагирующих на изменения в солнечном ветре, подходят к Земле в зонах так называемого аврорального овала, расположенных на 65–72 градусах магнитной широты. (Здесь надо помнить, что магнитные полюса смещены относительно географических и южный магнитный полюс находится на севере канадского архипелага, в точке с координатами 71° северной широты и 265° долготы). В экваториальной области к Земле подходят линии из более стабильной внутренней магнитосферы, сохраняющей дипольную конфигурацию поля.

Описанная выше схема магнитосферы была впервые предложена американскими физиками Сидни Чепменом и Винцентом Ферраро в 30-х годах XX века. Она удачно описывала форму магнитосферы, но не могла объяснить внезапных отклонений геомагнитного поля от своего постоянного значения. Такие отклонения исторически называют геомагнитной активностью.