

Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 119, № 1, 11–18 (2023)

УДК 523.985

## Исследование поляризации миллиметрового излучения солнечных вспышек

*В.С. Рыжов<sup>1</sup>, П.И. Шиврина<sup>1</sup>, В.В. Смирнова<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1, Москва, 105005, Россия  
*p.shivrina16@gmail.com*

<sup>2</sup> ФГБУН “Крымская астрофизическая обсерватория РАН”, Научный, 298409, Крым  
*vsvvid.smirnova@yandex.ru*

Поступила в редакцию 30 октября 2022 г.

**Аннотация.** В работе приведены оценки степени поляризации солнечных вспышек, зарегистрированных с помощью радиотелескопа РТ-7.5 МГТУ им. Н.Э. Баумана на частоте 93 ГГц. На основе данных картографирования полного солнечного диска определены временные профили интенсивности на правой и левой круговой поляризации для нескольких событий марта – июня 2022 г. Оценка верхнего предела степени круговой поляризации для максимальной фазы исследованных вспышек составила 5 %.

**Ключевые слова:** Солнце, радиоизлучение, поляризация миллиметрового излучения, поляризационный приемник

### 1 Введение

Радиотелескоп РТ-7.5 МГТУ им. Н.Э. Баумана является единственным отечественным радиотелескопом коротковолновой части миллиметрового (мм) диапазона волн. Он оснащен полноповоротной зеркальной антенной с диаметром главного зеркала 7.75 м. В настоящее время на радиотелескопе РТ-7.5 для солнечных наблюдений используется двухдиапазонный приемник с рабочими частотами  $\nu_1 = 93$  ГГц и  $\nu_2 = 140$  ГГц (Смирнова и др., 2017). Ширина диаграммы направленности антенны, которая определяет угловое разрешение для этих частот, составляет около 3 угл. мин., точность наведения на источник  $\sim 10''$ . Такие характеристики радиотелескопа позволяют проводить наблюдения в двух режимах: двумерное сканирование Солнца лучом антенны, при котором получается карта распределения яркостной температуры радиоизлучения по солнечному диску, и длительное сопровождение выделенной активной области с непрерывной записью сигнала от нее (Tsap et al., 2018).

К настоящему времени в мире имеется очень мало сведений о степени поляризации излучения солнечных вспышек в мм-диапазоне. Чтобы восполнить этот пробел, в 2021 году на радиотелескопе РТ-7.5 был впервые установлен поляризационный приемник диапазона 93 ГГц, который обеспечил условия для изучения круговой поляризации радиоизлучения Солнца.

Целью данной работы была апробация новой схемы разделения круговой поляризации для штатного радиометра 93 ГГц, установленного на радиотелескопе МГТУ им. Н.Э. Баумана, а также накопление статистики о степени круговой поляризации мм-радиоизлучения солнечных вспышек.

### 2 Режимы работы РТ-7.5

Основным режимом работы РТ-7.5 является регулярное двумерное картографирование полного солнечного диска. При этом большая часть наблюдений ведется одновременно на двух частотах: 93 и 140 ГГц (диапазоны 3.2 и 2.2 мм).

Другим режимом солнечных наблюдений на РТ-7.5 является сопровождение лучом антенны одной выбранной активной области с высоким прогнозом развития вспышки в течение всего возможного времени наблюдения. Данный режим позволяет получать профили интенсивности вспышек на двух частотах с максимальным временным разрешением 0.125 с. Режим используется, когда имеется высокая вероятность развития мощной вспышки в одной активной области на диске.

Поляризационный приемник, изображенный на рис. 1, состоит из рупорного облучателя, принимающего мм-излучение; поляризатора, преобразующего круговую левую и правую поляризацию в соответствующую линейную: вертикальную и горизонтальную; селектора поляризации, выделяющего вертикальную и горизонтальную поляризацию в отдельные каналы. Далее следуют модуляторы, по очереди открывающие поляризационные каналы. С выходов модуляторов сигналы поступают через сумматор на штатный термостатированный радиометр 93 ГГц. Особенностью приемника является получение данных об интенсивности излучения двух видов: на правой поляризации и разности интенсивностей на правой и левой поляризации. Однако из-за неравенства коэффициента передачи в двух каналах “чистой” разницы интенсивностей двух поляризаций на практике реализовать не удалось, и на картах второго вида преобладает одна из поляризаций.



Рис. 1. Устройство поляризационного приемника 93 ГГц

### 3 Метод оценки степени поляризации

Для данного приемника был разработан следующий метод оценки степени поляризации. В начале выполняется непрерывное картографирование полного диска “гребенчатым сканом” с последовательным получением интенсивностей  $I_1$  и  $I_2$  для каждого прохода луча антенны:

$$I_1 = I_{\text{Right}} \quad (1)$$

$$I_2 = \alpha \times I_{\text{Left}} - I_{\text{Right}}. \quad (2)$$

Далее выполняется калибровка и определяется коэффициент разбалансировки каналов схемы разделения поляризации  $p$  при наблюдении участков “спокойного Солнца” и “фона неба”, для которых степень поляризации принята  $p = 0$ :

$$I_{\text{Right}} = I_1 \quad (3)$$

$$I_{\text{Left}} = \frac{(I_1 + I_2)}{\alpha}. \quad (4)$$

После этого выполняется расчет степени поляризации по формуле

$$p = \frac{I_{\text{Right}} - I_{\text{Left}}}{I_{\text{Right}} + I_{\text{Left}}}. \quad (5)$$

Траектория движения луча при гребенчатом скане и примеры полученных радиояркостных карт Солнца представлены на рис. 2–4, для двух режимов. При угловой скорости сканирования 180 угл. с/с и длине строки  $H = 40$  угл. мин. межканальная задержка отклика радиометра для одной и той же точки на солнечном диске для канала правой поляризации и разностного канала лежит в пределах  $\Delta\tau = 4 \dots 25$  с. Шаг строк растра составляет  $d = 2$  угл. мин., общая продолжительность сканирования, определяющая временное разрешение при оценке степени поляризации, составляет  $\tau_S \approx 10$  мин. При анализе данных в постобработке определяется строка, содержащая наибольший отклик от вспышки (рис. 5). Далее производится совмещение двух смежных сканов по времени, а также по уровню “спокойного Солнца” с определением коэффициента разбалансировки  $\alpha$ . После этого определяются значения максимумов интенсивности на двух поляризациях и вычисляется степень поляризации (рис. 6).

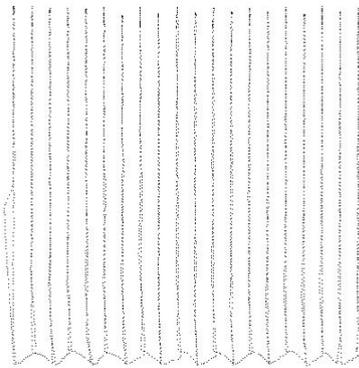


Рис. 2. Траектория движения луча

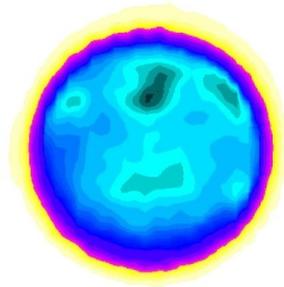


Рис. 3. Движение луча вверх, правая поляризация

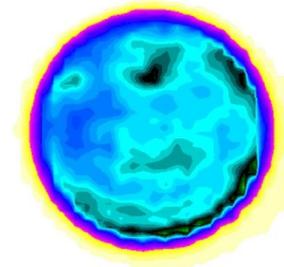


Рис. 4. Движение луча вниз, разность поляризаций

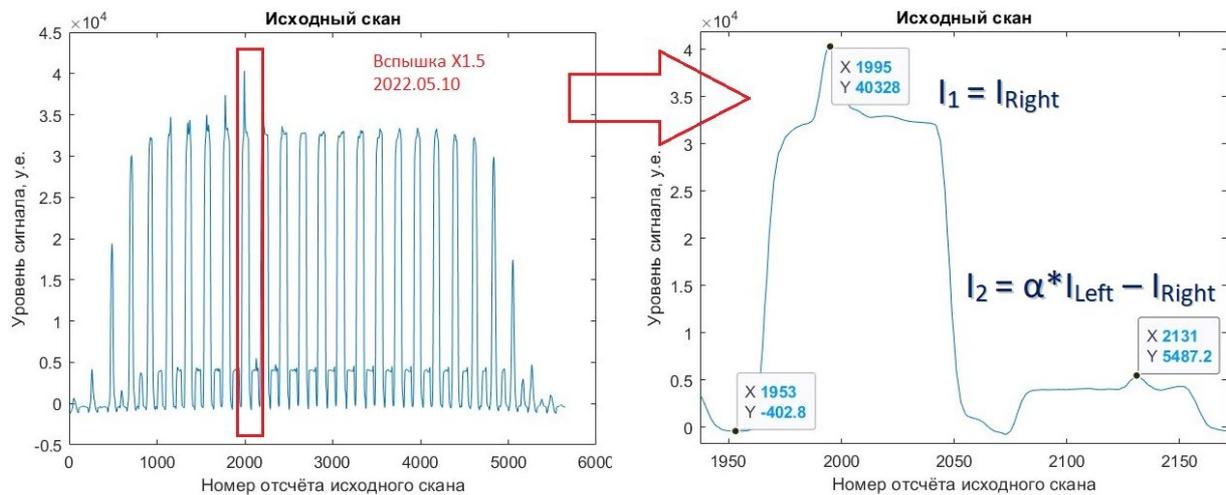


Рис. 5. Выбор необходимой строки скана

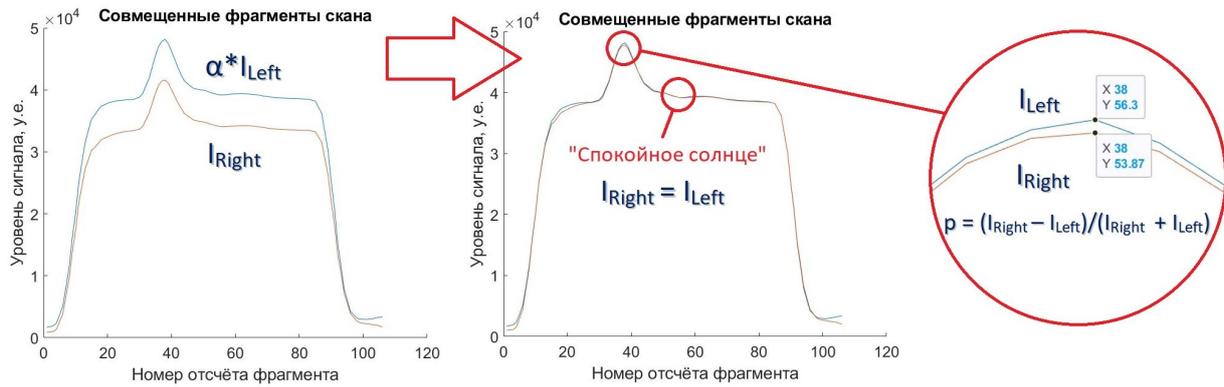


Рис. 6. Калибровка и оценка степени поляризации

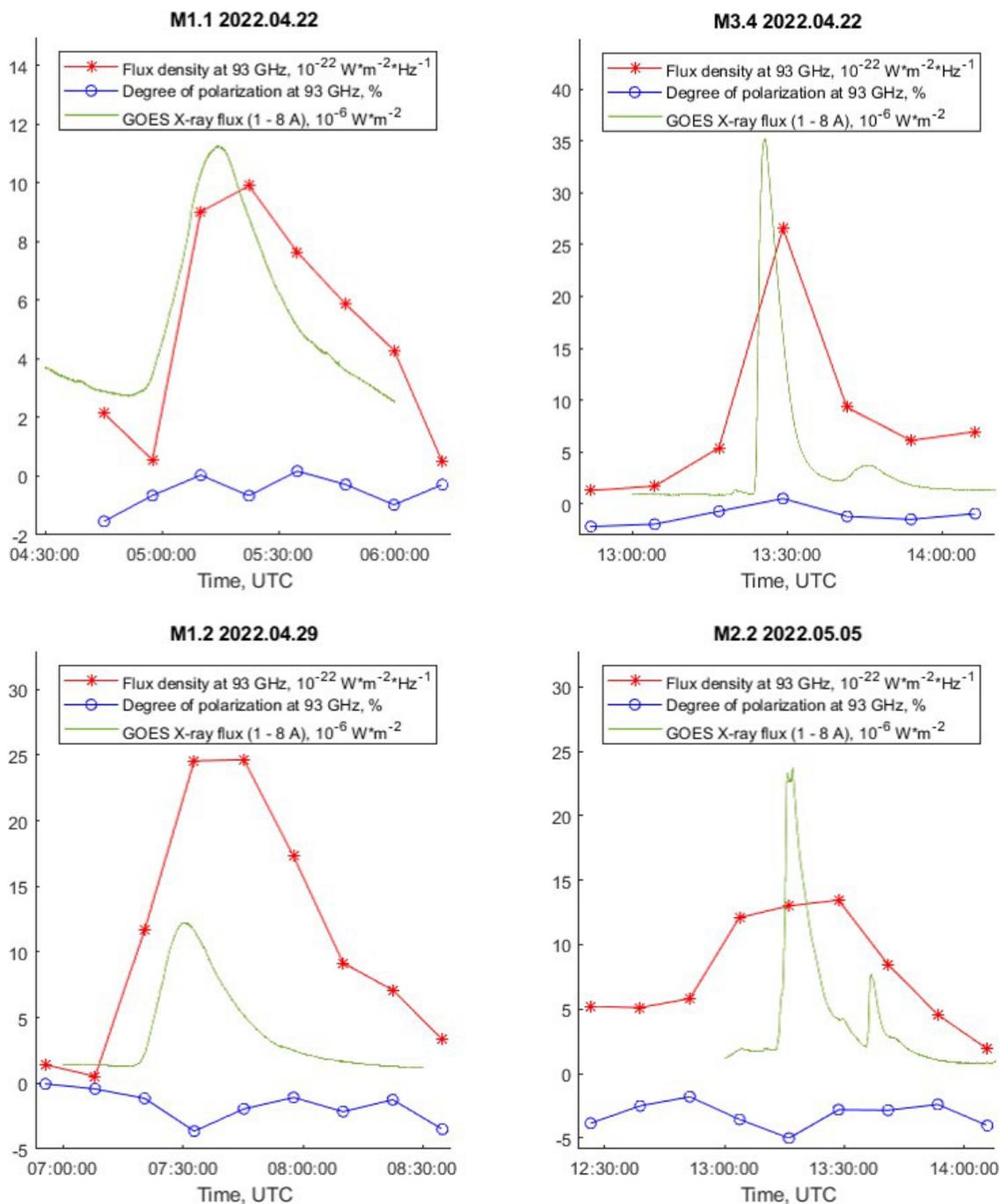
Погрешность оценивания степени поляризации находилась методом статистического моделирования с определением значения каждой составляющей отдельно. Бюджет погрешности представлен в таблице 1. Ввиду близости значений случайных составляющих погрешности и некомпенсированных систематических, последние принимались как случайные со среднеквадратическими отклонениями (СКО) 0.5 от их пределов. Результирующая среднеквадратическая погрешность оценивания степени поляризации составила  $\varepsilon_{\Sigma} = 4\%$ .

Таблица 1. Бюджет погрешности оценивания степени поляризации

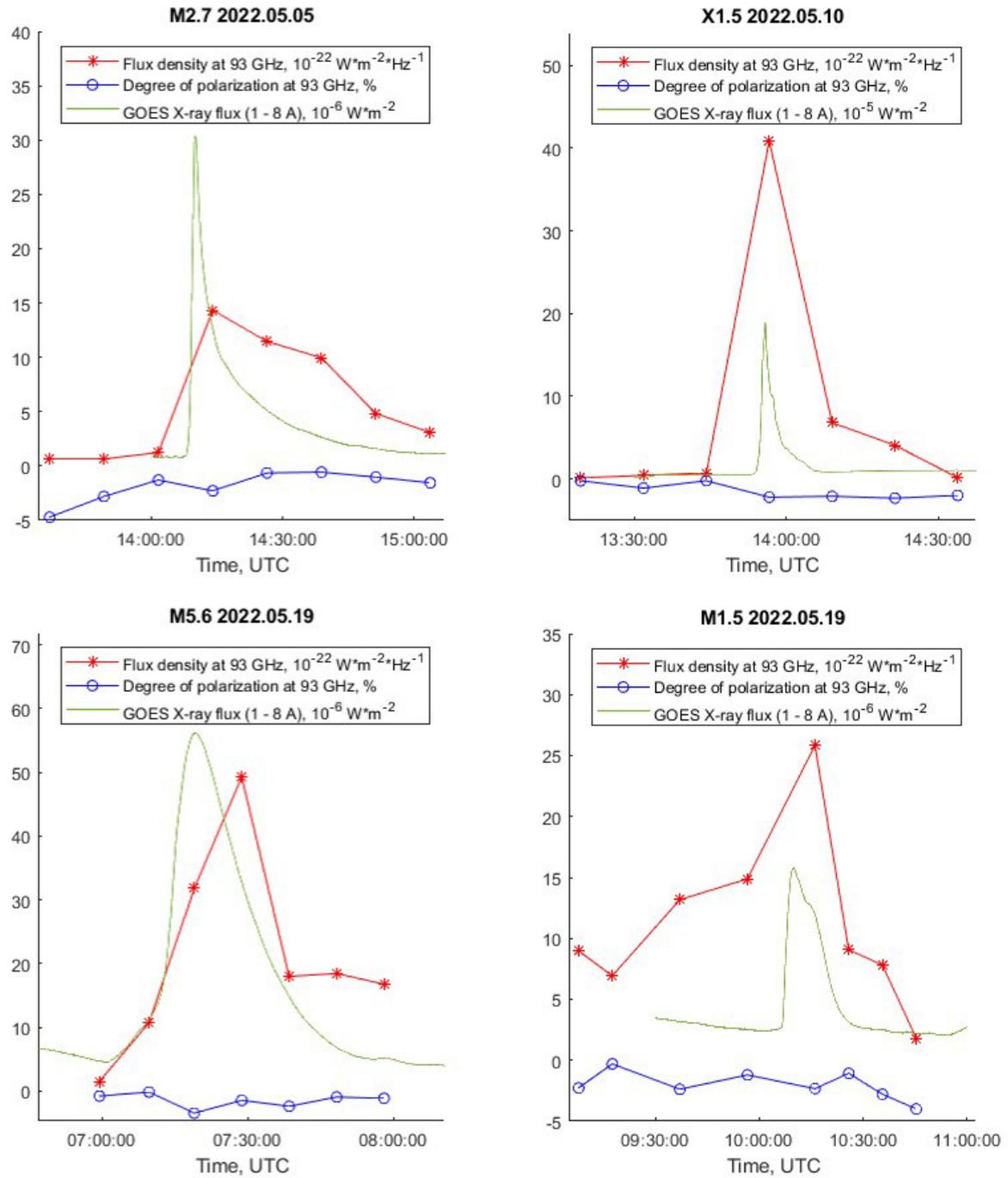
Наименование составляющей погрешности	Тип погрешности	Значение	Примечание
вызванная собственными шумами системы, правая поляризация	случайная, СКО	0.03 %	флуктуационная чувствительность системы $\Delta T_r = 1K$
вызванная собственными шумами системы, разностный канал	случайная, СКО	0.2 %	флуктуационная чувствительность системы $\Delta T_r = 1K$
вызванная флуктуациями потерь в атмосфере	случайная, СКО	1.6 %	ясная погода, СКО флуктуаций $\delta = 2\%$
вызванная координатным шумом	случайная, СКО	3.2 %	скорость ветра менее 10 м/с, СКО погрешности сканирования $\sigma_c = 5$ угл. с
вызванная нелинейностью приемного тракта	некомпенсированная, систематическая, предел	1.6 %	нелинейность приемного тракта $\delta_r = 7\%$ (0.3 дБ) в пределах динамического диапазона антенной температуры $T_A = 0 \dots 1.5 T_S$ , где $T_S$ – антенная температура при наведении на центр солнечного диска
вызванная межканальной задержкой	некомпенсированная, систематическая, предел	3 %	межканальная задержка $\Delta\tau = 24$ с, длительность переднего фронта вспышки $\tau_f = 300$ с
Результирующая среднеквадратическая погрешность оценки степени поляризации $\varepsilon_{\Sigma} = 4\%$			

Всего за активный период наблюдений 12.04.2022 – 23.06.2022 в интервалах картографирования произошла 51 вспышка, из которых 27 – С-класса, 20 – М-класса и 4 – Х-класса. Представленным методом был проведен анализ для 8 наиболее мощных событий М- и Х-классов, при регистрации

которых наблюдался наименьший уровень флуктуаций сигнала из-за погодных условий. На рис. 7 и 8 представлены графики зарегистрированной спектральной плотности излучения (СПИ) на правой поляризации, оценки степени поляризации, а также уровень мягкого рентгеновского излучения по данным GOES.



**Рис. 7.** Спектральная плотность и степень поляризации излучения зарегистрированных вспышек M1.1, M3.4 – 2022.04.22, M1.2 – 2022.04.29, M2.2 – 2022.05.05



**Рис. 8.** Спектральная плотность и степень поляризации излучения зарегистрированных вспышек M2.7 – 2022.05.05, X1.5 – 2022.05.10, M5.6, M1.5 – 2022.05.19

В таблице 2 представлено максимальное значение СПИ вспышки на правой поляризации, а также минимальное и максимальное значение степени поляризации вспышки для 8 отобранных событий.

**Таблица 2.** Статистика зарегистрированных событий

Время, UTC	Класс	Max СПИ, $10^{-22} \text{ Вт} \times \text{м}^{-2} \times \text{Гц}^{-1}$	Min p, %	Max p, %
2022.04.22 04:52	M1.1	$10 \pm 2$	$-1.5 \pm 4.0$	$0.2 \pm 4.0$
2022.04.22 13:16	M3.4	$27 \pm 5$	$-2.2 \pm 4.0$	$0.5 \pm 4.0$
2022.04.29 07:15	M1.2	$25 \pm 5$	$-3.6 \pm 4.0$	$0.0 \pm 4.0$
2022.05.05 13:08	M2.2	$13 \pm 3$	$-5.0 \pm 4.0$	$-1.8 \pm 4.0$
2022.05.05 14:02	M2.7	$14 \pm 3$	$-4.8 \pm 4.0$	$-0.6 \pm 4.0$
2022.05.10 13:50	X1.5	$41 \pm 8$	$-2.3 \pm 4.0$	$-0.2 \pm 4.0$
2022.05.19 07:00	M5.6	$49 \pm 10$	$-3.4 \pm 4.0$	$-0.2 \pm 4.0$
2022.05.19 10:00	M1.5	$26 \pm 5$	$-4.0 \pm 4.0$	$-0.3 \pm 4.0$

## 4 Выводы

В работе получены новые данные о степени круговой поляризации мм-излучения солнечных вспышек. Для всех 8 исследованных событий M- и X-классов отношение измеренного абсолютного значения степени поляризации к среднеквадратической погрешности метода (4%) за период развития вспышки не превысило значения 1.25, что позволяет оценить верхний предел степени поляризации мм-излучения рассмотренных событий около 5%. Дальнейшая оптимизация метода, направленная на снижение каждой составляющей погрешности, позволит повысить точность метода до 2%. Полученная нами верхняя оценка значительно ниже других исследований (Altyntsev et al., 2017; Silva, Valio, 2016). Для дальнейшего изучения предложенного метода необходимо создать калибровочный источник с частотой 93 ГГц, который имеет известную и изменяемую круговую поляризацию и который можно разместить в дальней зоне антенны радиотелескопа РТ-7.5

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ 20-52-26006 Чехия\_a и Минобрнауки НИР № 1021051101548-7-1.3.8.

## Литература

- Смирнова В.В., Цап Ю.Т., Шумов А.В. и др., 2017. Радиостроение. № 6. С. 14–26. [Smirnova V.V., Tsap Yu.T., Shumov A.V., et al., 2017. Radiostroenie, no. 6, pp. 14–26. (In Russ.)]
- Altyntsev A., Meshalkina N., Myshyakov I., Pal'shin V., Fleishman G., 2017. Solar Phys., vol. 292, iss. 9, p. 137.
- Silva D.F., Valio A.B.M., 2016. In Dorotovic I. et al. (Eds), Millimeter Observation of Solar Flares with Polarization. ASP Conf. Ser., San Francisco: ASP, vol. 504, p. 55.
- Tsap Yu.T., Smirnova V.V., Motorina G.G., et al., 2018. Solar Phys., vol. 293, no. 3, p. 50.

## Investigation of the polarization of millimeter radiation of solar flares

*V. Ryzhov*<sup>1</sup>, *P. Shivrina*<sup>1</sup>, *V. Smirnova*<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Bauman Moscow State Technical University, 2nd Bauman str., 5, p. 1, Moscow 105005, Russia  
*p.shivrina16@gmail.com*

<sup>2</sup> Crimean Astrophysical Observatory, Nauchny 298409  
*vsvvid.smirnova@yandex.ru*

**Abstract.** The paper presents estimates of the polarization degree of solar flares recorded using the RT-7.5 radio telescope of the Bauman Moscow State Technical University at a frequency of 93 GHz, time profiles of the intensity of right and left circular polarization for several events in March–June 2022 based on maps of the full solar disk. The estimation of the upper limit of the degree of circular polarization for the maximum phase of the studied flares was 5%.

**Key words:** Sun, radio emission, polarization of millimeter emission, polarization receiver