

Лекция 7. СОЛНЕЧНАЯ АКТИВНОСТЬ. СОЛНЕЧНЫЕ БУРИ

В 7-ой лекции обсуждается тема солнечной активности (солнечные бури), солнечные космические лучи Форбуш-понижения галактических космических лучей во время магнитных бурь и описание самой сильной магнитной бури 1859.

Развитие центров солнечной активности

Дифференциальное вращение Солнца «вытягивает» погруженные магнитные силовые трубки и усиливает поле до 2000—4000 Гс. Считается, что это усиление делает погруженные силовые трубки неустойчивыми, обуславливая появление трубок магнитного поля над поверхностью фотосферы. С помощью магнитографа можно обнаружить две области пересечения с этой поверхностью. Позднее они становятся видимыми: первая как головное, или ведущее, пятно, вторая как ведомое пятно. Следовательно, пара пятен имеет противоположную полярность.

Таким образом, при появлении магнитной силовой трубки над фотосферой возникает центр активности. Обычно, через несколько часов, или дней после этого - тонкая структура хромосферы (видимая на фотографиях в линии $H\alpha$ как темные «узелки») становится яркой. Эти яркие области называются факелами или флоккулами. Темные пятна развиваются в факелы. Одновременно изменяется область короны, находящаяся над центром активности: обычно усиливается излучение в линии $Fe\ XIV\ 5303\ \text{\AA}$, указывающее на повышение температуры.

После этой первой стадии, продолжающейся от одного до нескольких дней, увеличивается площадь факелов и магнитных областей. Обычно центр активности достигает максимальной стадии развития через 10—15 дней.

Хорошо развитое солнечное пятно имеет темную область, называемую тенью, которая окружена более яркой, но все еще темной областью, называемой полутенью. В области тени напряженность магнитного поля может достигать нескольких тысяч гаусс. Вблизи поверхности фотосферы конфигурация магнитного поля представляет пучок силовых трубок, находящихся в механическом равновесии с окружающей фотосферной плазмой. Полагают, что это сильное магнитное поле ослабляет конвективное движение фотосферного газа и таким образом подавляет основной механизм вертикальной передачи тепла внутри трубки (что можно видеть в тени). Поэтому пятно становится холоднее окружающей среды и выглядит более темным.

Типичное большое солнечное пятно имеет следующие характеристики:

$$\begin{aligned} \text{полная площадь} &= 350 \cdot 10^6 \text{ видимой полусферы,} \\ \text{диаметр полутени} &= 17\,500 \text{ км} \\ \text{максимальная напряженность поля} &= 3100 \text{ Гс,} \\ \text{полный магнитный поток} &= 8 \cdot 10^{21} \text{ Гс} \cdot \text{см}^2 \end{aligned}$$

Поскольку плотность газа, включающая плазменную компоненту, быстро падает с высотой, то на больших высотах силовые линии солнечного пятна не могут располагаться так же плотно, как вблизи поверхности фотосферы. Таким образом, в короне и хромосфере они будут расходиться. Корона над центром активности (окрестностью пятна) горячее, чем в других местах, и излучает интенсивную рентгеновскую радиацию. Через некоторое время центр активности становится очень сложным и неустойчивым. Биполярные пятна развиваются в большие биполярные группы: вокруг и между главных пятен появляются многочисленные мелкие пятна. Во время максимальной фазы цикла солнечной активности на диске Солнце видно несколько таких центров активности. Постепенно ведомые пятна исчезают, наконец, это же происходит и с ведущим пятном, но факелы и биполярные магнитные области (BM) остаются дальше. Появляются долгоживущие спокойные волокна, пересекающие факелы. Когда исчезают все следы ведомого пятна, местоположение ведущего пятна все еще можно обнаружить, но только как униполярную область (UM). Это последняя стадия развития центра активности.

Некоторые обсерватории составляют ежедневные карты Солнца, отмечая различные активные образования. На рис. 1 представлен образец ежедневных солнечных данных, выпускаемый Институтом Фраунгофера.

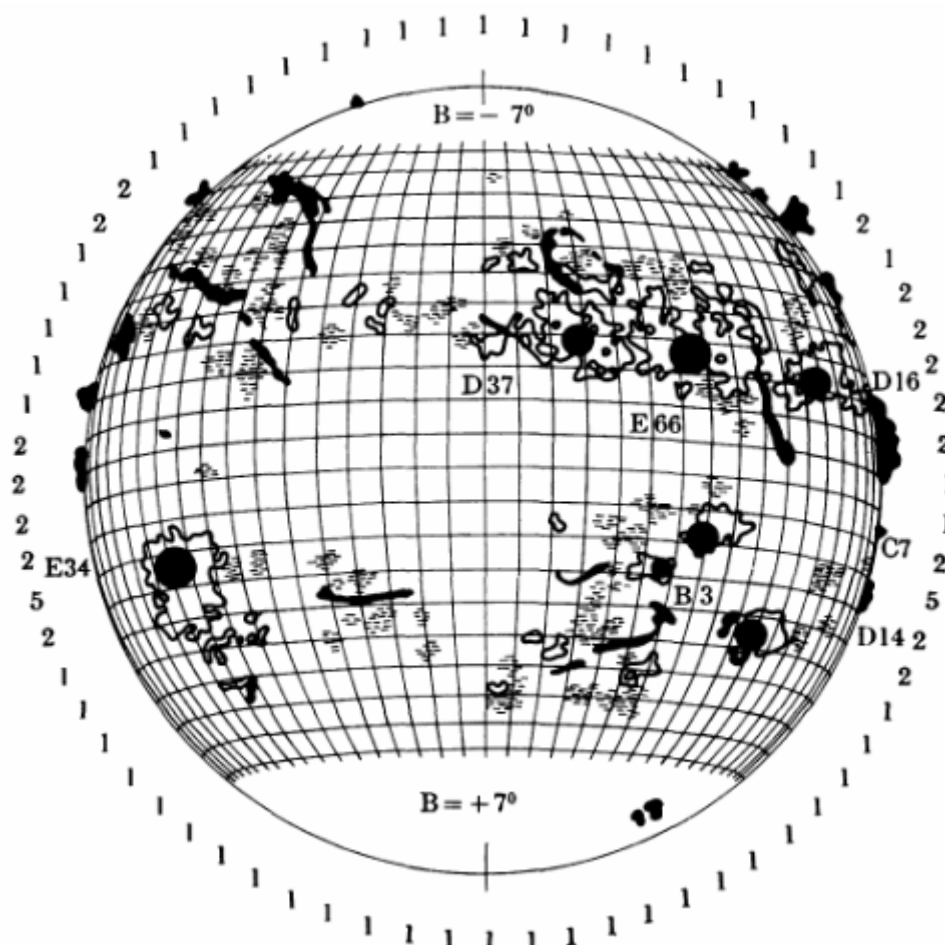


Рис. 1. Ежедневная карта Солнца. Темные кружки — солнечные пятна; заштрихованные области - факелы; темные нити - волокна и протуберанцы.

Солнечные бури.

Причина солнечных бурь, по-видимому, связана со сложной конфигурацией магнитных полей в центре активности. Полная энергия, излучаемая только в линии $H\alpha$ во время одной мощной бури, превышает 10^{31} эрг. Учитывая энергию, выделяемую в виде корпускулярного и других излучений, получим, что полная энергия, излучаемая в межпланетное пространство во время солнечной вспышки балла 3, будет порядка $10^{32} - 10^{33}$ эрг.

Предполагается, что энергия вспышки накапливается в виде магнитной энергии ($B^2/8\pi$) и внезапно переходит в кинетическую энергию частиц, когда магнитная конфигурация становится подходящей для того, чтобы «сработал» этот механизм. Де Ягер дал следующие оценки энергий излучений во время мощной солнечной бури:

Оценки энергий излучений во время мощной солнечной бури:

Полное электромагнитное излучение $= 10^{32}$ эрг

Межпланетное облако плазмы $2 \cdot 10^{32}$

Быстрые электроны $5 \cdot 10^{31}$

Солнечные космические лучи $3 \cdot 10^{31}$

Солнечные субкосмические лучи $2 \cdot 10^{31}$

Все другие частицы 10^{30}
 Полная энергия = $4 \cdot 10^{32}$ эрг

В модели Пиддингтона магнитно-нейтральная точка над арочной магнитной структурой, протянувшейся между двумя солнечными пятнами различной полярности, обеспечивает подходящую конфигурацию (рис. 2). Электроны высокой энергии, производимые здесь, «убегают» в межпланетное пространство, генерируя всплески типа III вдоль своих траекторий. Те электроны, которые опускаются в хромосферу, также генерируют микроволновое излучение. При столкновении с плотным хромосферным газом (водород) генерируется тормозное рентгеновское излучение.

Столкновения производят ионизацию атомов водорода. При рекомбинации излучаются линии серии Бальмера. Это проявляется в виде вспышки в линии H α . Хотя механизм выброса облака плазмы из вспышек точно неизвестен, следует отметить, что радиовсплески типа II являются индикатором плазмы, движущейся вверх вместе с ударной волной. Движение вверх области генерации излучения типа IV, по-видимому, является другим указанием на это. Корона вблизи области вспышки становится очень горячей, излучая как мягкое рентгеновское, так и интенсивное ультрафиолетовое и крайнее ультрафиолетовое излучения.

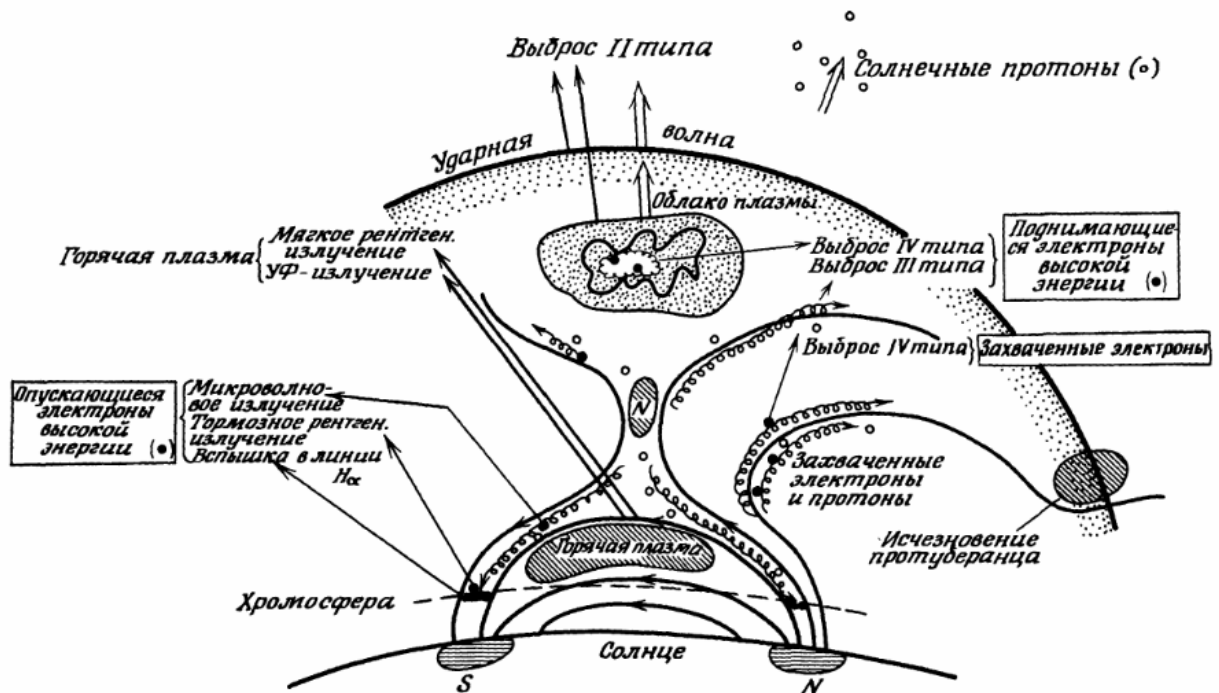


Рис. 2. Схема основных процессов, происходящих во время типичной солнечной бури.

Несколько иная гипотеза о природе солнечных бурь была предложена Якобсоном Карлквистом и Альвеном. Эти авторы полагают, что существует петля электрического тока, часть которой располагается в солнечной атмосфере. Петля несет электрический ток порядка 10^{12} А вдоль цепи индуктивности $L = 10^{10}$ см. Далее предполагается, что внезапный разрыв тока происходит в атмосферной части цепи, как только сила тока превысит определенное критическое значение. В месте разрыва образуется большое падение напряжения порядка:

$$V = L(dI/dt) \approx L / \tau = 10^{10} \text{ В},$$

где τ - характерное время солнечной вспышки (берется равным 10^3 с). Таким образом, в месте разрыва могут генерироваться солнечные космические лучи. Поскольку магнитная энергия цепи определяется как:

$$W = \frac{1}{2} LI^2 = 0.5 \cdot 10^{32} \text{ эрг,}$$

то ток в цепи может обеспечить запас энергии, требуемый для солнечной бури.

Основные требования к теории вспышек, сформулированные Старроком, Коппи и Свитом:

- а) запас энергии порядка $2 \cdot 10^{32}$ эрг, скорее всего накапливающейся перед вспышкой;
- б) спусковой механизм выделения запасенной энергии;
- в) преобразование во время взрывной фазы половины полного запаса энергии в движение масс со скоростью 1500 км/с за время менее 300 с;
- г) ускорение 10^{36} электронов до энергий порядка 100 кэВ за 1 с, повторенное несколько раз в течение взрывной фазы;
- д) ускорение 10^{36} протонов до энергий 0,1 МэВ — 30 ГэВ за время менее 10^3 с;
- е) преобразование во время фазы спада второй половины запасенной энергии в оптическое излучение с характерным временем распада $3 \cdot 10^3$ с.

Солнечные космические лучи

Солнечные вспышки, которые инжектируют протоны высокой энергии (1—15 ГэВ) встречаются довольно редко. Они называются протонными вспышками для отличия их от большинства вспышек, где протоны имеют меньшую энергию (< 100 кэВ). На рис. 3 показаны энергетические спектры солнечных протонов для нескольких вспышек умеренной интенсивности. Там же для сравнения приведен энергетический спектр галактических космических лучей.

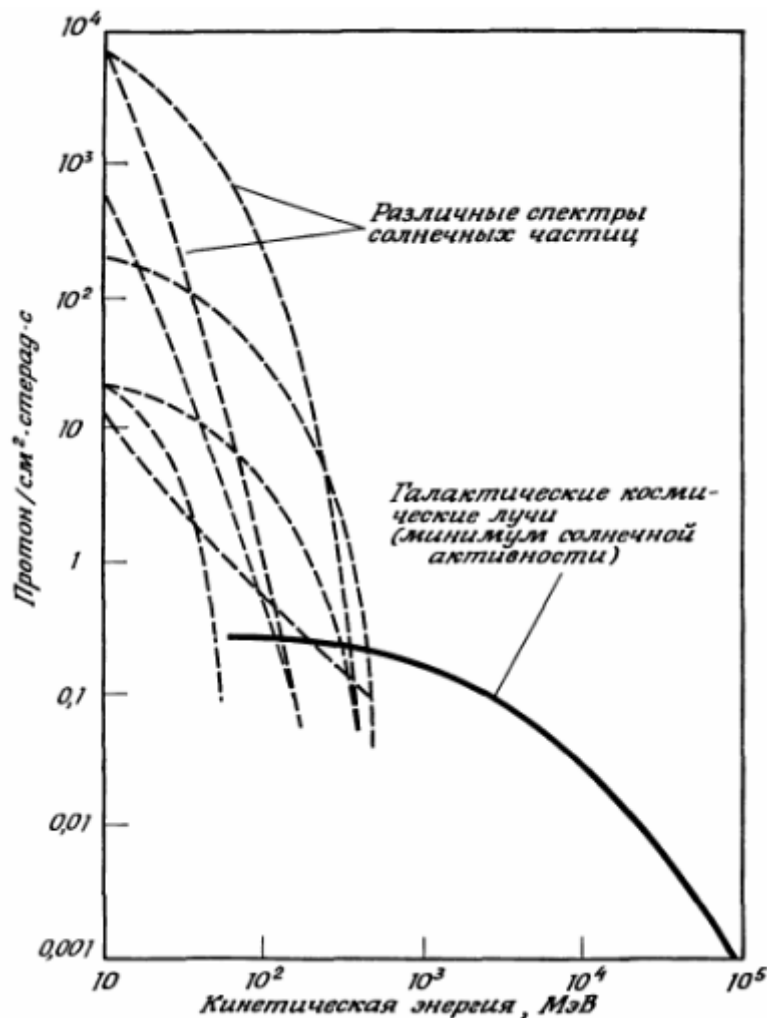


Рис. 3. Сравнение энергетических спектров солнечных протонов со спектром галактических космических лучей.

Фрейер и Веббер показали, что дифференциальный и интегральный энергетические спектры протонов удовлетворительно описываются уравнениями:

$$\frac{dJ}{dR} = \left(\frac{dJ}{dR} \right)_0 \exp(-R / R_0),$$

$$J = J_0 \exp(-R / R_0),$$

где R – жесткость, R_0 – характерная жесткость, $(dJ/dR)_0$ – дифференциальный поток, экстраполированный до нулевой жесткости, и

$$J_0 = R_0(dJ/dR)_0.$$

Релятивистские солнечные протоны

При наблюдении релятивистских солнечных протонов на Земле поток увеличивается до максимума очень быстро, а затем обычно медленно падает. Рис. 4. соответствует наиболее замечательному ливню космических лучей, наблюдавшемуся 23 февраля 1956 г. В «этом случае возрастание интенсивности космических лучей наблюдалось даже на геомагнитном экваторе, в Уанкайо, откуда следует, что энергия протонов достигала 15 ГэВ. Эллисон, Мак-Кенна и Рейд показали, что протонные вспышки чаще наблюдаются на западной, чем на восточной, половине солнечного диска. Это, по-видимому, свидетельствует о том, что протоны от западной половины легче доходят до Земли. Такие протоны распространяются вдоль межпланетных магнитных полей, имеющих конфигурацию спирали Архимеда. Мак-Краккен, изучая распределение солнечных протонов, сталкивающихся с поверхностью Земли, обнаружил, что приближенное направление прихода протонов отклонено примерно на 55° от линии Солнце—Земля.

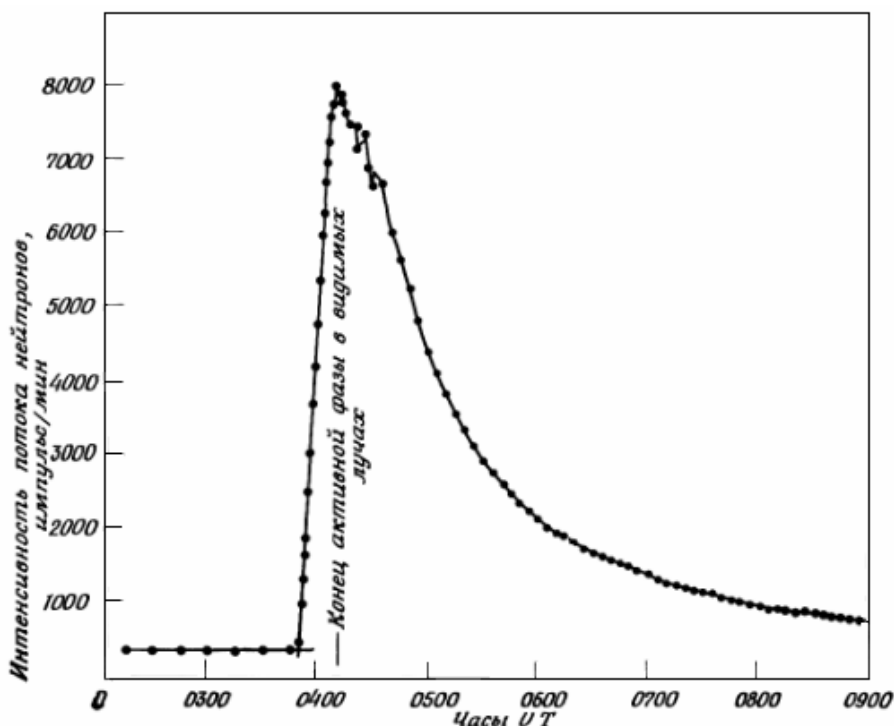


Рис. 4.. Увеличение интенсивности потока вторичных нейтронов, производимых в атмосфере первичными солнечными протонами вспышки.

Этот угол близок к углу между линией Солнце - Земля и линиями спирали Архимеда (рис.5). Однако траектории протонов не могут быть простыми спиралями: время прибытия протонов, как показал Кармихаэль, всегда больше расчетного времени на 10—20 мин. Запаздывание более явно выражено у нерелятивистских протонов. Барнс и Хальперн рассмотрели движения заряженных частиц высокой энергии в магнитном поле, имеющем конфигурацию спирали Архимеда. Выбирая гелиоцентрические сферические полярные координаты (r, θ, φ) с единичными векторами r, θ и φ соответственно, имеем

$$B = B_0 (r_0 / r)^2 [r - (\Omega r \sin \theta / V) \varphi],$$

где V — скорость солнечного ветра,

$$r_0 = 2R_\odot = 1.38 \cdot 10^{11} \text{ см}, B_0 = 5 \cdot 10^{-5} (1 \text{ а.е.} / r_0)^2 \text{ Гс и } \Omega = 2.9 \cdot 10^{-6} \text{ рад/с}$$

Магнитное поле можно также выразить с помощью единичного вектора b как $B = Bb = B_0 (r_0 / r)^2 \sec \alpha b$, где α - угол между направлениями B и r , равный

$$\alpha = \arctg (-B\varphi / Br) = \arctg [r / (V / \Omega \sin \theta)].$$

В инерциальной системе координат существует электрическое поле, определяемое как:

$$E = -V \times B = -(\Omega \sin \theta B_0 r_0^2 / r) \theta - (VrB \cos \alpha / a) \theta$$

где $a = -V / \Omega \sin \theta$. Это электрическое поле возникает в результате возмущения силовых линий межпланетного магнитного поля солнечным ветром.

Оно будет отсутствовать во вспомогательной системе координат, движущейся с плазмой солнечного ветра.

Заряженная частица, обладающая массой m , зарядом e и магнитным моментом μ дрейфует со скоростью:

$$v_d = \frac{b}{B} \times \left[-E + \frac{\mu}{e} \nabla B + \frac{m}{e} \left(v_s \frac{db}{dt} + \frac{dv_E}{dt} \right) \right],$$

где v_s - компонента скорости вдоль B , а v_E - скорость дрейфа ($E \times B$). Для устойчивой статической задачи оператор d/dt обращается в

$$v_s (b \cdot \nabla) = v_s (\partial / \partial s).$$

. Барнс и Хальперн показали, что в этом частном случае, как в первом приближении, скорость дрейфа близка к v_E :

$$v_d \approx v_E = [rV / (r^2 + a^2)] (r\tau + a\varphi).$$

При этих условиях они рассмотрели движение высокоэнергичной частицы с энергией ϵ и первоначальным углом наклона α_0 , которая выбрасывается от Солнца в межпланетное пространство при $r = r_0$, широте θ_0 и долготе φ_0 . Здесь предполагается сохранение энергии и адиабатического инварианта магнитного момента,

$$v^2_T = v_s^2 + v_c^2 + v_d^2,$$

где v_c - скорость вращения. Дифференциальное уравнение, описывающее движение вдоль радиуса, имеет вид:

$$dr/dt = v_r + v_{sr},$$

где

$$v_r = Vr^2 / (r^2 + a^2), \\ v_{sr} = v_s \cos \alpha = v_s a / (r^2 + a^2)^{1/2}.$$

Таким образом, интегрирование уравнения дает

$$t(r) \approx \left(\frac{m}{2e} \right)^{1/2} \frac{r}{2} \left[\left(1 + \frac{\Omega^2 r^2}{V^2} \right)^{1/2} + \frac{V}{\Omega r} \ln \left\{ \left(1 + \frac{\Omega^2 r^2}{V^2} \right)^{1/2} \right\} \right]$$

для $r_0 \ll r$, a и $\theta = \pi/2$. Для больших значений r : $t \sim r^{3/2}$.

Во вспомогательной системе координат, вращающейся вместе с Солнцем, альвеновские центры солнечных частиц движутся в направлении $\pm b$ (так как во вспомогательной системе отсутствует электрическое поле). Следовательно, для инерциального наблюдателя движение солнечных частиц подобно движению бусинок, выскальзывающих по спирали Архимеда, которая вращается с угловой скоростью Ω .

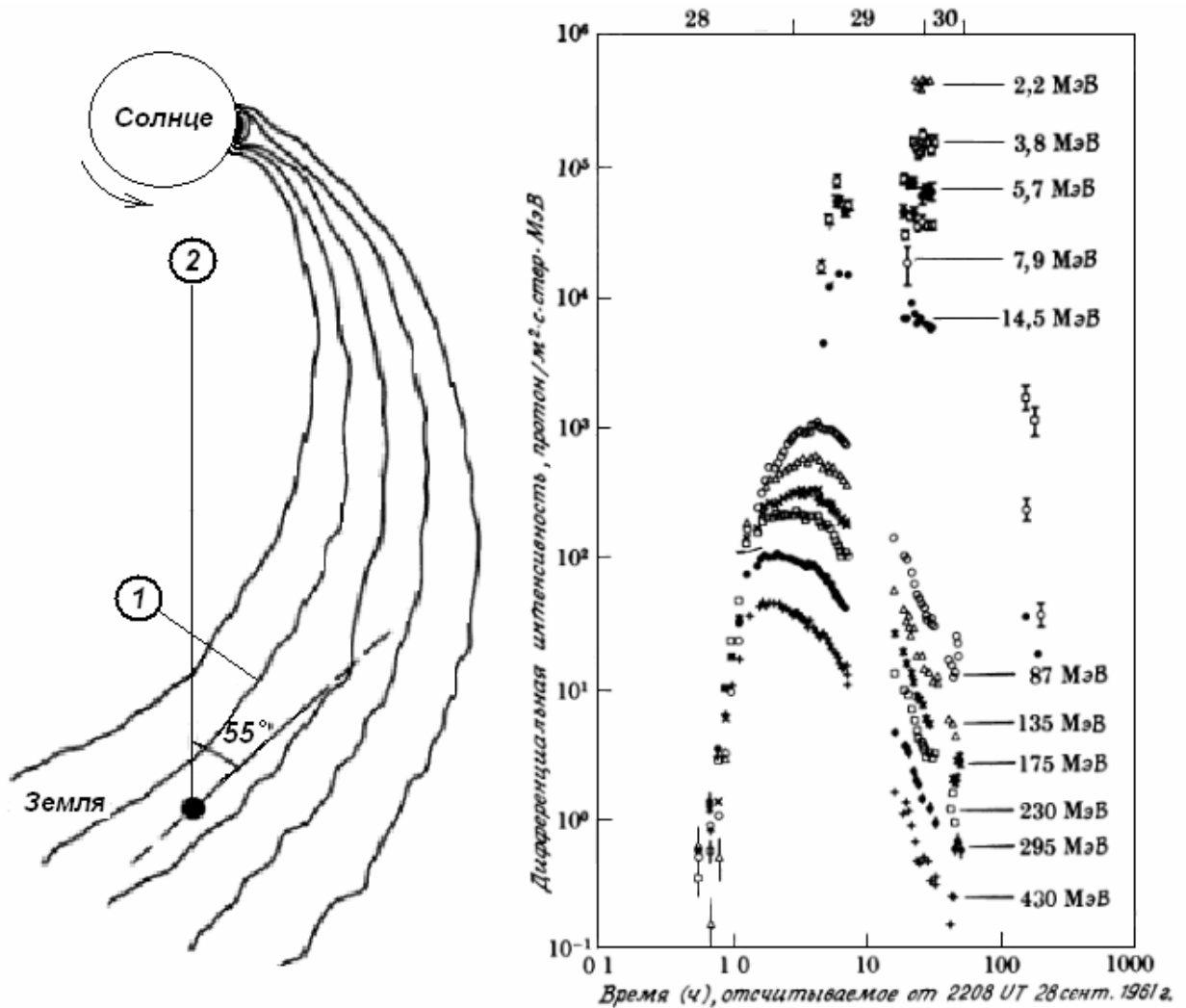


Рис. 5. Конфигурация силовых линий межпланетного магнитного поля, вдоль которых солнечные протоны достигали Земли, для вспышки 4 мая 1960 г. 1 - поле, обусловленное предыдущей вспышкой 29 апреля; 2 - новая вспышка.

Рис.6. Изменение со временем потока солнечных протонов для нескольких значений энергии во время солнечной протонной вспышки 28 сентября 1961 г.

Нерелятивистские протоны.

Первыми приходят к Земле протоны самых высоких энергий, а затем - протоны, имеющие более низкие значения энергий. На рис. 6 показан временной ход потока солнечных протонов для нескольких значений энергии во время солнечной протонной вспышки, наблюдавшейся 28 сентября 1961 г.

Первоначально предполагали, что солнечные космические лучи приходят к Земле в результате диффузии. Диффузия галактических космических лучей в межпланетном пространстве рассматривалась ранее. Уравнение диффузии для солнечных протонов имеет вид:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{r^\alpha} \frac{\partial}{\partial r} \left(D_0 r^{\alpha+\beta} \frac{\partial n}{\partial r} \right).$$

Принимается, что коэффициент диффузии D изменяется как: $D = D_0 r^\beta$.

Здесь $\alpha = 2$ для радиальной диффузии от точечного источника в трехмерном пространстве, (β - численная константа, которая определяется из наблюдаемой вариации n . Решение этого уравнения имеет вид:

$$\ln \left[I t^{(\alpha-1)/(2-\beta)} \right] = b - \frac{a}{t},$$

где a и b - константы, $I = nv/4\pi$ и v — скорость частицы с данной энергией.

Отсюда график, связывающий $\ln \left[I t^{(\alpha-1)/(2-\beta)} \right]$ с $1/t$, должен быть прямой линией.

Кримигис показал, что для протонов с энергией порядка 23 МэВ эта зависимость приблизительно выполняется, если β есть число вида 0, 1/2 или 1 (рис. 7).

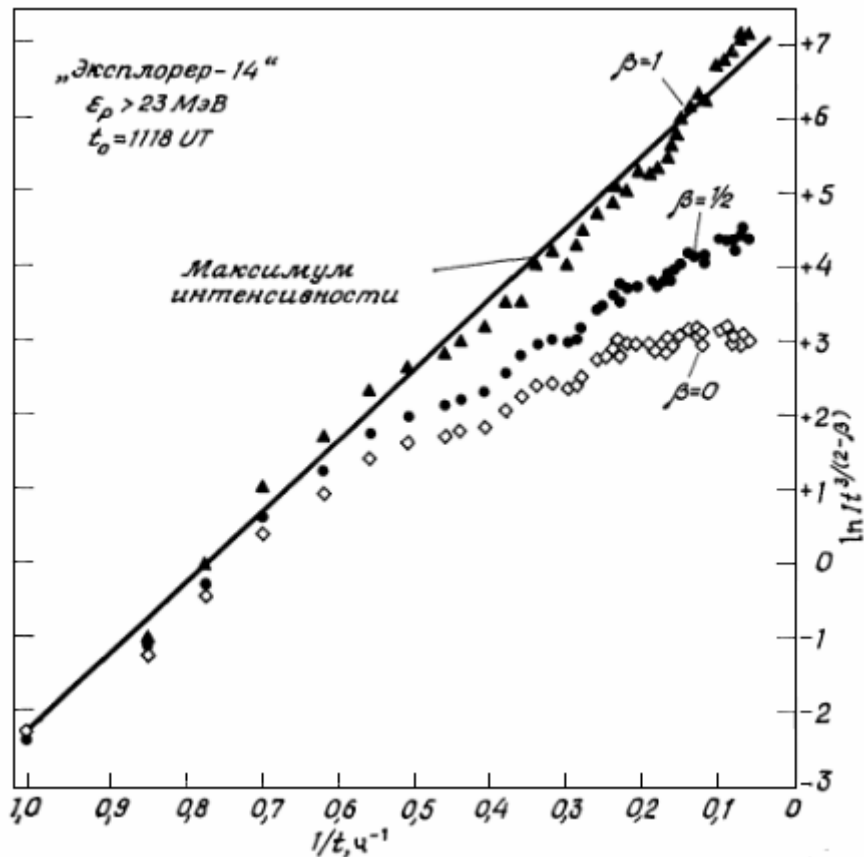


Рис. 7. Зависимость $\ln \left[I t^{(\alpha-1)/(2-\beta)} \right]$ от $1/t$ для протонной вспышки 15 апреля 1963 г. Лучшее совпадение с прямой линией получается при $\beta = 1$.

Однако в некоторых случаях невозможно найти прямолинейную зависимость. Провал» простой теории диффузии частично обусловлен наличием высоконаправленного потока протонов. Рао, Мак-Краккен и Буката показали, что поток часто чрезвычайно анизотропен и направление его максимума лежит вдоль вектора межпланетного магнитного поля.

Электроны высокой энергии

Радиоизлучение типа IV и жесткое рентгеновское излучение, наблюдаемые во время солнечных вспышек, указывают на то, что в области вспышки образуются электроны высокой энергии. За последние годы такие электроны (40—100 кэВ) были обнаружены в межпланетном пространстве. Они тесно связаны с всплесками

рентгеновского излучения и радиоизлучениями. Лин и Андерсон классифицируют солнечные электронные вспышки на два типа: быстрые и запаздывающие. Быстрые электроны наблюдаются примерно через 30—60 мин после максимальной стадии вспышки. Запаздывающие — примерно через 30 ч после соответствующей вспышки. По-видимому, подобно солнечным протонам электроны высокой энергии с западной полусферы Солнца легче достигают Земли, чем с восточной.

Взрывная и ударная волны в межпланетном пространстве. Модели Паркера

Долгое время считали, что во время солнечной бури облако плазмы инжектируется в пустое межпланетное пространство. Чепмен и Ферраро предполагали, что внезапное увеличение горизонтальной составляющей магнитного поля Земли отмечает момент контакта облака плазмы с магнитным полем Земли. Голд считал маловероятным, что облако плазмы имеет передний фронт, достаточно резкий для того, чтобы произвести наблюдаемое внезапное увеличение (если облако плазмы имеет приемлемую температуру), так как из-за теплового движения и почти бесстолкновительной ситуации граница должна быть очень диффузной. Голд полагал, что наблюдаемое внезапное увеличение магнитного поля Земли обусловлено ударной волной.

Паркер предположил, что внезапное увеличение температуры в короне над областью вспышки генерирует взрывную волну,

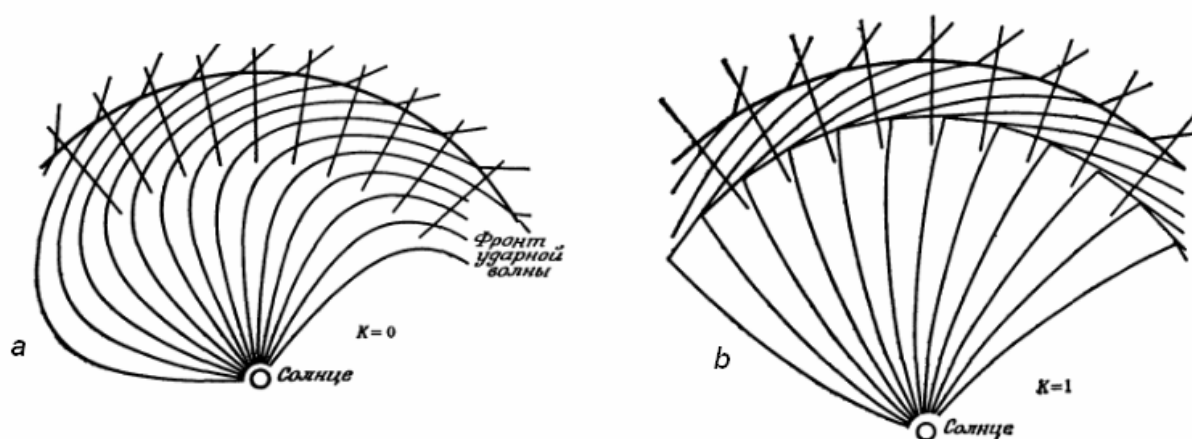


Рис. 8. Искажение силовых линий межпланетного магнитного поля в спокойный день взрывной волной ($K = 0$) [a] и ударной волной ($K = 1$) [b].

Паркер предположил, что взрывная волна распространяется сферически от точечного источника в неподвижном межпланетном газе, плотность которого падает как $\rho = \rho_0 r^{-s}$ где $s = 2$. Здесь r - расстояние от Солнца (точечный источник). Солнечная гравитационная и внутренняя энергии окружающей среды не учитываются. Решения Паркера характеризуются параметром K ; если введение энергии возмущения в межпланетный газ происходит импульсно (т. е. время инжекции меньше, чем время, за которое ударная волна достигает расстояний земной орбиты), то параметр K можно считать равным нулю.

С другой стороны, если облако плазмы во время распространения в межпланетном пространстве действует как поршень, то K должно быть больше нуля, причем его верхний предел равен единице. Паркер предположил, что межпланетные магнитные поля не влияют на распределение картины потока и эти поля заморожены в межпланетную плазму. На рис. 8-а и 8-б показаны конфигурации межпланетных магнитных полей в области, пересекаемой взрывной и ударной волнами соответственно.

Механизм выброса плазмы

а) Теория Милна. Милн предположил, что в солнечной атмосфере существует уровень, где селективное радиационное давление поддерживает определенные газы. При этом газ, который поглощает излучение с длиной волны N_0 , поддерживается радиационным давлением соответствующей интенсивности N_0P_0 (рис.9). Однако если некоторые частицы газа ускоряются каким-то механизмом, то из-за эффекта Доплера они будут поглощать излучение с длиной волны N_1 , а не N_0 . Поскольку радиационное давление N_1P_1 превышает давление N_0P_0 , то газ получит ускорение

$$\frac{N_1P_1 - N_0P_0}{N_0P_0} g,$$

где g — ускорение силы тяжести на Солнце. Ускорение заставит газ поглощать радиацию с еще более короткой длиной волны (N_2P_2). Таким образом, атом, движущийся вверх, «выкарабкивается» из линии поглощения. Милн нашел, что однократно ионизованный кальций может ускориться до скоростей порядка $1,6 \cdot 10^8$ см/с. Сейчас известно, что поддержка хромосферных газов радиационным давлением несущественна по сравнению с тепловым давлением.

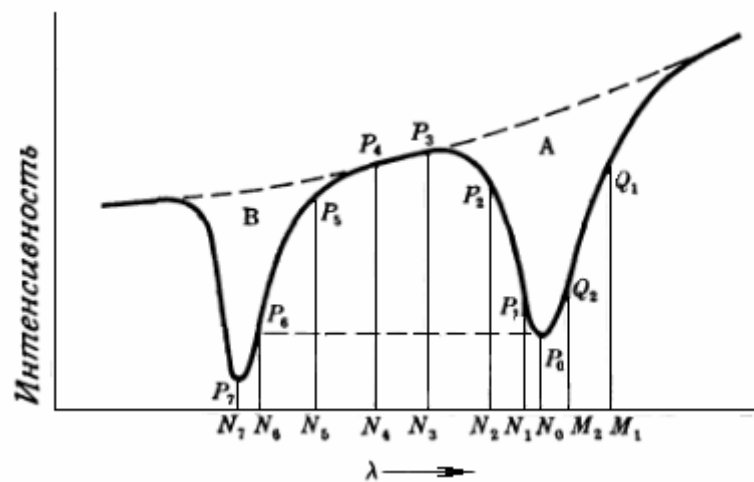


Рис. 9. Спектр, соответствующий механизму выброса Милна.

б) Модель облака солнечной плазмы Кана. Кан предположил, что солнечные частицы инжектируются радиально с поверхности полусферы радиуса $b = 2 \cdot 10^9$ см. Вспышка длится от $t = 0$ до $t = \tau_1$. Излучательная способность (количество частиц за единицу времени с единицы площади) для момента τ обозначается $N(\tau)$. Частицы инжектируются со скоростью $v(\tau)$, которая не изменяется во время полета в межпланетном пространстве. Пусть $v(0) = v_0$, $v(\tau_1) = v_1$, $v(\tau) = \{v_0(\tau_1 - \tau) + v_1\tau\} / \tau_1$.

Обозначим через R гелиоцентрическое расстояние до Земли ($1,5 \cdot 10^{13}$ см); тогда интервал между вспышкой и началом соответствующей магнитосферной бури (R/v_0) и продолжительность бури ($R/v_1 - R/v_0$) равны 26 и 18 ч соответственно. Тогда получим, что $v_0 = 1,6 \cdot 10^8$ см/с, $v_1 = 10^8$ см/с.

в) Механизм «дынного семечка» Шлюгера. Шлютер предположил, что диамагнитная плазма может ускоряться в неоднородном магнитном поле. Механизм выброса плазмы схематично показан на рис.10. Хайдер считал, что двойную волокнистую структуру вспышки можно объяснить гравитационным ускорением частиц газа и их столкновениями с частицами хромосферного газа после инжекции с помощью механизма «дынного семечка».

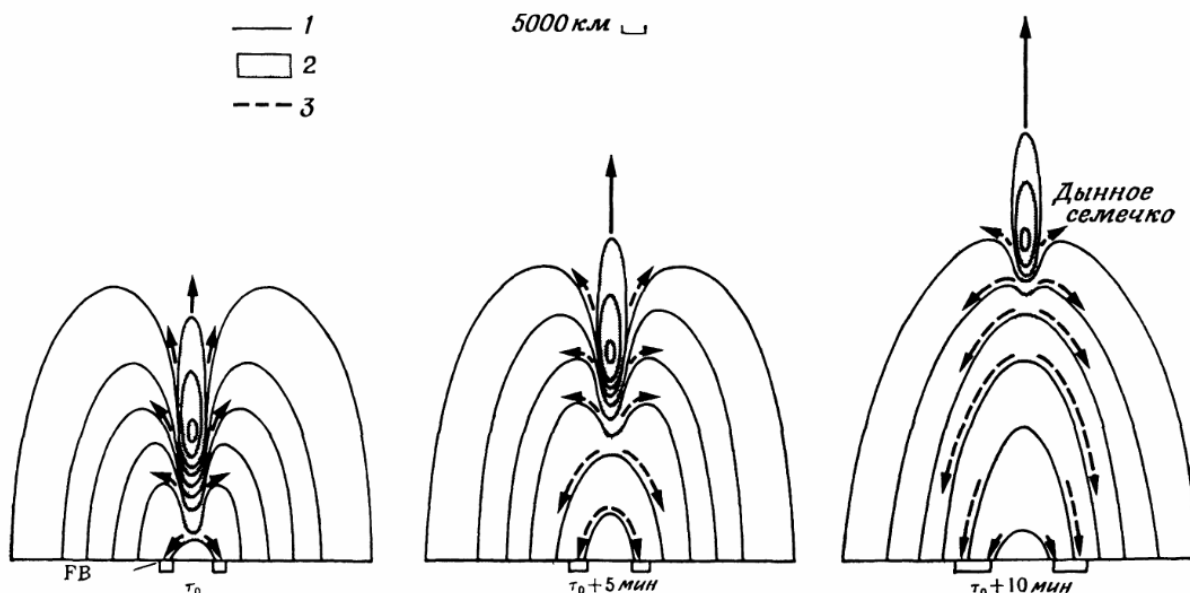


Рис. 10. Схема, иллюстрирующая механизм выталкивания диамагнитной солнечной плазмы из неоднородного магнитного поля. Предполагается, что часть выброшенного вещества вызывает уярчение, подобное вспышке (FB). 1 - силовые линии магнитного поля; 2 - вещество протуберанца-волокну и вспышечноподобных уярчений; 3 - движущееся вещество протуберанца.

Форбуш-понижение потока космических лучей.

Поток галактических космических лучей в области возмущенного солнечного ветра, вызванного солнечными бурями, показывает значительное уменьшение интенсивности. Это явление называют Форбуш-понижением. На рис. 11 показана суперпозиция записей нейтронных мониторов восьми станций Северной Америки для 9-25 июля 1959 г. За этот период произошло три больших Форбуш-понижения, что привело к уменьшению нормальной скорости счета более чем на 20%.

Предложено по крайней мере три объяснения Форбуш-понижения. Согласно первой гипотезе, инжектированная солнечная плазма несет сильные неупорядоченные магнитные поля, которые ослабляют проникновение космических лучей в область, занимаемую облаком плазмы, и рассеивают их. Предполагается, что первоначально облако плазмы не содержит частиц космических лучей. Проникновение происходит в результате процесса диффузии. Относительное уменьшение потока $\delta J/J$ в сферическом облаке в момент $t(s)$ можно описать следующим уравнением:

$$\delta J/J = - \exp(- \pi^2 \lambda v t / 3 r_0^2),$$

где λ и v обозначают среднюю длину свободного пробега и скорость частиц космических лучей, r_0 – радиус облака. Для $r_0 = 1 \text{ a.e.} = 1.5 \cdot 10^{13} \text{ см}$, $t = 10^5 \text{ с}$ и $\lambda = 6 \cdot 10^{10} \text{ см}$, $\delta J/J \approx 5\%$.

Голд предположил, что солнечная плазма уносит солнечные магнитные поля в виде «языка» или «магнитной бутылки». Эти поля отклоняют приходящие космические лучи и позволяют солнечным протонам достичь Земли.

Паркер считал, что межпланетное магнитное поле сдавливается на фронте взрывной волны. Такая сжатая область становится отражателем для космических лучей. Для его идеализированной модели взрывной волны отражение определяется как $(1 - 1/f)$, где f — отношение напряженности магнитного поля сразу же за фронтом взрывной волны к напряженности межпланетного магнитного поля. Космические лучи позади взрывной волны захватываются и испытывают адиабатическое расширение при продвижении взрывной волны. Эти процессы приводят к изменению энергетического спектра космических лучей, а также к значительному уменьшению плотности.

Наблюдения Форбуш-понижения в межпланетном пространстве с космических зондов пока не дали окончательного вывода относительно его причины. Рао, Мак-Кракен и Буката путем сложения последовательных векторов, называемых анизотропными векторами, построили диаграмму, показывающую изменение со временем интенсивности и направления солнечных космических лучей.

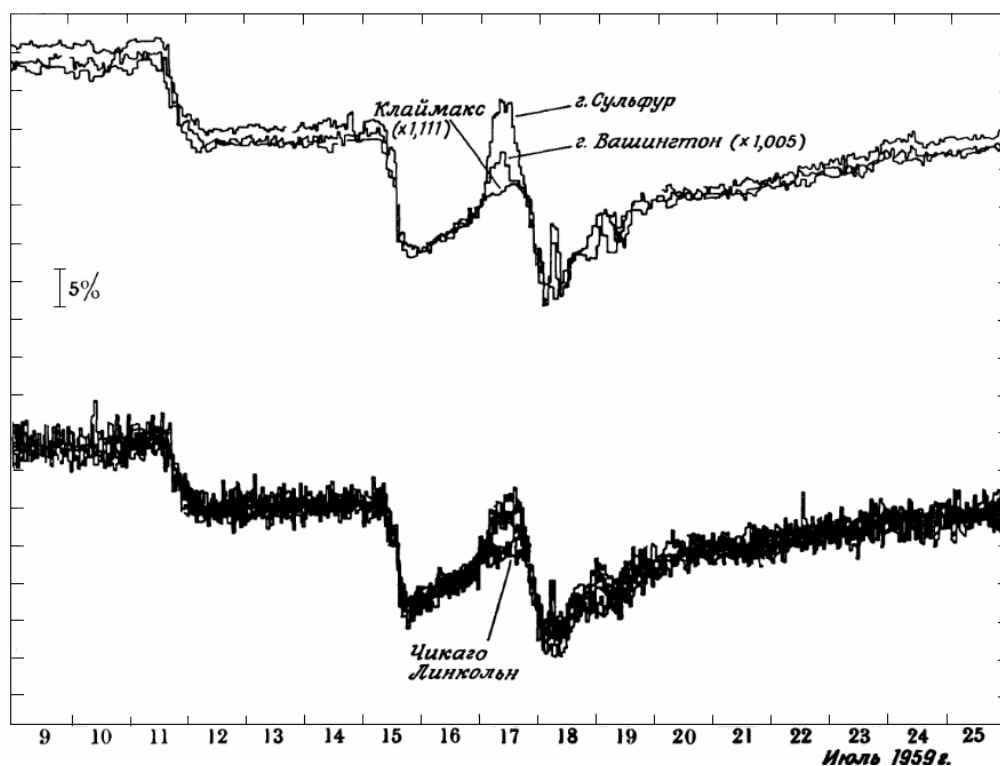


Рис.11. Суперпозиция записей нейтронных мониторов восьми станций Северной Америки: Резолют, Туле, Черчилль, Колледж, Дип-Ривер, Оттава, Чикаго, Линкольн.

В некоторых случаях Форбуш-понижение в месте, где находится космический зонд, происходит в тот момент, когда анизотропные векторы резко изменяют направление. Согласно модели взрывной волны Паркера, такое резкое изменение направления векторов предполагает прохождение ударной волны. Обычно Форбуш-эффект неодинаков в различных областях Земли. Иногда находится направление, при котором поток космических лучей увеличивается даже во время Форбуш-эффекта.

Межпланетные возмущения

Предположим, что в точке F солнечного диска (рис.12,а) происходит мощная солнечная буря. При наблюдении с Земли положение вспышки на диске Солнца зависит от угла между солнечным радиусом, проходящим через точку F, и линией Солнце—Земля.

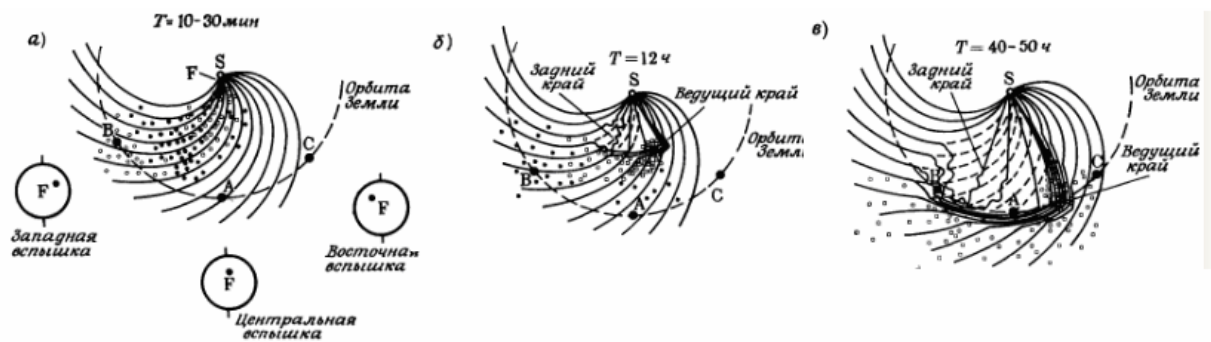


Рис. 12. Схема, иллюстрирующая последовательные стадии возмущения межпланетной среды, обусловленного солнечной бурей: а) 10—30 мин, б) 12 ч, в) 40—50 ч после вспышки. Локализация вспышки на диске Солнца показана буквой F; вспышка видна в различных частях солнечного диска в зависимости от взаимного расположения Земли и вспышки.

Если вспышка наблюдается на центральном меридиане, то Земля расположена в точке А. Если вспышка видна на удаляющейся западной полусфере, Земля будет в точке В, и в точке С- если вспышка видна в приближающейся восточной полусфере. На рис. 12, а, б и в схематически показано межпланетное состояние для трех последовательных эпох: 10—30 мин, 12 ч и 40—50 ч после солнечной вспышки. Во время первого интервала времени солнечные протоны быстро распространяются в межпланетном пространстве, вначале релятивистские протоны, затем протоны с меньшей энергией. Так как протоны движутся вдоль силовых линий межпланетного магнитного поля, то они достигают земной орбиты вначале в точке В и позднее в точке А. На этой стадии в точке С они не наблюдаются. Солнечная плазма расположена очень близко к Солнцу.

Примерно через 12 ч после вспышки как солнечная плазма, так и ударная волна, генерированная в солнечном ветре, находятся на полпути к Земле. К этому времени релятивистские солнечные протоны распространяются во внешнюю межпланетную среду. Существует тенденция увлечения фронтом ударной волны солнечных протонов низкой энергии, что приводит к большому накоплению протонов в области фронта.

Как ударная волна, так и движущаяся вперед плазма замедляются и пересекают земную орбиту примерно через 40—50 ч после вспышки. На рис. 12, в показано межпланетное состояние сразу же после того, как плазма достигает земной орбиты. При прохождении фронта ударной волны мимо Земли магнитосфера «погружается» в солнечный ветер, который имеет повышенные значения скорости, плотности и температуры, что приводит к внезапному сжатию магнитосферы. Это явление регистрируется магнитометром на поверхности Земли как внезапное увеличение горизонтальной компоненты поля, отмечающее начало магнитосферной бури. Примерно в это же время вне магнитосферы и в полярных областях часто наблюдается большое увеличение солнечных протонов низкой энергии.

Прохождение фронта ударной волны можно связать с быстрым уменьшением потока галактических космических лучей, так как диффузия космических лучей через фронт ударной волны может быть ослаблена.

Во время, когда ударная волна, несущая облако плазмы, действует на магнитосферу, последняя становится неустойчивой. Во внешней магнитосфере образуется большой поток частиц высокой энергии. На этой стадии растут и затухают системы интенсивных электрических токов, вызывая магнитосферные возмущения. Расстояния, до которых распространяется влияние солнечных бурь в межпланетном пространстве, неизвестны. Есть несколько сообщений о том, что декаметровое радиоизлучение Юпитера увеличивается через несколько дней после мощной солнечной бури.

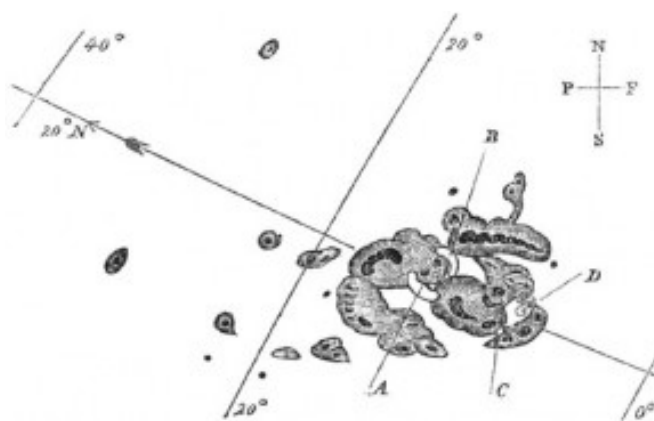
Солнечная и геомагнитная буря 1859 года, известная как Событие Кэррингтона или Солнечный супершторм (Solar Superstorm) - мощнейшая за историю наблюдений геомагнитная буря.

С 28 августа по 2 сентября на Солнце наблюдались многочисленные пятна и вспышки. Сразу после полудня 1 сентября британский астроном Ричард Кэррингтон наблюдал наибольшую вспышку, которая вызвала крупный корональный выброс массы. Он устремился прямо к Земле и достиг ее через 18 часов. Это необычно - такое расстояние обычно проходит выбросом за 3-4 дня. Он двигался так быстро, потому что предыдущие выбросы расчистили путь.

1-2 сентября началась крупнейшая за всю историю регистрации геомагнитная буря, вызвавшая отказ телеграфных систем по всей Европе и Северной Америке. Северные сияния наблюдались по всему миру, даже над Карибами; также интересно, что над Скалистыми горами они были настолько яркими, что свечение разбудило золотоискателей, которые начали готовить завтрак, думая, что наступило утро. По оценкам, *Dst*-индекс геомагнитной активности во время бури достигал **-1760 нТл**.

Ледяные керны свидетельствуют, что события подобной интенсивности повторяются в среднем примерно раз в 500 лет. Самая сильная буря с начала космической эры (с 1957 года) произошла 13 марта 1989 года, когда *Dst*-индекс геомагнитной активности достигал **-640 нТл**. Также после 1859 года менее сильные бури происходили в 1921 и 1960 годах, когда отмечались массовые сбои радиосвязи.

Сразу же после полудня 1 сентября английский астроном Ричард Каррингтон (Richard Carrington) сделал набросок группы солнечных пятен необычно больших размеров. В 23:18 ученый стал свидетелем интенсивного белого свечения с двух направлений локализации солнечных пятен. Он напрасно пытался привлечь чье-либо внимание в обсерватории к этому удивительному пятиминутному спектаклю - уединенно работающие астрономы редко находят аудиторию, разделяющую их энтузиазм. 17 часов спустя по всей Америке вторая волна полярного сияния превратила ночь в день даже далеко на юге, в Панаме. В газетах появились сообщения о малиновом и зеленом свечении. Золотоискатели в Скалистых горах проснулись и позавтракали в час пополуночи, думая, что Солнце уже взошло в облачном небе. Телеграфные системы перестали работать в Европе и Северной Америке.



Зарисовка Солнца Кэррингтоном в 1859 году

Во время бури 1859 по всей Америке и Европе телеграфное сообщение было нарушено. Линии передач искрились, телеграфная бумага спонтанно возгоралась. Некоторые устройства продолжали работать даже будучи отключенными от линий передач.

Представим, что бы случилось, если бы Событие Кэррингтона произошло в наши дни. Устройства никак не защищены от воздействия радиации. Мы окажемся без мобильной связи. Не будет телевидения, интернета, вообще ничего. Конечно, скорее всего, технологии военных будут работать (по крайней мере, на это можно надеяться, иначе нам просто автоматически крышка).

В 2013 году будет пик солнечной активности. Конечно, не стоит слушать бульварные издания, которые предрекают смерть и хаос – в конце-концов, с 1859 года прошло несколько циклов активности, но, тем не менее, учитывая, что мы всё больше и больше полагаемся на электронику, стоит быть начеку. На этот раз всё не кончится удивлёнными старателями и сломанным телеграфом.

В опубликованном в конце 2008 года американской Академией наук докладе «Угрозы космической погоды: социальные и экономические последствия», подготовленном по заказу космического агентства США НАСА, содержится важное предупреждение правительству: внезапный шторм на Солнце по своим последствиям может быть сравним с ядерной войной или падением гигантского астероида на Землю. Результаты внезапного солнечного шторма «могут оказаться разрушительными для современного общества, которое слишком зависит от техники», считает профессор Дэниел Бейкер из Колорадского университета, специалист по астрофизике и физике атмосферы и один из авторов опубликованного доклада.

Главный тезис доклада, подготовленного учеными разных специальностей, состоит в том, что рано или поздно случится космический шторм, значительно более сильный, чем все вспышки солнечной активности, свидетелем которых стала человеческая цивилизация, уже вооруженная высокими технологиями. Подобные события уже случались в прошлом, но в те времена человечество еще не так сильно зависело от электрических сетей (или вообще их не имело) и вообще не использовало спутники.

Опасения, которые вызвало появление этого доклада, возникли не на пустом месте. То, что сильные солнечные бури случаются, стало известно астрономам задолго до наступления эры спутников. В августе 1859 года солнечная активность была настолько сильной, что имевшиеся тогда в распоряжении ученых магнитометры зашкаливали, «полярное» сияние наблюдали жители стран у экватора, на короткое время выходил из строя «интернет викторианской эпохи» - телеграф, а на некоторых участках телеграфисты даже отключали телеграф от электрических батарей и передавали сообщение на индуцированном магнитной бурей токе.

С переходом цивилизации на электричество последствия даже не такой сильной, как в 1859 году, аномальной солнечной активности стали более чувствительными. В конце октября — начале ноября 2003 года в результате всплеска солнечной активности на севере Европы произошли аварии на трансформаторных станциях, приведшие к отключению электричества в северных районах Швеции, а один из весьма дорогостоящих спутников НАСА — ADEOS-2 — вышел из строя. Радиационный шторм был такой силы, что НАСА отдало распоряжение космонавтам на Международной космической станции надеть скафандры для дополнительной защиты. Аналогичные инциденты происходили, пусть и в меньших масштабах, и ранее, а во время солнечной бури в январе 2005 года авиакомпании United Airlines пришлось корректировать маршруты своих самолетов, проходивших в районе Северного полюса.

А вот уже следующий мощный всплеск аномальной солнечной активности может поразить человечество, ставшее зависимым от спутников связи и GPS. Стали значительно более распространенными и важными для функционирования современного общества и электрические сети. Последствия геомагнитного всплеска будут аналогичны взрыву мощной электромагнитной бомбы, вызывающему перегорание электрических сетей и необратимые повреждения всей радиоэлектронной аппаратуры.

Мощный солнечный шторм, даже аналогичный по силе тому, который произошел в 1859 году, может привести к катастрофическим последствиям: серьезным авариям на электростанциях и распределительных станциях, массовому отключению электричества, которое приведет к отключению систем водоснабжения и теплоснабжения, холодильных установок, авариям в медицинских учреждениях, отключению систем телефонной связи, авариям на электротранспорте и т.д. Кроме того, такой шторм приведет к исключительно серьезным авариям спутников связи и спутников, отвечающих за работу систем навигации самолетов и морских судов, поскольку, в отличие от наземной электроники, электронные устройства космических аппаратов значительно менее защищены и атмосферой, и магнитосферой Земли.

Большая активность Солнца, и в частности взрывы на солнечной поверхности, которые называются «солнечной бурей», могут парализовать Землю в ближайшие три года, предупреждают британские ученые.

»Солнечная буря 1859 г. была самой сильной из всех когда-либо зафиксированных. Полярные сияния озарили все небо далеко на юг, до Карибских островов, стрелки магнитных компасов крутились как сумасшедшие, телеграфные системы вышли из строя.

»Согласно анализу слоев ледяной коры, подобный выброс частиц Солнцем происходит только раз в 500 лет. Тем не менее даже не столь сильные солнечные бури, наблюдаемые раз в 50 лет, могли бы сжечь искусственные космические спутники, породить большие помехи в радиовещании и вызвать глобальное отключение электричества.

»Высокая цена ущерба, наносимого солнечными бурями, оправдывает внедрение систематических наблюдений за Солнцем, а также необходимость серьезной защиты спутников и наземных энергосистем.

Обычные условия. Магнитное поле Земли обычно отклоняет солнечные заряженные частицы, формируя магнитосферу, область пространства, напоминающую формой каплю (на илл.). Со стороны Солнца граница этой области – магнитопауза – находится на расстоянии около 60 тыс. км от нашей планеты.

Первые стадии удара. Когда после вспышки происходит выброс вещества из солнечной короны, корональные выбросы массы, эти облака плазмы сильно искажают магнитосферу. В крайнем случае, если **солнечная буря** очень сильная, возможно даже проникновение магнитопаузы в радиационные пояса Земли и их уничтожение.

Разрыв и перестройка линий магнитного поля. Солнечная плазма обладает собственным магнитным полем и, распространяясь к нашей планете, порождает возмущения в магнитном поле Земли. Если поле плазмы направлено в противоположную сторону от магнитного поля Земли, то они могут соединиться, или может произойти разрыв, высвобождающий магнитную энергию, которая ускоряет заряженные частицы, порождая таким образом яркое полярное сияние и сильные электрические токи.

Первый порыв бури. Сильнейшая буря породила не один, а два корональных выброса массы. Первый имел около 40–60 часов до прибытия к Земле. Согласно данным магнитометров 1859 г., магнитное поле выброшенной плазмы предположительно обладало спиральным профилем. Когда первая волна ударила о Землю, ее магнитное поле было ориентировано на север. Будучи направленным таким образом, магнитное поле усилило собственное магнитное поле Земли, что свело к минимуму эффект взаимодействия. Корональные выбросы массы сжали магнитосферу Земли - область околоземного пространства, в которой магнитное поле Земли превосходит магнитное поле

Солнца - и были зарегистрированы магнитоизмерительными станциями на поверхности Земли как внезапное начало солнечной бури. В остальном же волна прошла незамеченной. Несмотря на то, что плазма продолжала распространяться дальше, огибая Землю, магнитное поле плазмы медленно вращалось и через 15 часов воспрепятствовало магнитному полю Земли, а не усилило его. В результате произошел контакт линий ориентированного на север магнитного поля Земли и ориентированного на юг облака плазмы. Далее линии поля разъединились на более простые структуры, порождая огромное количество скрытой энергии. Именно по этой причине работа телеграфа нарушилась, и началось полярное сияние. Через день или два плазма прошла мимо Земли, и магнитное поле нашей планеты возвратилось в свое нормальное состояние.

Вспышки рентгеновского излучения. Самые большие корональные выбросы массы обычно совпадают с одной или несколькими интенсивными вспышками, и буря 1859 г. не была исключением. Видимая вспышка, которую зафиксировали 1 сентября Каррингтон и другие, обладала температурой около 50 млн градусов Кельвина. Согласно этим оценкам, был испущен не только свет видимого диапазона, но и рентгеновское и гамма-излучение. Это была самая яркая солнечная вспышка, когда-либо зафиксированная, обнаруживающая гигантские энергии солнечной атмосферы. Излучение ударило Землю спустя время, которое понадобилось свету, чтобы дойти до нашей планеты (восемь с половиной минут), гораздо раньше второй волны коронального выброса. Если бы в этом процессе существовали короткие радиоволны, они могли бы оказаться бесполезными за счет распределения энергии в ионосфере: высотные слои ионизированного газа отражают радиоволны. Рентгеновское излучение также нагревало верхнюю часть атмосферы и приводило к тому, что она разрасталась на десятки и сотни километров.

Вторая ударная волна. До того как окружающая плазма солнечного ветра получила достаточно времени для заполнения пустот, сформировавшихся за счет прохождения первой волны корональных выбросов, Солнце породило такую же вторую. При небольшом количестве задерживающего вещества корональный выброс достиг Земли за 17 часов. В этот момент его магнитное поле было ориентировано на юг, и поэтому произошло немедленное геомагнитное нарушение. Оно оказалось настолько неистовым, что сжало магнитосферу Земли (которая обычно простирается на 60 тыс. км) до 7 тыс. км или, возможно, даже до верхней границы стратосферы. Пояса излучения Ван Алена (радиационные пояса), окружающие нашу планету, были временно сорваны, огромное количество протонов и электронов было выброшено в верхние слои атмосферы. Эти частицы могли быть ответственными за интенсивно красное полярное сияние, видимое из большого количества наблюдательных пунктов на Земле.

Фотоны, обладающие высокой энергией. Солнечные вспышки и интенсивные корональные выбросы также ускоряли протоны до энергий в 30 МэВ или выше. В арктических областях, где магнитное поле Земли создает наименьшую защиту, эти частицы проникали до высот 50 км и давали дополнительную энергию ионосфере. Согласно исследованиям Брайана Томаса (Brian C. Thomas) из Университета Уошберн, протонный ливень солнечной бури 1859 г. уменьшил количество озона в земной стратосфере на 5%. Для восстановления озонового слоя потребовалось четыре года. Наиболее высокоэнергичные протоны с энергиями больше 1 ГэВ вступили во взаимодействие с ядрами атомов азота и кислорода в атмосфере, порождая нейтроны и создавая аномальный недостаток азотной кислоты. Достигающие земной поверхности ливни нейтронов называются «событиями на поверхности», но технологии не были в состоянии зафиксировать их движение. К счастью, это не было опасно для жизни.

Массивные электрические токи. Поскольку полярные сияния распространяются от высоких широт к низким, сопровождающие их ионосферные и авроральные

электрические токи индуцируют интенсивный, соединяющий континенты ток на поверхности Земли. Так эти токи проникли в телеграфную систему. Многоамперные высоковольтные нагрузки привели к тому, что сгорели несколько телеграфных станций.

Итак, последовательность событий:

- 1. Солнечные пятна.** 26 августа. Большая группа пятен появилась на Солнце около 55° западной долготы. Возможно, произошел первый корональный выброс массы.
- 2. Корональные выбросы массы.** 28 августа. Корональный выброс массы достиг Земли скользящим ударом – благодаря солнечной широте его источника; магнитное поле выброса было ориентировано на север.
28 августа, 07:30 UTC. Гринвичская магнитная обсерватория обнаружила нарушение – сжатие сигнала в магнитосфере
- 3. Точи, где было зафиксировано полярное сияние.** 28 августа, 22:55 UTC. Начало основной фазы солнечной бури. Большие магнитные возмущения, нарушение работы телеграфа и полярные сияния на юге, до 25° северной широты. 30 августа. Завершение геомагнитных возмущений от первого коронального выброса массы
- 4. Вспышка рентгеновского излучения.** 1 сентября, 11:15 UTC. Астроном Ричард Каррингтон (Richard C. Carrington) наряду с другими замечает белые вспышки на Солнце; большая группа солнечных пятен совершила вращение до западной долготы 12°
- 5. Точки, где было зафиксировано полярное сияние.** 2 сентября, 05:00 UTC. Магнитные обсерватории Гринвича и Кью фиксируют геомагнитный хаос, немедленно последовавший за возмущениями; второй корональный выброс массы достиг Земли за 17 часов, двигаясь со скоростью 2380 км/с, обладая южной ориентацией магнитного поля; полярные сияния появляются до 18° северной широты
- 6. 3–4 сентября.** Заканчивается основная фаза геомагнитного возмущения, вызванная вторым выбросом корональной массы; продолжается рассеянное полярное сияние уменьшающейся интенсивности

Повторение сильной солнечной бури 1859 г. могло бы стать «космической Катриной», приводя к повреждениям спутников, энергосистем и систем радиосвязи общей стоимостью в миллиарды долларов.

Влияние геомагнитных бурь на жизнь и здоровье людей

Геомагнитные бури являются одним из важнейших элементов космической погоды и влияют на многие области деятельности человека, из которых можно выделить нарушение связи, систем навигации космических кораблей, возникновения поверхностных зарядов на трансформаторах и трубопроводах и даже разрушение энергетических систем.

Магнитные бури также влияют на здоровье и самочувствие людей. Раздел биофизики, изучающий влияние изменений активности Солнца и вызываемых ею в земной магнитосфере возмущений на земные организмы, называется гелиобиологией. Острые споры вызывал в своё время вопрос о влиянии солнечной активности на возникновение несчастных случаев и травматизм на транспорте и в производстве. На это впервые указал ещё в 1928 году Александр Чижевский.

Момент начала стрессовой реакции может сдвигаться относительно начала бури на разные сроки для разных бурь и для конкретного человека. Некоторые люди начинают реагировать на магнитные бури за 1-2 дня до них, то есть в момент вспышек на самом Солнце, фактически, реагируя на солнечные бури.

Солнечный шторм и магнитные бури в 2012-2013 годах

Длительность солнечного периода составляет каждые 11-12 лет. В конце каждого периода наблюдается максимум солнечной активности. Русский биофизик Александр Чижевский первым заметил связь активности Солнца и хода истории. 1905 год – максимум солнечной активности, 1917 год – максимум солнечной активности, 1928–29 тоже максимум активности, 1991 год - максимум солнечной активности и, наконец, 2002 год, который особенно нас затронул – тоже максимум солнечной активности.

Сегодня Солнце вступает в новую активную фазу. Взрывы идут почти ежеминутно. Специалисты заговорили о подлинном космическом цунами! Оно и вызывает аномальные магнитные бури, но пик активности Солнца придется на 2012 и 2013 годы.

В 2013 году ожидается солнечный шторм, который может привести к частичному или полному отключению электричества по всему земному шару. Угроза технологической инфраструктуре должна быть настолько большой, что британский Министр обороны Лайм Фокс собрал срочную пресс-конференцию. Британские ученые предупредили, что будет сильный шторм на Солнце, который обычно бывает один раз в столетии. Шторм, который достигнет своего максимума в конце 2012 - в начале 2013 годов.

NASA ранее подготовили сообщение, в котором они объясняют, что такая большая солнечная вспышка магнитной энергии, вызовет хаос на большей части Земли. Вспышка может вызвать геомагнитный шторм на Земле, который отключит электричество на несколько часов, дней или месяцев.

В дополнении к отключению электропитания, не будут летать самолеты, снизятся запасы продовольствия и в течение многих месяцев не будет доступа к Интернету.

Прогноз солнечных бурь

На конференции подразделения физики Солнца (Solar Physics Division) Американского астрономического общества (American Astronomical Society) группа специалистов из Католического университета Америки представила доклад о разработке новых методов прогнозирования солнечных бурь на Земле с точностью до 12 часов. Следует отметить, что ныне существующие методы позволяют получать прогноз с точностью до 2-5 дней.

Для получения более точных прогнозов была создана новая модель образования протуберанцев, которая позволяет довольно точно определить время, когда поток ионизованного газа достигнет Земли. При взаимодействии этого газа с магнитным полем Земли возникают магнитные бури, которые помимо такого эффектного явления как северное сияние, могут привести к неполадкам в системах радиосвязи и в линиях электропередач, а также к выводу из строя спутников.

Такие точные прогнозы будут весьма полезны операторам различных систем связи и спутников, находящихся на околоземных орбитах, поскольку позволят минимизировать "нерабочее" время, когда указанные системы будут находиться в безопасном режиме.

Точность прогноза зависит от определения начальной скорости потока ионизованного газа, которая может меняться от 20 до 2000 км/сек. Затем может происходить ускорение или замедление движения этого газа, чтобы его скорость соответствовала скорости солнечного ветра, которая составляет около 400 км/сек. Для определения закономерностей изменения скорости ионизованного газа со временем специалисты Католического университета использовали данные с научных космических кораблей SOHO и Wind, а также информацию, полученную много лет назад с помощью зондов Helios-1, Pioneer Venus Orbiter и P78-1.

В результате были получены следующие выводы: ионизованный газ с начальной скоростью 200 км/сек достигает Земли за 4,5 дня, а если его начальная скорость составляла 1000 км/сек, то он прилетит к Земле за 2,25 дней.

Разработанная модель применялась для расчета времени возникновения электромагнитных возмущений на Земле после вспышки на Солнце, случившейся 6 июня

этого года. Согласно расчетам, ионизованный газ должен был достигнуть магнитосферы Земли 9 июня в 4 часа по Гринвичу, а на самом деле это произошло на 6 часов раньше. То есть результаты укладывались в пределы ошибки в 12 часов.

Астрономы Католического университета собираются продолжить свои исследования, чтобы определить влияние размера протуберанцев и их расположения на солнечном диске на скорость движения ионизованного газа в космическом пространстве. (InfoArt News Agency).