

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МИКРОВСПЫШЕК
ПО ДАННЫМ СПЕКТРОПОЛЯРИМЕТРА 4–8 ГГцSTATISTICAL ANALYSIS OF MICROFLARES AS OBSERVED BY
THE 4–8 GHz SPECTROPOLARIMETER**Д.А. Жданов***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, zhdanov@iszf.irk.ru***А.Т. Алтынтцев***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, altyntsev@iszf.irk.ru***Н.С. Мешалкина***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, nata@iszf.irk.ru***С.А. Анфиногентов***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, anfinogentov@iszf.irk.ru***D.A. Zhdanov***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, zhdanov@iszf.irk.ru***A.T. Altyntsev***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, altyntsev@iszf.irk.ru***N.S. Meshalkina***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, nata@iszf.irk.ru***S.A. Anfinogentov***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, anfinogentov@iszf.irk.ru*

Аннотация. Радионаблюдения слабых событий являются одним из перспективных методов исследования энерговыделения и нетепловых процессов в солнечной короне. Развитие инструментальной базы позволяет вести радионаблюдения слабых транзитных корональных явлений, таких как квазистационарные уярчания и слабые вспышки рентгеновского класса В и ниже, не доступные ранее для анализа. Используя наблюдения на спектрополяриметре Badary Broadband Microwave Spectropolarimeter (BBMS) мы измерили параметры спектров микроволнового излучения для трех десятков слабых солнечных вспышек рентгеновских классов от А до С1.5. Спектры свидетельствуют, что нагрев плазмы вызывается появлением потоков нетепловых электронов, которые можно обнаружить по формируемым ими всплескам микроволнового излучения, преимущественно с амплитудой ~5–6 с.е.п. (одна солнечная единица потока (с.е.п.) радиоизлучения равна 10^{-22} Вт/(м·Гц)) на частотах 4–5 ГГц. Диапазон индексов роста низкочастотной части спектра f^{α} меняется в широких пределах $\alpha=0.3 \div 15$. Распределение индексов спада высокочастотной части подобно распределениям обычных вспышек. Одно из объяснений появления больших значений f^{α} — эффект Разина, который может влиять на форму гиротронного спектра, при генерации всплесков в плотной плазме при относительно слабых магнитных полях. Обнаружены два события, в которых появление нетепловых электронов приводит к генерации узкополосных всплесков на частотах около двойной плазменной частоты. Тестовые испытания Сибирского радиогелиографа (СРГ) показали возможности измерений структуры вспышечных источников с потоками ~1 с.е.п., что свидетельствует о высоком диагностическом потенциале создаваемого радиогелиографа для обнаружения процессов ускорения в слабых вспышечных событиях и их локализации в активных областях.

Abstract. Radio observations of weak events are one of the promising methods for studying energy release and non-thermal processes in the solar corona. The development of instrumental capabilities allows for radio observations of weak transient coronal events, such as quasi-stationary brightenings and weak flares of X-ray class B and below, which were previously inaccessible for analysis. We have measured the spectral parameters of microwave radiation for thirty weak solar flares with X-ray classes ranging from A to C1.5, using observations from the Badary Broadband Microwave Spectropolarimeter (BBMS). The spectra indicate that plasma heating is caused by the appearance of non-thermal electron fluxes, which can be detected by bursts of microwave radiation, predominantly with an amplitude ~5–6 solar flux units (SFU) at 4–5 GHz frequencies. One solar flux unit (SFU) of radio emission is equal to 10^{-22} W/(m·Hz). The range of low-frequency spectrum growth indices f^{α} varies widely from $\alpha=0.3$ to 15. The distribution of high-frequency decay indices is similar to the distributions of regular flares. One of the explanations for the appearance of large f^{α} values is the Razin effect, which can influence the shape of the gyrotron spectrum during the generation of bursts in dense plasma under relatively weak magnetic fields. We have detected two events in which the appearance of non-thermal electrons led to the generation of narrow-band bursts at frequencies near the double plasma frequency. SRH test trials have shown the potential for measuring the structure of flare sources with fluxes of the order of 1 SFU, indicating the high diagnostic potential of the radioheliograph for detecting acceleration processes in weak flare events and their localization in active regions.

Keywords: solar microwave emission, radio bursts, microflares.

Ключевые слова: солнечное микроволновое излучение, радиовсплески, микровспышки.

ВВЕДЕНИЕ

Идея нагрева солнечной короны рентгеновскими вспышками привела исследователей к следующему заключению. С повышением точности экспериментальных исследований происходит обнаружение все более мелкомасштабных структур. В литературе возникли такие термины, как «микровспышки» и «нановспышки», характеризующие особенно слабые проявления солнечной активности в рентгеновском диапазоне [Богачёв и др., 2020]. В дальнейшем эти термины получили распространение в работах, посвященных слабым всплескам в крайнем ультрафиолетовом (КУФ) диапазоне. В настоящее время с помощью УФ-телескопа с высоким разрешением (High-Resolution Instrument, HRI_{EUV}) зарегистрированы еще более слабые КУФ-урячания, названные кострами (campfires) [Berghmans et al., 2021].

Наибольший интерес представляет взаимосвязь между микроволновым и рентгеновским излучениями через процессы ускорения электронов. Было показано, например [Schadee et al., 1983; Qiu et al., 2004; Богачёв и др., 2020], что ускорение электронов в больших солнечных вспышках играет ключевую роль в процессах энерговыделения и эти процессы аналогичным образом проявляют себя в микровспышках. Известно, что примерно половина больших солнечных вспышек обнаруживает эффект Ньюперта, отражающий причинную связь нагрева вспышечной плазмы с появлением потока электронов, ускоренных в импульсной фазе [Neupert, 1968].

Однако детектирование нетепловых электронов ограничивается чувствительностью принимающей аппаратуры. Опубликовано не так много работ, в которых анализ микровспышек одновременно проводился бы по данным наблюдений в жестком рентгеновском и в микроволновом диапазонах [Stoiser et al., 2007; Li et al., 2022; Shibasaki et al., 1983; Chiuderi Drago et al., 1987; Gopalswamy et al., 1997; Gary et al., 1997; Nindos et al., 1999; Raulin et al., 1999; Kundu et al., 2006; Altyntsev et al., 2020; Battaglia et al., 2021].

В работе [Qiu et al., 2004] даны статистически значимые результаты анализа микровспышек по данным двух диапазонов: жесткого рентгеновского по данным наблюдений RHESSI (Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager) [Lin et al., 2002] и микроволнового по данным OVSA [Gary, Hurford, 1990]. Отбор микровспышек для анализа осуществлялся по сигналу в рентгеновском канале с диапазоном энергий 12–25 кэВ, величина которого не должна была превышать 100 отсчетов в секунду. Для совместного анализа было отобрано 56 событий, которые соответствовали рентгеновским вспышкам класса не выше C1.0 по GOES.

Большие антенны OVSA (Owens Valley Solar Array) позволяли измерять микроволновые потоки интенсивностью от 0.2 с.е.п. Формы наблюдаемых микроволновых спектров были характерными для гиро-

синхротронного механизма излучения. Частоты максимумов спектров составляли ~6 ГГц, а интенсивность — ниже 10 с.е.п. Основной целью анализа было определение характеристик нетепловых электронов, ускоряемых в слабых событиях.

Известно, что в случае гиротронного спектра на частотах выше частоты максимума спектра f_{\max} скорость спада микроволнового спектра β (наклон высокочастотной части спектра, или высокочастотный наклон) определяется степенным индексом распределения нетепловых электронов по энергии δ [Dulk, Marsh, 1982]. В работе [Qiu et al., 2004] были получены оценки степенного индекса нетепловых электронов в пределах $\delta=2\div 4$.

Характеристики низкочастотного наклона спектра в этом исследовании не обсуждались. Тем не менее, при гиротронном механизме излучения низкочастотная часть также определяется распределением нетепловых электронов. В этом случае зависимость наклона от индекса δ гораздо слабее и пропорциональна интенсивности радиопотока $S\sim f^\alpha$. Например, в однородном источнике для диапазона изменений $\delta=2\div 7$ наклон ограничен интервалом $\alpha=2.67\div 3.1$ [Shaik, Gary, 2021]. Однако в реально наблюдаемых спектрах диапазон изменений α гораздо шире. Так, в работе [Stahli et al., 1989], в которой наблюдения спектра проводились с достаточно высоким спектральным разрешением, было показано, что α изменялся в пределах от 1 до 10 и область вблизи $\alpha=3$ слабо выделяется по частоте встречаемости во вспышечных всплесках. Появление пологих спектров с $\alpha<2.6$ интерпретировалось как неоднородность микроволнового источника, т. е. наличие излучающих областей с более слабыми магнитными полями.

Для интерпретации спектров с крутыми наклонами $\alpha>3.1$ было предложено несколько эффектов, связанных как с особенностями генерации излучения в источнике, так и с внешними факторами [Stahli et al., 1989]. Например, наиболее часто для объяснения больших значений α привлекается эффект Разина — подавление гиротронного излучения в плотной плазме с концентрацией n на частотах $f_R<20n/B$, где B — магнитное поле в источнике [Ginzburg, Syrovatskii, 1965]. В этом случае деформация низкочастотной части спектра может использоваться для оценки концентрации плазмы в источнике гиротронного излучения (см., например, [Ramaty, 1969; Fleishman, Kuznetsov, 2010]).

Слабые транзиентные события в микроволновом диапазоне, в первую очередь, ассоциируются с тонкими временными и спектральными структурами излучения микроволнового всплеска. Известно, что источники излучения тонкой структуры не всегда совпадают с источниками широкополосного континуального излучения микроволновых всплесков. Это обусловлено разными требованиями к условиям возникновения и выхода излучения при различных

механизмах генерации излучения. Было показано, что тонкая структура может наблюдаться без сопровождающего ее микроволнового всплеска [Zhdanov, Zandanov, 2015]. Отсутствие источника экранирующего континуального излучения делает такие события особенно интересными. Во-первых, повышается точность локализации источника излучения тонкой структуры, во-вторых, уменьшается степень неоднозначности интерпретации и взаимосвязи между наблюдениями в различных диапазонах излучения.

С другой стороны, первые многоволновые наблюдения на СРГ [Алтынцев и др., 2020] показали, что, помимо гиросинхротронного излучения, появление нетепловых электронов в микровспышках можно обнаружить по когерентному узкополосному излучению нетепловых электронов, захваченных в низких магнитных петлях с достаточно высокой плотностью [Алтынцев и др., 2022; Altyntsev et al., 2023]. Однако чаще всего слабые транзиентные события в микроволновом диапазоне не связаны с тонкой структурой микроволнового излучения или когерентными механизмами излучения, поскольку не являются столь неординарными явлениями.

Целью настоящей работы является получение новых экспериментальных результатов, подтверждающих роль ускоренных электронов в нагреве плазмы в слабых вспышках, во время низкой солнечной активности нового цикла из анализа данных микроволновых наблюдений с высоким разрешением по частоте и высокой чувствительностью по потоку. Анализ совместных микроволновых наблюдений ВВМС 4–8 ГГц [Zhdanov, Zandanov, 2011]) и многоволновых изображающих данных СРГ позволил выделить 30 слабых событий, которые были отождествлены как микроволновые микровспышки. Наблюдения проводились в период низкой солнечной активности в апреле–декабре 2021 г., что способствовало обнаружению достаточно слабых микроволновых откликов на фоне интегрального излучения Солнца, которые соответствовали рентгеновским вспышкам классов от А до С2.0 по GOES-классификации.

ИНСТРУМЕНТЫ И ОТБОР СОБЫТИЙ

В работе использованы данные ВВМС с временным разрешением 1 с. В этом режиме чувствительность приемника по потоку составляет около 1 с.е.п. Спектральное разрешение данных позволяет найти пиковую частоту f_{\max} , максимальный поток S_{\max} и наклоны спектра α и β микроволновых всплесков, если пиковая частота находится в диапазоне частот 4–8 ГГц. В исключительных случаях, чтобы определить форму микроволнового спектра на частотах ниже 4 ГГц, привлекались данные Солнечного радиоспектрополяриметра 2–24 ГГц (СРС, [Муратов, 2011]). В случаях $f_{\max} > 8$ ГГц привлекались данные поляриметров NORP (Nobeyama Radio Polarimeter) на 9.4 и 17 ГГц.

В простейшем случае параметры микроволновых спектров S_{\max} , f_{\max} , α , β можно найти с помощью аппроксимации спектра степенной функцией, предполагая, что излучение выходит из однородного гиро-

синхротронного источника. Аппроксимация спектра $S(f)$ проводилась степенной функцией (1), имеющей форму с одним максимумом по частоте и степенными наклонами на низких и высоких частотах [Stahli et al., 1989]:

$$S = Af^a \left(1 - e^{Bf^{-b}}\right), \quad (1)$$

где f — частота; A , B , a , b — свободные параметры. Параметр a соответствует наклону низкочастотной части спектра α , а наклон высокочастотной части определяется выражением $\beta = (a - b)$.

Анализ 80 событий из каталога ВВМС показал, что 45 событий произошли во время рентгеновских вспышек класса не выше С2.0 по GOES. Порог С2.0 выбран произвольно, чтобы ограничить размер начальной выборки событий. Аппроксимация спектров выполнялась в момент времени T_{\max} , когда радиопоток достигал максимальной величины S_{\max} . В таблице представлены 30 событий, для которых были найдены все S_{\max} , f_{\max} , α , β .

На рис. 1, а показан случай, когда результат аппроксимации микроволнового спектра в событии 21 сентября 2021 г. не может быть использован для анализа. Видно, что в диапазоне 4–8 ГГц радиопоток монотонно возрастает с частотой и, чтобы определить пиковую частоту, необходимо привлечение данных поляриметров Нобеяма на 9.4 и 17 ГГц. Однако чувствительность приемника поляриметра на частоте 9.4 ГГц не позволила обнаружить всплеска над фоновым излучением. На рис. 1 высота вертикальных отрезков соответствует среднеквадратичному отклонению по уровню 3σ , вычисленному на интервале времени перед всплеском. Таким образом, в высокочастотной части спектра этого события отсутствуют достоверные точки, что не позволяет найти f_{\max} , α , следовательно, нельзя найти S_{\max} и β . В этом событии можно оценить только наклон α . В остальных 15 событиях, которые не вошли в итоговую таблицу, возникли схожие неоднозначности при аппроксимации.

Схема процедуры аппроксимации показана на рис. 1, б. Например, в событии 25 сентября 2021 г. спектральный пик находился на частоте 4.3 ГГц, максимальный поток достигал 14.8 с.е.п., а наклоны спектра равны $\alpha \approx 9.0$ и $\beta \approx -7.4$.

Пространственная информация об источниках микроволнового излучения доступна из тестовых наблюдений СРГ в режиме, когда работает только одна из трех антенных решеток. С апреля по октябрь события были зарегистрированы антенной решеткой 3–6 ГГц. С ноября по декабрь зарегистрировано шесть событий во время испытаний решетки 6–12 ГГц, во время трех событий наблюдения не проводились. Режим наблюдений указан в таблице.

На рис. 2, а показаны взаимосвязь между наблюдениями: временные профили потока мягкого рентгеновского излучения GOES в канале 1–8 Å и производная этого профиля во время микровспышки 25.09.2021. На фазе роста мягкого рентгеновского излучения вспышки класса В3.4 наблюдался микроволновый всплеск длительностью около 20 с.

На панелях б, в показаны временные профили потока на шести частотах СРГ с решетки 3–6 ГГц: 2.8,

Сводная информация о событиях

№	DATE	T_{\max}	Δt , с	$\Delta GOES$	GOES	S_{\max}	f_{\max}	α	β	SRH	HXR
			сек	вт/м ²		с.е.п.	ГГц				
1	2021-04-19	06:29:59	-16	3.5×10^{-8}	B2.1	1.06	5.71	2.15	-4.60	3-6	S/10
2	2021-04-21	01:27:48	-4	1.3×10^{-6}	C1.8	4.95	5.13	2.20	-2.47	3-6	no
3	2021-05-09	04:34:41	5	1.5×10^{-6}	C1.7	7.52	5.13	2.51	-3.00	3-6	F/50
4	2021-05-11	03:19:45	8	9.0×10^{-8}	B1.7	6.07	4.51	1.30	-2.20	3-6	S/10
5	2021-05-22	01:24:36	-7	9.5×10^{-8}	B2.9	3.23	5.54	6.86	-0.39	3-6	S/25
6	2021-05-23	01:38:31	-14	2.9×10^{-7}	B6.0	2.26	4.68	4.18	-2.80	3-6	S/15
7	2021-05-27	03:09:40	92	1.1×10^{-6}	C1.4	8.39	7.22	4.26	-0.66	3-6	S/no
8	2021-05-27	03:19:57	-12	7.6×10^{-8}	C1.1	4.10	6.27	4.17	-2.17	3-6	S/no
9	2021-05-27	04:41:38	-53	3.4×10^{-7}	B6.0	4.19	7.90	3.40	-0.65	3-6	S/no
10	2021-05-27	06:46:23	2	5.9×10^{-7}	B9.2	4.06	6.35	6.41	-0.58	-	no
11	2021-05-27	08:06:59	-16	7.4×10^{-7}	C1.0	5.15	8.77	4.07	-0.43	3-6	no
12	2021-06-03	01:36:26	0	5.2×10^{-8}	B1.2	4.91	5.81	3.64	-1.61	3-6	no
13	2021-08-22	01:04:09	-10	1.2×10^{-7}	B4.2	3.39	5.31	4.19	-3.45	3-6	S/25
14	2021-08-22	04:12:40	-23	1.0×10^{-6}	C1.2	6.74	4.42	1.25	-6.76	3-6	F/25 S/25
15	2021-08-22	08:30:30	13	3.3×10^{-7}	B5.5	3.43	5.80	1.29	-4.10	3-6	F/50 S/25
16	2021-08-30	09:34:35	-5	6.6×10^{-7}	C1.1	5.69	7.49	1.13	-3.00	3-6	S/25
17	2021-09-06	05:57:55	3	1.5×10^{-7}	B5.5	4.90	3.81	2.24	-2.30	3-6	F/25 S25
18	2021-09-11	06:20:24	9	2.9×10^{-8}	B3.5	4.05	5.36	6.10	-1.51	3-6	F/100 S/25
19	2021-09-13	02:55:54	1	4.5×10^{-7}	B8.6	11.1	5.51	3.24	-3.11	3-6	S/25
20	2021-09-21	05:36:53	10	2.7×10^{-9}	B2.6	no	no	1.99	no	3-6	F/50 S/no
21	2021-09-22	03:23:30	16	2.1×10^{-7}	B3.2	4.41	4.54	9.67	-0.70	3-6	S/no
22	2021-09-25	06:12:57	2	7.6×10^{-8}	B3.3	14.8	4.27	9.04	-7.43	3-6	S/25
23	2021-10-30	05:26:06	-16	2.5×10^{-7}	B6.5	3.43	5.40	2.26	-2.00	-	S/25
24	2021-10-31	03:22:28	1	4.9×10^{-7}	C1.8	8.40	6.77	1.56	-3.80	-	S/no
25	2021-12-15	03:44:29	5	6.0×10^{-7}	C2.0	10.8	13.5	3.30	-0.58	6-12	F/25 S/25
26	2021-12-16	07:47:05	12	3.2×10^{-7}	B9.8	9.69	5.75	4.05	-2.20	6-12	F/50 S/25
27	2021-12-17	04:39:07	7	6.5×10^{-8}	B8.9	10.3	4.60	15.10	-0.58	6-12	S/25
28	2021-12-20	05:50:12	-18	1.2×10^{-7}	B9.1	5.60	3.83	8.38	-14.00	6-12	F/50 S/25
29	2021-12-23	04:39:35	95	2.0×10^{-7}	C1.3	2.74	5.63	0.604	-4.38	6-12	F/50 S/10
30	2021-12-23	06:20:30	309	1.2×10^{-7}	C1.4	1.97	5.01	0.34	-5.10	6-12	S/25

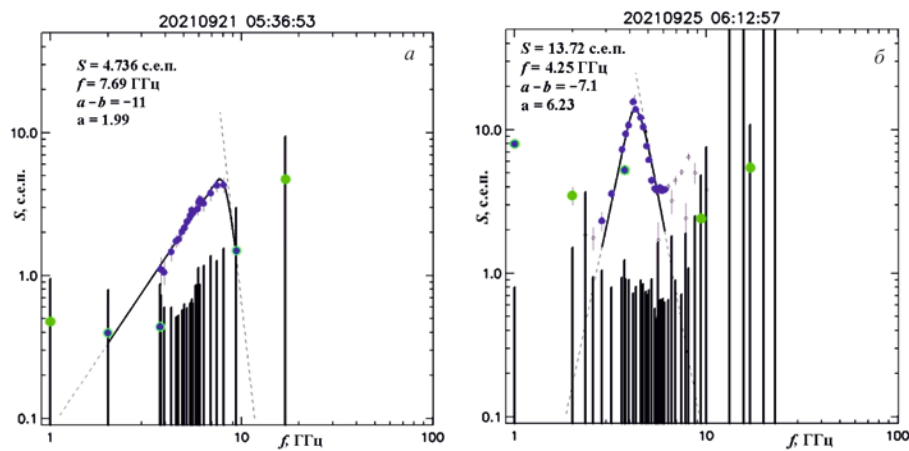


Рис. 1. Аппроксимация микроволновых спектров. Данные BBMS — синие точки, поляриметров Нобейма — зеленые. Результат аппроксимации данных — сплошная кривая линия; штриховые линии — асимптоты наклонов спектра; вертикальные отрезки — среднеквадратичные ошибки 3σ для каждой частоты, рассчитанные на интервале перед всплеском. Панель а: аппроксимация события № 20 21.09.2021. Значение потока на частоте 9.4 ГГц находится ниже фоновой среднеквадратичной ошибки 3σ . В этом случае β , S_{\max} и f_{\max} имеют неопределенные значения, при этом α определен. Панель б — аппроксимация события № 22 25.09.2021

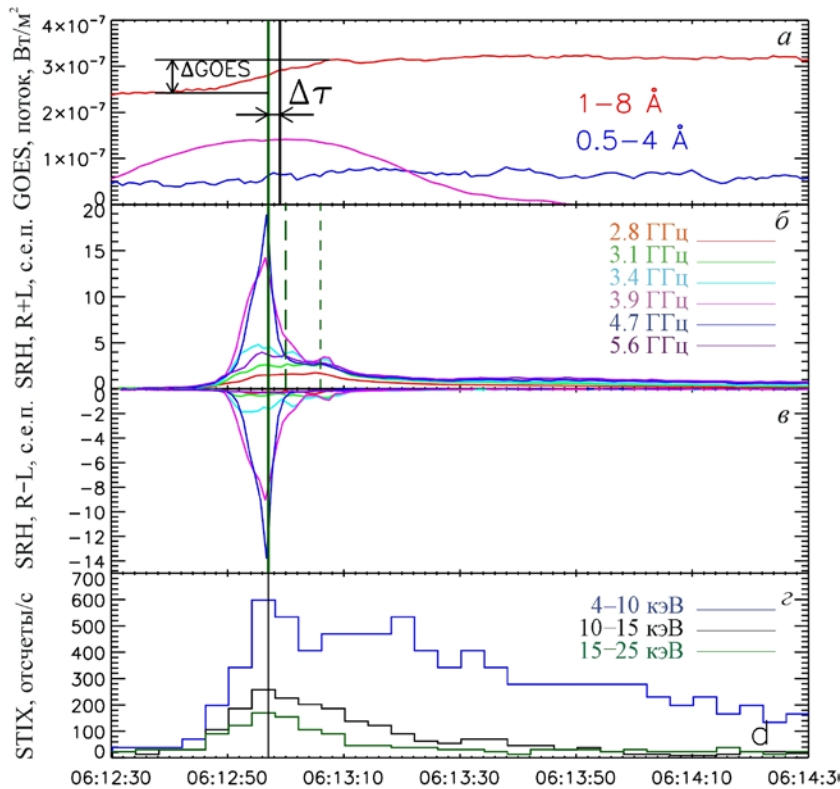


Рис. 2. Событие 25 сентября 2021 г.: *a* — временные профили мягкого рентгеновского излучения GOES (синяя и красная кривые) и производная профиля 1–8 Å (розовая кривая), максимумы которых отмечены черными вертикальными линиями, $\Delta GOES$ показывает прирост мягкого рентгеновского потока, Δt — сдвиг между максимумами всплеска и производной GOES; *б, в* — профили микроволнового потока в интенсивности (R+L) и поляризации (R–L), записанные CRG на шести частотах, зеленые вертикальные линии — максимумы микроволнового всплеска (сплошная) и субпиков (штриховые); *г* — профили жесткого рентгеновского излучения спектрометра STIX

3.1, 3.4, 3.9, 4.7 и 5.6 ГГц. Чувствительность 129-антенной решетки 3–6 ГГц CRG на порядок выше, чем BBMS. Шумовые дорожки на кривых потока CRG фактически незаметны, т. е. чувствительность радиогелиографа по потоку лучше 10 % от 1 с.е.п. На панели *г* приведены сигналы трех каналов жесткого рентгеновского излучения с энергиями 4–25 кэВ.

В таблице для каждого события определены приращение мягкого рентгена $\Delta GOES$ и GOES-класс вспышки. Величина временного сдвига Δt определяется разностью между моментом максимума производной профиля рентгеновского потока и моментом максимального микроволнового потока T_{max} (см. рис. 2). Как отмечалось выше, взаимосвязь жесткого и мягкого рентгеновских излучений проявляется через эффект Ньюперта, который определяется через производную потока мягкого рентгена.

В последней колонке приведена информация о жестком рентгеновском излучении для каждого события, индексом F отмечены наблюдения FERMI/GBM [Meegan et al., 2009], индексом S — наблюдения с помощью Spectrometer Telescope for Imaging X-rays (STIX, [Krucker et al., 2020; Xiao et al., 2023]). Как правило, отклики наблюдаются в каналах с энергией до 25 кэВ. Для четырех событий данные наблюдений в жестком рентгене отсутствуют.

Из различий временных профилей на разных частотах следует, что спектр всплеска менялся во времени: на 3.9 и 4.7 ГГц наблюдался узкополосный интенсивный всплеск длительностью 3.2 с на полу-

высоте. В течение всего всплеска излучение имеет левую круговую поляризацию, степень которой зависит от частоты приема. В основном она не превышает 20 %, но резко увеличивается на 3.9 и 4.7 ГГц, достигая 70 % во время узкополосного всплеска. Во время всплеска прирост интенсивности $\Delta GOES$ соответствовал потоку $7.6 \cdot 10^{-8}$ Вт/м² или GOES-уровню A7.6. Задержка производной профиля 1–8 Å относительно максимума микроволнового всплеска $\Delta t \approx 2$ с. Чтобы выделить основную фазу роста, сигнал GOES перед дифференцированием был сглажен с окном 2 мин.

В канале GOES 0.5–4 Å отклик на эту вспышку был протяженным, но его величина находилась на уровне шумов. В жестком рентгене моменты максимальных потоков совпадают с максимумом микроволнового излучения. В канале с низкой энергией 4–10 кэВ длительность всплеска превышает 1 мин, что значительно дольше продолжительности всплеска в микроволнах. В каналах 10–25 кэВ кривые потока близки по форме и длительности к микроволновым профилям на частотах 3.4 и 5.6 ГГц, на которых короткий интенсивный всплеск на промежуточных частотах не проявляется.

На рис. 3 показаны спектры микроволнового излучения всплеска 25 сентября 2021 г., измеренные в три момента времени, отмеченные на рис. 2, *б*. Фоновое излучение солнечного диска исключено по уровню перед всплеском. Сплошной кривой показана аппроксимация спектра BBMS в максимуме всплеска форму-

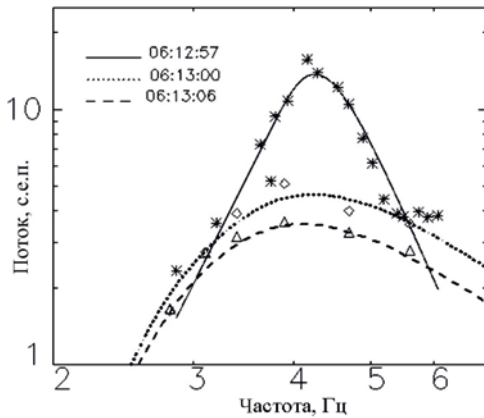


Рис. 3. Событие 25 сентября 2021 г. Микроволновые спектры в моменты времени, отмеченные на рис. 2, б. Сплошная кривая — аппроксимация формулой (1) спектра ВВМС (звездочки) в максимуме всплеска. Измерения СРГ в последующие моменты показаны ромбами и треугольниками. Пунктирной и штриховой кривыми показаны результаты аппроксимации измеренных спектров субпиков гиротронным излучением

лой (1), которая была использована для определения параметров спектра, а также для амплитудной калировки измерений СРГ. Во время короткого всплеска интенсивность потока на частоте ~ 4.5 ГГц в течение 5 с возрастает более чем в четыре раза, а полоса излучаемых частот на полувысоте спектра уменьшается до ~ 2 ГГц. Во время двух последующих моментов спектры, показанные ромбами и треугольниками, значительно шире.

СТАТИСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЫБОРКИ ВСПЛЕСКОВ

Распределения приведенных в таблице микроволновых всплесков по амплитуде и частоте максимума спектра показаны на рис. 4. Гистограммы нашей выборки событий с потоками до 15 с.е.п. показаны сплошными линиями в сравнении с выборкой [Stahli et al., 1989], включающей всплески с потоками в диапазоне 3–620 с.е.п. (штриховые линии). В нашей выборке по слабым событиям чаще присутствуют всплески с более низкими частотами максимумов спектров 5–6 ГГц (α) и амплитудами около 4–5 с.е.п. (б).

Связь нагрева вспышечной плазмы с интенсивностью потоков радиоизлучения, генерируемых не-тепловыми электронами, показана на рис. 5, а. Разброс величин $\Delta GOES$ относительно амплитуды микроволнового излучения S очень велик и может достигать двух порядков по величине. При этом наблюдается ограничение максимальных значений $\Delta GOES$, которые не превышают границы $4 \cdot 10^{-8} (S_{\max})^2$ (штриховая линия).

На рис. 5, б представлена гистограмма распределения событий по задержке Δt , определяемой разностью между моментом максимума производной мягкого рентгеновского излучения и моментом максимума микроволнового всплеска.

Хорошо известно, что примерно для половины больших солнечных вспышек наблюдается эффект

Ньюперта, отражающий причинную связь нагрева вспышечной плазмы с появлением потока электронов, ускоренных в импульсной фазе [Neupert, 1968]. Поэтому мы использовали производную мягкого рентгеновского излучения для определения предполагаемого максимального момента инжекции электронов. Из распределения видно, что в подавляющем количестве событий модуль задержек Δt не превышает 20 с.

Этот факт может свидетельствовать о взаимосвязи наблюдаемых микроволновых всплесков и ассоциируемых с ними рентгеновских вспышек.

Значения $\Delta t > 50$ с наблюдались в четырех случаях. Отметим, что для события № 30 на рис. 5, б не указано экстремальное значение $\Delta t = 309$ с.

На рис. 6 показаны гистограммы распределения наклонов спектра α и β и соотношение между ними (правая панель). Приведено сравнение с аналогичными работами других авторов.

Для низкочастотного наклона α приведено сравнение с результатами работы [Stahli et al., 1989]. В нашей работе за единичный интервал шага гистограммы принят диапазон изменения α для однородного источника от 2.67 до 3.1. Видно, что наблюдается широкий разброс значений α , при этом аналогичный результат получен работе [Stahli et al., 1989]. Однако область значений, соответствующих гиротронному механизму излучения однородного источника, в отличие от выборки [Stahli et al., 1989], не выделяется по частоте регистрируемых событий. Появление событий с низкими значениями $\alpha < 2.6$ естественно связать с нарушениями однородности источника излучения. В слабых событиях можно ожидать простую конфигурацию и малые размеры источников, а доля событий со сложной структурой ($> 30\%$) относительно мала. В остальных событиях низкочастотный наклон спектра $\alpha > 3.1$, т. е. круче ожидаемого для гиротронного излучения.

Для высокочастотной части спектра β приведено сравнение с результатами работы Nita et al. [2004]. Для подавляющего числа всплесков нашей выборки $|\beta| \leq 7$.

Обычно предполагают, что крутой наклон спектра на частотах ниже максимума вызван эффектом Разина — подавлением гиротронного излучения плотной фоновой плазмой, которая может быть характерна для источников слабых вспышек с малыми высотами [Ramaty, 1969; Fleishman, Kuznetsov, 2010]. С этим предположением согласуется связь между значениями наклонов α и β (см. рис. 6, в). В случае эффекта Разина гиротронный спектр модифицируется следующим образом: на низких частотах крутизна наклона спектра становится большой, а величина потока в максимуме спектра уменьшается, и следовательно, наклон спектра на высоких частотах становится более пологим. Подобное поведение наблюдается в наблюдениях — на рис. 6, в большим значениям β соответствуют малые абсолютные значения α . На панели в выделяются две вспышки, в спектрах которых оба наклона аномально крутые (две звездочки в правом верхнем углу). Для изучения особенностей этих всплесков № 22 и 28 использо-

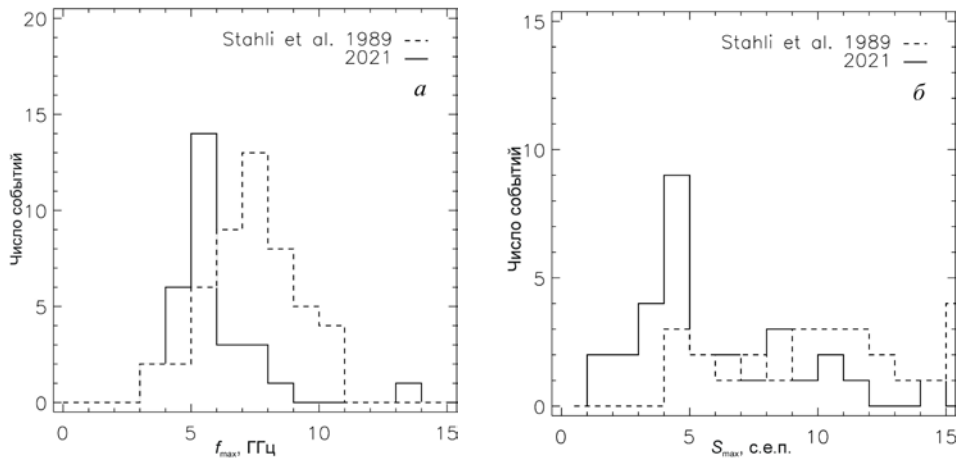


Рис. 4. Распределения всплесков по частоте (а) и амплитуде (б). Штриховой линией показаны аналогичные зависимости из работы [Stahli et al., 1989]

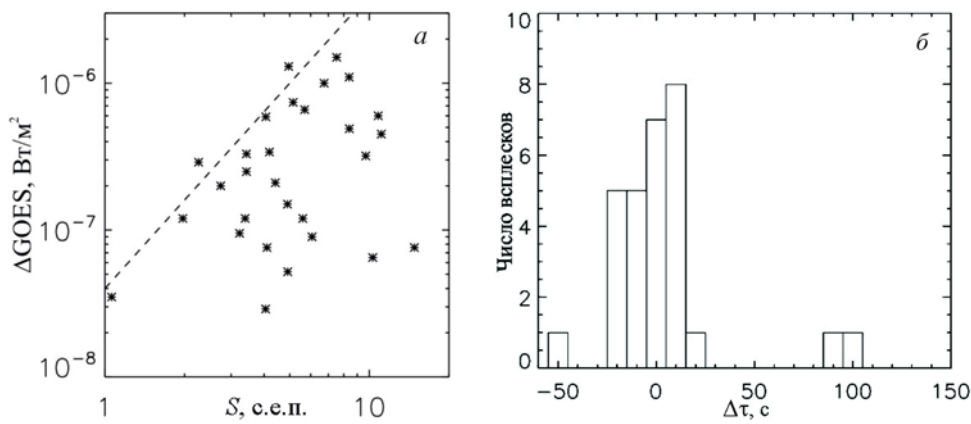


Рис. 5. Зависимость прироста $\Delta GOES$ от амплитуды микроволнового спектра (а), распределение событий по задержкам τ максимума производной мягкого рентгеновского излучения от максимума микроволнового всплеска (б)

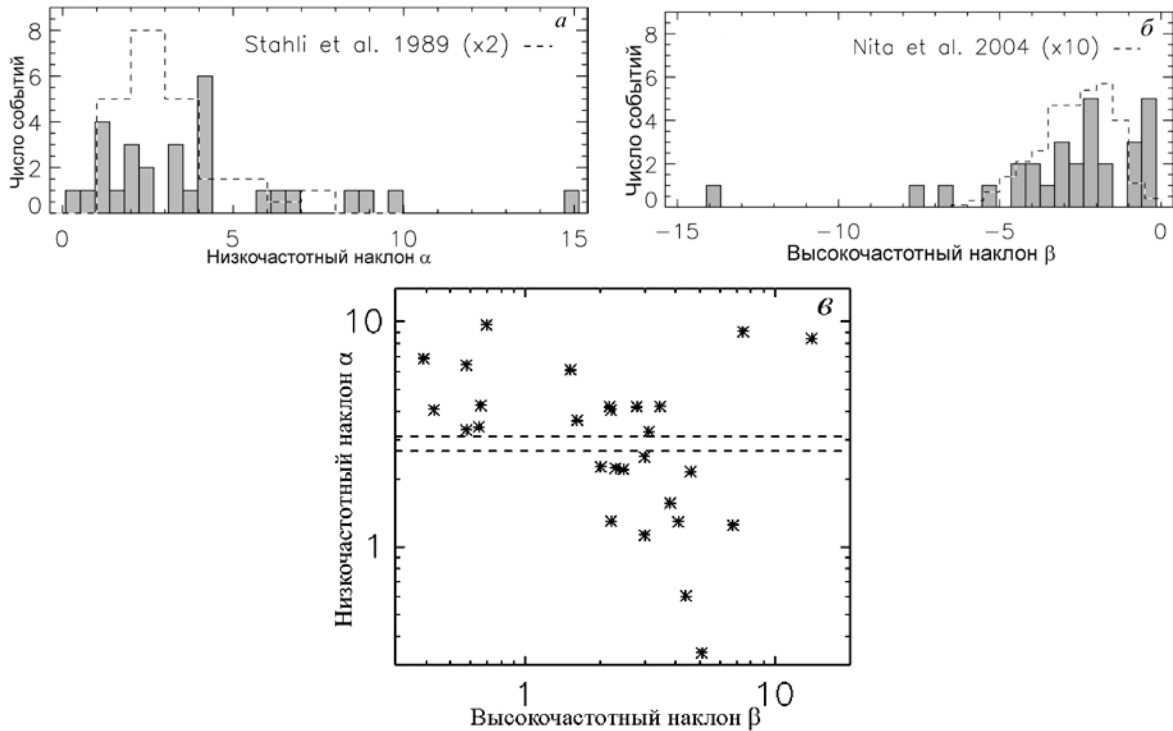


Рис. 6. Гистограммы низкочастотного (а) и высокочастотного (б) наклонов спектров и связь между величинами этих наклонов (в). Горизонтальные линии соответствуют $\alpha=2.67$ и 3.1 . Гистограммы для выборки всплесков Stahli et al. [1989] показаны штриховыми линиями с масштабом 1:2, для выборки [Nita et al., 2004] — в масштабе 1:10

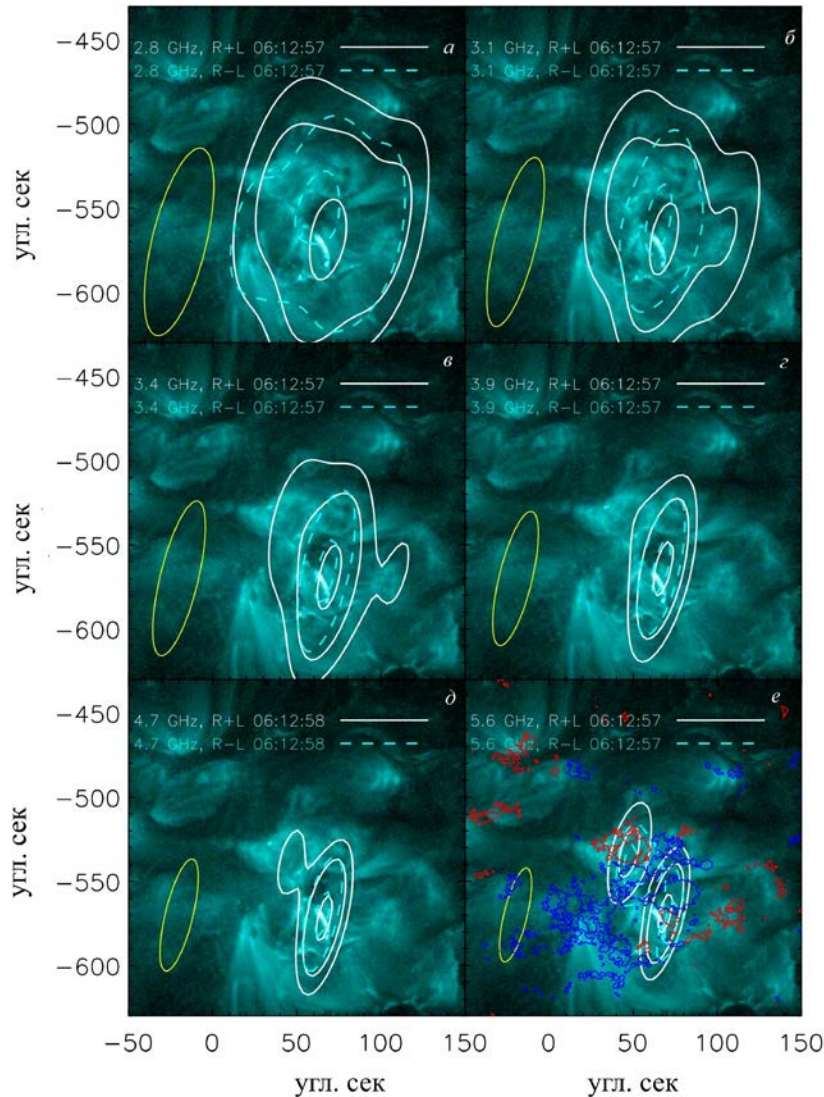


Рис. 7. Событие 25 сентября 2021 г. Изображения вспышечной области в диапазоне частот 2.8–5.6 ГГц. Фон — изображение AIA/SDO на 131 Å. Белые контуры — яркостные температуры радиоисточников (R+L) на уровнях 0.3, 0.5 и 0.9 от максимальной величины на изображении. Штриховые голубые линии — контуры излучения круговой поляризации (R–L) на уровнях 0.5 и 0.9. Желтые овалы в левом нижнем углу — диаграммы СРГ на данной частоте. Красные/синие контуры на панели e — изолинии продольного магнитного поля ± 200 Гс

вались наблюдения СРГ с пространственным разрешением. Наблюдения события № 28 на СРГ выполнены антенной решеткой 6–12 ГГц, а согласно наблюдениям на спектрополяриметре 4–8 ГГц, частота максимума спектра была в районе 3.8 ГГц. Поэтому сосредоточим внимание на событии № 22, а именно, всплеске 25 сентября 2021 г.

ВСПЛЕСК 25 СЕНТЯБРЯ 2021 г.

Микроволновый всплеск события № 22 произошел 25 сентября 2021 г. в интервале 06:12–06:14 UT в активной области 12871, расположенной в южном полушарии вблизи центрального меридиана, и наблюдался во время роста рентгеновского потока до уровня A7.6. На рис. 7 показано появление яркой петли во время рентгеновской вспышки, наблюдаемой в высокотемпературной линии 131 Å.

В момент пика микроволнового всплеска спектр имел крутой наклон как на низких ($\alpha \approx 9$), так и на

высоких частотах ($\beta \approx -7.4$). Всплеск можно охарактеризовать как узкополосный, поскольку он имел полосу частот не более 2 ГГц и наблюдался на частотах от 3.2 до 5.2 ГГц. Такие значения наклона и ширины полосы не укладываются в стандартную модель однородного гиросинхротронного источника.

С другой стороны, благодаря высокой чувствительности СРГ в спектрометрическом режиме наблюдений, на временном профиле потока на нескольких частотах во время фазы затухания после основного пика выделены еще два субпика (см. рис. 2, б). Спектры этих субпиков значительно более пологие (см. рис. 3). Это факт может говорить как об изменении параметров генерации излучения, так и о том, что излучение выходит из другого источника. Для уточнения этой информации были привлечены пространственные наблюдения СРГ.

Источник микроволнового излучения (R+L) показан белыми контурами на уровнях 0.3, 0.5 и 0.9 от максимальной яркостной температуры (рис. 7).

Время построения изображений 06:12:57 соответствует пику узкополосного интенсивного всплеска. Нужно отметить, что во время наблюдений этого события были отключены восемь антенн центральной части антенной решетки. Это не сказывается на измерениях пространственной структуры компактных источников, но влияет на распределение яркости крупномасштабных протяженных источников, таких как диск Солнца. Поэтому выравнивание радиокарт на разных частотах производилось не по диску, а по удаленному гирорезонансному источнику в северной части Солнца. При совмещении КУФ-изображений с радиокартами SRG установлено, что близко к центру яркости радиоисточника находится яркая УФ-петля.

Размеры источника всплеска уменьшаются с ростом частоты. На высоких частотах форма изолинии на уровне 0.5 и ее размеры становятся близкими к размеру диаграммы SRG (желтый овал). Узкополосному всплеску соответствуют изображения на частотах 3.9 и 4.7 ГГц, на этих частотах размер микроволнового источника поперек диаграммы и вдоль УФ-петли составлял $\sim 20''$. На других частотах яркостная температура вспышечного источника гораздо ниже, а на уровне изолиний 0.3 и 0.5 уже заметно присутствие квазистационарных источников. Поэтому область, охватываемая изолиниями на низких частотах, расширяется, а на изображениях на 5.6 ГГц проявляется новый источник.

Изолинии яркостной температуры в поляризации на уровне 0.5 от максимума близки к аналогичным изолиниям в интенсивности. В согласии с поведением временных профилей на рис. 2, *в* знак поляризации на всех частотах отрицательный, т. е. соответствует левой круговой поляризации, но степень поляризации зависит от частоты. На 3.9 и 4.7 ГГц она составляла более 60 %.

ОБСУЖДЕНИЕ

Низкий уровень активности во время тестовых наблюдений SRG позволил с помощью VBMS отобрать для анализа 30 слабых микроволновых всплесков во время вспышек с приращением мягкого рентгеновского излучения ΔGOES менее $1.5 \cdot 10^{-6}$ Вт/м².

Статистический анализ показал, что микроволновые всплески происходят, как правило, на фронте роста рентгеновского излучения. Таким образом, подтверждается вывод, сделанный в работах [Lysenko et al., 2018; Altyntsev et al., 2020], о том, что слабые вспышки часто являются импульсными, а в энерговыделении таких вспышек доминирует ускорение электронов в начальной стадии. Подобное поведение характерно для сильных импульсных вспышек и называется эффектом Ньюперта [Neupert, 1968]. В анализируемой выборке приращение рентгеновского излучения ΔGOES наблюдались в пределах трех порядков от $2.7 \cdot 10^{-9}$ до $1.5 \cdot 10^{-6}$ Вт/м². Связь ΔGOES с амплитудой всплесков S_{max} оказалась слабой, но обнаружилось ограничение на максимальную величину ΔGOES [Вт/м²] $< 4 \cdot 10^{-8} (S_{\text{max}})^2$.

Приведенные в таблице параметры микроволновых спектров характерны для гиросинхротронного

излучения среднерелятивистских электронов. Тем не менее, наблюдаемое распределение наклонов низкочастотной части спектра α не согласуется с моделью, в которой оптически толстая часть спектра контролируется поглощением гиросинхротронного излучения теми же нетепловыми электронами, которые ответственны за высокочастотное излучение. Случаи с малыми $\alpha < 2.6$ могут реализовываться из-за неоднородности источника, например из-за добавления на низких частотах излучения областей вспышки с меньшими магнитными полями. Различные эффекты, которые приводят к появлению всплесков с $\alpha > 3.1$, обсуждаются в работе [Stahli et al., 1989]. В нашей выборке основным эффектом является, по-видимому, поглощение Разина, поскольку в этом случае появляется наблюдаемая связь между величинами α и β (см. рис. 6, *в*), которая проявляется в том, что более крутым наклонам спектра на низких частотах соответствуют более пологие снижения спектра на высоких частотах. Отметим также, что число вспышек возрастает с уменьшением спектрального максимума и максимального радиопотока. Большинство событий в выборке соответствует нетепловой компоненте, где $\beta = -3.5 \div -1.5$. Низкочастотный наклон спектра α имеет широкий разброс значений от 1 до 4 и выше при ожидаемом разбросе значений для однородного источника от 2.67 до 3.1.

В таблице и на рис. 6, *в* два события (№ 22, 28) в сторону как низких, так и высоких частот отличаются аномально крутыми наклонами спектра, которые нельзя объяснить гиросинхротронным излучением даже однородного источника. Спектры для трех моментов времени в событии № 22 приведены на рис. 3. После узкополосного пика, показанного сплошной кривой, спектры становятся во время субпиков широкополосными. Спектры субпиков удается объяснить гиросинхротронным излучением однородного источника с размерами петли, наблюдаемой в КУФ-излучении. Результаты расчетов, выполненных с помощью программы [Fleishman, Kuznetsov, 2010] показаны пунктирной и штриховой линиями. Лучшие результаты подгонки получены при величине магнитного поля в источнике 180 Гс, концентрации излучающих нетепловых частиц $1.1 \cdot 10^6$ см⁻³ во время первого субпика и $0.8 \cdot 10^6$ см⁻³ во время второго субпика. В обоих случаях индекс степенного спектра ускоренных частиц составлял ~ 4.4 , а концентрация фоновой плазмы — $4 \cdot 10^{10}$ см⁻³. Последнее значение близко к независимой оценке, полученной из расчетов меры эмиссии УФ-излучения. При таких параметрах на форму спектров существенное влияние может оказывать эффект Разина, поскольку критическая частота Разина, рассчитанная по полученным значениям магнитного поля и плотности плазмы $f_R \approx 4.4$ ГГц близка к частоте максимумов аппроксимируемых спектров субпиков.

В максимуме всплеска № 22 полоса излучения настолько узкая, что объяснить ее в рамках гиросинхротронного излучения невозможно, в том числе и при использовании величин магнитного поля и концентрации фоновой плазмы гиросинхротронного источника субпиков, полученных выше. Из анализа изображений вспышечной области на частотах 3.9 и 4.2 ГГц следует, что когерентный источник также

должен быть расположен во вспышечной петле, а его размер должен быть несколько меньше размеров источника на других частотах приема СРГ.

Теория когерентных механизмов узкополосного излучения разрабатывалась в работах [Zaitsev, Stepanov, 1983; Zaitsev et al., 1997]. Было показано, что при инжекции ускоренных электронов во вспышечную петлю за характерные времена пролета вдоль петли может устанавливаться пичч-угловое распределение электронов, генерирующее плазменные волны на верхнегибридной частоте. Это значит, что при плотности плазмы $4 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ частота второй гармоники составляет 3.7 ГГц, что достаточно близко к наблюдаемой частоте 4.27 ГГц. Генерация излучения прекращается при уменьшении угловой анизотропии ускоренных электронов из-за взаимодействия с возбуждаемой турбулентностью. У генерируемого в результате слияния плазменных волн электромагнитного излучения частота становится близка к удвоенной верхнегибридной частоте, а степень круговой поляризации должна быть ~50 %. Напомним, что поляризации всплеска на 3.9 и 4.7 ГГц составляла более 60 %.

Таким образом, данные наблюдений пикового излучения во время вспышки 25 сентября согласуются с представлениями теории [Zaitsev, Stepanov, 1983; Zaitsev et al., 1997]. Отметим, что подобный случай с узкополосным излучением на частоте ~6 ГГц был недавно рассмотрен в работах [Алтынцев и др., 2022; Altyntsev et al., 2023].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наблюдения с помощью VBMS позволили изменить параметры спектров микроволнового излучения для трех десятков слабых солнечных вспышек с приростом рентгеновского потока от А до С1.5. Микроволновые спектры свидетельствуют, что в большинстве событий нагрев плазмы сопровождается появлением потоков нетепловых электронов, которые удается зарегистрировать как всплески микроволнового излучения. Зависимость прироста мягкого рентгеновского излучения от амплитуды всплеска проявляется слабо, т. е. при одинаковом приросте могут наблюдаться гиросинхротронные всплески, на порядок отличающиеся по величине. Диапазон индексов роста низкочастотной части спектра f^{α} может реализовываться в широких пределах $\alpha=0.3 \div 1.5$. На форму спектра существенное влияние может оказывать эффект Разина, особенно если всплески генерируются в плотной плазме при относительно слабых магнитных полях.

В некоторых случаях появление нетепловых электронов приводит к генерации узкополосных всплесков на частотах около двойной плазменной частоты.

Авторы выражают благодарность Российскому научному фонду (РНФ) за финансовую поддержку грантом РНФ № 22-22-00019 [https://rscf.ru/project/22-22-00019], а также коллективам СРГ и SDO за свободный доступ к данным. Результаты получены с использованием уникальной научной установки «Сибирский солнечный радиотелескоп» [http://ckp-

rf.ru/usu/73606/], оборудования Центра коллективного пользования «Ангара» [http://ckp-angara.iszf.irk.ru/].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алтынцев А.Т., Лесовой С.В., Глоба М.В. и др. Многоволновый Сибирский радиогелиограф. *Солнечно-земная физика*. 2020. Т. 6, № 2. С. 37. DOI: [10.12737/szf-62202003](https://doi.org/10.12737/szf-62202003).
- Алтынцев А.Т., Мешалкина Н.С., Мышьяков И.И. Когерентное микроволновое излучение как индикатор нетеплового энерговыделения в рентгеновской корональной точке. *Солнечно-земная физика*. 2022. Т. 8, № 2. С. 4. DOI: [10.12737/szf-82202201](https://doi.org/10.12737/szf-82202201).
- Богачёв С.А., Ульянов А.С., Кириченко А.С. и др. Микровспышки и нановспышки в короне Солнца. *Успехи физических наук*. 2020. Т. 190, № 8. С. 838. DOI: [10.3367/UFNr.2019.06.038769](https://doi.org/10.3367/UFNr.2019.06.038769).
- Муратов А.А. Солнечный спектрополяриметр диапазона 2–24 ГГц. *Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике*. XII конференция молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом»: Тезисы докладов. Иркутск, 19–24 сентября 2011 г. С. 21–22.
- Altyntsev A.T., Meshalkina N.S., Fedotova A.Ya., Myshyakov I.I. Background microwave emission and microflares in young active region 12635. *Astrophys. J.* 2020. Vol. 905, iss. 2. P. 149. DOI: [10.3847/1538-4357/abc54f](https://doi.org/10.3847/1538-4357/abc54f).
- Altyntsev A.T., Reid H., Meshalkina N.S., et al. Temporal and spatial association between microwaves and type III bursts in the upper corona. *Astronomy and Astrophysics*. 2023. Vol. 671. Id. A30. P. 7. DOI: [10.1051/0004-6361/202244599](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202244599).
- Battaglia M., Sharma R., Luo Y., et al. Multiple electron acceleration instances during a series of solar microflares observed simultaneously at X-Rays and microwaves. *Astrophys. J.* 2021. Vol. 922, no. 2. P. 134. DOI: [10.3847/1538-4357/ac2aa6](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac2aa6).
- Berghmans D., Auchère F., Long D.M., et al. Extreme-UV quiet Sun brightenings observed by the Solar Orbiter/EUI. *Astronomy and Astrophysics*. 2021. Vol. 656, no. L4. DOI: [10.1051/0004-6361/202140380](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140380).
- Chiuderi Drago F., Alissandrakis C., Hagyard M. Microwave emission above steady and moving sunspots. *Solar Phys.* 1987. Vol. 112. P. 89. DOI: [10.1007/BF00148490](https://doi.org/10.1007/BF00148490).
- Dulk G.A., Marsh K.A. Simplified expressions for the gyrosynchrotron radiation from mildly relativistic, nonthermal and thermal electrons. *Astrophys. J.* 1982. Vol. 259. P. 350. DOI: [10.1086/160171](https://doi.org/10.1086/160171).
- Fleishman G.D., Kuznetsov A.A. Fast gyrosynchrotron codes. *Astrophys. J.* 2010. Vol. 721, iss. 2. P. 1127. DOI: [10.1088/0004-637X/721/2/1127](https://doi.org/10.1088/0004-637X/721/2/1127).
- Gary D.E., Hurford G.E. Multifrequency Observations of a Solar Microwave Burst with Two-dimensional Spatial Resolution. *Astrophys. J.* 1990. Vol. 361. P. 290. DOI: [10.1086/169194](https://doi.org/10.1086/169194).
- Gary D.E., Hartl M.D., Shimizu T. Nonthermal radio emission from solar soft X-ray transient brightenings. *Astrophys. J.* 1997. Vol. 477. P. 958. DOI: [10.1086/303748](https://doi.org/10.1086/303748).
- Ginzburg V.L., Syrovatskii S.I. Cosmic Magnetobremstrahlung (synchrotron Radiation). *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 1965. Vol. 3. P. 297. DOI: [10.1146/annurev.aa.03.090165.001501](https://doi.org/10.1146/annurev.aa.03.090165.001501).
- Gopalswamy N., Zhang J., Kundu M.R., et al. Fast Time Structure during Transient Microwave Brightenings: Evidence for Nonthermal Processes. *Astrophys. J.* 1997. Vol. 491, iss. 2. P. L115. DOI: [10.1086/311063](https://doi.org/10.1086/311063).
- Krucker S., Hurford G.J., Grimm O. The Spectrometer/Telescope for Imaging X-rays (STIX). *Astronomy and Astrophysics*. 2020. Vol. 642. P. A15. DOI: [10.1051/0004-6361/201937362](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201937362).
- Kundu M.R., Schmahl E.J., Grigis P.C., et al. Nobeyama radio heliograph observations of RHESSI microflares. *Astronomy and Astrophysics*. 2006. Vol. 451, iss. 2. P. 691–707.

- Li Z., Su Y., Veronig A., et al. Detailed Thermal and Non-thermal Processes in an A-class Microflare. *Astrophys. J.* 2022. Vol. 930, no. 2. P.147. DOI: [10.3847/1538-4357/ac651c](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac651c).
- Lin R.P., Dennis B.R., Hurford G.J. The Reuven Ramaty High-Energy Solar Spectroscopic Image. *Solar Phys.* 2002. Vol. 210. P. 3. DOI: [10.1023/A:1022428818870](https://doi.org/10.1023/A:1022428818870).
- Lysenko A., Altyntsev A., Meshalkina N., Zhdanov D. Fleishman G. Statistics of “Cold” Early Impulsive Solar Flares in X-Ray and Microwave Domains. *Astrophys. J.* 2018. Vol. 856. DOI: [10.3847/1538-4357/aab271](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aab271).
- Meegan C., Lichti G., Bhat P.N., et al. The Fermi gamma-ray burst monitor. *Astrophys. J.* 2009. Vol. 702. P. 791. DOI: [10.1088/0004-637X/702/1/791](https://doi.org/10.1088/0004-637X/702/1/791).
- Neupert W.M. Comparison of Solar X-Ray Line Emission with Microwave Emission during Flares. *Astrophys. J.* 1968. Vol. 153. P. L59. DOI: [10.1086/180220](https://doi.org/10.1086/180220).
- Nindos A., Kundu M.R., White S.M., et al. Microwave and extreme ultraviolet observations of solar polar regions. *Astrophys. J.* 1999. Vol. 527, iss. 1. P. 415–425.
- Nita G.M., Gary D.E., Lee J. Statistical study of two years of solar flare radio spectra obtained with the Owens Valley Solar Array. *Astrophys. J.* 2004. Vol. 605, iss. 1. P. 528–545.
- Qiu J., Liu Ch., Gary D.E., Nita G.M., Wang H. Hard X-ray and microwave observations of microflares. *Astrophys. J.* 2004, vol. 612, no. 1, p. 530. DOI: [10.1086/422401](https://doi.org/10.1086/422401).
- Ramaty R. Gyrosynchrotron emission and absorption in a magnetoactive plasma. *Astrophys. J.* 1969. Vol. 158. P. 753. DOI: [10.1086/150235](https://doi.org/10.1086/150235).
- Raulin J.-P., White S.M., Kundu M.R., et al. Multiple components in the millimeter emission of a solar flare. *Astrophys. J.* 1999. Vol. 522, iss. 1. P. 547–558.
- Schadee A., de Jager C., Svestka Z. Enhanced X-ray emission above 3.5 keV in active regions in the absence of flares. *Solar Phys.* 1983. Vol. 89. P. 287. DOI: [10.1007/BF00217252](https://doi.org/10.1007/BF00217252).
- Shaik S.B., Gary D.E. Implications of flat optically thick microwave spectra in solar flares for source size and morphology. *Astrophys. J.* 2021. Vol. 919. P. 44. DOI: [10.3847/1538-4357/ac0fdb](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac0fdb).
- Shibasaki K., Chiuderi-Drago F., Melozzi M., et al. Microwave, ultraviolet, and soft X-Ray observations of hale region 16898. *Solar Phys.* 1983. Vol. 89. P. 307. DOI: [10.1007/BF00217253](https://doi.org/10.1007/BF00217253).
- Schadee A., de Jager C., Svestka Z. Enhanced X-ray emission above 3.5 keV in active regions in the absence of flares. *Solar Phys.* 1983, vol. 89, p. 287. DOI: [10.1007/BF00217252](https://doi.org/10.1007/BF00217252).
- Stoiser S., Veronig A.M., Aurass H., Hanslmeier A. RHESSI microflares: I. X-ray properties and multiwavelength characteristics. *Solar Phys.* 2007. Vol. 246, iss. 2. P. 339. DOI: [10.1007/s11207-007-9066-7](https://doi.org/10.1007/s11207-007-9066-7).
- Zaitsev V.V., Stepanov A.V. The plasma radiation of flare kernels. *Solar Phys.* 1983. Vol. 88. P. 297. DOI: [10.1007/BF00196194](https://doi.org/10.1007/BF00196194).
- Zaitsev V.V., Kruger A., Hildebrandt J., Kliem B. Plasma radiation of power-law electrons in magnetic loops: Application to solar decimeter-wave continua. *Astronomy and Astrophysics.* 1997. Vol. 328. P. 390.
- Zhdanov D.A., Zandanov V.G. Broadband microwave spectropolarimeter. *Central European Astrophys. Bull.* 2011. Vol. 35. P. 223.
- Zhdanov D.A., Zandanov V.G. Observations of microwave fine structures by the Badary broadband microwave spectropolarimeter and the Siberian Solar Radio Telescope. *Solar Phys.* 2015. vol. 290, iss. 1. P. 287. DOI: [10.1007/s11207-014-0553-3](https://doi.org/10.1007/s11207-014-0553-3).
- Xiao H., Maloney S., Krucker S., et al. The data center for the Spectrometer and Telescope for Imaging X-rays (STIX) onboard Solar Orbiter. 2023. <https://arxiv.org/abs/2302.00497>. URL: <http://ckp-rf.ru/usu/73606/> (дата обращения 24 августа 2023 г.). URL: <http://ckp-angara.iszf.irk.ru> (дата обращения 24 августа 2023 г.). URL: <https://rscf.ru/project/22-22-00019/> (дата обращения 24 августа 2023 г.).
- Статья подготовлена по материалам Восемнадцатой ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе», 6–10 февраля 2023 г., ИКИ РАН, Москва.*
- Как цитировать эту статью:*
Жданов Д.А., Алтынцев А.Т., Мешалкина Н.С., Анфиногентов С.А. Статистический анализ микровспышек по данным Спектрополяриметра 4–8 ГГц. *Солнечно-земная физика.* 2023. Т. 9, № 3. С. 111–121. DOI: [10.12737/szf-93202312](https://doi.org/10.12737/szf-93202312).