

---

## О КОРРЕЛЯЦИИ ОКОЛОЗЕМНЫХ ПРОТОННЫХ ВОЗРАСТАНИЙ >100 МэВ С ПАРАМЕТРАМИ СОЛНЕЧНЫХ МИКРОВОЛНОВЫХ ВСПЛЕСКОВ

### CORRELATION OF NEAR-EARTH PROTON ENHANCEMENTS >100 MeV WITH PARAMETERS OF SOLAR MICROWAVE BURSTS

---

**В.В. Гречнев***Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
Иркутск, Россия, grechnev@iszf.irk.ru***В.И. Киселев***Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
Иркутск, Россия, valentin\_kiselev@iszf.irk.ru***Н.С. Мешалкина***Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
Иркутск, Россия, nata@iszf.irk.ru***И.М. Черток***Институт земного магнетизма, ионосферы  
и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН,  
Троицк, Москва, Россия, ichertok@izmiran.ru***V.V. Grechnev***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,  
Irkutsk, Russia, grechnev@iszf.irk.ru***V.I. Kiselev***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,  
Irkutsk, Russia, valentin\_kiselev@iszf.irk.ru***N.S. Meshalkina***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,  
Irkutsk, Russia, nata@iszf.irk.ru***I.M. Chertok***Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and  
Radio Wave Propagation RAS,  
Troitsk, Moscow, Russia, ichertok@izmiran.ru*

**Аннотация.** Анализируются соотношения между различными комбинациями максимумов потоков и флюенсов солнечных микроволновых всплесков, записанных радиополяриметрами в Нобееме на частоте 35 ГГц в 1990–2015 гг., и соответствующими параметрами протонных возрастных с энергиями выше 100 МэВ, превышавших 0.1 pfu, зарегистрированных в околоземном пространстве мониторами GOES. Установлено, что наиболее высока корреляция между флюенсами протонов и микроволнового излучения. Этот факт отражает зависимость полного числа протонов от общей продолжительности процесса их ускорения. В событиях с мощными вспышками коэффициенты корреляции флюенсов протонов с флюенсами микроволнового и мягкого рентгеновского излучения выше, чем со скоростями КВМ. Результаты указывают на статистически больший вклад вспышечных процессов в ускорение высокоэнергичных протонов. Ускорение на ударных волнах оказывается менее значимым на высоких энергиях в событиях, связанных с мощными вспышками, хотя его вклад, вероятно, преобладает в более слабых событиях. Показано, что вероятность протонного возрастания прямо зависит от максимума потока и длительности микроволнового всплеска, что может быть использовано для диагностики протонных возрастных по данным мониторинга микроволнового излучения.

**Ключевые слова:** протонные события, солнечные вспышки, радиоизлучение.

**Abstract.** We analyze the relations between various combinations of peak fluxes and fluences of solar microwave bursts at 35 GHz recorded with the Nobeyama Radio Polarimeters during 1990–2015, and corresponding parameters of proton enhancements with  $E > 100$  MeV exceeding 0.1 pfu registered by GOES monitors in near-Earth environment. The highest correlation has been found between the microwave and proton fluences. This fact reflects a dependence of the total number of protons on the total duration of the acceleration process. In the events with strong flares, the correlation coefficients of proton fluences with microwave and soft X-ray fluences are higher than those with speeds of coronal mass ejections. The results indicate a statistically larger contribution of flare processes to acceleration of high-energy protons. Acceleration by shock waves seems to be less important at high energies in events associated with strong flares, although its contribution probably prevails in weaker events. The probability of a detectable proton enhancement was found to directly depend on the peak flux and duration of the microwave burst, that can be used for diagnostics of proton enhancements based on microwave observations.

**Keywords:** proton events, solar flares, radio radiation.

---

## ВВЕДЕНИЕ

Проблема происхождения солнечных протонных событий (СПС) и их диагностики активно обсуждается почти полвека [Bazilevskaya, 2009; Мирошниченко и др., 2013]. Вызванные солнечной активностью возмущения космической погоды могут представлять значительную угрозу для различных отрас-

лей человеческой деятельности и здоровья людей. Потоки ускоренных до высоких энергий частиц опасны и для оборудования космических аппаратов, и для их экипажей. Первая экспедиция, прибывшая на Международную космическую станцию (МКС) 2 ноября 2000 г., подверглась воздействию мощнейшего СПС 8–10 ноября (см., например, [Lario et al., 2009; Logachev et al., 2016]). Образующиеся под дей-

ствием солнечных космических лучей (СКЛ) в атмосфере Земли вторичные частицы могут также дать заметные дозы облучения членов экипажей и пассажиров трансконтинентальных авиарейсов, заходящих в высокие широты. Всплеск экстремальной солнечной активности в конце октября 2003 г. заставил изменить их трассы в тот период [Веселовский и др., 2004].

За ускорение частиц могут быть ответственны вспышечные процессы в активной области или ударные волны в более обширном пространстве [Cliver et al., 1989; Kallenrode, 2003; Aschwanden, 2012; Reames, 2013; Desai, Giacalone, 2016]. Эти две возможные области ускорения предполагаются удаленными и фактически независимыми друг от друга. Широко распространено мнение, что основным ускорителем протонов, достигающих орбиты Земли, являются головные ударные волны, возбуждаемые корональными выбросами (КВМ) со сверхальфвеновскими скоростями в верхней короне [Reames, 2009, 2013; Gopalswamy et al., 2014]. Это представление основано, в частности, на результатах анализа дисперсии скоростей солнечных частиц разных энергий. В результате такого анализа экстраполированное время выхода частиц от Солнца в межпланетное пространство обычно получается задержанным относительно вспышки, что считается аргументом в пользу их ускорения головными ударными волнами, движимыми КВМ. Исходя из гипотетических представлений о поршневом механизме возбуждения ударных волн, сторонники этой концепции сопоставляют свойства СПС с наблюдаемыми проявлениями, соответствующими предполагаемым в рамках данной гипотезы. Например, начало радиовсплеска II типа считается индикатором образования ударной волны, соответствующим переходу переднего края КВМ в сверхальфвеновский режим. На основании этих предположений делаются попытки связать свойства ударной волны, которой приписывается ответственность за ускорение протонов, с начальной частотой радиовсплеска II типа.

Однако ни в случае иного (например, импульсно-поршневого) механизма возбуждения ударных волн, ни при расположении источника радиовсплеска II типа на фланге ударного фронта такого соответствия не ожидается. Нами установлена более тесная, чем считалось ранее, взаимосвязь между развитием эруптивных вспышек и возбуждением ударных волн [Grechnev et al., 2013a, 2015b]. Следовательно, традиционное противопоставление ускорения частиц ударной волной и во вспышке может быть не вполне правомерным.

В ранних работах указывалось на соответствие между параметрами солнечных энергичных частиц и микроволновых всплесков [Stoort, 1971, Акиньян и др., 1978]. Однако в статье [Kahler, 1982] эта корреляция была приписана «синдрому большой вспышки» — общему соответствию между энерговыделением в эруптивной вспышке и его различными проявлениями независимо от наличия физической связи между ними. Впоследствии возведение в абсолют ускорения частиц ударной волной привело к недооценке диагностических возможностей микро-

волновых всплесков. Тем не менее в ряде исследований сделан вывод о существенной роли вспышечных процессов в ускорении СКЛ и подтверждена перспективность диагностики СПС по данным о вспышечном радиоизлучении [Дайбог и др., 1987; Chertok, 1990; Melnikov et al., 1991; Isaeva et al., 2010]. С этой точки зрения важной представляется корреляция между параметрами частотного спектра микроволновых всплесков и энергетического спектра потоков протонов у Земли [Черток и др., 2009]. В работах [Grechnev et al., 2008; Klein et al., 2014] аргументировано преобладание вспышечного ускорения в экстремальном СПС 20 января 2005 г. В статьях [Grechnev et al., 2013b, 2015a] показана несостоятельность противопоставления источников ускоренных протонов в разных экстремальных событиях. Возникающая во время вспышки ударная волна может ускорить частицы значительно раньше, чем скорость КВМ превысит альфвеновскую. Освобождение ускоренных во вспышке частиц, захваченных в магнитный жгут КВМ, возможно лишь после его пересоединения с открытой магнитной структурой. Следовательно, задержанный относительно вспышки выход в межпланетное пространство ускоренных частиц свидетельствует в пользу их ускорения во вспышке, а не ударной волной, что изменяет вывод из результатов анализа дисперсии скоростей на противоположный. Таким образом, результаты последних лет показывают, что анализ соотношений между микроволновыми всплесками и протонными возрастаниями полезен и безотносительно к происхождению СПС.

В настоящей работе для выявления вклада двух возможных источников ускорения анализируются соотношения между параметрами вспышек и КВМ и СПС высоких энергий. Основными целями являются выяснение, между какими параметрами солнечных эруптивных событий и СПС корреляция наиболее высока, и выявление возможных закономерностей для оперативной диагностики СПС по данным микроволновых наблюдений.

В разделе 1 суммируются полученные нами ранее статистические результаты (1.1), перечисляются источники данных, характеризуются их отбор и подготовка (1.2). В разделе 2 анализируются зависимости вероятности СПС от мощности микроволнового всплеска (2.1) и его длительности (2.2), сравниваются корреляции между разными комбинациями максимумов потоков и флюенсов микроволновых всплесков и протонных возрастаний (2.3). В разделе 3 анализируются соотношения между разными параметрами солнечной эруптивной активности и флюенсами протонов. Полученные результаты обобщаются в разделе 4.

## **1. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ПОДГОТОВКА ДАННЫХ**

### **1.1. Полученные ранее результаты**

Наблюдаемое как микроволновые всплески гиротронное излучение ускоренных электронов зависит от их параметров, магнитного поля в источ-

нике и его размеров. Эти зависимости существенно различаются для оптически толстого режима (ниже частоты максимума спектра гиротронного излучения) и оптически тонкого режима (на частотах выше спектрального максимума). Микроволновое излучение в оптически тонком режиме максимально чувствительно к электронам высоких энергий и наиболее прямо связано с темпом энерговыделения в процессе вспышки – КВМ. Частота спектрального максимума также зависит от названных параметров. Поэтому микроволновые данные на фиксированной частоте неоднозначны, относясь к области спектра гиротронного излучения левее максимума в одних событиях и правее него в других. Чтобы свести к минимуму эту неоднозначность, целесообразно анализировать микроволновые данные на максимально возможной частоте. Наивысшая частота, на которой ведутся стабильные долговременные измерения интегрального потока солнечного радиоизлучения, составляет 35 ГГц. Эти наблюдения ведутся радиополяриметрами обс. Нобеяма (Nobeyama Radio Polarimeters, NoRP [Nakajima et al., 1985]) с 1990 г.

В работе [Grechnev et al., 2013b] проанализированы соотношения между максимумами потоков микроволновых всплесков  $\geq 1000$  с.е.п. ( $1 \text{ с.е.п.} = 10^{-22} \text{ Вт м}^{-2} \text{ Гц}^{-1}$ ) на частоте 35 ГГц ( $F_{35}$ ) и потоков протонов с энергиями выше 100 МэВ ( $J_{100}$ ) за период 1990–2012 гг. Для полноты анализа выявлены и рассмотрены события за тот же период, вызвавшие СПС  $J_{100} > 10$  pfu ( $1 \text{ pfu} = 1 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$ ), связанные с более слабыми микроволновыми всплесками. В полный список вошло 98 событий. Для удобства введены категории событий по аналогии с классификацией GOES, определяемые максимальной величиной микроволнового потока всплеска на частоте 35 ГГц:  $F_{35} > 10^4$  с.е.п. — mX (microwave-eXtreme),  $10^3$  с.е.п.  $< F_{35} < 10^4$  с.е.п. — mS (microwave-Strong),  $F_{35} < 10^3$  с.е.п. — mM (microwave-Moderate) и mO (microwave-Occluded) — для событий за солнечным лимбом, излучение которых не наблюдается с Земли.

Выявлено четыре группы событий:

1) события с общим ростом протонного потока при увеличении микроволнового — группа, к которой относится большинство событий;

2) события с интенсивными всплесками на частоте 35 ГГц без протонных возрастаний, обнаружимых в интегральном канале GOES > 100 МэВ;

3) нетипично обильные СПС после умеренных микроволновых всплесков (mM) — несколько событий;

4) СПС, связанные с залимбовыми источниками (mO), — несколько событий.

Сформулирован предварительный диагностический критерий: если событие произошло в видимой части западной полусферы Солнца и сопровождалось значительным микроволновым всплеском, КВМ и всплеском II типа, то можно ожидать околосолнечного возрастания потока протонов  $J_{100}$ , выраженного в единицах pfu, в пределах от  $(F_{35}/1100)^2$  до  $(F_{35}/13\ 000)^2$ , где  $F_{35}$  выражен в с.е.п. При высокой интенсивности микроволновых всплесков значительные СПС возможны даже в случае расположе-

ния солнечного источника в восточной полусфере, особенно при их большой длительности. Установлено, что для мощных СПС характерно внедрение всплесочных лент в области над тенями пятен, что согласуется с наличием в таких событиях мощных микроволновых всплесков, за которые ответственно гиротронное излучение в сильных магнитных полях электронов высоких энергий [Grechnev et al., 2008].

В работе [Grechnev et al., 2015a] был продолжен анализ выбранных событий. Список был расширен до 111 событий. Исследованы соотношения между различными комбинациями максимумов потоков и флюенсов (проинтегрированных по времени потоков излучения) микроволновых всплесков на частоте 35 ГГц и протонных возрастаний с энергиями >100 МэВ. Использовались наблюдательные данные о временном ходе интенсивности и спектре как протонного возрастания на орбите Земли, так и микроволнового всплеска в его солнечном источнике и расположении последнего на Солнце. В настоящей работе для полноты картины и проверки ранее полученных результатов и предположений список анализируемых событий продолжен до марта 2015 г. и дополнен событиями со значительно более слабыми СПС ( $0.1 \text{ pfu} < J_{100} < 10 \text{ pfu}$ ), наблюдавшимися с 1996 г.

## 1.2. Анализируемые данные

Список микроволновых всплесков, зарегистрированных NoRP, представлен на сайте [<http://solar.nro.nao.ac.jp/norp/html/event>]. Данные о всплесках на частоте 35 ГГц имеются для периода с 15 апреля 1990 г. до 10 марта 2015 г. Мы проанализировали все события из этого списка с максимальными потоками всплесков на частоте 35 ГГц выше 1000 с.е.п. ( $F_{35} \geq 10^3$ ). Этому критерию удовлетворяют 104 события. Анализ корреляций СПС с параметрами КВМ возможен с 1996 г., когда началась наблюдения на коронографах LASCO. Для учета СПС после слабых микроволновых всплесков дополнительно рассмотрены все протонные возрастания с 1996 г., максимумы потоков которых удовлетворяли условию  $J_{100} \geq 0.1 \text{ pfu}$ , а соответствующие микроволновые всплески попадали в наблюдательное время в Нобеяме. Эти СПС были предварительно отобраны из архива стандартных трехдневных графиков протонных потоков, записанных мониторами на спутниках GOES в трех интегральных каналах в период с 1996 по март 2015 г. [<ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse>]. Обширная дополнительная информация имеется в ряде статей и каталогов СПС, в том числе электронных [Sladkova et al., 1998; Kurt et al., 2004; Веселовский и др., 2012; Logachev et al., 2016; <http://www.wdcb.ru/stp/data/SPE>]. В результате было дополнительно найдено 34 события. При последующем отборе отождествлялся солнечный источник события с использованием фильмов и наборов изображений, полученных на радиогелиографе Нобеяма [<http://solar.nro.nao.ac.jp/norh>], телескопах крайнего ультрафиолетового диапазона и коронографах космических обсерваторий SOHO [[http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list](http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list); [http://lasco-www.nrl.navy.mil/daily\\_mpg](http://lasco-www.nrl.navy.mil/daily_mpg)], STEREO [[http://cdaw.gsfc.nasa.gov/stereo/daily\\_movies](http://cdaw.gsfc.nasa.gov/stereo/daily_movies)] и SDO [<http://sdo.gsfc.nasa.gov/data/aiahmi>] для соответствующих периодов.

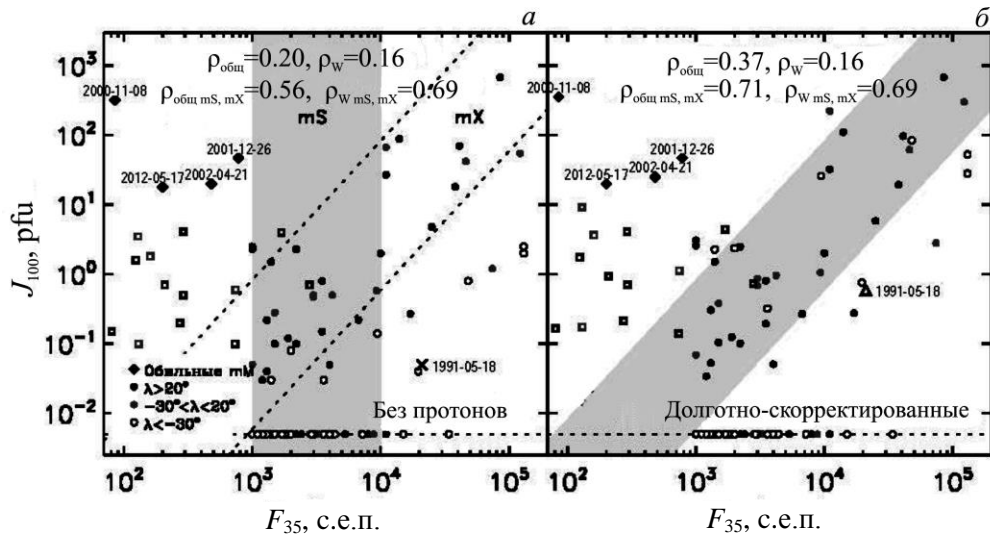


Рис. 1. Соотношение между максимумами потоков СПС  $E_p > 100$  МэВ и всплесков на частоте 35 ГГц: фактические значения (а), с долготной коррекцией (б). Долгота солнечного источника представлена символами: незакрашенные круги — дальние восточные события ( $\lambda < -30^\circ$ ), черные круги — западные события ( $\lambda > 20^\circ$ ), серые круги — события в интервале долгот  $-30^\circ < \lambda < 20^\circ$ . Квадратами обозначены 13 событий mM с  $0.1 \leq J_{100} < 10$  pfu: черными — западные, серыми — с долготами в интервале  $-30^\circ < \lambda < 20^\circ$ . Черные ромбы — четыре события mM с нетипично высокой протонной продуктивностью. События без обнаружимых протонных возрастных условно показаны на пунктирной горизонтальной линии. Пирсоновские коэффициенты корреляции, рассчитанные для всех событий и отдельно для западных, приведены в верхней части графиков. Коэффициенты корреляции с индексами mS, mX рассчитаны для соответствующих категорий событий. Наклонные пунктирные линии  $(F_{35}/13\ 000)^2$  и  $(F_{35}/1100)^2$  на панели (а) соответствуют границам области, заштрихованной серым цветом (б). Эти линии ограничивают основное облако точек и указывают на прямое соответствие между пиковыми потоками  $F_{35}$  и  $J_{100}$

Шестнадцать событий были связаны с залимбовыми источниками, микроволновое излучение от которых не могло достичь Земли. Относительно этих событий трудно сделать какие-либо выводы, поэтому они исключены из дальнейшего рассмотрения. Исключены также события, для которых данные GOES или NoRP неудовлетворительны. Полный список анализируемых событий (121 событие, включая добавленные 13 событий с пиковыми потоками СПС  $J_{100} \geq 0.1$  pfu и слабыми микроволновыми всплесками) представлен в таблице на сайте [http://iszf.irk.ru/~grechnev/papers/protons\_microwaves/Table.htm]. Структура таблицы та же, что и в статье [Grechnev et al., 2015a], с дополнительной колонкой флюенсов протонов на фазе роста. События в таблице расположены в порядке убывания их категории — сначала mX, затем mS и в конце mM. В пределах каждой категории порядок хронологический. Залимбовые события mO в таблицу не включены и не анализировались.

Автоматически обработанные цифровые данные NoRP в формате XDR (IDLsave) доступны по адресу [ftp://solar-pub.nao.ac.jp/pub/nsro/norp/xdr]. Методика дополнительной, более точной обработки данных NoRP и оценки количественных параметров всплесков представлена в работе [Grechnev et al., 2013b]. Для всех событий определены и вычтены уровни микроволнового излучения до всплеска, поскольку точность их нахождения программным автоматом в Нобееме часто бывает недостаточной. Анализируемый вклад гиросинхротронного излучения ускоренных электронов выделен вычитанием из микроволновых профилей всплесков с  $F_{35} < 10^3$  с.е.п. теп-

лового тормозного излучения, вычисленного из данных GOES по мягкому рентгену по стандартной методике. Для более мощных всплесков этот вклад незначителен. Вскрыта и устранена ошибка в длительности всплесков, возникшая при переходе от первоначальных оценок их полной длительности к последующим измерениям по половинному уровню и сместившая количественные результаты соответствующего анализа в статье [Grechnev et al., 2015a]. Длительности микроволновых всплесков, представленные в таблице на указанном выше сайте и анализируемые в данной работе, измерены единообразно по половинному уровню.

Цифровые данные протонных мониторов GOES доступны на сайте [http://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes/data/new\_avg]. Полные флюенсы протонов вычислены для интегрального протонного канала  $E_p > 100$  МэВ с вычтенным уровнем фона за все время протонного возрастания. Флюенсы протонов на фазе роста вычислялись аналогично. В случаях, когда СПС происходило на спаде предыдущего события, снижающийся уровень фона аппроксимировался экспонентой.

Набор анализируемых данных показан на рис. 1, а, аналогичном рисунку в статье [Grechnev et al., 2013b]. Рисунок представляет соотношения между пиковыми значениями протонных потоков с  $E_p > 100$  МэВ и микроволновых всплесков на частоте 35 ГГц. Для наглядности солнечные события разбиты по гелиодолготе  $\lambda$  на три интервала с границами  $-30^\circ$  и  $+20^\circ$ . Долготные интервалы представлены градиациями серого. События без протонных возрастных условно показаны на горизонтальной пунктирной прямой

внизу. Большинство СПС группируется между наклонными линиями, образуя «главную последовательность». Четыре события mM с нетипично высокой протонной продуктивностью (черные квадраты, расположенные значительно выше «главной последовательности» в левой части графика): 2000-11-08, 2001-12-26, 2002-04-21, 2012-05-17 — произошли после умеренных микроволновых всплесков с пиковым потоком  $F_{35} < 10^3$  с.е.п. Два из них вызвали наземные возрастания интенсивности космических лучей (GLE): 2001-12-26 (GLE63), 2012-05-17 (GLE71). СПС 1991-05-18 (отмечено крестиком на панели *a* и треугольником на панели *b*) связывают с западным источником, но по своим свойствам это событие выглядит как типичное СПС от восточного источника. Поэтому ему приписана долгота E45 [Grechnev et al., 2015a]. Вверху приведены коэффициенты корреляции между логарифмами пиковых значений микроволновых и протонных потоков для всех событий ( $\rho_{\text{общ}}$ ) и отдельно только для событий в западной полушере с гелиодолготами  $\lambda > 20^\circ$  ( $\rho_{\text{W}}$ ). Здесь и далее события в западной полушере Солнца мы называем западными, а в восточной полушере — восточными событиями. Корреляция для западных событий ниже из-за более существенного вклада четырех нетипичных событий.

На рис. 1, *b* представлены те же события, но с поправкой на долготное ослабление при распространении протонных потоков с энергиями выше 100 МэВ:  $\exp([\lambda - 54^\circ] / 63^\circ)^2$  [Belov et al., 2009]. Эта зависимость близка к результату [Lario et al., 2013], полученному для протонов с энергиями 25–53 МэВ. Аналогичный подход использовался и ранее, включая работу [Kahler, 1982]. Применение долготной коррекции повышает корреляцию для всего ансамбля событий на 70 %. Эта коррекция использовалась для всех параметров СПС, в том числе и при западном расположении их источников. Поскольку такая долготная коррекция не является бесспорной, для контроля коэффициенты корреляции вычислены также отдельно для западных событий. Заметим, что эти коэффициенты корреляции, как и параметры регрессии, относятся к логарифмам анализируемых величин, а не к самим значениям из-за их большого динамического диапазона. Результаты применения линейных статистических методов в логарифмическом масштабе не являются корректными. Ввиду отсутствия общеизвестных альтернативных методов приходится принять в качестве компромисса этот подход, используемый практически во всех аналогичных исследованиях (см., например, [Kahler, 1982; Trotter et al., 2015; Dierckx et al., 2015] и др.), учитывая, что результаты имеют оценочный характер.

## 2. СООТНОШЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МИКРОВОЛНОВЫХ ВСПЛЕСКОВ И СПС

### 2.1. Связь вероятности протонного события с мощностью всплеска на частоте 35 ГГц

На рис. 2 представлено распределение вероятности СПС >100 МэВ в зависимости от пикового зна-

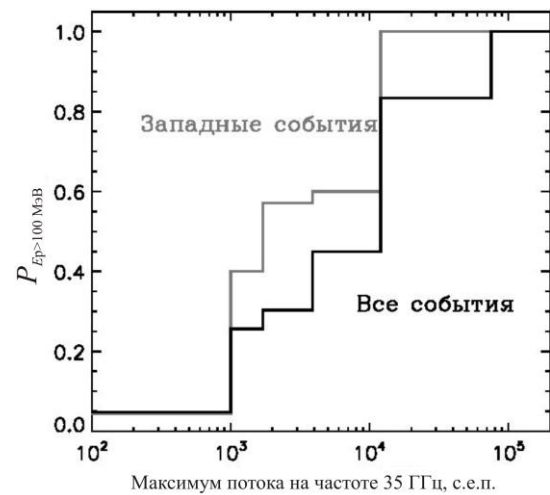


Рис. 2. Зависимость вероятности СПС с энергиями  $E_p > 100$  МэВ от максимума потока микроволнового всплеска на частоте 35 ГГц без учета длительности всплеска и расположения солнечного источника. Серая гистограмма соответствует западным событиям, черная — всем событиям

чения микроволнового всплеска на частоте 35 ГГц ( $F_{35}$ ). Из-за относительно небольшого числа событий форма гистограммы чувствительна к интервалам разбиения. Они выбраны так, чтобы при возможно большем числе интервалов гистограмма была монотонной. При максимуме микроволнового всплеска  $F_{35} \approx 10^3$  с.е.п. вероятность СПС составляет около 35 %. С ростом  $F_{35}$  вероятность СПС повышается, приближаясь к 100 % при  $F_{35} \geq 10^5$  с.е.п. Вероятность СПС при расположении его солнечного источника в западной полушере на 10–20 % выше вероятности, усредненной по всему набору событий.

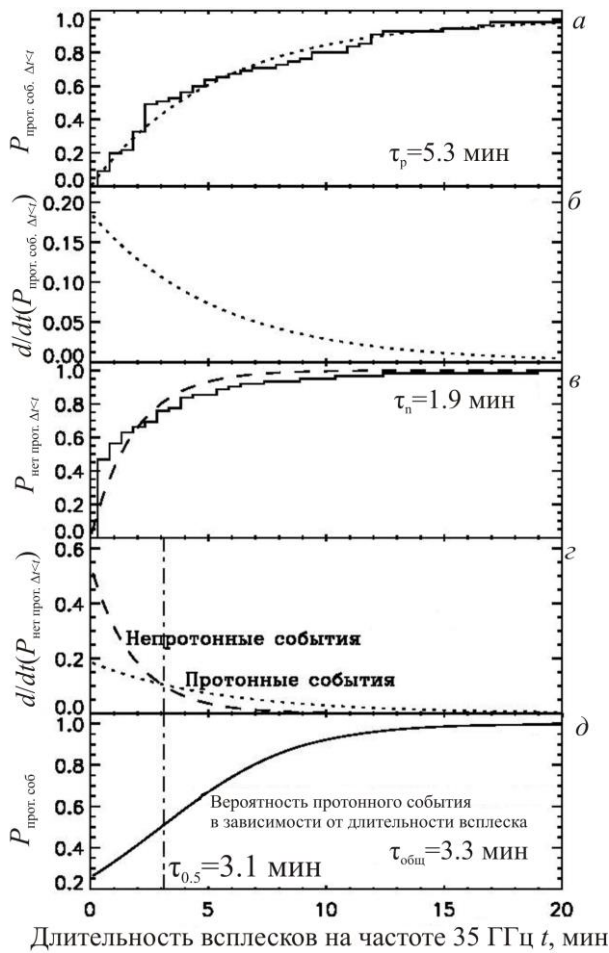
Таким образом, вероятность СПС прямо зависит от пикового значения микроволнового всплеска на частоте 35 ГГц. Этот факт согласуется с выводом статей [Grechnev et al., 2013b, 2015a] об информативности мощных микроволновых всплесков как признака больших СПС.

### 2.2. Роль длительности всплеска

События без СПС условно показаны на горизонтальной пунктирной прямой в нижней части графика на рис. 1. Длительности соответствующих микроволновых всплесков на половинном уровне составляют от 0.06 до 18.8 мин при среднем значении 2.3 мин и разбросе  $\sigma_n = 2.5$  мин. Диапазон длительностей всплесков в протонных событиях — от 0.23 до 68 мин при среднем значении 7.7 мин ( $\sigma_p = 7.9$  мин). Средние длительности различаются в 3.3 раза. Для анализа использовано интегральное распределение вероятности  $P(\Delta t \leq t)$ , характеризующее вероятность события, если его длительность  $\Delta t$  не превышает заданной величины  $t$ .

На рис. 3, *a* сплошной линией показано интегральное распределение вероятности микроволновых всплесков в зависимости от их длительности для событий, вызвавших СПС. Вид этого распределения близок к экспоненциальному:

$$P(\Delta t \leq t) = 1 - \exp(-t/\tau).$$



Длительность всплесков на частоте 35 ГГц  $t$ , мин

Рис. 3. Связь вероятности СПС с длительностью микроволновых всплесков на частоте 35 ГГц: интегральное распределение вероятности для длительностей микроволновых всплесков, связанных с СПС (а), и их плотность вероятности (б); то же для всплесков без СПС — интегральное распределение вероятности (в) и плотность вероятности (г). Внизу: расчетная зависимость вероятности СПС от длительности всплеска (д)

Его производная является плотностью распределения вероятности и имеет вид  $\exp(-t/\tau)/\tau$ . Минимизация отклонения между фактическим распределением вероятности и его аналитической аппроксимацией дает оптимальное значение параметра  $\tau_p = 5.3$  мин, характеризующего распределение по длительности микроволновых всплесков, связанных с СПС. Соответствующие аппроксимирующие функции показаны пунктирной кривой на рис. 3, а и б.

Характер распределения по длительности микроволновых всплесков на частоте 35 ГГц, не связанных с СПС, оказался таким же, но с меньшей характеристической длительностью  $\tau_n = 1.9$  мин (рис. 3, в, г). Аппроксимирующие функции показаны штриховой линией. Для сравнения на рис. 3, г приведена пунктирная кривая аппроксимации функции распределения вероятности для СПС. Отношение ширины распределений длительностей микроволновых всплесков, связанных и не связанных с СПС,  $\tau_p/\tau_n = 2.8$ , что близко к отношению их фактических средних длительностей 3.3.

Расчетное отношение вероятностей протонного и непротонного событий на рис. 3, г выражается как

$$\frac{P_p}{P_n} = \frac{1 - \exp(-t_{35}/\tau_p)}{1 - \exp(-t_{35}/\tau_n)}$$

Можно оценить вероятность СПС  $P_p(t_{35})$  при известной длительности микроволнового всплеска  $t_{35}$ :

$$P_p(t_{35}) = \frac{1}{P_p/P_n + 1} = \left( \frac{1 - \exp(-t_{35}/\tau_p)}{1 - \exp(-t_{35}/\tau_n)} + 1 \right)^{-1}$$

При найденных параметрах для анализируемого набора событий эта оценка дает 59%. Фактически СПС произошли после 60 из 124 микроволновых всплесков с потоками  $F_{35} \geq 10^3$  с.е.п., т. е. в  $\approx 48\%$  событий. Расчетная вероятность для СПС представлена на рис. 3, д. Штрихпунктирной прямой на рис. 3, г, отмечена длительность всплеска 3.1 мин, при которой функции распределения протонных и непротонных событий становятся равными, что соответствует вероятности 0.5. Судя по рис. 3, д, при величине всплеска на частоте 35 ГГц выше 1000 с.е.п. и его длительности не менее 15 мин вероятность СПС близка к 100%.

Идентичность функций распределения для событий с СПС и без них указывает на то, что сама по себе продолжительность всплесков на частоте 35 ГГц не является определяющим признаком протонной продуктивности вспышки. Точно такое же распределение по длительности имеет и полный набор микроволновых всплесков, включающий как протонные, так и непротонные события. В этом случае  $\tau_{\text{общ}} = 3.3$  мин. Это распределение никак не связано с протонной продуктивностью событий и является собственной характеристикой, присущей самим микроволновым всплескам. Вероятной причиной разных ширин распределений  $\tau_p$  и  $\tau_n$  является чувствительность детектора, измеряющего протонный поток на орбите Земли в присутствии радиационного фона. При распространении в межпланетном пространстве протонного сгустка, инжектированного вблизи Солнца, происходит его расплывание из-за дисперсии по скоростям и других эффектов. Снижение максимума околоземного протонного возрастания особенно значительно, если продолжительность инжекции мала. Не исключено, что эти же причины определяют и зависимость вероятности СПС от пикового значения потока микроволнового всплеска на рис. 2.

Однотипный вид представленных распределений по длительности показывает, что характеристики всплесков на частоте 35 ГГц не позволяют разделить СПС на «импульсные» и «постепенные». Следовательно, причиной зависимости количества протонов высоких энергий от длительности события может быть не различие в механизмах ускорения частиц, а продолжительность работы ускорительного процесса.

### 2.3. Флюенсы протонов и микроволнового излучения

Соотношения между различными комбинациями пиковых значений потоков и полных флюенсов всплесков микроволнового излучения и СПС представлены на четырех графиках на рис. 4. Коэффициенты корреляции для всех событий и отдельно для западных приведены в верхней части графиков.

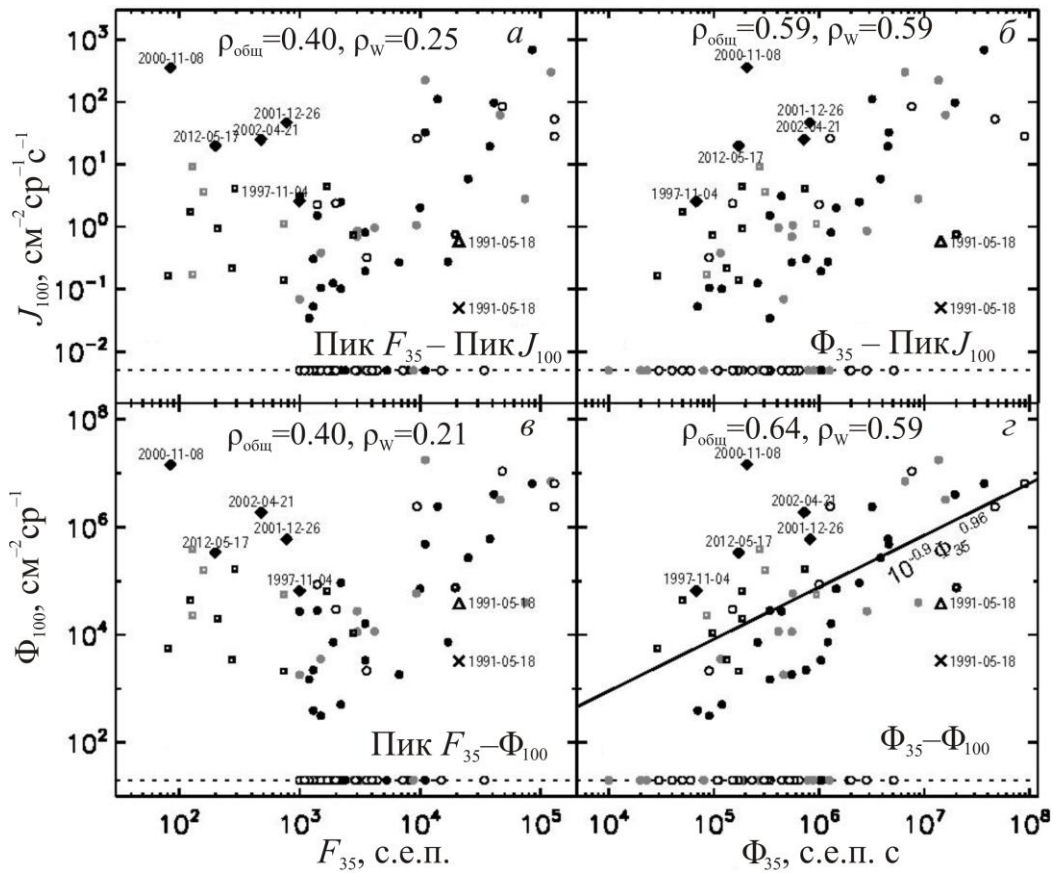


Рис. 4. Соотношения между разными комбинациями пиковых величин потоков и флюенсов всплесков микроволнового излучения на частоте 35 ГГц и СПС > 100 МэВ: зависимость максимумов потоков протонов  $J_{100}$  от потоков  $F_{35}$  (а) и флюенсов  $\Phi_{35}$  микроволнового излучения (б); зависимость флюенсов протонов  $\Phi_{100}$  от потоков  $F_{35}$  (в) и флюенсов  $\Phi_{35}$  микроволнового излучения (г). В верхней части рисунков указаны коэффициенты корреляции для всех событий и отдельно для западных. Долгота солнечного источника каждого события представлена цветом символа аналогично рис. 1. Квадратами обозначены 13 событий с  $0.1 \leq J_{100} < 10$  pfu и  $F_{35} < 1000$  с.е.п. Черные ромбы — пять событий mM с нетипично высокой протонной продуктивностью. События без протонных возрастаний схематически показаны на горизонтальной пунктирной линии. Сплошная наклонная линия на панели г — линейная аппроксимация распределения в логарифмическом масштабе

Различие между верхней и нижней левыми панелями незначительно. Отклонение пяти нетипичных событий от основного облака точек существенно меньше на правых графиках, где аргументом является флюенс микроволнового излучения, чем на левых, где аргумент — максимальный микроволновый поток. Наилучшее соответствие с коэффициентом корреляции 0.64 наблюдается между флюенсами СПС и флюенсами микроволновых всплесков.

В отобранных по нашему критерию пяти событиях mM (черные ромбы) наблюдались повышенные потоки протонов высоких энергий. Возможно, эти события существенно отличаются от остальных. Как показывает рис. 4, наивысшая корреляция между флюенсами протонов и микроволнового излучения связана с большой длительностью этих событий; длительность событий с  $J_{100} \geq 0.1$  pfu и небольшими всплесками на 35 ГГц также велика. Однако даже эти события со слабыми пиковыми протонными потоками на графике флюенсов лежат на верхней границе «главной последовательности». Для событий с  $F_{35} \geq 1000$  с.е.п. (без учета событий mM) коэффициент корреляции между флюенсами составляет 0.81, а для остальных комбинаций он не превышает 0.75.

Полученное в логарифмическом масштабе для всех без исключения событий уравнение линейной регрессии, связывающее флюенсы микроволнового излучения и протонов, имеет вид  $\Phi_{100} = 10^{-0.9 \pm 1.19} \Phi_{35}^{0.96 \pm 0.19}$ . Показатель степени в пределах разброса близок к единице, что соответствует прямой пропорциональности между флюенсами. Без учета событий mM с  $F_{35} < 1000$  с.е.п. показатель степени выше единицы:  $\Phi_{100} = 10^{-3.54 \pm 0.98} \Phi_{35}^{1.35 \pm 0.16}$ .

Соответствие между продолжительностью процесса вспышечного ускорения и длительностью микроволнового всплеска очевидно. Если же протоны ускоряются ударными волнами вдали от области вспышки, то такого соответствия труднее ожидать. Полученный результат указывает на статистическое преобладание в области энергий >100 МэВ протонов вспышечного происхождения при наличии вклада протонов, ускоренных ударными волнами, но с меньшей статистической значимостью, что противоречит гипотезе об исключительной роли ударных волн в ускорении протонов [Kahler, 1982; Reames, 2013; Gopalswamy et al., 2014; Desai, Giacalone, 2016]. Для подтверждения нашего вывода рассмотрим корреляции флюенсов протонов с некоторыми параметрами вспышечного излучения и скоростью КВМ.

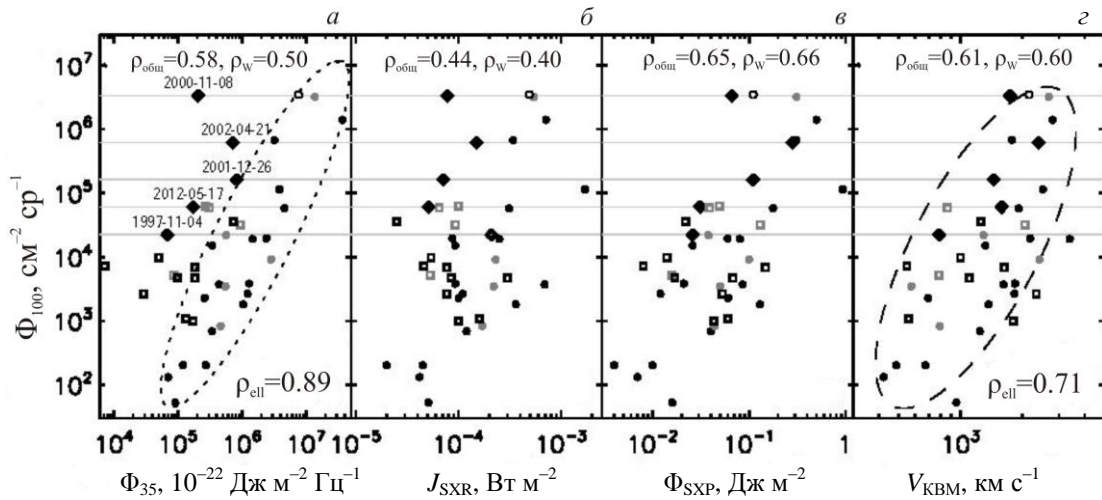


Рис. 5. Логарифмические графики рассеяния для флюенсов протонов  $>100$  МэВ с долготной коррекцией в зависимости от разных параметров солнечных вспышек и скорости КВМ. В верхней части графиков указаны коэффициенты корреляции для всех событий ( $\rho_{\text{обн}}$ ) и отдельно для западных событий ( $\rho_w$ ). Значение символов аналогично рис. 1. Флюенсы обильных событий отмечены серыми горизонтальными линиями. Эллипсами обведены события с  $F_{35} \geq 1000$  с.е.п. (а) и главное облако точек (z);  $\rho_{\text{ell}}$  — коэффициент корреляции для событий внутри эллипсов

### 3. СВЯЗЬ ФЛЮЕНСОВ ПРОТОНОВ С ПАРАМЕТРАМИ СОЛНЕЧНОЙ ЭРУПТИВНОЙ АКТИВНОСТИ

В работе [Trottet et al., 2015] были проанализированы 44 околоземных протонных возрастания в диапазоне энергий 15–40 МэВ (и соответствующие потоки субрелятивистских электронов), связанные со вспышками 1997–2006 гг. классов М и X в западной полусфере Солнца. Авторы вычисляли коэффициенты корреляции между логарифмами пиковых протонных потоков и параметров, характеризующих вспышки и КВМ: максимума потока мягкого рентгеновского излучения, его флюенса от начала до максимума, флюенса микроволнового излучения и скорости КВМ.

В рассмотренном авторами диапазоне энергий протонов 15–40 МэВ было трудно отфильтровать вклад ускорения межпланетными ударными волнами вдали от Солнца. Для энергий протонов  $>100$  МэВ вклад межпланетных ударных волн, скорее всего, значительно ниже. Как показывает рис. 4, флюенс микроволнового излучения  $\Phi_{35}$  коррелирует с полным флюенсом протонов  $\Phi_{100}$  существенно лучше, чем с максимумом потока протонов  $J_{100}$ . Поэтому мы анализируем корреляции именно с полными флюенсами протонных возрастаний, а не с их пиковыми значениями.

Систематическая информация о КВМ и их скоростях имеется для событий с 1996 г. в каталоге КВМ [Yashiro et al., 2004; [http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list](http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list)]. Скорости, перечисленные в каталоге КВМ, измерены по самой быстрой детали, и поэтому для быстрых КВМ значения скорости относятся, вероятнее всего, непосредственно к ударным волнам [Ciaravella, 2006; Grechnev et al., 2013a, 2014, 2015b; Kwon et al., 2014, 2015]. Скорости КВМ известны для 39 СПС из нашего списка. На рис. 5 представлены логарифмические графики рассеяния для флюенсов протонов  $>100$  МэВ с долготной коррек-

цией  $\Phi_{100}$  в зависимости от флюенсов микроволнового излучения  $\Phi_{35}$  (рис. 5, а), максимумов потоков мягкого рентгеновского излучения  $J_{\text{SXR}}$  (рис. 5, б), флюенсов рентгеновского излучения от начала до максимума  $\Phi_{\text{SXR}}$  (рис. 5, в) и скоростей КВМ  $V_{\text{КВМ}}$  (рис. 5, z). Как и на аналогичном рисунке в статье [Grechnev et al., 2015a], эллипсом на рис. 5, а обведены все события с максимальными потоками  $F_{35} \geq 1000$  с.е.п (mS и mX), а на рис. 5, z — главное облако точек, которое теперь включает практически все события, довольно равномерно распределившиеся внутри эллипса. Важны не соотношения осей эллипсов, зависящие от масштабов координатных осей, а указанные на графиках коэффициенты корреляции.

Анализ расширенного набора событий подтверждает результаты и предположения нашей предыдущей работы [Grechnev et al., 2015a]. События с мощными микроволновыми всплесками категорий mS и mX группируются в облако точек с высокой корреляцией 0.89 между  $\Phi_{100}$  и  $\Phi_{35}$  (для западных событий внутри эллипса коэффициент корреляции составляет 0.88). Более высокая корреляция флюенса протонов  $\Phi_{100}$  с флюенсом мягкого рентгеновского излучения  $\Phi_{\text{SXR}}$ , чем с его пиковой величиной  $J_{\text{SXR}}$ , согласуется с тем фактом, что полное число ускоренных частиц определяется как интенсивностью ускорительного процесса, так и его длительностью. Скорее всего, более широкий разброс, наблюдаемый для пиковых значений, в значительной мере определяется эффектами распространения протонов от источника до околоземного пространства.

Согласно данным протонных мониторов GOES, повышенные значения флюенсов протонов для вновь рассмотренных событий с  $0.1 \leq J_{100} < 10$  pfu, источники большинства которых располагались в западной полусфере, связаны с их большой продолжительностью. Судя по рис. 5, а, к обильным относятся также СПС 4 ноября 1997 г., связанное с коротким (0.9 мин) микроволновым всплеском пороговой интенсивности 1000 с.е.п. и относительно



медленным КВМ (785 км/с), но его флюенс протонов нетипично высок. Вероятная частота спектрального максимума всплеска была между 10 и 20 ГГц. По максимальному потоку мягкого рентгена X2.1 это событие не выделяется среди остальных, а по флюенсу рентгеновского излучения и скорости КВМ оно располагается в верхней части основного облака точек.

Естественно предположить, что в событиях с нетипично высокой протонной продуктивностью преобладал вклад ускорения протонов ударными волнами. Возможно и влияние каких-то дополнительных факторов, усиливших их протонный выход, особенно для события 2000-11-08 [Lario et al., 2009], которое выделяется и на рис. 5, *z* своим огромным флюенсом протонов, хотя скорость соответствующего КВМ (1738 км/с) не была экстремальной.

Представленные результаты относятся к полным флюенсам протонов, интегрированным за все время соответствующих околоземных протонных возрастаний. С другой стороны, в аналогичных исследованиях часто рассматриваются флюенсы протонов только на фазе роста протонного события, в частности, с целью выделения его первого, «быстрого» компонента, связь которого со вспышечными процессами представляется более явной. Для полноты картины были также проанализированы те же самые статистические соотношения не только для полных флюенсов протонов, но и для флюенсов на фазе роста СПС от его начала до пика. Для них коэффициенты корреляции со всеми рассматриваемыми параметрами оказались практически такими же, как и для полных флюенсов, с различиями в пределах 0.02.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Проведенный анализ выявил связь между величиной и длительностью микроволновых всплесков, регистрируемых на частоте 35 ГГц, и вероятностью СПС с энергиями >100 МэВ. По-видимому, причины этой связи, помимо ограниченной чувствительности детекторов, — эффекты распространения протонов от их солнечных источников до Земли. Это обстоятельство предполагает возможность ускорения протонов до высоких энергий во всех вспышках, сопровождаемых достаточно мощными всплесками на частоте 35 ГГц, т. е. во всех случаях, когда происходит ускорение значительного числа электронов до релятивистских энергий, что подтверждает выводы статьи [Livshits, Belov, 2004] об одновременности ускорения электронов и протонов.

Наши результаты согласуются с главным выводом работы [Trottet et al., 2015] и подтверждают ее предварительное заключение о преобладающей роли вспышечного ускорения для протонов высоких энергий. Для подавляющего большинства проанализированных нами событий установлена прямая зависимость с высокой корреляцией между параметрами вспышки и флюенсами протонов с энергиями >100 МэВ. Сопоставив корреляция флюенсов СПС с флюенсами мягкого рентгеновского излучения (от начала роста до максимума) и микроволнового излучения показывает, что оба этих параметра,

характеризующих солнечные вспышки, в принципе могут быть использованы для диагностики СПС.

Для событий с достаточно мощными микроволновыми всплесками ( $F_{35} > 1000$  с.е.п.) наблюдается высокая корреляция (около 0.9) между флюенсами микроволнового излучения и протонов, присутствующая в диапазоне трех порядков величины для микроволн и пяти порядков для протонных событий. Это соответствует степенной зависимости, показатель которой можно грубо оценить как логарифмическое отношение этих диапазонов, т. е.  $5/3 \approx 1.7$ . Показатель степени, полученный линейной регрессией в логарифмическом масштабе, составляет  $1.35 \pm 0.16$ . Данный факт позволяет практически оценивать ожидаемый флюенс СПС по наблюдаемому микроволновому всплеску.

При более слабых всплесках корреляция должна снижаться, поскольку для возбуждения ударной волны, которая может ускорить протоны, требуется лишь эрупция магнитоплазменной структуры с достаточной величиной ее ускорения. Это может происходить и без выраженных вспышечных процессов, ответственных за ускорение частиц (см., например, [Grechnev et al., 2015a, b]); для таких событий характерен мягкий спектр СПС [Черток и др., 2009; Gopalswamy et al., 2015]. Действительно, корреляция с флюенсами протонов снижается у событий с более слабыми микроволновыми всплесками, но не столь сильно, как можно было бы ожидать: треть от их общего числа на рис. 5, *a* располагается внутри корреляционного эллипса или на его границе.

Отдельного обсуждения заслуживают события с повышенной протонной продуктивностью (черные ромбы на рис. 5). Событие 8 ноября 2000 г. настолько удалено от корреляционного эллипса, отличаясь рядом своих характеристик от других событий, что в рамках нашего анализа его исключительность можно связать с ускорением ударной волной. Очень короткое импульсное событие 4 ноября 1997 г. не укладывается в рамки представлений о «постепенных» событиях с предположительно преобладающим ускорением протонов ударными волнами.

Три оставшихся СПС, два из которых были связаны с GLE, характеризуются умеренными микроволновыми всплесками от 200 до 800 с.е.п. с широким диапазоном длительностей от 13 до 58 мин и максимумами спектра не выше 10 ГГц [Grechnev et al., 2013b]. Существование событий с нетипично высокой протонной продуктивностью и низкой частотой спектрального максимума отмечалось и ранее [Melnikov et al., 1991; Daibog et al., 1993]. Детальный анализ вспышки 26 декабря 2001 г. выявил значительную асимметрию магнитной конфигурации. Для баланса магнитного потока площадь микроволнового источника на стороне слабых полей должна быть больше, чем на стороне сильных полей, соответственно отношению их напряженностей. Это приводит к подъему низкочастотной части спектра гиротронного излучения и сдвигу его максимума влево. Сильная зависимость гиротронного излучения от напряженности магнитного поля в области его генерации приводит к дополнительному разбросу параметров микроволнового всплеска

в несколько раз при одной и той же эффективности ускорения [Grechnev et al., 2017]. По сути, эти обстоятельства подтверждают предположения авторов статей [Melnikov et al., 1991; Daibog et al., 1993] о роли магнитных полей. Для частичной компенсации этих эффектов при диагностике можно использовать морфологический признак пересечения вспышечных лент с тенями пятен. Наиболее мощный микроволновый всплеск происходит, если ленты пересекают тени обоих пятен противоположной полярности (как, например, в случаях GLE69 и GLE70). Всплески с меньшими пиковыми потоками происходят при пересечении тени пятна одной из лент, что и наблюдалось в событиях, вызвавших GLE63 и GLE71. Умеренные всплески происходят в большинстве событий при расположении лент вне пятен.

Еще одна причина повышенной протонной продуктивности этих трех событий могла быть связана с тем, что в каждом из них произошло как минимум две эрупции, разделенных небольшим промежутком времени. В результате повторной эрупции облегчается подъем последующего КВМ, достижение им более высокой скорости, возбуждение более сильной ударной волны (в том числе в результате слияния двух ударных волн, возбужденных каждой из эрупций). При первой эрупции обеспечивается выброс в корону надтепловых частиц, которые могут быть ускорены ударной волной, возникшей при второй эрупции. С другой стороны, первая эрупция вытягивает замкнутые корональные структуры, значительно облегчая выход протонов и более тяжелых ионов, ускоренных в активной области вспышечными процессами [Grechnev et al., 2013a].

Существенным ограничением нашего анализа является тот факт, что использовавшееся излучение на высокой частоте 35 ГГц, адекватно отражающее процессы мощного энерговыделения и ускорения частиц в главной фазе вспышки, несет недостаточную информацию о возможном постэруптивном (постимпульсном) ускорении частиц, интенсивность которого значительно ниже, но продолжительность больше. Как известно, максимум спектра микроволнового излучения со временем сдвигается в область низких частот (что соответствует смещению микроволнового источника в область слабых магнитных полей), поэтому продолжительная постэруптивная фаза проявляется лишь на более низких частотах [Chertok, 1995; Klein et al., 1999, 2014]. Вследствие этого найденные для частоты 35 ГГц коэффициенты корреляции являются нижней границей возможных. Способ учета возможных постэруптивных процессов пока неочевиден.

Авторы благодарны А.Т. Алтынцеву, А.В. Белову, Б.Ю. Юшкову, В.Г. Курт, М.А. Лившицу, К.-Л. Кляйну, Н.В. Нитте, В.Е. Судобнову, С.С. Калашникову за плодотворные обсуждения и помощь в обработке данных и рецензентам статьи за полезные замечания. Авторы признательны коллективу, обеспечивающим наблюдения на радиополяриметрах обсерватории Нобейма и измерения потоков протонов на спутниках GOES, за данные, использованные в настоящем анализе. Работа частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект № 14-02-00367 и 15-02-01089).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акиньян С.Т., Фомичев В.В., Черток И.М. Оценки интенсивности солнечных потоков протонов по интегральным параметрам микроволновых радиовсплесков // Геомагнетизм и аэронавигация. 1978. Т. 18. С. 577–582.
- Веселовский И.С., Панасюк М.И., Авдюшин С.И. и др. Солнечные и гелиосферные явления в октябре–ноябре 2003 г.: причины и следствия // Космические исследования 2004. Т. 42. С. 435–488. DOI: 10.1023/B: COSM.0000046229.24716.02.
- Веселовский И.С., Мягкова И.Н., Яковчук О.С. Динамика энергетических спектров солнечных протонных событий в 23-м солнечном цикле // Астрон. вестник. 2012. Т. 46, № 3. С. 235–258. DOI: 10.1134/S0038094612030033.
- Дайбог Е.И., Курт В.Г., Логачев Ю.И. и др. Коэффициент выхода электронов, генерированных в солнечных вспышках // Изв. АН СССР. Сер. физическая. 1987. Т. 51, № 10. С. 1825–1827.
- Мирошниченко Л.И., Вашенюк Э.В., Перес-Пераса Х.А. Солнечные космические лучи: 70 лет наземных наблюдений // Геомагнетизм и аэронавигация. 2013. Т. 53, № 5. С. 579–600. DOI: 10.7868/S001679401305012X.
- Черток И.М., Гречнев В.В., Мешалкина Н.С. О соотношении спектров микроволновых всплесков на Солнце и потоков протонов у Земли // Астрон. журнал. 2009. Т. 86, № 11. С. 1133–1144.
- Aschwanden M.J. GeV particle acceleration in solar flares and ground level enhancement (GLE) events // Space Sci. Rev. 2012. V. 171, iss. 1–4. P. 3–21. DOI: 10.1007/s11214-011-9865-x.
- Bazilevskaya G.A. On the early phase of relativistic solar particle events: are there signatures of acceleration mechanism? // Adv. Space Res. 2009. V. 43. P. 530–536. DOI: 10.1016/j.asr.2008.08.005.
- Belov A. Properties of solar X-ray flares and proton event forecasting // Adv. Space Res. 2009. V. 43, iss. 4. P. 467–473. DOI: 10.1016/j.asr.2008.08.011.
- Chertok I.M. On the correlation between the solar gamma-ray line emission, radio bursts and proton fluxes in the interplanetary space // Astron. Nachr. 1990. V. 311. P. 379–381. DOI: 10.1002/asna.2113110618.
- Chertok I.M. Post-eruption particle acceleration in the corona: a possible contribution to solar cosmic rays // 24<sup>th</sup> International Cosmic Ray Conference. 1995. V. 4. P. 78.
- Cliver E.W., Forrest D.J., Cane H.V., et al. Solar flare nuclear gamma-rays and interplanetary proton events // Astrophys. J. 1989. V. 343. P. 953–970. DOI: 10.1086/167765.
- Croom D.L. Solar microwave bursts as indicators of the occurrence of solar proton emission // Solar Phys. 1971. V. 19. P. 152–170. DOI: 10.1007/BF00148831.
- Daibog E.I., Melnikov V.F., Stolpovskii V.G. Solar energetic particle events from solar flares with weak impulsive phases of microwave emission // Solar Phys. 1993. V. 144. P. 361–372. DOI: 10.1007/BF00627600.
- Desai M., Giacalone J. Large gradual solar energetic particle events // Living Rev. Solar Phys. 2016. V. 13. P. 3–132. DOI: 10.1007/s41116-016-0002-5.
- Dierckxsens M., Tziotziou K., Dalla S., et al. Relationship between solar energetic particles and properties of flares and CMEs: statistical analysis of solar cycle 23 events // Solar Phys. 2015. V. 290. P. 841–874. DOI: 10.1007/s11207-014-0641-4.
- Gopalswamy N., Xie H., Akiyama S., et al. Major solar eruptions and high-energy particle events during solar cycle 24 // Earth, Planets and Space. 2014. V. 66, article id. 104. 15 p. DOI: 10.1186/1880-5981-66-104.
- Gopalswamy N., Mäkelä P.A., Akiyama S., et al. Large solar energetic particle events associated with filament eruptions outside of active regions // Astrophys. J. 2015. V. 806, iss. 1, article id. 8. 15 p. DOI: 10.1088/0004-637X/806/1/8.
- Grechnev V.V., Kurt V.G., Chertok I.M., et al. An extreme solar event of 20 January 2005: properties of the flare and the origin of energetic particles // Solar Phys. 2008. V. 252. P. 149–177. DOI: 10.1007/s11207-008-9245-1.

Grechnev V.V., Kiselev V.I., Uralov A.M., et al. An updated view of solar eruptive flares and the development of shocks and CMEs: history of the 2006 December 13 GLE-productive extreme event // *Publ. Astron. Soc. Japan.* 2013a. V. 65, iss. sp1, S9. DOI: 10.1093/pasj/65.sp1.S9.

Grechnev V.V., Meshalkina N.S., Chertok I.M., Kiselev V.I. Relations between strong high-frequency microwave bursts and proton events // *Publ. Astron. Soc. Japan.* 2013b. V. 65, iss. sp1, S4. DOI: 10.1093/pasj/65.sp1.S4.

Grechnev V.V., Kiselev V.I., Meshalkina N.S., Chertok I.M. Relations between microwave bursts and near-Earth high-energy proton enhancements and their origin // *Solar Phys.* 2015a. V. 290, iss. 10. P. 2827–2855. DOI 10.1007/s11207–015–0797–6.

Grechnev V.V., Uralov A.M., Kuzmenko I.V., et al. Responsibility of a filament eruption for the initiation of a flare, CME, and blast wave, and its possible transformation into a bow shock // *Solar Phys.* 2015b. V. 290, iss. 1. P. 129–158. DOI: 10.1007/s11207–014–0621–8.

Grechnev V.V., Uralov A.M., Kiselev V.I., Kochanov A.A. The 26 December 2001 solar eruptive event responsible for GLE63. II. Multi-loop structure of microwave sources in a major long-duration flare // *Solar Phys.* 2017. V. 292, iss. 1. article id. 3. 27 p. DOI: 10.1007/s11207–016–1025–8.

Isaeva E.A., Melnikov V.F., Tsvetkov L.I. Dependence of the SCR proton flux estimate on radio burst parameters // *Bull. Crimean Astrophys. Obs.* 2010. V. 106. P. 26–30. DOI: 10.3103/S0190271710010043.

Kahler S.W. The role of the big flare syndrome in correlations of solar energetic proton fluxes and associated microwave burst parameters // *J. Geophys. Res.* 1982. V. 87. P. 3439–3448. DOI: 10.1029/JA087iA05p03439.

Kallenrode M.-B. Current views on impulsive and gradual solar energetic particle events // *J. Phys. G.* 2003. V. 29, iss. 5. P. 965–981.

Klein K.-L., Chupp E.L., Trotter G. Flare-associated energetic particles in the corona and at 1 AU // *Astron. Astrophys.* 1999. V. 348. P. 271–285.

Klein K.-L., Masson S., Bouratzis C., et al. The relativistic solar particle event of 2005 January 20: origin of delayed particle acceleration // *Astron. Astrophys.* 2014. V. 572, id. A4. 8 p. DOI: 10.1051/0004–6361/201423783.

Lario D., Aran A., Decker R.B. Major solar energetic particle events of solar cycles 22 and 23: intensities close to the streaming limit // *Solar Phys.* 2009. V. 260, iss. 2. P. 407–421. DOI: 10.1007/s11207–009–9463–1.

Lario D., Aran A., Gómez-Herrero R., et al. Longitudinal and radial dependence of solar energetic particle peak intensities: STEREO, ACE, SOHO, GOES, and MESSENGER observations // *Astrophys. J.* 2013. V. 767. P. 41–59. DOI: 10.1088/0004–637X/767/1/41.

Livshits M.A., Belov A.V. When and where are solar cosmic rays accelerated most efficiently? // *Astron. Rep.* 2004. V. 48. P. 665–677. DOI: 10.1134/1.1787069.

Logachev Yu.I., Bazilevskaya G.A., Vashenyuk E.V., et al. Catalogue of Solar Proton Events in the 23<sup>rd</sup> Cycle of Solar Activity (1996–2008) / Ed. Yu.I. Logachev, ESDB repository. Moscow: Geophysical Center RAS, 2016. 740 p. DOI: 10.2205/ESDB–SAD–P–001.

Melnikov V.F., Podstrigach T.S., Dajbog E.I., Stolpovskij V.G. Nature of the relationship between the fluxes of solar cosmic ray electrons and protons and the parameters of microwave bursts // *Cosm. Res.* 1991. V. 29, N 1. P. 87–94.

Nakajima H., Sekiguchi H., Sawa M., et al. The radiometer and polarimeters at 80, 35, and 17 GHz for solar observations at Nobeyama // *Publ. Astron. Soc. Japan.* 1985. V. 37, N 1. P. 163–170.

Reames D.V. Solar release times of energetic particles in ground-level events // *Astrophys. J.* 2009. V. 693. P. 812–821. DOI: 10.1088/0004–637X/693/1/812.

Reames D.V. The two sources of solar energetic particles // *Space Sci. Rev.* 2013. V. 175, iss. 1–4. P. 53–92. DOI: 10.1007/s11214–013–9958–9.

Sladkova A.I., Bazilevskaya G.A., Ishkov V.N., et al. Catalogue of Solar Proton Events 1987–1996. Moscow: Moscow University Press, 1998. 247 p.

Trotter G. E., Samwel S., Klein K.-L., et al. Statistical evidence for contributions of flares and coronal mass ejections to major solar energetic particle events // *Solar Phys.* 2015. V. 290, iss. 3. P. 819–839. DOI: 10.1007/s11207–014–0628–1.

URL: <http://solar.nro.nao.ac.jp/norp/html/event> (дата обращения 10 марта 2017 г.).

URL: <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse> (дата обращения 10 марта 2017 г.).

URL: <http://www.wdcb.ru/stp/data/SPE> (дата обращения 10 марта 2017 г.).

URL: <http://solar.nro.nao.ac.jp/norh> (дата обращения 10 марта 2017 г.).

URL: [http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list](http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list) (дата обращения 10 марта 2017 г.).

URL: [http://lasco-www.nrl.navy.mil/daily\\_mpg](http://lasco-www.nrl.navy.mil/daily_mpg) (дата обращения 10 марта 2017 г.).

URL: [http://cdaw.gsfc.nasa.gov/stereo/daily\\_movies](http://cdaw.gsfc.nasa.gov/stereo/daily_movies) (дата обращения 10 марта 2017 г.).

URL: <http://sdo.gsfc.nasa.gov/data/aiahmi> (дата обращения 10 марта 2017 г.).

URL: [http://iszf.irk.ru/~grechnev/papers/protons\\_micro-waves/Table.htm](http://iszf.irk.ru/~grechnev/papers/protons_micro-waves/Table.htm) (дата обращения 10 марта 2017 г.).

URL: <ftp://solar-pub.nao.ac.jp/pub/nsro/norp/xdr> (дата обращения 10 марта 2017 г.).

URL: [http://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes/data/new\\_avg](http://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes/data/new_avg) (дата обращения 10 марта 2017 г.).

## REFERENCES

Akin'yan S.T., Fomichev V.V., Chertok I.M. Estimates of solar proton flux intensity from integral parameters of microwave radio bursts. *Geomagnetizm i Aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 1978, vol. 18, pp. 577–582. (In Russian).

Aschwanden M.J. GeV particle acceleration in solar flares and ground level enhancement (GLE) events. *Space Sci. Rev.* 2012, vol. 171, iss. 1–4, pp. 3–21. DOI: 10.1007/s11214–011–9865–x.

Bazilevskaya G.A. On the early phase of relativistic solar particle events: are there signatures of acceleration mechanism? *Adv. Space Res.* 2009, vol. 43, pp. 530–536. DOI: 10.1016/j.asr.2008.08.005.

Belov A. Properties of solar X-ray flares and proton event forecasting. *Adv. Space Res.* 2009, vol. 43, iss. 4, pp. 467–473. DOI: 10.1016/j.asr.2008.08.011.

Chertok I.M. On the correlation between the solar gamma-ray line emission, radio bursts and proton fluxes in the interplanetary space. *Astron. Nachr.* 1990, vol. 311, pp. 379–381. DOI: 10.1002/asna.2113110618.

Chertok I.M. Post-eruption particle acceleration in the corona: a possible contribution to solar cosmic rays. *24<sup>th</sup> International Cosmic Ray Conference.* 1995, vol. 4, p. 78.

Chertok I.M., Grechnev V.V., Meshalkina N.S. On the relationship between spectra of solar and microwave bursts and near-Earth proton fluxes. *Astronomy Reports.* 2009, vol. 53, no. 11, pp. 1059–1069.

Cliver E.W., Forrest D.J., Cane H.V., et al. Solar flare nuclear gamma-rays and interplanetary proton events. *Astrophys. J.* 1989, vol. 343, pp. 953–970. DOI: 10.1086/167765.

Croom D.L. Solar microwave bursts as indicators of the occurrence of solar proton emission. *Solar Phys.* 1971, vol. 19, pp. 152–170. DOI: 10.1007/BF00148831.

Daibog E.I., Kurt V.G., Logachev Yu.I., Stolpovskij V.G., Zenchenko V.N., Melnikov V.F. Yield of electrons generated in solar flares. *Izvestiya AN SSSR. Seriya fizicheskaya* [Bull. of the Russian Academy of Sciences. Physics]. 1987, vol. 51, no. 10, pp. 1825–1827. (In Russian).

Daibog E.I., Melnikov V.F., Stolpovskij V.G. Solar energetic particle events from solar flares with weak impulsive phases of microwave emission. *Solar Phys.* 1993, vol. 144, pp. 361–372. DOI: 10.1007/BF00627600.

Desai M., Giacalone J. Large gradual solar energetic particle events. *Living Rev. Solar Phys.* 2016, vol. 13, pp. 3–132. DOI: 10.1007/s41116-016-0002-5.

Dierckx M., Tziotziou K., Dalla S., et al. Relationship between solar energetic particles and properties of flares and CMEs: statistical analysis of solar cycle 23 events. *Solar Phys.* 2015, vol. 290, pp. 841–874. DOI: 10.1007/s11207-014-0641-4.

Gopalswamy N., Xie H., Akiyama S., et al. Major solar eruptions and high-energy particle events during solar cycle 24. *Earth, Planets and Space.* 2014, vol. 66, article id. 104, 15 p. DOI: 10.1186/1880-5981-66-104.

Gopalswamy N., Mäkelä P.A., Akiyama S., et al. Large solar energetic particle events associated with filament eruptions outside of active regions. *Astrophys. J.* 2015, vol. 806, iss. 1, article id. 8, 15 p. DOI: 10.1088/0004-637X/806/1/8.

Grechnev V.V., Kurt V.G., Chertok I.M., Uralov A.M., Nakajima H., Altyntsev A.T., Belov A.V., Yushkov B.Yu., Kuznetsov S.N., Kashapova L.K., Meshalkina N.S., Prestage N.P. An extreme solar event of 20 January 2005: properties of the flare and the origin of energetic particles. *Solar Phys.* 2008, vol. 252, pp. 149–177. DOI: 10.1007/s11207-008-9245-1.

Grechnev V.V., Kiselev V.I., Uralov A.M., et al. An updated view of solar eruptive flares and the development of shocks and CMEs: history of the 2006 December 13 GLE-productive extreme event. *Publ. Astron. Soc. Japan.* 2013a, vol. 65, SP1, S9. DOI: 10.1093/pasj/65.sp1.S9.

Grechnev V.V., Meshalkina N.S., Chertok I.M., Kiselev V.I. Relations between strong high-frequency microwave bursts and proton events. *Publ. Astron. Soc. Japan.* 2013b, vol. 65, SP1, S4. DOI: 10.1093/pasj/65.sp1.S4.

Grechnev V.V., Kiselev V.I., Meshalkina N.S., Chertok I.M. Relations between microwave bursts and near-Earth high-energy proton enhancements and their origin. *Solar Phys.* 2015a, vol. 290, iss. 10, pp. 2827–2855. DOI 10.1007/s11207-015-0797-6.

Grechnev V.V., Uralov A.M., Kuzmenko I.V., Kochanov A.A., Chertok I.M., Kalashnikov S.S. Responsibility of a filament eruption for the initiation of a flare, CME, and blast wave, and its possible transformation into a bow shock. *Solar Phys.* 2015b, vol. 290, iss. 1, pp. 129–158. DOI: 10.1007/s11207-014-0621-8.

Grechnev V.V., Uralov A.M., Kiselev V.I., Kochanov A.A. The 26 December 2001 solar eruptive event responsible for GLE63. II. Multi-loop structure of microwave sources in a major long-duration flare. *Solar Phys.* 2017, vol. 292, iss. 1, article id. 3, 27 p. DOI: 10.1007/s11207-016-1025-8.

Isaeva E.A., Melnikov V.F., Tsvetkov L.I. Dependence of the SCR proton flux estimate on radio burst parameters. *Bull. Crimean Astrophys. Obs.* 2010, vol. 106, pp. 26–30. DOI: 10.3103/S0190271710010043.

Kahler S.W. The role of the big flare syndrome in correlations of solar energetic proton fluxes and associated microwave burst parameters. *J. Geophys. Res.* 1982, vol. 87, pp. 3439–3448. DOI: 10.1029/JA087iA05p03439.

Kallenrode M.-B. Current views on impulsive and gradual solar energetic particle events. *J. Phys. G.* 2003, vol. 29, iss. 5, pp. 965–981.

Klein K.-L., Chupp E.L., Trotter G., Magun A., Dunphy P.P., Rieger E., Urpo S. Flare-associated energetic particles in the corona and at 1 AU. *Astron. Astrophys.* 1999, vol. 348, pp. 271–285.

Klein K.-L., Masson S., Bouratzis C., et al. The relativistic solar particle event of 2005 January 20: origin of delayed particle acceleration. *Astron. Astrophys.* 2014, vol. 572, id. A4, 8 p. DOI: 10.1051/0004-6361/201423783.

Lario D., Aran A., Decker R.B. Major solar energetic particle events of solar cycles 22 and 23: intensities close to the streaming limit. *Solar Phys.* 2009, vol. 260, iss. 2, pp. 407–421. DOI: 10.1007/s11207-009-9463-1.

Lario D., Aran A., Gómez-Herrero R., et al. Longitudinal and radial dependence of solar energetic particle peak intensities: STEREO, ACE, SOHO, GOES, and MESSENGER observations. *Astrophys. J.* 2013, vol. 767, pp. 41–59. DOI: 10.1088/0004-637X/767/1/41.

Livshits M.A., Belov A.V. When and where are solar cosmic rays accelerated most efficiently? *Astron. Rep.* 2004, vol. 48, pp. 665–677. DOI: 10.1134/1.1787069.

Logachev Yu.I., Bazilevskaya G.A., Vashenyuk E.V., et al. *Catalogue of Solar Proton Events in the 23<sup>rd</sup> Cycle of Solar Activity (1996–2008)*. Moscow, Geophysical Center RAS Publ., 2016, 740 p. DOI: 10.2205/ESDB-SAD-P-001.

Melnikov V.F., Podstrigach T.S., Dajbog E.I., Stolpovskij V.G. Nature of the relationship between the fluxes of solar cosmic ray electrons and protons and the parameters of microwave bursts. *Cosm. Res.* 1991, vol. 29, no. 1, pp. 87–94.

Miroshnichenko L.I., Vashenyuk E.V., Perez-Pérez J. Solar cosmic rays: 70 years of ground-based observation. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 2013, vol. 53, no. 5, pp. 579–600. DOI: 10.7868/S001679401305012X. (In Russian).

Nakajima H., Sekiguchi H., Sawa M., et al. The radiometer and polarimeters at 80, 35, and 17 GHz for solar observations at Nobeyama. *Publ. Astron. Soc. of Japan.* 1985, vol. 37, no. 1, pp. 163–170.

Reames D.V. Solar release times of energetic particles in ground-level events. *Astrophys. J.* 2009, vol. 693, pp. 812–821. DOI: 10.1088/0004-637X/693/1/812.

Reames D.V. The two sources of solar energetic particles. *Space Sci. Rev.* 2013, vol. 175, iss. 1–4, pp. 53–92. DOI: 10.1007/s11214-013-9958-9.

Sladkova A.I., Bazilevskaya G.A., Ishkov V.N., et al. *Catalogue of Solar Proton Events 1987–1996*. Moscow, Moscow University Press, 1998, 247 p.

Trottet G. E., Samwel S., Klein K.-L., et al. Statistical evidence for contributions of flares and coronal mass ejections to major solar energetic particle events. *Solar Phys.* 2015, vol. 290, iss. 3, pp. 819–839. DOI: 10.1007/s11207-014-0628-1.

Veselovsky I.S., Panasyuk M.I., Avdyushin S.I., Bazilevskaya G.A. Solar and heliospheric events in October–November 2003: causes and effects. *Kosmicheskie issledovaniya* [Cosmic Research]. 2004, vol. 42, pp. 435–488. DOI: 10.1023/B: COSM.0000046229.24716.02. (In Russian).

Veselovsky I.S., Myagkova I.N., Yakovchuk O.S. Dynamics of energetic spectra of solar proton events in 23 solar cycle. *Astronomicheskii vestnik* [Astron. Bull.]. 2012, vol. 46, no. 3, pp. 235–258. DOI: 10.1134/S0038094612030033. (In Russian).

URL: <http://solar.nro.nao.ac.jp/norp/html/event> (accessed March 10, 2017).

URL: <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse> (accessed March 10, 2017).

URL: <http://www.wdcb.ru/stp/data/SPE> (accessed March 10, 2017).

URL: <http://solar.nro.nao.ac.jp/norh> (accessed March 10, 2017).

URL: [http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list](http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list) (accessed March 10, 2017).

URL: [http://lasco-www.nrl.navy.mil/daily\\_mpg](http://lasco-www.nrl.navy.mil/daily_mpg) (accessed March 10, 2017).

URL: [http://cdaw.gsfc.nasa.gov/stereo/daily\\_movies](http://cdaw.gsfc.nasa.gov/stereo/daily_movies) (accessed March 10, 2017).

URL: <http://sdo.gsfc.nasa.gov/data/aiahmi> (accessed March 10, 2017).

URL: [http://iszf.irk.ru/~grechnev/papers/protons\\_microwaves/Table.htm](http://iszf.irk.ru/~grechnev/papers/protons_microwaves/Table.htm) (accessed March 10, 2017).

URL: <ftp://solar-pub.nao.ac.jp/pub/nsro/norp/xdr> (accessed March 10, 2017).

URL: [http://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes/data/new\\_avg](http://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes/data/new_avg) (accessed March 10, 2017).

#### *Как цитировать эту статью*

Гречнев В.В., Киселев В.И., Мешалкина Н.С., Черток И.М. О корреляции околоземных протонных возрастаний >100 МэВ с параметрами солнечных микроволновых всплесков. *Солнечно-земная физика.* 2017. Т. 3, № 3. С. 3–14.

#### *How to cite this article*

Grechnev V.V., Kiselev V.I., Meshalkina N.S., Chertok I.M. Correlation of near-Earth proton enhancements >100 MeV with parameters of solar microwave bursts. *Solar-Terrestrial Physics.* 2017. Vol. 3, iss. 3. P. 3–14.