

КОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Санкт-Петербург

1991

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ОРДЕНА ЛЕНИНА ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ им. А. Ф. ИОФФЕ

КОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
(сборник научных трудов)

Санкт-Петербург
1991

УДК 523.98

ДИНАМИКА УСКОРЕНИЯ И ВЫХОДА РЕЛЯТИВИСТСКИХ СКР ИЗ
СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЫ

Э.В.Вашенюк, Л.И.Мирошниченко, М.О.Сорокин
(СССР)

Х.Перес-Переса, М.Альварес-М., А.Гальегос-С.
(Мексика)

А н н о т а ц и я

Проанализированы временные, спектральные и питч-угловые характеристики исходя из данных наземных наблюдений. Были получены некоторые доказательства того, что существует две (возможно независимые) компоненты - быстрая и медленная - в определенных протонных событиях для интерпретации этих результатов. Была предложена модель. В этой модели обе компоненты возникают в процессе магнитного пересоединения либо в нейтральном слое коронального потока под действием генерируемых вспышкой ударной волны (быстрая компонента), либо прямо в области вспышки (в её начальной фазе) с последующим временным задерживанием частиц в расширяющейся магнитной бутылке (медленная компонента).

DYNAMICS OF ACCELERATION AND ESCAPE OF RELATIVISTIC SCR FROM
THE SOLAR CORONA

E.V.Vashenyuk , L.I.Miroshnichenko, M.O.Sorokin
(USSR)

Ch.Perez-Peraza, M.Alvares-M.,A.Galiegos -C.
(Mexico)

A b s t r a c t

The temporal, spectral and pitch-angle characteristics of relativistic SCR are analyzed from ground-based data. Some evidence has been obtained that there are two (probably independent) components- a prompt and a delayed ones - existing in certain proton events. A model has been suggested to interpret the results. In this model, both components arise in the process of magnetic reconnection either in the neutral sheet of the coronal streamer under the action of the flare-generated shock wave (the prompt component), or right in the flare region (in its initial phase) with subsequent temporary containment of particles in the expanding magnetic bottle (the delayed component).

ДИНАМИКА УСКОРЕНИЯ И ВЫХОДА РЕЛЯТИВИСТСКИХ СКЛ ИЗ
СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЫ

Э.В.Вашенюк, Л.И.Мирошниченко, М.О.Сорокин
(СССР)

Х.Перес-Пераса, М.Альварес-М., А.Гальегос-С.
(Мексика)

В в е д е н и е

Картина генерации и выхода СКЛ из солнечной короны пока еще далека от полного понимания. Однако некоторые ключевые факты можно считать достаточно достоверными. Ускорение частиц до высоких энергий в солнечных вспышках обусловлено, по-видимому, электрическими полями импульсной и (или) возможно турбулентной природы, а генерация таких полей связана, скорее всего, с процессами магнитного пересоединения, образования и разрыва токовых слоев в солнечной атмосфере [1]. Основное ускорение (то есть ускорение основной массы СКЛ до высоких энергий) происходит достаточно быстро (секунды - доли секунд). Ускоренные частицы при этом не могут сразу выйти в межпланетное пространство и удерживаются внутри расширяющейся магнитной бутылки, связанной с плазменным выбросом из места вспышки, на переднем фронте которого образуется ударная волна (УВ) [2,3]. Освобождение частиц из бутылки при её разрушении возможно вследствие неустойчивости Релея-Тейлора, когда давление вне бутылки превысит давление внутри неё [2,3]. В [4,5] развита количественная модель, позволяющая описать эволюцию временного хода интенсивности и энергетического спектра частиц при конвективном переносе вместе с расширяющейся магнитной бутылкой, а после ее разрушения азимутальным распространением в короне посредством дрейфа и диффузии. В литературе обсуждается также возможность дополнительного ускорения плазменной турбулентностью частиц, захваченных за фронтом УВ [6-10] и дрейфового ускорения на фронте УВ [7,9,10].

В последние годы различными авторами были получены принципиально новые данные о временных, спектральных и угловых характеристиках релятивистских солнечных протонов у Земли и вблизи Солнца. В частности, удалось оценить времена начала испускания

и начала регистрации релятивистских солнечных протонов у Земли (с точностью 1-5 мин.) [11], характерные времена ускорения и максимальные энергии протонов при магнитном пересоединении в корональных токовых слоях при их взаимодействии, соответственно, с периферической частью корональной магнитной бутылки [4] и фронтом корональной UV [12,13]. Были получены также наблюдательные указания о возможном раздельном осуществлении быстрой и медленной компонент частиц в некоторых солнечных протонных событиях (СПС) [14,15]. С помощью развитого в [16,17] метода решения обратной задачи распространения были восстановлены временные профили, энергетические спектры [18,19] иpitch-угловые распределения [19] вблизи Солнца для ряда СПС. При этом в некоторых событиях спектр быстрой компоненты оказался заметно жестче, чем в медленной [18]. Ниже анализируются данные о двух предполагаемых компонентах СКЛ и на основе этих данных сделана попытка построить непротиворечивую физическую модель генерации и выхода из солнечной короны релятивистских частиц.

Данные наблюдений

Изучение релятивистских СКЛ позволяет понять свойства солнечного ускорителя при экстремальных условиях (короткое время ускорения, максимальная энергия ускоренных частиц и т.п.). Авторы [14, 15] впервые обратили внимание на систематические различия в форме временных профилей СПС по данным наземных наблюдений (рис.1, на котором показаны 4 последовательных СПС на фазе спада 21-го цикла солнечной активности). Различия подтверждались также распределением событий по полуширине временного профиля в зависимости от гелиодолготы вспышки, на основе чего в [14,15] сделан вывод о возможном раздельном осуществлении двух компонент: медленной (МК) и быстрой (БК) в одном и том же протонном событии. Раздельное осуществление быстрой и медленной компонент в событиях на рис.1 подтверждает также анализ с помощью известных соотношений:

$$v \cdot T_m = A_m + B_m \cdot v \quad (1)$$

$$v \cdot T_n = A_n + B_n \cdot v, \quad (2)$$

где T_n и T_m , соответственно, время прихода первых частиц и максимума интенсивности относительно начала радиовсплеска II типа

(предполагаемый момент генерации); v - скорость частиц; A_n и A_m - суммарный путь, пройденный в межпланетном пространстве, соответственно, первыми частицами и основной их массой; B_n и B_m - время, проведенное в короне соответствующими популяциями частиц.

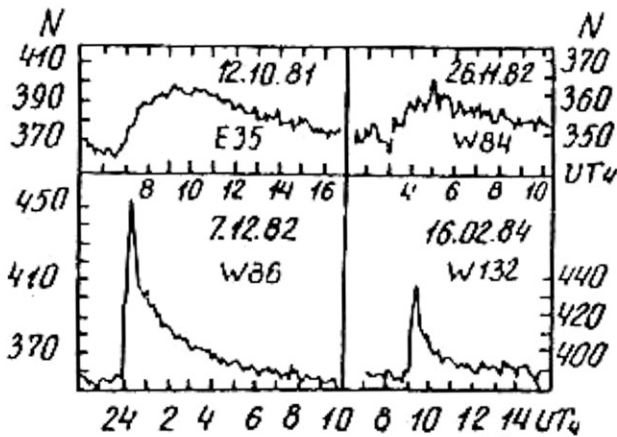
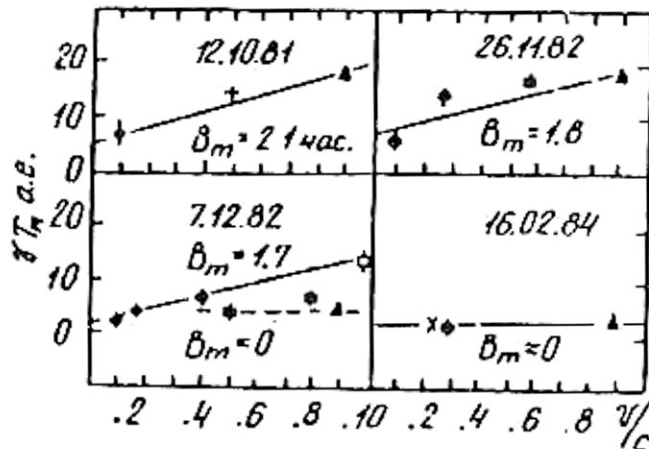


Рис.1.
СПС 1981-84 гг. по данным нейтронного монитора в Апатитах [14].

На рис.2 показана зависимость пройденного пути $v \cdot T_m$ от скорости частиц различной энергии и жесткости (светлым прямоугольником обозначены данные по электронам, остальные точки соответствуют протонам) для четырех указанных СПС (рис.1). Видно, что в событиях 12.10.81 г. и 26.11.82 г. наблюдалась лишь медленная компонента, для которой $B_m = const$ и не зависит от энергии. В событии 7.12.82 г. наряду с медленной, при больших энергиях протонов проявилась также быстрая компонента ($B_m \approx 0$). 16.02.84 г. наблюдалась, по-видимому, только быстрая компонента. Две компоненты - быструю и медленную-можно выделить также и в популяции т.н. "первых" частиц.

Рис.2.
 $v \cdot T_m$ анализ событий на рис.1.



На рис.3 показано распределение числа событий в зависимости от величины B_n . Видно, что в большинстве событий испускание в межпланетное пространство первых частиц начинается через 5-15 мин. ($\bar{B}_{n1} = 8$ мин.) от начала радиовсплеска II типа; в остальных

событиях это время составляет 20-30 минут и более ($\bar{B}_{\pi 2} = 30$ мин.). Интересно, что средняя величина B_{π} в области энергий ~ 40 МэВ равна 29 мин. [20], то есть для медленной компоненты B_{π} не зависит от энергии, так же, как и величина B_m (независимость от энергии в "медленных" событиях ранее была показана в [21]).

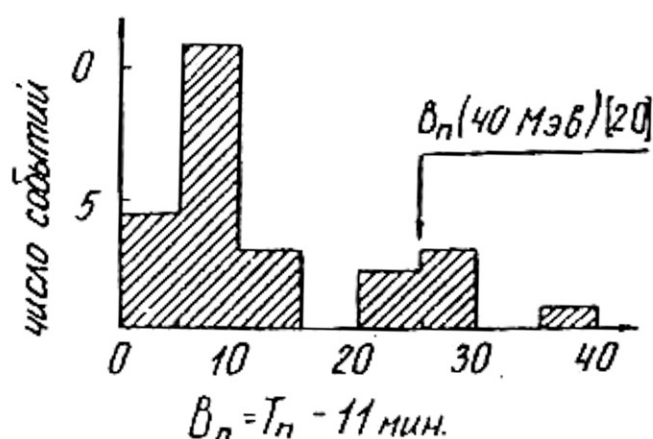


Рис.3.
Распределение числа событий по величине B_{π} .

На существование двух компонент указывают также данные по анизотропии солнечных протонов. На рис.4 показаны усредненные профили возрастания на двух группах станций нейтронных мониторов [22]. Соответственно, А-профиль интенсивности на станциях с асимптотическими конусами приёма, расположенными вблизи оси анизотропии, В - профиль интенсивности рассеянной компоненты.

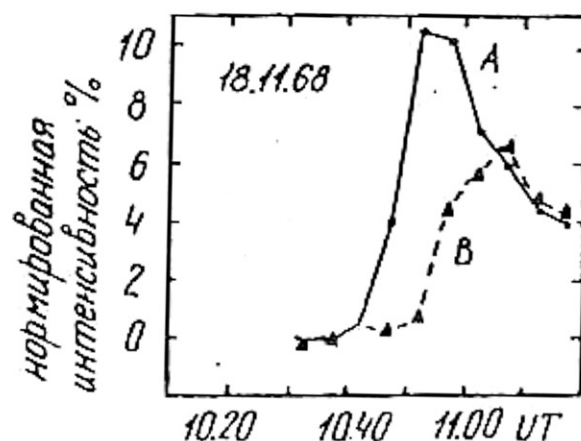


Рис.4.
Быстрая А и медленная В компоненты в событии 18.11.68 [22].

Временной сдвиг между анизотропной и рассеянной компонентами на рис.4 аналогичен временному сдвигу между быстрой и медленной компонентами на рис.3. Такая ситуация является типичной для многих СЭС. Представляется маловероятным, чтобы во всех подобных случаях

за орбитой Земли существовала идеально отражающая граница, порождающая рассеянную компоненту СКЛ. Вместе с тем, если бы изотропная компонента порождалась одним только рассеянием в межпланетной среде, то временной профиль её должен был быть более плавным, чем на рис.4. Таким образом, следует предположить, что пичч-угловое распределение в значительной мере формируется уже вблизи Солнца и источник быстрой компоненты является довольно анизотропным, что подтверждается данными о восстановленных пичч-угловых распределениях вблизи Солнца [18]. Сохранение характера пичч-углового распределения в процессе межпланетного распространения возможно в тех случаях, когда адиабатическая фокусировка компенсируется конкурирующим процессом рассеяния [23].

Исходя из известных в настоящее время физических механизмов генерации и коронального распространения СКЛ, можно попытаться интерпретировать описанные выше результаты следующим образом. Независимость от энергии корональных времен B_n и B_m для медленной компоненты, по-видимому, означает связь её с магнитной бутылкой: частицы всех энергий и жесткостей начинают одновременно освобождаться при разрушении бутылки в момент B_n и полностью покидают её за время B_m (B_m может заключать в себе еще время истечения из солнечной короны [24], а также время азимутальной диффузии [5,6]). Быстрая компонента ($\bar{B}_{n1} = 8$ мин.), которая испускается еще до момента открытия бутылки ($\bar{B}_{n2} = 30$ мин.), по-видимому, связана с фронтом корональной УВ [14,15], который распространяется перед плазменным выбросом, содержащим в себе бутылку. Так как инжекция частиц в межпланетное пространство должна происходить на корональных высотах $1-1,5 R_\odot$, то есть там, где появляются открытые силовые линии [25], а также с учетом того, что в момент начала радиовсплеска II типа (предполагаемый момент генерации) высота фронта УВ над фотосферой составляет $\sim 0,2 R_\odot$ [3], получим для быстрой ($\bar{B}_{n1} = 8$ мин.) и медленной ($\bar{B}_{n2} = 30$ мин.) компонент скорости радиального переноса (1200-2000 км/с и 400-500 км/с). Такие скорости являются характерными для фронтов УВ и транзита, с которым связана магнитная бутылка [2], что подтверждает сделанное выше предположение.

Свойства источника на Солнце, восстановленные численным решением обратной задачи

Авторами [16, 17] был развит метод восстановления характеристик источника частиц на Солнце по данным измерений у Земли с помощью решения обратной задачи межпланетного распространения СКЛ. При этом использовалось численное решение интегрального уравнения I рода:

$$\int G(\vec{x}, \vec{x}_0) f(\vec{x}_0) d\vec{x}_0 = \Psi(\vec{x}), \quad (3)$$

где $f(\vec{x}_0)$ — искомая функция источника, соответствующая наблюдаемому у Земли распределению $\Psi(\vec{x})$, \vec{x}_0 , \vec{x} представляют собой в общем случае любые параметры (координаты процесса):

$\vec{x}_0 = (x_{01}, x_{02}, \dots, x_{0n})$, $\vec{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, которыми могут быть, например, энергия ϵ_{0k} , ϵ_k ;pitch-угол (θ_{0k}, θ_k) и др., соответственно, в источнике и у Земли. В качестве функции Грина $G(\vec{x}, \vec{x}_0)$ использовалось решение диффузионного уравнения с коэффициентом диффузии, зависящим от энергии. В резко анизотропных событиях (таких как 16.02.84 г.) функция Грина определялась численно по данным 2-х разнесенных станций, одна из которых регистрировала анизотропный, а другая — рассеянный поток. На рис.5 показаны профили испускания для 3-х событий, соответственно 19.II.49 г., 7.I2.82 г. и 23.02.56 г. Характерная форма профилей — быстрый рост и экспоненциальный спад отражают временной характер истечения релятивистских частиц из короны. Полуширина временных профилей в событиях 19.II.1949 г. (1) и 23.02.1956 г. (2) равна, соответственно, 25 и 19 минут, что находится в соответствии с оценками характерного времени истечения частиц в модели магнитной бутылки [3]. Временной профиль источника в событии 7.I2.1982 г. значительно уже (полуширина ~ 12 мин.), и не исключено, что он почти полностью обусловлен быстрой компонентой, на что указывает также данные рис.2.

На рис.6 показаны энергетические спектры, восстановленные в источнике для событий 19.II.1949 г. и 7.I2.1982 г. В [12] отмечается также, что в восстановленных в источнике спектрах величина наклона зависит от энергии (при малых энергиях спектр уплощается), что, по-видимому, является следствием действия различных механизмов ускорения. В связи с этим следует отметить анисальную жест-

кость восстановленного спектра для события 16.02.1984 г. [18] предположительно состоявшего из одной только быстрой компоненты [14].

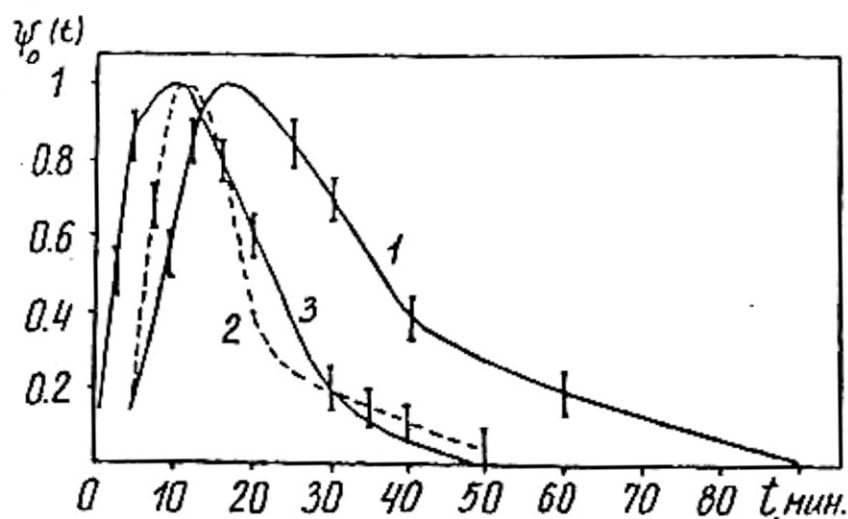


Рис.5. Профили испускания релятивистских протонов для событий 19.II.1949, 7-8.II.1982 и 23.02.1956 г. (кривые 1, 2 и 3, соответственно) [19].

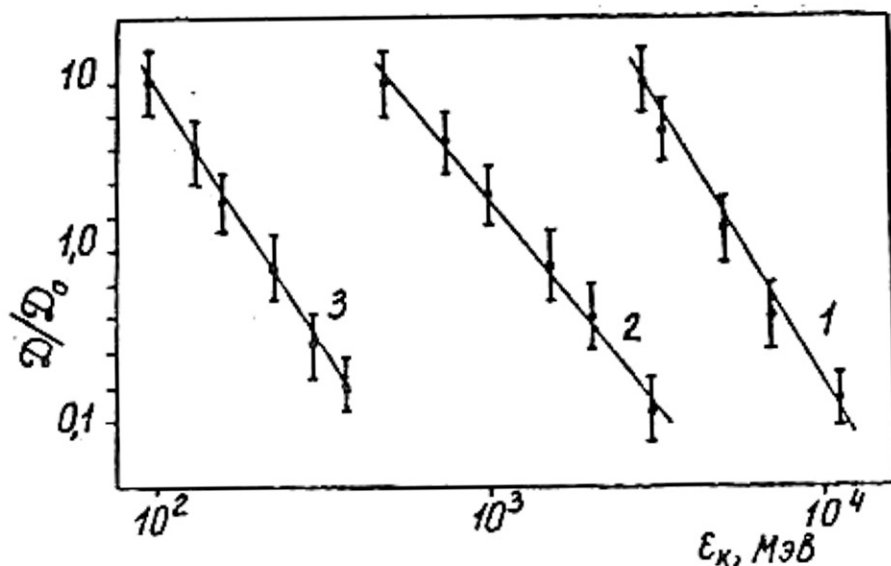


Рис.6. Дифференциальные энергетические спектры испускания (в произвольных единицах) для протонных событий 19.II.1949г. (2) и 7.II.1982г. (1 - для высоких и 3 - для низких энергий).

На рис.7 показаны восстановленные пичч-угловые распределения в источнике и у Земли для этого же события. Обращает на себя внимание резко анизотропный характер испускания из короны частиц быстрой компоненты (расчётные профили соответствуют различным предположениям о рассеивающих свойствах межпланетной среды).

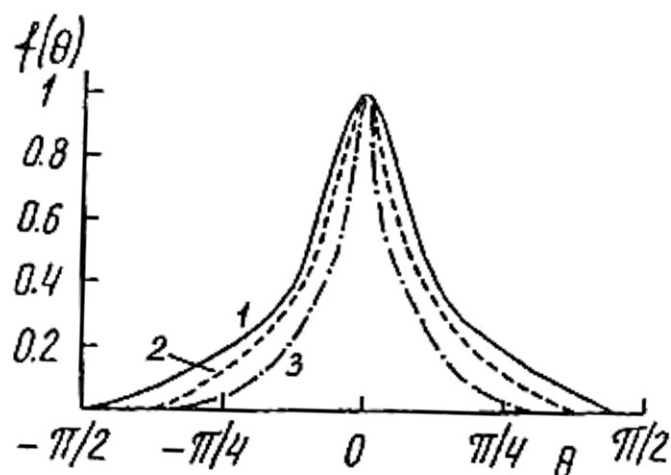


Рис.7. Наблюдаемое пичч-угловое распределение СКЛ у Земли 16.02.1984 г. (кривая 1) и результаты восстановления пичч-углового распределения вблизи Солнца для двух значений среднеквадратичного угла рассеяния $\bar{\theta}^2 = 0,07$ и $0,3$ (кривые 2 и 3, соответственно) [18].

Полученные выше результаты о характеристиках СКЛ в источнике подтверждают экспериментальные данные о характере генерации и истечении СКЛ из короны. В частности, подтверждаются такие свойства источника быстрой компоненты, как кратковременность испускания, жесткий энергетический спектр и анизотропное пичч-угловое распределение.

Модель источника быстрой компоненты

Проведенное в предыдущих разделах рассмотрение дает убедительные свидетельства существования двух компонент, быстрой и медленной, в событиях, сопровождающихся генерацией релятивистских СКЛ. Свойства медленной компоненты хорошо изучены, они достаточно полно описываются моделью магнитной бутылки [2,3].

Физическая модель источника БК должна адекватно отражать все отмеченные выше её характерные свойства:

1) испускание БК начинается еще до начала открытия бутылки;
2) генерация БК предположительно происходит на открытых силовых линиях (малое время нарастания и спада интенсивности в событиях с БК);

3) анизотропный характер испускания БК [18] - (рис.7);

4) специфический механизм быстрого ускорения (импульсный характер возрастаний в событиях с БК, аномально жесткий энергетический спектр [18] ;

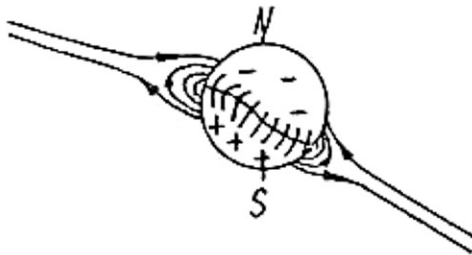
5) вероятный физический агент, ответственный за генерацию БК - корональная УВ [14,15] .

К этим свойствам следует еще добавить не совсем понятный, на первый взгляд, факт:

6) вспышки, после которых регистрировались частицы БК, имеют тенденцию располагаться вне оптимального гелиодолготного интервала ($50^{\circ}-60^{\circ} W$) [11,14,15] .

При построении модели источника БК следует также иметь в виду реальную структуру коронального магнитного поля - рис.8 [26] .

Рис.8.



Модель коронального магнитного поля с нейтральным токовым слоем [26] .

Открытые магнитные силовые линии в короне под действием солнечного ветра образуют структуры типа коронального стримера, опоясывающие Солнце и переходящие на значительном от него удалении в гелиосферный токовый слой. Открытая конфигурация магнитного поля в слое позволяет частицам, попавшим в него, быстро покинуть Солнце, вместе с тем они будут испытывать быстрый азимутальный дрейф под действием перпендикулярной к магнитному полю компоненты скорости - рис.9. Как показано в [27] , скорость этого дрейфа $V_d \sim 0,1 V_1$.

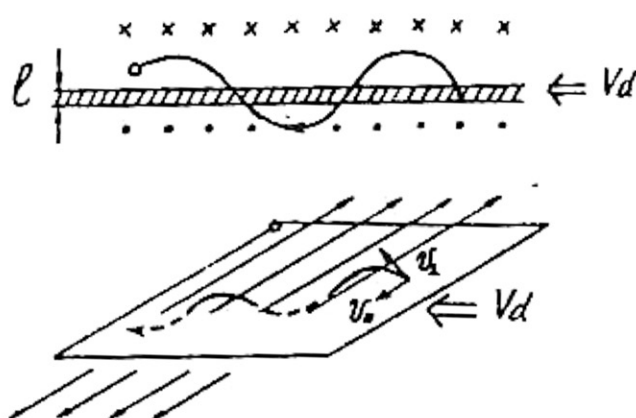


Рис.9. Движение частицы в нейтральном слое. V_d — скорость азимутального дрейфа [27].

Начало инжекции БК, как отмечалось выше, по времени соответствует моменту достижения фронтом УВ области открытых силовых линий (основания токового слоя — рис.8). Возможная модель генерации частиц БК, учитывающая все перечисленные выше свойства (1-6), а также реальную структуру магнитного поля в короне (рис.8) и характер движения частиц в нейтральном слое (рис.9), показана на рис.10.

Распространяющаяся перед расширяющейся магнитной бутылкой корональная УВ падает на нейтральный слой коронального стримера (который, кстати, может находиться не непосредственно над активной областью, в которой произошла вспышка). Под действием возмущения, вызванного ударной волной в нейтральном слое, начинается процесс интенсивного пересоединения (заштрихованная область). Некоторая часть частиц, которым удалось покинуть бутылку (на фронте и перед фронтом УВ), будет эффективно ускоряться индукционными электрическими полями, возникающими в области пересоединения [12,13]. По оценкам [4], энергия ускоренных частиц при этом может достигать величины 1,8–3,7 ТэВ. Ускоренные частицы без задержки уходят с Солнца вдоль слоя, одновременно дрейфуя в азимутальном направлении, как это показано на рис.10. Азимутальным сносом вследствие этого дрейфа, по-видимому, можно объяснить отсутствие событий с БК на оптимальных гелиодолготах (50° – 60° W) [11,14,15] — свойство 6. Направление дрейфа в нейтральном слое зависит от полярности общего магнитного поля Солнца.

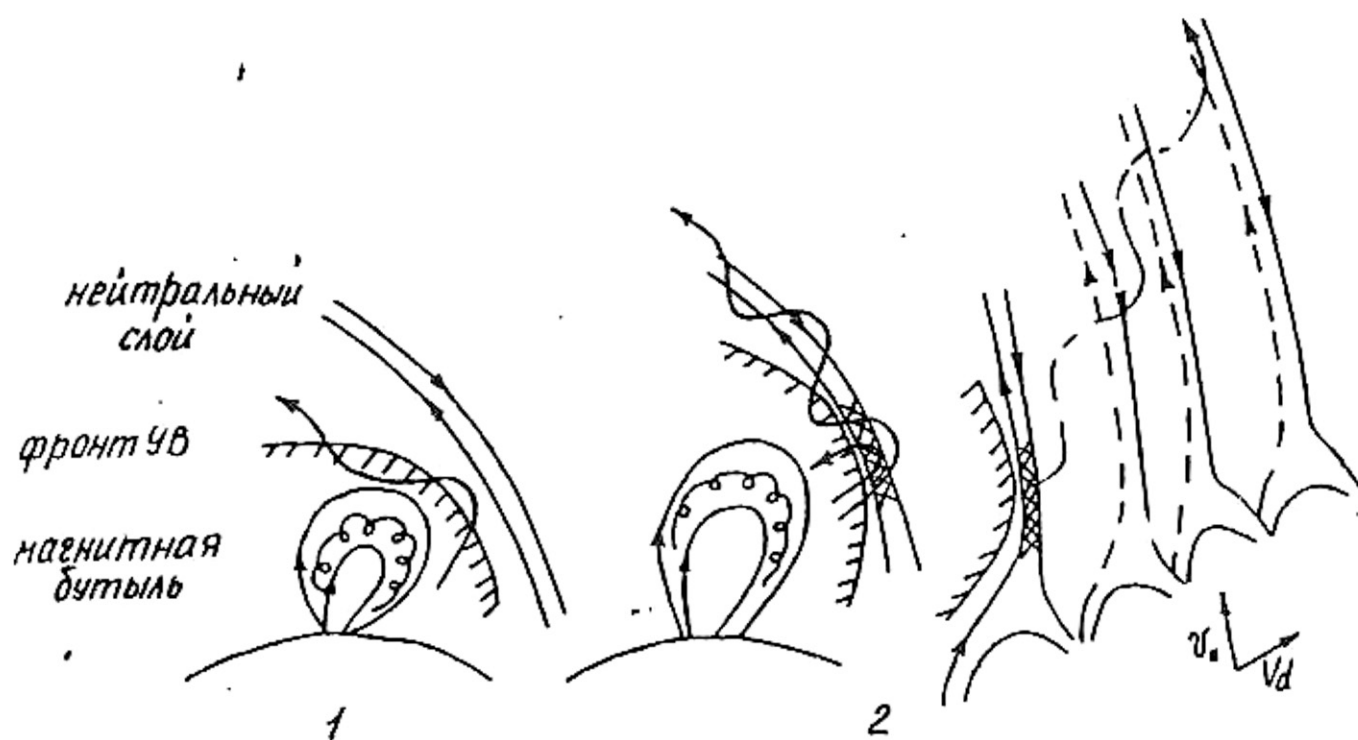


Рис.10. Возможная модель генерации быстрой компоненты СКЛ в вертикальном токовом слое коронального стримера. Предполагаемая область ускорения заштрихована.

Для ситуации, показанной на рис.8 и 9, дрейф будет направлен с Запада на Восток. Импульсные события на западном лимбе и за ним+ 7.12.82 г. ($W 86^{\circ}$) и 16.02.84 г. ($W 132^{\circ}$)-наблюдались как раз в то время, когда общее магнитное поле Солнца имело полярность, соответствующую рис.8. Указанная закономерность имеет место и для ряда других событий с БК. Наряду с азимутальным дрейфом при движении частиц в нейтральном слое должна происходить сильная адиабатическая фокусировка в расходящемся магнитном поле, силовые линии которого почти радиальны вплоть до $20 R_{\odot}$ [25]. Оценки показывают, что на этом расстоянии поток частиц уже в значительной степени коллимирован (свойство 3). Таким образом, модель (рис.10), в основном, объясняет все свойства БК (1-6).

Следует отметить, что в эпоху, близкую к максимуму солнечного цикла, нейтральный слой (рис.8) располагается в вертикальной плоскости или сильно наклонен к плоскости гелиоэкватора [26], поэтому закономерного азимутального переноса частиц БК в это время может не наблюдаться.

З а к л ю ч е н и е

Проведено исследование процессов генерации и выхода из солнечной короны релятивистских СКЛ. Рассмотрение широкого круга экспериментальных фактов, а также характеристик источника частиц на Солнце, восстановленных по данным наземных измерений, приводит к выводу о существовании двух (возможно независимых) компонент - быстрой и медленной - в событиях с релятивистскими СКЛ. Основная масса частиц в протонном событии представлена медленной компонентой. Ускорение частиц медленной компоненты, по-видимому, происходит в начальной фазе вспышки. Ускоренные частицы удерживаются внутри расширяющейся магнитной бутылки и одновременно освобождаются при её разрушении (предположительно вследствие неустойчивости Релея-Тейлора), образуя при этом изотропный источник частиц. Быстрая компонента начинает испускаться с Солнца еще до начала открытия бутылки. Она характеризуется более жестким энергетическим спектром и анизотропией в источнике. Предложена модель генерации быстрой компоненты в процессе магнитного пересоединения в нейтральном слое коронального стримера под действием падающей на него корональной ударной волны.

Л и т е р а т у р а

1. Мирошниченко Л.И. // Солнечные вспышки.- М.: ВИНТИ, Астрономия.- Т.34.- 1987.- С.238.
2. Schatten K.H., Mullan D.J. J.Geophys.Res.V.82.-1977.-P.5609.
3. Mullan D.J. Astrophys.J. V.269.-1983.-P.765.
4. Perez-Peraza J. Space Sci.Rev. V.44.-1986.-P.91.
5. М.Альварес-Мадригал, Мирошниченко Л.И., Х.Перес-Пераса, Ф.Риверо-Гардусо // Астрон.ж.- Т.63.- 1986.- С.1169.
6. Mullan D.J., Schatten K.H. Solar Phys.V.62,-1979.-P.153.
7. Lee M.A., Fisk L.A. Space Sci.Rev. V.32.-1982.- .205.
8. Lee M.A., Ryan J.M. Astrophys.J.V.303.-1986.- P 629.
9. Decker R.B. Preprint APL/JHU,87-17. Laurel, Maryland, USA.- -1987.-P.23.
10. Бережко Е.Г., Крымский Г.Ф.// Успехи физич.наук.- Т.154.- 1988.- С.49.

11. Cliver E.W., Kahler S.W., Shea M.A., Smart D.F. // *Astrophys. J.* - V.260. - 1982. - P.362.
12. Mullan D.J., Perez-Peraza J., Galvez M., Alvarez M. // 18 ICRC, SP 1-13, 1983.
13. Mullan D.J., Perez-Peraza J., Galvez M., Alvarez M. // *Adv. Space Res.*, V.4, - 1984. - P.157.
14. Borovkov L.P., Lazutin L.L., Shumilov O.I., Vashenyuk E.V. // 20 ICRC, V.3. - 1987. - 124.
15. Вашенюк Э.В. // Материалы Всесоюзной конференции по космическим лучам. Сентябрь 1988 г., Ч.2. - Изд-во КазГУ. - 1989. - С.27.
16. Мирошниченко Л.И., Сорокин М.О. // *Геомagnetизм и аэрономия.* - Т.25. - 1985. - С.534.
17. Мирошниченко Л.И., Сорокин М.О. // *Геомagnetизм и аэрономия.* - Т.26. - 1986. - С.535.
18. Мирошниченко Л.И., Сорокин М.О. // *Геомagnetизм и аэрономия.* - Т.27. - 1987. - С.893.
19. Мирошниченко Л.И., Сорокин М.О. // *Геомagnetизм и аэрономия.* - Т.29. - 1989. - С.309.
20. Базилевская Г.А., Сладкова А.И. // *Геомagnetизм и аэрономия.* - Т.26. - 1986. - С.187.
21. Bazilevskaya G.A., Vashenyuk E.V. // 16 ICRC, V.5. - 1979. - P.156.
22. Duggal S.P. // *Rev. Geophys. Space Phys.*, V.17. - 1979. - P.1021.
23. Earl J.A. // *Astrophys. J.*, V.206. - 1976. - P.301.
24. Bazilevskaya G.A., Vashenyuk E.V. // 17 ICRC. - V.3. - 1981. - P.393.
25. Коваленко В.А. // *Солнечный ветер.* - М.: Наука. - 1983. - 272 С.
26. Коржов Н.П. // *Исследования по geomagnetизму, аэрономии и физике Солнца.* - Вып.61. - М.: Наука. - 1982. - С.162.
27. Flak L.A., Schatteh K.H. // *Sol. Phys.* V.23. - 1972. - P.204.