

УДК 523.98

Зависимость оценки потока протонов СКЛ от параметров радиовсплесков

Е.А. Исаева¹, В.Ф. Мельников², Л.И. Цветков¹

¹ Лаборатория радиоастрономии НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”, 98688, Украина, Крым, Ялта
isaeva-ln@mail.ru

² Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург

Поступила в редакцию 10 ноября 2009 г.

Аннотация. Приводятся результаты, свидетельствующие о том, что точность оценки потока протонов солнечных космических лучей (СКЛ) по параметрам μ -всплесков значительно выше для протонных событий, характеризующихся низким уровнем послевсплескового повышения потока (Post Burst Increase [PBI]) μ -всплеска, мощной декаметровой компонентой (ДКМ) и малым значением временного сдвига ($\Delta t < 9$ минут) максимума ДКМ-всплеска относительно максимума μ -всплеска. По-видимому, эти три параметра связаны между собой, т. к. события, характеризующиеся малым значением Δt , имеют очень низкий уровень PBI. Показано, что точность оценки потока протонов в большей мере зависит от Δt , чем от интенсивности ДКМ-компоненты. Примерно для половины событий исследованной выборки точность оценки потока протонов приближается к предельно возможной точности по параметрам μ -всплесков.

RELATION OF ACCURACY OF AN ESTIMATION OF A SOLAR ENERGETIC PROTON FLUX SCR FROM VALUE OF PARAMETERS OF RADIO BURSTS, by E.A. Isaeva, V.F. Melnikov, L.I. Tsvetkov. In activity outcomes testifying are resulted that the accuracy of an estimation of a solar energetic proton flux SCR on parameters μ -bursts is much higher for proton events described by low level post bursts increase (PBI) of the flux μ -bursts, powerful decameter component (DCM) and small value of temporary shift ($\Delta t < 9$ minutes) maximum DCM of burst concerning a maximum μ -burst. Apparently these three parameters are connected among themselves, since events described by small value of temporary shift Δt of a maximum DCM of burst rather μ -burst have very much low level PBI. Moreover, is shown what the accuracy of an estimation of a solar energetic proton flux in the greater measure depends on value of temporary shift Δt than from intensity DCM components. Approximately for half of events investigated sampling the accuracy of an estimation of a solar energetic proton flux comes nearer to extreme possible accuracy on parameters μ -bursts.

Ключевые слова: Солнце, протонные события, радиовсплески

1 Введение

Прогнозирование протонных событий является одной из актуальных задач солнечной радиофизики. Современные методы прогноза протонных событий основываются на связи параметров солнечных

космических лучей (СКЛ) с параметрами радиовсплесков (Акиньян и др., 1977, 1978; Черток, 1982; Черток и др., 1987; Мельников, Епифанов, 1979; Мельников и др., 1986, 1991). Протонные события имеют характерный U-образный тип частотного радиоспектра с максимумами в сантиметровом и метровом диапазонах длин волн (Подстригач, Фасахова, 1981). Известно, что по параметрам μ -всплесков можно оценить общее количество ускоренных частиц и их энергетический спектр (Черток, 1982), а по параметрам метровых-декаметровых можно судить об условиях выхода ускоренных частиц в межпланетное пространство (Акиньян и др., 1977). Мельников и др. (1986, 1991) показали, что сильная связь между потоком среднерелятивистских электронов СКЛ и интегральным потоком микроволнового всплеска свидетельствует о том, что электроны СКЛ и электроны, генерирующие радиовсплеск, ускорены единым процессом. Максимальный коэффициент корреляции достигается при использовании обобщенного индекса микроволнового излучения $\varphi \int F dt$, где $\int F dt \equiv F_m T_\mu$, а $\varphi = (9/f_m)^\alpha$, где $\alpha \approx 1.5$, f_m – частота, на которой μ -излучение достигает максимума. Значение потока μ -всплеска F_m характеризует максимальное мгновенное количество электронов в источнике за время всплеска, T_μ – эффективная длительность всплеска, характеризует длительность инжекции и время жизни электронов во вспышечной арке. Величина $\varphi = (9/f_m)^\alpha$ зависит от напряженности магнитного поля B в источнике и характеризует эффективность μ -излучения, которая сильно уменьшается при уменьшении B (уменьшении φ). Величина $\varphi \int F dt \equiv \int N_e dt = N_{et} \tau_e$, где N_{et} – полное количество ускоренных электронов, N_e – мгновенное число электронов в арке, τ_e – время жизни электронов в радиоисточнике. Мельников и др. (1986, 1991) показали, что электроны и протоны ускоряются в едином процессе, что дает возможность оценивать поток ускоренных протонов по параметрам микроволновых всплесков. В пределах гиротронного механизма генерации излучения естественно ожидать, что параметры радиоизлучения лучше коррелируют с потоком электронов. И это действительно так, пока степень связи оценивается для параметров, содержащих информацию о мощности μ -излучения (F_m и $\int F dt$). Но как только в радиоиндекс включается временной параметр T_μ , влияние T_μ на I_p по сравнению с влиянием на I_e становится более сильным. Связь между потоком протонов I_p и эффективной длительностью T_μ является нелинейной $I_p \propto T_\mu^2$, в то время как для потока электронов I_e и T_μ она линейная. Наличие гораздо более сильной связи между I_p и T_μ объясняет обогащения СКЛ-протонами по сравнению с электронами с ростом эффективной длительности T_μ μ -всплесков (Мельников и др., 1991; Липатов и др., 2002). Обогащение СКЛ-протонами по сравнению с электронами можно объяснить не привлекая вторую фазу ускорения протонов, если учесть различия в динамике электронов и протонов во вспышечных арках разных размеров.

Доля вышедших электронов и протонов в значительной мере определяется условиями выхода. Известно, что интенсивность (Акиньян и др., 1977) и длительность (Мельников, Епифанов, 1979) метрового компонента играют важную роль в качестве прогностических факторов при оценке потоков протонов по радиоизлучению. Наличие интенсивного метрового-декаметрового излучения свидетельствует о благоприятных условиях выхода частиц высоко в корону и далее в межпланетное пространство. В работе (Мельников и др., 1991) показано, что условия выхода для электронов и протонов сильно связаны. Отсюда следует возможность дальнейшего улучшения точности прогноза потока протонов I_p в межпланетном пространстве по характеристикам метрового-декаметрового излучения, являющимся индикатором выхода ускоренных электронов в высокие слои короны. Поэтому представляется необходимым сопоставить поток электронов и протонов в межпланетной среде с различными характеристиками метрового и декаметрового излучения.

Ранее наилучшая точность оценки потока протонов СКЛ была получена на основе обобщенного индекса микроволнового излучения на частоте спектрального микроволнового максимума (Мельников и др., 1991), где остаточная дисперсия σ^2 и корреляция r между наблюдаемым I_p и расчетным значением $I_{p\mu}$ потока протонов составила $\sigma^2 \approx 0.63$ и $r \approx 0.82$. Мельниковым и др. (1991) приведены аргументы, указывающие на то, что дальнейшее повышение точности оценки потока протонов по параметрам микроволновых (μ)-всплесков будет связано с количественным учетом условий выхода ускоренных протонов по параметрам метровых и ДКМ-всплесков. В связи с этим в данной работе была предпринята попытка выяснить, насколько учет параметров ДКМ-компоненты влияет на точность оценки потока протонов по параметрам μ -всплесков. Для этой цели использовали

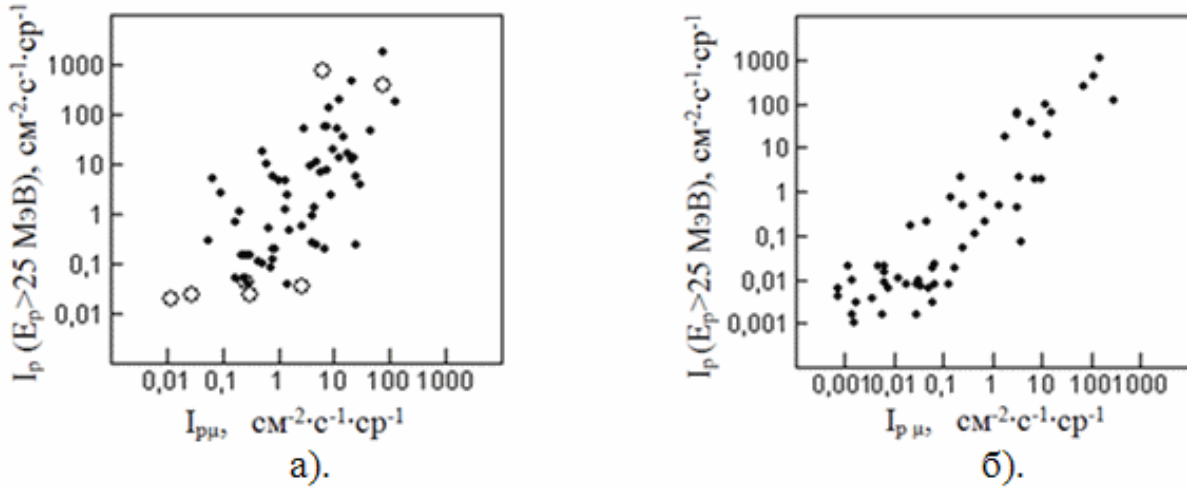


Рис. 1. Диаграммы рассеяния между наблюдаемым I_p и расчетным значением $I_{p\mu}$ потока: а) для опорной выборки протонных событий $\sigma^2 \approx 0.63$ и $r \approx 0.82$; б) для исследуемой выборки протонных событий $\sigma^2 \approx 0.85$ и $r \approx 0.69$

независимую выборку протонных событий, для которых имелись оригинальные записи радиоизлучения Солнца в диапазоне 25–15400 МГц (<http://www.ngdc.noaa.gov/stp/SOLAR/ftpsolarradio.html>, <http://www.ngdc.noaa.gov/stp/SOLAR/ftpsolarradio.html>), а также данные о потоках протонов в диапазоне 0.8–500 МэВ, зарегистрированных на Международной космической станции серии GOES-10 в период с 1991 г. по 2005 г. (<http://goes.ngdc.noaa.gov/data/avg/>).

2 Результаты исследований

Независимая выборка включает 64 протонных события, зарегистрированных в 22–23 цикле солнечной активности (с. а.), рис. 1а. Сравнение точности оценки потока протонов по параметрам μ -всплесков осуществлялось по отношению к ранее полученной точности для опорной выборки (см. рис. 1б), включающей 53 протонных события, зарегистрированных в 21 цикле с. а. (Мельников и др., 1991).

Первый этап сравнительного анализа точности оценки потока протонов состоял в нахождении линейных регрессионных моделей для опорной (1) и исследуемой (2) выборок, устанавливающих связь потока протонов I_p СКЛ с параметрами μ -всплесков, где $I_{p\mu}$ – расчетное значение потока протонов, F_m и T_μ – максимальное значение потока и эффективная длительность μ -всплеска на частоте спектрального микроволнового максимума f_m .

$$\lg I_{p\mu} = 1.2 \lg F_m + 2.0 \lg T_\mu - 2.0 \lg f_m - 3.4 \quad (1)$$

$$\lg I_{p\mu} = 1.0 \lg F_m + 1.0 \lg T_\mu - 0.8 \lg f_m - 3.2. \quad (2)$$

На рис. 1 представлены диаграммы рассеяния потока протонов для опорной и исследуемой выборок, где остаточная дисперсия σ^2 и корреляция r между наблюдаемым I_p и расчетными значениями $I_{p\mu}$ потока протонов по параметрам μ -всплесков составила для опорной выборки $\sigma^2 \approx 0.63$ и $r \approx 0.82$, а для исследуемой $\sigma^2 \approx 0.85$ и $r \approx 0.69$. Черными значками обозначены значения потока протонов, полученные по мировой сети данных службы Солнца. Белыми значками обозначены потоки протонов, вычисленные по данным наблюдений радиоизлучения Солнца на РТ-22 НИИ “КрАО”, выполненных с помощью 4-х волнового поляриметра.

Из рис. 1 видно, что шесть событий, зарегистрированных на РТ-22, достаточно хорошо ложатся на ранее полученную зависимость. Радиовсплески, связанные с протонными событиями, были зарегистрированы на РТ-22 22.07.91 в интервале 09:45–10:05 UT; 24.07.91 в интервале 11:40–11:55 UT; 28.07.91 в интервале 06:30–06:40 UT; 12.07.00 в интервале 10:10:35 UT; 14.07.00 в интервале 10:15–10:45 UT; 24.09.01 в интервале 09:30–11:30 UT.

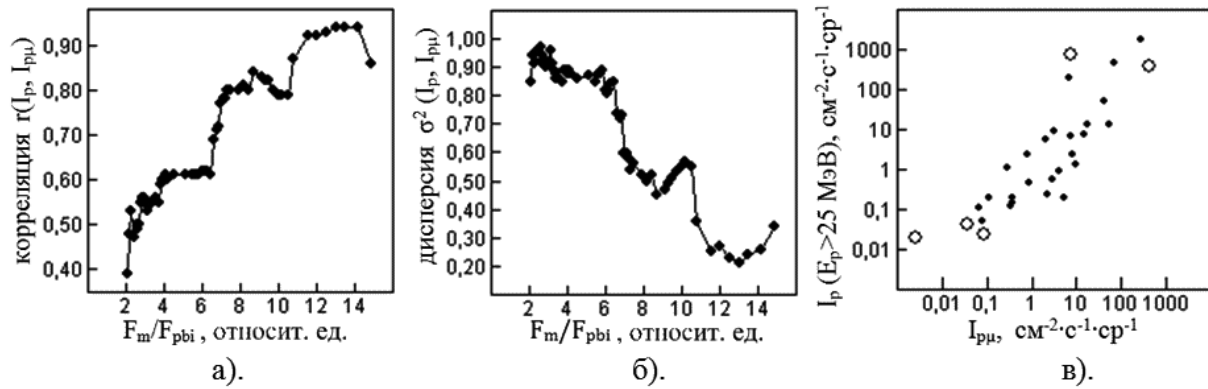


Рис. 2. Зависимость точности оценки потока протонов СКЛ от интенсивности РВИ: а) зависимость корреляции между наблюдаемым I_p и расчетным значением $I_{p\mu}$ потока протонов; б) зависимость дисперсии между наблюдаемым I_p и расчетным значением $I_{p\mu}$ потока протонов; в) диаграмма рассеяния между наблюдаемым I_p и расчетным значением $I_{p\mu}$ потока протонов для событий с уровнем РВИ $F_{pbi} \leq 0.1F_m$, для которых $\sigma^2 \approx 0.55$ и $r \approx 0.85$

Обращает на себя внимание тот факт, что для исследуемой выборки точность оценки потока протонов по отношению к опорной выборке значительно хуже. Это послужило поводом для проведения детальных исследований с целью выявления возможных причин, приведших к столь существенным отличиям в параметрах моделей для опорной и исследуемой выборок. Сравнительный анализ показал, что на точность оценки потока протонов большее влияние оказывает то, какие типы протонных событий по параметрам радиовсплесков представлены в исследуемой выборке. В качестве параметров, характеризующих точность оценки потока протонов по радиовсплескам, были выбраны три параметра, а именно: интенсивность послевсплескового повышения уровня потока μ -всплеска РВИ F_{pbi} , выраженная в единицах максимального значения μ -всплеска, интенсивность ДКМ-компоненты $\int F_{dec} dt$ и параметр Δt , характеризующий временной сдвиг максимума ДКМ-всплеска относительно максимума μ -всплеска.

Проведенные детальные исследования зависимости точности оценки потока протонов по параметрам μ -всплесков от интенсивности РВИ F_{pbi} показали, что точность оценки потока протонов значительно выше для событий с низким уровнем РВИ $F_{pbi} \leq 0.1F_m$, для которых остаточная дисперсия σ^2 и корреляция r между наблюдаемым I_p и расчетным $I_{p\mu}$ значением потока протонов составляет $\sigma^2 \approx 0.55$ и $r \approx 0.85$, в то время как для событий с высоким уровнем РВИ $F_{pbi} \geq 0.1F_m$ $\sigma^2 \approx 0.90$ и $r \approx 0.55$ (рис. 2). Более того, для событий с низким уровнем РВИ $F_{pbi} \leq 0.1F_m$ для исследуемой выборки, параметры регрессионной модели фактически совпадают с параметрами модели для опорной выборки (1). Таким образом, существенные отличия в точности оценки потока протонов по параметрам μ -всплесков для опорной и исследуемой выборок были связаны с наличием в исследуемой выборке большого количества событий, сопровождающихся мощным РВИ и всплесками типа GRF (gradual rise and fall) в микроволновом диапазоне, в то время как в опорной выборке представлены в основном события с низким уровнем РВИ.

Точность оценки потока протонов по параметрам микроволновых всплесков в значительной сте-

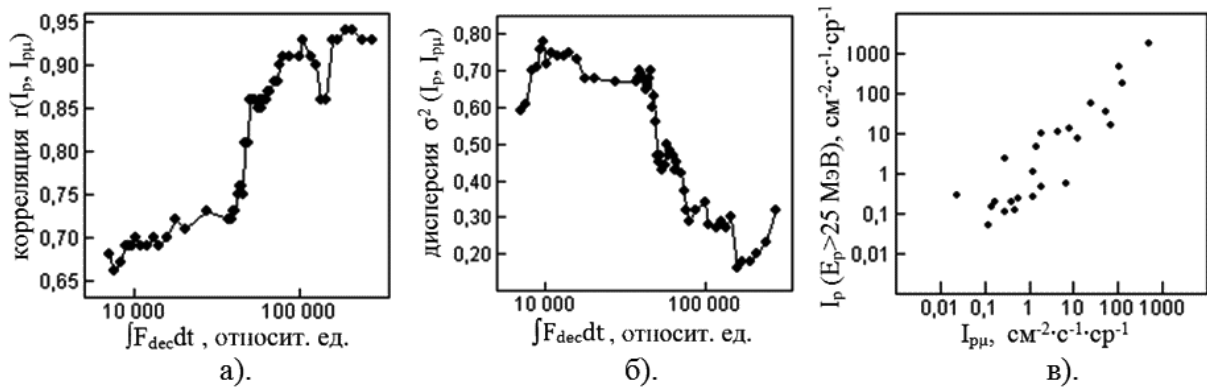


Рис. 3. Зависимость точности оценки потока протонов СКЛ от интенсивности ДКМ-всплеска: а) зависимость корреляции между наблюдаемым I_p и расчетным значением I_{pm} потока протонов; б) зависимость дисперсии между наблюдаемым I_p и расчетным значением I_{pm} потока протонов; в) диаграмма рассеяния между наблюдаемым I_p и расчетным значением I_{pm} потока протонов для событий с мощной ДКМ-компонентой $\int F_{dec} dt \geq 10000$, для которых $\sigma^2 \approx 0.32$ и $r \approx 0.89$

пени зависит от условий выхода в самых верхних слоях солнечной короны. Ранее было показано, что наличие достаточно мощной метровой-декаметровой компоненты непрерывных всплесков свидетельствует о благоприятных условиях выхода, отсутствие – о неблагоприятных условиях выхода (Акиньян и др., 1977). В настоящей работе были предприняты попытки количественного учета условий выхода по параметрам ДКМ-всплесков. На рис. 3 представлены результаты численной оценки условий выхода протонов СКЛ по параметрам ДКМ-всплесков.

Проведенные исследования показали (см. рис. 3), что точность оценки потока протонов по параметрам μ -всплесков значительно выше для событий с мощной ДКМ-компонентой. В качестве параметра, характеризующего интенсивность ДКМ-компоненты, использовался интегральный поток ДКМ-всплеска на частоте спектрального ДКМ-максимума. Для событий с мощной ДКМ-компонентой, для которых $\int F_{dec} dt > 10000$, остаточная дисперсия σ^2 и корреляция r между наблюдаемым I_p и расчетным значением I_{pm} потока протонов составляет приблизительно $\sigma^2 \approx 0.32$ и $r \approx 0.89$. Видно, что по отношению к полной выборке протонных событий точность оценки потока протонов значительно возросла, т. к. остаточная дисперсия при этом существенно уменьшилась с 0.85 до 0.32.

Представляет интерес определить точность оценки потока протонов по параметрам μ -всплесков в зависимости от временных характеристик ДКМ-компоненты, а именно от параметра Δt , характеризующего временной сдвиг максимума ДКМ-всплеска относительно максимума μ -всплеска (см. рис. 4). Из рис. 4 видно, что точность оценки потока протонов значительно выше для событий, имеющих малые значения временного сдвига максимума ДКМ-компоненты относительно максимума μ -всплеска ($\Delta t \leq 9$ минут). Зависимость точности оценки потока протонов от значения параметра Δt значительно сильнее, чем от интенсивности ДКМ-компоненты. Для половины событий из исследуемой выборки, для которых временной сдвиг максимума ДКМ-компоненты относительно максимума μ -всплеска не превышает 9 минут, точность оценки потока протонов приближается к предельно возможной точности по параметрам радиовсплесков.

Для этих событий остаточная дисперсия σ^2 и корреляция r между наблюдаемым I_p и расчетным I_{pm} значением потока протонов по параметрам μ -всплесков составляет $\sigma^2 \approx 0.20$ и $r \approx 0.94$. Эти параметры связи близки к предельно достижимым оценкам точности ($\sigma^2 \approx 0.19$) прогноза потоков протонов СКЛ по радиовсплескам, полученным в работе (Мельников и др., 1991) на основе использования интенсивности электронной компоненты СКЛ как величины, характеризующей эф-

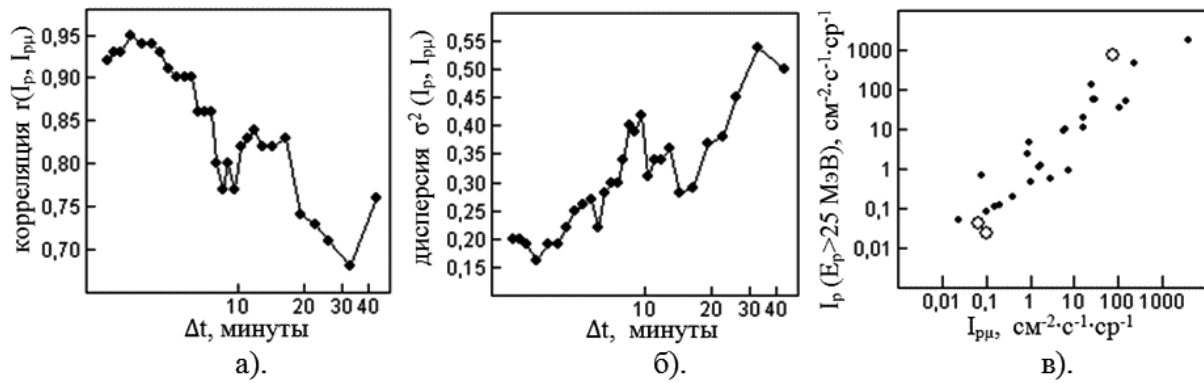


Рис. 4. Зависимость точности оценки потока протонов СКЛ от значения временного сдвига Δt максимума ДКМ-всплеска относительно максимума μ -всплеска: а) зависимость корреляции между наблюдаемым I_p и расчетным значением I_{pm} потока протонов; б) зависимость дисперсии между наблюдаемым I_p и расчетным значением I_{pm} потока протонов; в) диаграмма рассеяния между наблюдаемым I_p и расчетным значением I_{pm} потока протонов для событий с малым значением $\Delta t \leq 9$ минут, для которых $\sigma^2 \approx 0.20$ и $r \approx 0.94$

эффективность выхода ускоренных протонов в межпланетное пространство. Полученный результат указывает на то, что декаметровое излучение солнечных вспышек может служить эффективным количественным индикатором условий выхода.

3 Обсуждение результатов и выводы

Используемые выше три параметра, влияющие на точность оценки потока протонов СКЛ по параметрам микроволновых всплесков, по-видимому, связаны между собой и характеризуют два разных процесса ускорения протонов и электронов. Протонные события, характеризующиеся низким уровнем РВИ, имеют малые значения временного сдвига максимума ДКМ-всплеска относительно максимума μ -всплеска, и для этих событий наблюдается хорошая корреляция между параметрами потока протонов СКЛ и параметрами μ -всплесков. С другой стороны, протонные события, характеризующиеся высоким уровнем РВИ, как правило, имеют большие значения временного сдвига максимума ДКМ-всплеска относительно максимума μ -всплеска, и для этих событий характерна плохая корреляция между параметрами потока протонов СКЛ и параметрами μ -всплесков. Данный результат, по-видимому, свидетельствует об одновременном действии в некоторых случаях двух широко известных процессов ускорения. В одном ускорение протонов и электронов идет в ходе импульсной фазы вспышки низко в короне, в районе вспышечных петель. В другом ускорение идет высоко в короне на фронте ударной волны, генерируемой корональным выбросом массы (КВМ). Если реализуются условия без существенного ускорения на КВМ, и если условия выхода протонов из области вспышки благоприятны, т. е. конфигурация магнитного поля над вспышечными петлями преимущественно открытая в межпланетное пространство, то реализуется быстрый выход как протонов, так и электронов. И тогда, с одной стороны, будут малые значения временного сдвига между максимумами микроволновых и ДКМ-всплесков (так как в данном случае ДКМ-излучение генерируется электронами, ускоренными на импульсной фазе микроволнового всплеска), а с другой стороны, будет достаточно хорошая корреляция между параметрами потока протонов и микроволновых всплесков.

Если же реализуются условия, когда основное ускорение протонов и электронов происходит на ударной волне перед корональным выбросом массы, то тогда поток протонов в межпланетном пространстве может быть завышен и будет плохая корреляция между параметрами протонов и

микроволновых всплесков. Но из-за того, что КВМ достигает больших высот с существенной задержкой (>10 минут), то и ускоренные на фронте ударной волны электроны дадут декаметровый всплеск, существенно задержанный относительно микроволнового.

Проведенное исследование показало:

1. Данные по радиоизлучению Солнца, полученные на радиоастрономическом комплексе НИИ “КрАО”, вполне можно использовать для дальнейшего улучшения методов прогноза космической погоды.
2. Учет параметров микроволновых и декаметровых всплесков существенно улучшает прогноз геоэффективных событий.

Благодарности. Авторы признательны создателям сайтов: <http://www.ngdc.noaa.gov/>, <http://goes.ngdc.noaa.gov/> за обширные сведения по радиоизлучению Солнца, а также благодарят Шликар Г.Н. за подготовку рукописи к печати.

Литература

- Акиньян С.Т., Фомичев В.В., Черток И.М. // Геомагнетизм и аэрономия. 1977. Т. 17. №. 1. С. 10.
- Акиньян С.Т., Фомичев В.В., Черток И.М. // Геомагнетизм и аэрономия. 1978. Т. 18. №. 4. С. 577.
- Исаева Е.А., Цветков Л.И. // 19-я Международная Крымская конференция “СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии”. Севастополь. 2009. Т. 2. С. 920.
- Липатов Б.И., Мельников В.Ф., Подстригач Т.С., Снегирев С.Д., Тихомиров Ю.В., Фридман В.М., Шейнер О.А. // Известия вузов. Радиофизика. 2002. Т. 65. №. 2. С. 83.
- Мельников В.Ф., Епифанов О.В. // Симпозиум КАПГ по солнечно-земной физике. М.: Наука. 1979. С. 115.
- Мельников В.Ф., Подстригач Т.С., Курт В.Г., Столповский В.Г. // Космические исследования. 1986. Т. 24. С. 610.
- Мельников В.Ф., Подстригач Т.С., Дайбог Е.И., Столповский В.Г. // Космические исследования. 1991. Т. 29. С. 95.
- Очелков Ю.П. // Геомагнетизм и аэрономия. 1986. Т. 26. №. 6. С. 1007.
- Подстригач Т.С., Фасахова М.А. // Геомагнетизм и аэрономия. 1981. Т. 21. №. 1. С. 22.
- Черток И.М. // Геомагнетизм и аэрономия. 1982. Т. 22. №. 2. С. 182.
- Черток И.М., Базилевская Г.А., Сладкова А.И. // Геомагнетизм и аэрономия. 1987. Т. 27. №. 3. С. 362.