

УДК 524.1-52:523.9

СТАТИСТИЧЕСКИЕ СВЯЗИ МЕЖДУ СОЛНЕЧНЫМИ КОСМИЧЕСКИМИ ЛУЧАМИ, РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ II ТИПА И КОРОНАЛЬНЫМИ ВЫБРОСАМИ МАССЫ

© 2021 г. Г. А. Базилевская^{1, *}, Ю. И. Логачёв², Е. И. Дайбог²,
Н. А. Власова², Е. А. Гинзбург³, В. Н. Ишков^{4, 5}, Л. Л. Лазутин²,
М. Д. Нгуен², Г. М. Сулова², О. С. Яковчук²

¹Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН), г. Москва, Россия

²Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (НИИЯФ МГУ), г. Москва, Россия

³Институт прикладной геофизики им. акад. Е.К. Федорова Росгидромета (ИПГ), г. Москва, Россия

⁴Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Москва, г. Троицк, Россия

⁵Геофизический центр РАН (ГЦ РАН), г. Москва, Россия

*e-mail: bazilevskayaga@lebedev.ru

Поступила в редакцию 27.02.2021 г.

После доработки 13.04.2021 г.

Принята к публикации 27.05.2021 г.

Радиоизлучение II типа часто сопровождает события в солнечных космических лучах и является индикатором распространения ударной волны в короне Солнца. С другой стороны, важную роль в ускорении солнечных протонов играет ударная волна, связанная с выбросами коронального вещества. Оба эти явления могут происходить без сопровождения солнечными космическими лучами, в то же время не все события солнечных космических лучей сопровождаются радиоизлучением II типа. Статистические связи между этими явлениями рассмотрены на базе Каталогов солнечных протонных событий 23 и 24-го циклов солнечной активности. Показано, что события солнечных космических лучей, сопровождаемые радиоизлучением II типа, относятся к наиболее мощным как по характеристикам частиц, так и по характеристикам источников.

DOI: 10.31857/S0016794021050035

1. ВВЕДЕНИЕ

Солнечные космические лучи (СКЛ) — одно из следствий взрывного энерговыделения на Солнце наряду с электромагнитными излучениями и выбросом корональной массы (КВМ). До сих пор продолжается дискуссия о вкладах различных механизмов в генерацию СКЛ, среди которых главными кандидатами являются ускорение во вспышечной области и ускорение на ударной волне, связанной с КВМ [Anastasiadis et al., 2019; Reames, 2021]. Радиоизлучение, сопровождающее взрывное энерговыделение, генерируется ускоренными электронами и дает ценную информацию о происходящих физических процессах, в том числе об ускорении протонов. Радиоизлучение II типа (РИ2) интерпретируется как распространение ударной волны в короне [Cairns et al., 2003]. В работе [Цап и Исаева, 2013] показана высокая корреляция между потоками СКЛ и структурой ударной волны, вызывающей РИ2, которая возрастает

с энергией солнечных протонов, что прямо указывает на роль ударной волны в ускорении СКЛ. Подтверждение ускорения СКЛ на ударных волнах в короне получило подтверждение в работе [Kouloumvakos et al., 2019], в которой показано тесное соотношение между интенсивностью солнечных протонов с энергией 40–60 МэВ с числом Маха корональных волн (коэффициент корреляции $CC = 0.75$). В работе [Gopalswamy et al., 2019a] показано, что длительное вспышечное гамма-излучение в событиях с релятивистскими СКЛ коррелирует с конечной частотой и длительностью РИ2.

С другой стороны, параметры частотного спектра вспышечных микроволновых всплесков коррелируют с показателем степенного энергетического спектра солнечных протонов, и это является аргументом в пользу ускорения СКЛ в процессах импульсного и постэруптивного энерговыделения во вспышке [Черток и др., 2009].

Таблица 1. Статистика событий СКЛ и РИ2 [URL Type II] за 1997–2017 гг.

Полное число событий СКЛ	Число исключенных событий СКЛ	Число событий СКЛ с РИ2	Число событий СКЛ без РИ2	Полное число событий РИ2	Число исключенных событий РИ2	Число событий РИ2 с СКЛ	Число событий РИ2 без СКЛ
236	63	103	70	518	146	103	269

Постэруптивное ускорение электронов подтверждено работой [Yu et al., 2020], основанной на наблюдениях обновленного радиотелескопа EOVSA. Исследование [Fleishman et al., 2020] установило, что изменение магнитного поля в короне в области вспышки 10 сентября 2017 г. привело к выделению энергии, достаточной для ускорения частиц, генерирующих микроволновое радиоизлучение. Можно с уверенностью предполагать, что в большинстве случаев на Солнце реализуются условия для ускорения частиц несколькими способами, которые могут действовать одновременно или последовательно на разных фазах энерговыделения на Солнце [например, Bouratzis et al., 2010].

Взаимосвязь между КВМ и РИ2 является достаточно сложной [Ramesh et al., 2010], она может быть разной для РИ2 метрового и декаметрового диапазона [Lara et al., 2003; Gopalswamy et al., 2005], а также зависит от характеристик общего магнитного поля Солнца [Bilenko, 2015, 2018]. Работы [Gopalswamy et al., 2005, 2019a; Kumari et al., 2017] утверждают, что СКЛ генерируются ударными волнами, которые инициируются КВМ, проявляющимися в короне как радиоизлучение II типа и затем распространяющимися в межпланетном пространстве.

Результаты сопоставлений РИ2, КВМ и СКЛ, выполненные до сих пор, относились к наиболее ярким событиям СКЛ. Многообразие условий, в которых ускоряются и распространяются СКЛ, отражаются в большой вариабельности их характеристик, и это делает необходимым накапливать статистику для выявления взаимосвязей процессов, дающих вклад в СКЛ. Такую возможность обеспечивают Каталоги СКЛ, представляющие однородные ряды данных.

В этой работе, основанной на данных об СКЛ из Каталогов [Логачёв и др., 2016, 2019], мы рассмотрим 2 вопроса: (1) чем отличаются солнечные протонные события, сопровождаемые и не сопровождаемые радиоизлучением II типа и (2) отличаются ли события с радиоизлучением II типа, сопровождающие и не сопровождающие солнечные протонные события.

2. ДАННЫЕ ИЗМЕРЕНИЙ

Данные о потоках и спектрах частиц, а также о предполагаемых источниках СКЛ и надежности

их отождествления взяты из работ [Логачёв и др., 2016, 2019], в которых собраны события СКЛ с максимальной интенсивностью солнечных протонов с $E \geq 10$ МэВ $J10 \geq 1.0$ pfu ($\text{cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$). В Каталогах дана информация о потоках солнечных протонов, об интегральном энергетическом спектре в максимуме временного профиля события и о возможных источниках СКЛ с оценкой степени достоверности. Процедура отождествления источника СКЛ и степени достоверности описана в Каталоге [Акиньян и др., 1982] и в работе [Логачёв и др., 2015]. Данные о РИ2 описаны в работе [Gopalswamy et al., 2019b] и содержатся в таблицах [URL Type II], причем эти события РИ2 привязаны к КВМ (CME-loud TypeII) и соответствующим источникам на Солнце согласно [URL CME]. Этот список включает события РИ2, в основном декаметрового и гектометрового диапазонов, зарегистрированные на спутниках WIND и STEREO. Мы нашли 11 событий СКЛ, не совпадающих с РИ2 по данным [URL Type II], в которых РИ2 было зарегистрировано наземными радиотелескопами [URL Type II m]. Эти события не включены в настоящий анализ, поскольку они, в основном, относятся к метровому диапазону и могут иметь другой характер связи с СКЛ [Lara et al., 2003]. При сравнении СКЛ с базой РИ2 было важно, чтобы их источники совпадали. Мы считали совпадающими источники, происшедшие из одной активной области на Солнце, при условии, что РИ2 имело место раньше, чем приход СКЛ к Земле в пределах нескольких часов. При таком подходе обнаружилось, что большинство несовпадений было связано с событиями, источники которых находились на лимбе или за лимбом Солнца. Эти события обладают особенностями, которые связаны с геометрией ускоряющих ударных волн и межпланетного магнитного поля, в котором распространяются СКЛ. Они требуют дальнейшего изучения и не рассматриваются в этой статье. Статистика событий, включенных в нашу работу, представлена в таблице 1.

3. ОСОБЕННОСТИ СОБЫТИЙ СКЛ, СВЯЗАННЫХ И НЕ СВЯЗАННЫХ С РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ II ТИПА

Из таблицы 1 следует, что событий СКЛ с РИ2, больше, чем без РИ2. События СКЛ анализировались по величине потока протонов $J10$ и энергетическому спектру в максимуме временного

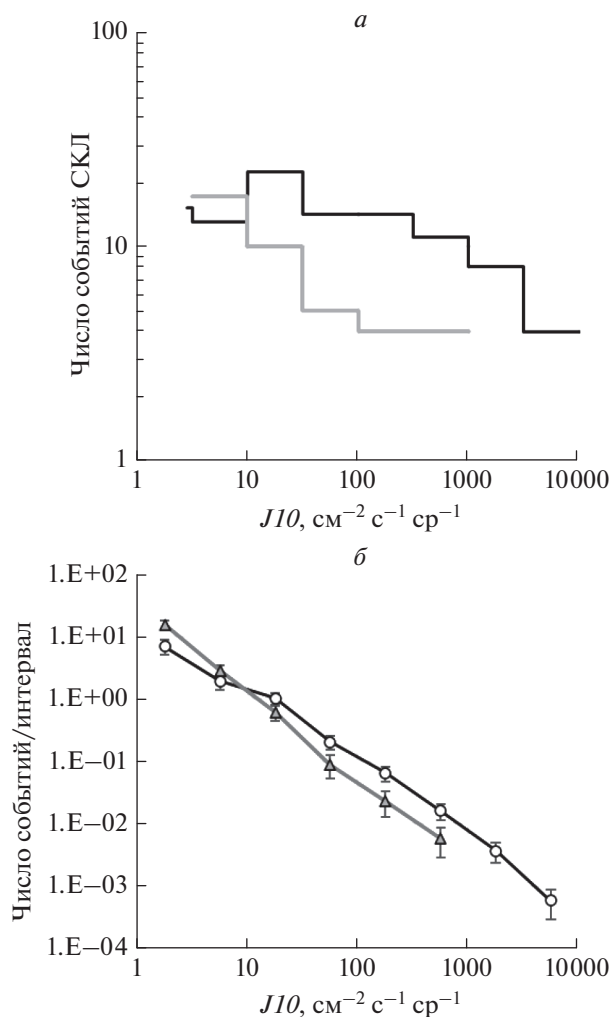


Рис. 1. (а) – Распределение событий СКЛ по величине $J10$ потока протонов с $E \geq 10$ МэВ в максимуме события для событий с РИ2 (черная гистограмма) и без РИ2 (серая гистограмма). (б) – Распределение событий СКЛ на единицу интервала потока для событий с РИ2 (черная кривая с кружками) и без РИ2 (серая кривая с треугольниками).

профиля события, по гелиодолготному распределению и мощности родительских вспышек, а также по характеристикам сопровождающих их КВМ.

Из рисунка 1а следует, что при малых потоках $J10$ число событий СКЛ без РИ2 даже превышает число событий с РИ2, но по мере увеличения потока доля событий с РИ2 становится все больше. Все события с $J10 > 1000 \text{ rfu}$ сопровождаются РИ2. Распределения числа событий, отнесенные к величине интервала, представленные на рис. 1б, подчиняются степенному закону с показателем $\eta = -1.1$ для событий с РИ2 и $\eta = -1.4$ для событий без РИ2.

Показатель интегрального энергетического спектра протонов в максимуме события опреде-

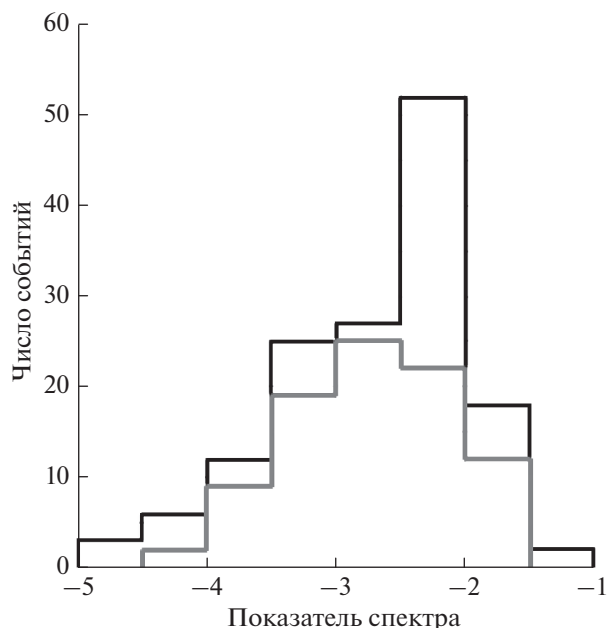


Рис. 2. Распределение показателя энергетического спектра СКЛ в степенном представлении. Черная гистограмма – события СКЛ с РИ2, серая гистограмма – без РИ2.

ляется в Каталогах [Логачёв и др., 2016, 2019] в интервале энергий десятков–сотен МэВ по участку, где спектр хорошо аппроксимируется степенным законом. Интервал энергий может меняться от события к событию, но показатель хорошо отражает общую зависимость от энергии. На рисунке 2 видно, что в событиях СКЛ с РИ2 явно преобладают жесткие спектры с показателем ~ -2 , тогда как события СКЛ без РИ2 имеют более мягкие спектры, показатели имеют распределение, близкое к симметричному, с показателем в максимуме распределения ~ -3 .

Как видно на рис. 3, максимальный вклад в СКЛ с $E \geq 10$ МэВ дают события с вспышками балла М независимо от их связи с РИ2. Однако распределение источников по мощности заметно сдвинуто в сторону более сильных вспышек для событий, связанных с РИ2. В то же время 11 событий СКЛ без РИ2 были связаны с вспышками балла Х.

Распределения вспышек-источников по гелиодолготе показаны на рис. 4. Источники СКЛ с РИ2 в большинстве располагаются в западном полушарии Солнца, в то время как события без РИ2 распределены более равномерно. В восточном полушарии событий без РИ2 даже больше, чем с РИ2. В западном полушарии Солнца событий с РИ2 примерно в 2 раза больше, чем событий без РИ2. Однако события СКЛ без РИ2 имеют плоское распределение в интервале долгот $E30-W90$, в котором содержится 75% всех событий.

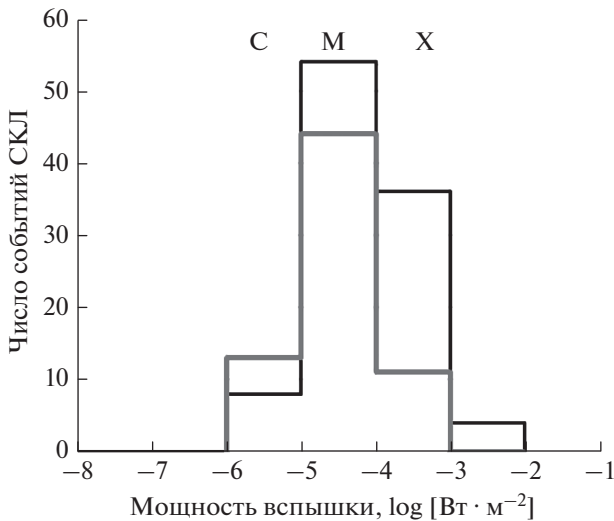


Рис. 3. Распределение по мощности рентгеновских вспышек – источников СКЛ. Обозначения – как на рис. 2.

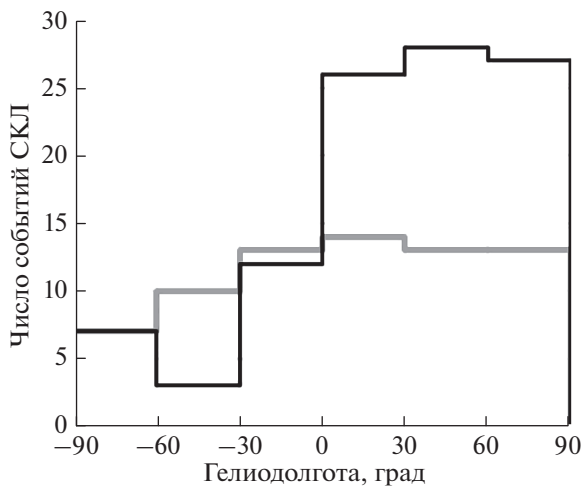


Рис. 4. Распределения вспышек-источников событий СКЛ по гелиодолготе. Обозначения – как на рис. 2.

Рисунок 5 показывает соотношение событий СКЛ, КВМ и РИ2. Рисунок 5а говорит, что СКЛ без РИ2 связаны с менее скоростными КВМ, чем СКЛ с РИ2. Более того, 18 событий СКЛ не связаны ни с РИ2, ни с КВМ. По углу раствора КВМ события СКЛ, связанные и не связанные с РИ2, практически не отличаются: к типу гало, т.е. 360°, относятся 71% и 63% соответственно (на рис. 5б показано абсолютное число событий). При этом наблюдается существенное различие в позиционных углах КВМ (рис. 5в). Следует отметить, что для событий РИ2 в использованных нами таблицах [URL Type II] даны так называемые центральные позиционные углы (СРА), которые для событий по углу раствора типа “гало” относятся к 360°.

Этим объясняется преобладание событий в интервале углов 330°–360° и некоторое подобие распределений событий РИ2 по углу раствора и позиционному углу на рис. 5б и 5в. В большинстве работ используются значения позиционных углов МА [URL СМЕ], которые для всех событий определяются как направление наиболее быстрого распространения КВМ. В событиях с углом раствора <360° значения позиционных углов СРА и МА мало отличаются [URL СМЕ]. В сторону Земли распространяются КВМ с позиционным углом больше 180 град. Этот интервал углов превалирует для событий СКЛ, связанных с РИ2, тогда как для событий СКЛ без РИ2 распределение по позиционному углу практически равномерное. В целом, события СКЛ без РИ2 слабо связаны с КВМ.

Таким образом, события СКЛ, сопровождаемые РИ2, – более мощные, с более жестким спектром, связаны с более сильными вспышками, расположенными на оптимальных гелиодолготах. Они сопровождаются более быстрыми КВМ, направленными в сторону Земли. Можно добавить, что эти события отождествляются с наибольшей достоверностью, так как они принадлежат к числу наиболее ярких событий. В то же время события без РИ2, составляющие ~40% от всех событий СКЛ, включенных в обработку, тоже нередко имеют мощные источники, расположенные в оптимальном для земного наблюдателя интервале.

4. ОСОБЕННОСТИ СОБЫТИЙ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ II ТИПА, СОПРОВОЖДАЮЩИХ И НЕ СОПРОВОЖДАЮЩИХ СКЛ

Обращает на себя внимание тот факт, что события СКЛ, связанных с РИ2, большинство, тогда как среди РИ2 преобладают события, не связанные с СКЛ. Отчасти это объясняется тем фактом, что до земного наблюдателя доходят только те СКЛ, для которых были благоприятные условия распространения (западная долгота соединения с источником), и это ограничение не действует на РИ2. Действительно, гелиодолготное распределение источников РИ2, представленное на рис. 6, обнаруживает дефицит источников РИ2 с СКЛ в восточном полушарии Солнца, тогда как источники РИ2 без СКЛ имеют практически симметричное гелиодолготное распределение с максимумом в районе центрального меридиана. При этом событий РИ2 без СКЛ в западном полушарии почти в полтора раза больше, чем событий РИ2 с СКЛ, т.е. большое число событий с РИ2, происходящее на благоприятной долготе, не генерирует СКЛ.

Рисунок 7 показывает, что максимальный вклад в события РИ2 дают вспышки балла М не-

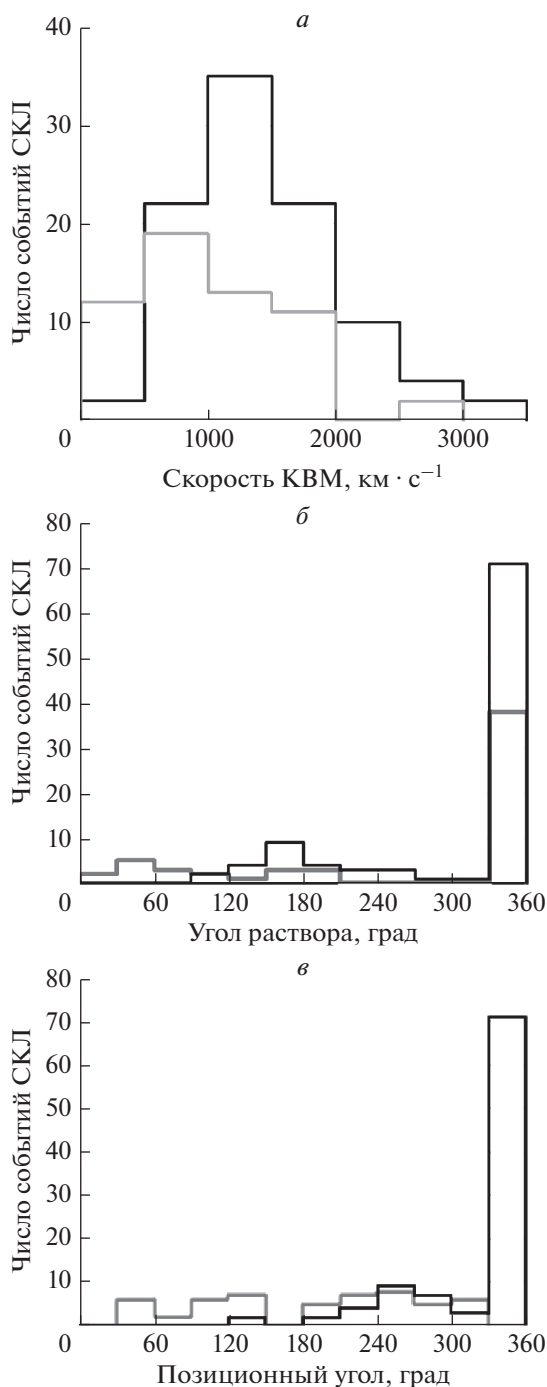


Рис. 5. Распределения событий СКЛ по параметрам КВМ. (а) – распределение по скорости КВМ, (б) – распределение по углу раствора КВМ, (в) – распределение по позиционному углу КВМ. Обозначения – как на рис. 2.

зависимо от связи с СКЛ. В процентном отношении доля этих событий – 50% для тех и других РИ2. Однако для РИ2, сопровождающих СКЛ, доля источников класса X – ~33%, а доля источников класса C – ~10%, тогда как для событий

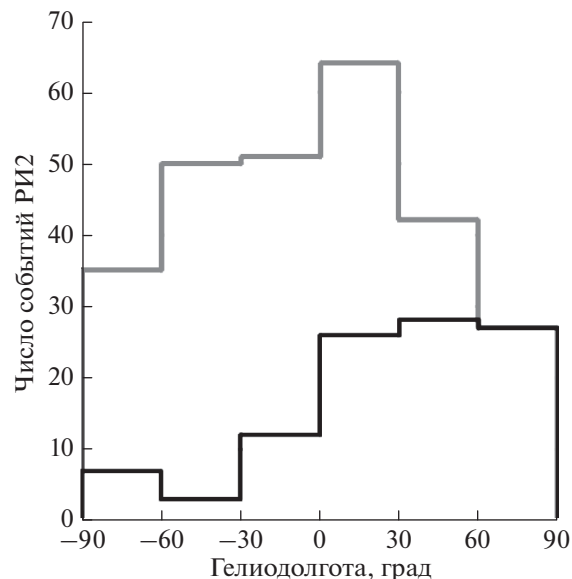


Рис. 6. Гелиодолготное распределение вспышек-источников РИ2. Черная гистограмма относится к событиям РИ2, сопровождающим СКЛ. Серая гистограмма – события РИ2 без СКЛ.

РИ2 без СКЛ соотношение противоположное – ~16% и ~33%. Кроме того, среди событий РИ2 с СКЛ имеются вспышки балла $> X10$, которых нет среди событий РИ2 без СКЛ.

События РИ2, в которых были генерированы СКЛ, сопровождаются более быстрыми КВМ, чем события РИ2 без СКЛ (рис. 8а). В распределениях РИ2 по углу раствора КВМ видно, что относительная доля событий типа гало больше для РИ2 с СКЛ (рис. 8б). Из распределений по позиционному углу видно, что для РИ2 с СКЛ относительно больше событий связано с КВМ, идущих в сторону Земли (рис. 8в).

Таким образом, события РИ2, которые сопровождают СКЛ, связаны с более сильными источниками на Солнце, чем РИ2 без СКЛ. Это следует как из мощности рентгеновских источников, так и из характеристик КВМ.

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В отличие от предыдущих работ [Цап и Исаева, 2013; Gopalswamy et al., 2005, 2019a], анализировавших связь радиоизлучения II типа с СКЛ для избранных или наиболее мощных событий, мы рассмотрели однородный ряд событий СКЛ с максимальной интенсивностью $J10 \geq 1.0 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ протонов с $E \geq 10 \text{ МэВ}$ за 1997–2017 гг. [Логачёв и др., 2016, 2019]. Сравнение проводилось с событиями РИ2 декаметрового-гектометрового диапазона [URL Туре II], которые сопровождалась КВМ и имели отождествление с источником на Солнце. В статистический анализ были включены

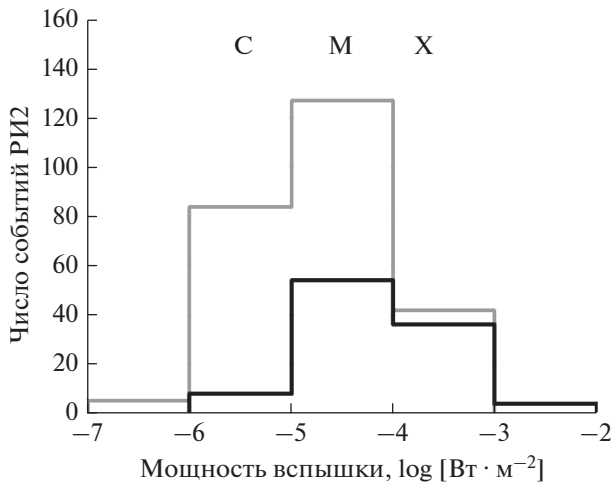


Рис. 7. Распределение источников РИ2 по мощности рентгеновских вспышек. Обозначения – как на рис. 6.

ми вспышками, находящимися в основном в западном полушарии Солнца. Они сопровождаются более быстрыми КВМ, большей частью типа гало, с направлением в сторону Земли. Эти характеристики согласуются с концепцией “синдрома большой вспышки” [Kahler, 1982], из которого следует, что при большом энерговыделении на Солнце все проявления достигают большой мощности независимо от физических процессов, лежащих в их основе. В этих случаях требуется отдельный анализ каждого индивидуального события, что является предметом нашей дальнейшей работы.

Мы нашли 70 событий СКЛ, которые не сопровождались РИ2, и некоторые из них не сопровождались КВМ. Среди них есть события, связанные с достаточно мощными источниками, расположенными в интервале гелиодолгот преимущественного соединения с земным наблюдателем. По нашему мнению, именно эти события заслуживают дальнейшего изучения.

ны 173 события СКЛ и 372 события с РИ2. События СКЛ, связанные с РИ2, имеют более жесткий энергетический спектр, связаны с более мощны-

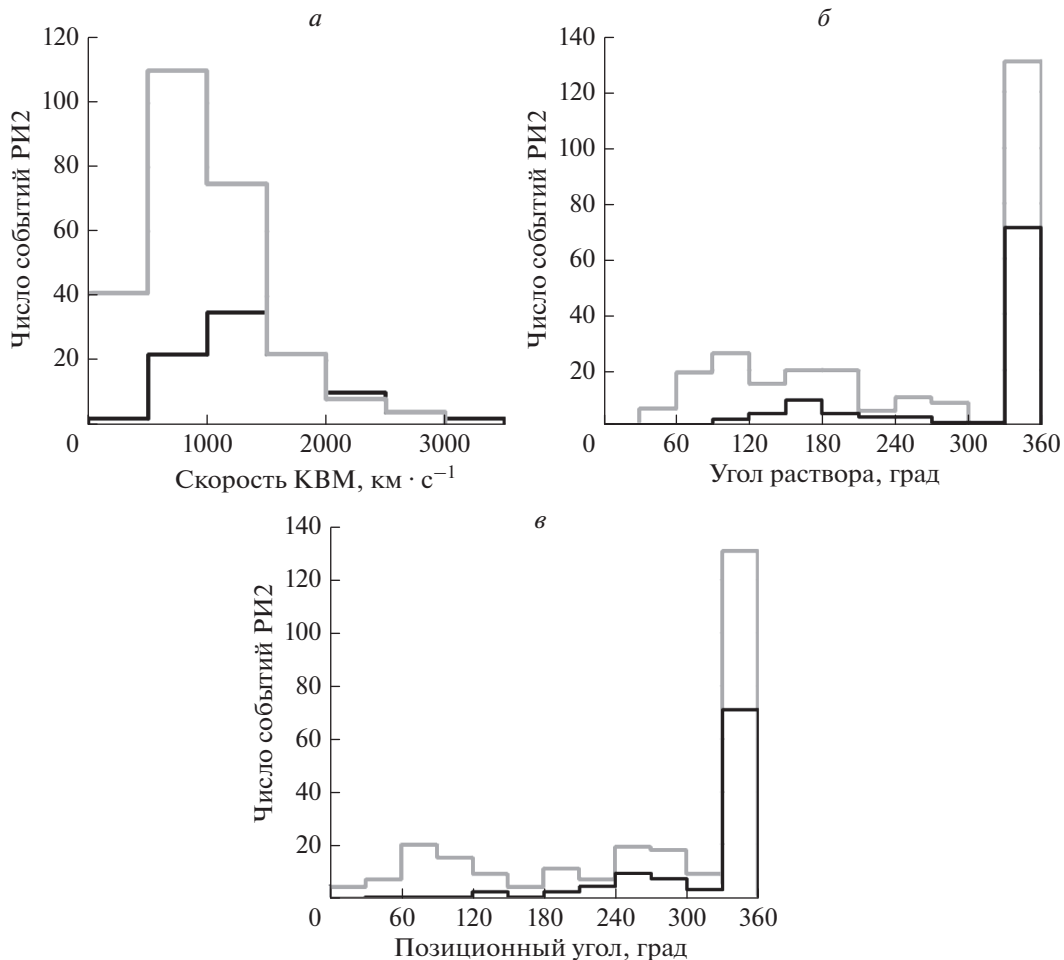


Рис. 8. Распределение событий РИ2 по характеристикам сопровождающих их КВМ: (а) – по скорости КВМ, (б) – по углу раствора КВМ, (в) – по позиционному углу КВМ. Обозначения – как на рис. 6.

С другой стороны, более половины событий РИ2, сопровождаемых КВМ, не наблюдались в СКЛ. Среди них были мощные события с источниками на западном полушарии Солнца, но какие-то условия не позволили ускориться или выйти частицам в межпланетную среду.

Возможно, что исследование именно событий СКЛ, не связанных с РИ2, и событий РИ2, не связанных с СКЛ, поможет продвинуть наше понимание явления СКЛ и его связей с условиями на Солнце и в межпланетной среде.

6. БЛАГОДАРНОСТИ

Мы благодарим всех исследователей, представляющих через Интернет свои данные о вспышках на Солнце (<https://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/solar-data/solar-features/solar-flares/x-rays/goes/xrs/>), КВМ — (https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/) и событиях радиоизлучения II типа (http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/radio/waves_type2.html). Г.А. Базилевская благодарна за обсуждения в рамках проекта ISSI HEROIC “Анализ событий СКЛ высокой энергии” под руководством доктора А. Папаиоанну.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа поддержана грантом Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 19-02-00264.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акиньян С.Т., Базилевская Г.А., Ишков В.Н. и др. Каталог солнечных протонных событий. 1970–1979 гг., ред. Логачев Ю.И. М.: ИЗМИРАН, 184 с. <http://www.wdcb.ru/stp/data/SPE/>. 1982.
- Логачёв Ю.И., Базилевская Г.А., Вашенюк Э.В. и др. Сравнение протонной активности в 20–23-м циклах // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 55. № 3. С. 291–302. 2015. <https://doi.org/10.7868/S001679401503013X>
- Логачёв Ю.И., Базилевская Г.А., Вашенюк Э.В. и др. Каталог солнечных протонных событий 23-го цикла солнечной активности (1996–2008 гг.). Москва. 2016. http://www.wdcb.ru/stp/data/SPE/katalog_SPS_23_cikla_SA.pdf.
- Логачёв Ю.И., Базилевская Г.А., Дайбог Е.И. и др. Список солнечных протонных событий 24 цикла солнечной активности (2009–2019). 2019. http://www.wdcb.ru/stp/data/SPE/List_SPE_24_Cycle_SA.pdf. <https://doi.org/10.2205/ESDB-SAD-P-007>
- Черток И.М., Гречнев В.В., Мешалкина Н.С. Соотношение спектров микроволновых всплесков на Солнце и потоков протонов у Земли // Астрон. журн. Т. 86. № 11. С. 1133–1144. 2009. <https://doi.org/10.1134/S1063772909110110>
- Цан Ю.Т., Исаева Е.А. Ускорение солнечных космических лучей и тонкая спектральная структура радио-всплесков II типа // Космич. исслед. Т. 51. № 2. С. 119–124. 2013. <https://doi.org/10.1134/S0010952513020068>
- Anastasiadis A., Lario D., Papaioannou A., Kouloumvakos A., Vourlidas A. Solar energetic particles in the inner heliosphere: status and open questions // Phil. Trans. R. Soc. A 377: 20180100. 2019. <https://doi.org/10.1098/rsta.2018.0100>
- Bilenko I.A. Coronal mass ejections and type II radio bursts in cycles 23 and 24 // Geomagn. Aeronomy. V. 55. № 8. P. 1141–1151. 2015. <https://doi.org/10.1134/S0016793215080046>
- Bilenko I.A. Regularities in the formation of Coronal Mass Ejections associated and not associated with type II radio bursts // Geomagn. Aeronomy. V. 58. № 7. P. 989–1000. 2018. <https://doi.org/10.1134/S0016793218070034>
- Bouratzis C., Preka-Papadema P., Hillaris A., Tsitsipis P., Kontogeorgos A., Kurt V.G., Moussas X. Radio observations of the 20 January 2005 X-class flare // Solar Phys. V. 267. P. 343–359. 2010. <https://doi.org/10.1007/s11207-010-9648-7>
- Cairns I.H., Knock S., Robinson P., Kuncic Z. Type II solar radio bursts: theory and space weather implication // Space Science Reviews. V. 107. № 1. P. 27–34. 2003. <https://doi.org/10.1023/A:1025503201687>
- Fleishman G.D., Gary D.E., Chen B., Kuroda N., Yu S., Nita G.M. Decay of the coronal magnetic field can release sufficient energy to power a solar flare // Science. V. 367(6475). P. 278–280. 2020. <https://doi.org/10.1126/science.aax6874>
- Gopalswamy N., Aguilar-Rodriguez E., Yashiro S., Nunes S., Kaiser M.L., Howard R.A. Type II radio bursts and energetic solar eruptions // J. Geophys. Res. V. 110. A12S07. 2005. <https://doi.org/10.1029/2005JA011158>
- Gopalswamy N., Mäkelä P. Yashiro S., Lara A., Akiyama S., Xie H. On the shock source of sustained gamma-ray emission from the Sun // J. Phys. Conf. Ser. 1332 012004. 2019a. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1332/1/012004>
- Gopalswamy N., Mäkelä P. Yashiro S. A Catalog of Type II radio bursts observed by Wind/WAVES and their statistical properties // Sun and Geosphere. V. 14. № 2. P. 111–121. 2019b. <https://doi.org/10.31401/SunGeo.2019.02.03>
- 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. V. 87. № A5. P. 3439–3448. 1982. <https://doi.org/10.1029/JA087iA05p03439>
- Kouloumvakos A., Rouillard A.P., Wu Y., Vainio R., Vourlidas A., Plotnikov I., Afanasiev A., Önel H. Connecting the properties of coronal shock waves with those of solar energetic particles // The Astrophysical Journal. V. 876:80 (18pp). 2019. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab15d7>
- Kumari A., Ramesh R., Kathiravan C., Gopalswamy N. New evidence for a Coronal Mass Ejection-driven high frequency type II burst near the Sun // The Astrophysical J. V. 843. № 1. Article id. 10. 7 p. 2017. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa72e7>
- Lara A., Gopalswamy N., Nunes S., Muñoz G., Yashiro S. A statistical study of CMEs associated with metric type II bursts // Geophys. Res. Lett. V. 30. № 12. 8016. 2003. <https://doi.org/10.1029/2002GL016481>

- *Ramesh R., Kathiravan C., Kartha S.S., Gopalswamy N.* Radioheliograph observations of metric type II bursts and the kinematics of Coronal Mass Ejections // *The Astrophysical J.* V. 712. P. 188–193. 2010.
- *Reames D.V.* Solar Energetic Particles (Second Edition). Lecture notes in physics book series (LNP, V. 978): Springer, 202 p. 2021.
<https://doi.org/10.1007/978-3-030-66402-2>
- *Yu S., Chen B., Reeves K.K., Gary D.E., Musset S., Fleishman G.D., Nita G.M., Glesener L.* Magnetic reconnection during the post-impulsive phase of a long-duration solar flare: bidirectional outflows as a cause of microwave and X-ray bursts // *The Astrophysical J.* V. 900. № 1. :17(14pp). 2020.
<https://doi.org/10.3847/1538-4357/aba8a6>
- URL Type II http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/radio/waves_type2.html
- URL Type II m <https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-and-geophysical-event-reports>
- URL CME https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/