

## ВОЗМОЖНЫЕ ПОГРЕШНОСТИ В ВОССТАНОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ ФИТИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРАХ РАДИОИСТОЧНИКА, СВЯЗАННЫЕ С АНИЗОТРОПНОСТЬЮ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ

### POSSIBLE ERRORS IN RADIO SOURCE PARAMETERS RECOVERED BY THE FITTING METHOD RELATED TO ANISOTROPY OF THE ELECTRON DISTRIBUTION

Д.А. Смирнов 

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория  
РАН,

Санкт-Петербург, Россия, [dmitriy.smirnov@unn.ru](mailto:dmitriy.smirnov@unn.ru)

В.Ф. Мельников 

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория  
РАН,

Санкт-Петербург, Россия, [v.melnikov@gaoran.ru](mailto:v.melnikov@gaoran.ru)

D.A. Smirnov

Central Astronomical Observatory RAS at Pulkovo,  
Saint Petersburg, Russia, [dmitriy.smirnov@unn.ru](mailto:dmitriy.smirnov@unn.ru)

V.F. Melnikov

Central Astronomical Observatory RAS at Pulkovo,  
Saint Petersburg, Russia, [v.melnikov@gaoran.ru](mailto:v.melnikov@gaoran.ru)

**Аннотация.** В настоящей работе исследованы погрешности восстановления (радиодиагностики) параметров солнечных вспышек (магнитного поля, концентрации ускоренных электронов и др.) методом фитирования микроволновых спектров. Анализ погрешностей проводился путем диагностики двух модельных радиоисточников с известными заданными параметрами, в том числе с заданными параметрами анизотропии питч-углового распределения излучающих электронов. Сама диагностика проводилась с использованием генетического алгоритма минимизации. Показано, что использование традиционного подхода с предположением об изотропности питч-углового распределения электронов приводит к значительным систематическим ошибкам, в частности, к сильному занижению значений напряженности магнитного поля при наличии в реальном радиоисточнике продольной анизотропии питч-углового распределения электронов. При восстановлении же параметров с учетом возможной анизотропии точность восстановления заметно повышается.

**Ключевые слова:** солнечные вспышки, радиогелиограф, радиодиагностика.

**Abstract.** This paper examines errors in recovering (radio diagnostics) solar flare parameters (magnetic field, accelerated electron density, etc.) by fitting microwave spectra. The analysis was performed by diagnosing two model radio sources with known preset parameters, including given parameters of the pitch-angle anisotropy of emitting electrons. The diagnostics was carried out by a genetic minimization algorithm. It is shown that using the traditional approach on the assumption about isotropy of pitch angular distribution of electrons leads to significant systematic errors, in particular, to a strong underestimation of the magnetic field strength in the presence of longitudinal anisotropy of pitch angular distribution of electrons in a real radio source. When restoring the same parameters in view of possible anisotropy, the accuracy of the restoration increases markedly.

**Keywords:** solar flares, radioheliograph, radio diagnostics.

## ВВЕДЕНИЕ

Проведение исследований солнечных вспышек методами радиодиагностики чрезвычайно актуально, так как только в радиодиапазоне возможно получение детальной информации о корональном магнитном поле и электронах умеренно релятивистских энергий. Практической основой таких исследований стали созданные в последние годы многочастотные радиогелиографы, которые позволяют регистрировать частотные спектры микроволнового излучения в отдельных участках вспышки. Прежде всего, это регулярные наблюдения, проводимые на Сибирском радиогелиографе (СРГ) в частотных диапазонах 3–6, 6–12 и 12–24 ГГц [Алтынцев и др., 2020] и на солнеч-

ном интерферометре-спектрометре  $\alpha$  (Expanded Owens Valley Solar Array) в диапазоне 1–18 ГГц [Gary et al., 2018; Chen et al., 2020]. В ближайшие два года планируется также начало регулярных наблюдений на Китайском спектрогелиографе MUSER в диапазоне 2–15 ГГц [Yan et al., 2021].

Диагностику по данным радиогелиографов осуществляют методом фитирования, т. е. подгонки наблюдаемых частотных спектров из вспышечно-активных областей Солнца к теоретическим, восстанавливая таким образом параметры плазмы и ускоренных частиц. Ранее радиодиагностика с помощью данного подхода проводилась в предположении изотропности питч-углового распределения излуча-

ющих нетепловых электронов [Morgachev et al., 2014; Fleishman et al., 2020]. Наиболее интересный результат подобной микроволновой диагностики представлен в работах [Fleishman et al., 2020, 2022], где авторы в результате анализа вспышки 10 сентября 2017 г. на основе данных EOVSA выявили уменьшение магнитного поля в области наиболее яркого микроволнового источника излучения. Это позволило авторам сделать вывод о высокой скорости диссипации магнитной энергии, что приводит к возникновению супер-драйсеровского электрического поля, очень эффективному нагреву плазмы и ускорению частиц. Близкие значения скорости изменения магнитного поля ( $dB/dt=1\div 10$  Гс/с) были недавно получены при радиодиагностике двух вспышек (20 января 2022 г. и 16 июля 2023 г.) на основе данных наблюдений Сибирского радиогелиографа [Смирнов, Мельников, 2024].

Между тем, в действительности питч-угловое распределение электронов во вспышечной петле может быть анизотропным как с поперечной [Melnikov et al., 2002], так и с продольной анизотропией [Morgachev et al., 2014, 2015; Shain et al., 2017]. Более того, иногда параметры плазмы и ускоренных частиц в вершине петли могут быть восстановлены только в том случае, если питч-угловое распределение энергичных электронов является анизотропным (продольным), а для изотропного распределения решения нет [Morgachev et al., 2014].

Этот факт необходимо учитывать при диагностике, закладывая дополнительные неизвестные параметры в процедуру фитирования. Это значительно усложняет процедуру восстановления, так как увеличивается количество подбираемых параметров, а значит, и необходимых для их поиска уравнений. С другой стороны, сейчас это становится возможным благодаря созданию новых многочастотных радиоинтерферометров: CPG, MUSER и EOVSA.

Стоит помнить также и об объемах вычислительных ресурсов, необходимых для решения этой задачи. Как известно, для достаточного сэмплирования в многомерном пространстве параметров необходимо учитывать количество точек (в данном случае наборов характеристик плазмы), которое значительно возрастает с увеличением размерности. В частности, для пространства размерности  $n$  ( $n$  — количество искоемых параметров) требуется порядка  $k^n$  точек, где  $k$  — количество точек, необходимых для полноценного заполнения одной размерности в рамках поставленной задачи.

Целью настоящей работы является нахождение возможных погрешностей оценок магнитного поля и параметров ускоренных электронов в предположении как изотропного, так и анизотропного распределений электронов, а также сравнение их величин для выяснения степени точности каждого из подходов.

## 1. ОПИСАНИЕ ИСПОЛЬЗУЕМЫХ МОДЕЛЕЙ

Анализ проводился с использованием двух модельных радиоисточников с разными заданными параметрами (табл. 1).

Были выбраны следующие условия. Энергетический спектр электронов задавался в виде степенного спектра с изломом на энергии  $E_{\text{break}}$ , т. е. состоящего из двух частей ( $E < E_{\text{break}}$ ,  $E > E_{\text{break}}$ ), где как высокоэнергичная, так и низкоэнергичная части описывались степенными законами с разными показателями спектра  $\delta_1$  и  $\delta_2$ . Минимальный и максимальный пределы в энергетических распределениях электронов составляют  $E_{\text{min}}=30$  кэВ и  $E_{\text{max}}=10$  МэВ.

Анализируемые однородные участки модельных источников имели одинаковую глубину  $D=3\cdot 10^8$  см, площадь  $S=2.76\cdot 10^{17}$  см<sup>2</sup> и температуру фоновой плазмы  $T=10^7$  К. Однако другие параметры (электронная концентрация фоновой плазмы  $n_0$ , напряженность магнитного поля  $B$ , угол между направлением магнитного поля и лучом зрения  $\theta$ , энергия излома  $E_{\text{break}}$  и показатели энергетического спектра электронов  $\delta_1$  и  $\delta_2$ ) в моделях различаются (см. табл. 1). При этом в модели № 2 в 8.75 раз увеличено отношение электронной концентрации плазмы к напряженности магнитного поля, по сравнению с моделью № 1 для усиления эффекта Ризина до уровня, при котором обусловленные им изменения плотности потока гиротронного излучения значительно превышают аппаратные погрешности измерений. Это обеспечивает возможность радиодиагностики концентрации фоновой плазмы.

Питч-угловое распределение электронов задавалось анизотропным в виде гауссова пучка:

$$g(\mu) = A \exp\left[-\frac{(\mu - \mu_0)^2}{\mu_1^2}\right], \quad (1)$$

где  $\mu_0 = \cos\alpha_0$ ,  $\alpha_0$  — угол между направлением скорости электронов в максимуме распределения по питч-углам и магнитным полем. Питч-угол  $\alpha_0$  принимался равным  $0^\circ$  (продольная анизотропия),  $30^\circ$  и  $90^\circ$  (поперечная анизотропия). Величина  $\mu_1$ , характеризующая ширину пучка, была принята равной 0.2. При увеличении значений до  $\mu_1 \approx 1$  и более, распределение становится практически изотропным (рис. 1). Частотные спектры гиротронного излучения модельных источников, рассчитанные для разных значений параметра  $\alpha_0$  анизотропного питч-углового распределения ( $\mu_1=0.2$ ), показаны на рис. 2–4.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В табл. 2 даны относительные отклонения восстановленных величин от заданных для каждой из двух моделей радиоисточников. Отклонения больших по величине параметров, таких как  $n_0$ ,  $n_b$ ,  $B$ , рассчитывались по формуле

$$\delta = (A_r - A_m) / A_m \cdot 100 \% \quad (2)$$

где  $A_r$  — восстановленный параметр;  $A_m$  — модельный параметр. Отклонения прочих параметров ( $\theta$ ,  $E_{\text{break}}$ ,  $\delta_1$ ,  $\delta_2$ ,  $\alpha_0$ ,  $\mu_1$ ) указывались в единицах измерения этих параметров и рассчитывались по формуле  $\Delta A = A_r - A_m$ . Из табл. 2 следует, что погрешности результатов диагностики параметров определялись в предположении как изотропного распределения

Таблица 1

Параметры модельных радиоисточников

№	$n_0, \text{см}^{-3}$	$B, \text{Гс}$	$\theta, \text{град}$	$n_b(E > 0.1 \text{ МэВ}), \text{см}^{-3}$	$E_{\text{break}}, \text{МэВ}$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\alpha_0$		
Модель № 1	1e10	350	85	2.2e5	0.3	4	8	0	30	90
Модель № 2	5e10	200	65	7.2e5	0.5	3	5			

Таблица 2

Используемая модель радиоисточника	Используемое приближение	Модельное значение $\alpha_0$	$\Delta n_0/n_{\text{см}}, \%$	$\Delta B/B_m, \%$	$\Delta \theta, \text{град}$	$\Delta n_b/n_{\text{бм}}, \%$	$\Delta E_{\text{break}}, \text{МэВ}$	$\Delta \delta_1$	$\Delta \delta_2$	$\Delta \alpha_0, \text{град}$	$\Delta \mu_1$
Модель № 1	изотропное	0°	-98.0	-90.3	+55.0	+372283	+0.4	-0.5	+3.0	-	-
		30°	-89.7	-75.1	-36.4	+881898	-0.3	-3.0	+1.7	-	-
		90°	-35.7	+0.9	-30.3	+1569.1	-0.1	+0.8	+1.5	-	-
	анизотропное	0°	-13.8	-9.2	-1.6	+117.8	+0.4	+0.4	+32.2	+22.1	-0.03
		30°	+4.1	+3.7	+8.4	-25.1	-0.02	-0.1	-0.07	-1.1	+0.01
		90°	+2.11	+5.24	+3.9	+91.2	+0.02	-0.4	+1.7	+22.9	+0.2
Модель № 2	изотропное	0°	-99.0	-40.7	+40.9	+2133	-0.04	+2.2	-2.8	-	-
		30°	$\infty$	-34.4	+42.3	+1520	-0.2	+1.1	-2.3	-	-
		90°	+10.8	+8.3	-25.3	+185.2	+0.09	+0.2	+15.6	-	-
	анизотропное	0°	+0.09	-0.02	-0.0003	-0.02	+0.002	+0.002	+0.09	+1.8	-0.00007
		30°	$\infty$	+3.8	-2.0	-2.7	+0.03	-0.1	+3.3	-14.1	+0.02
		90°	+2.7	-0.1	+0.3	+1.3	-0.03	-0.006	-1	+0.3	+0.0002

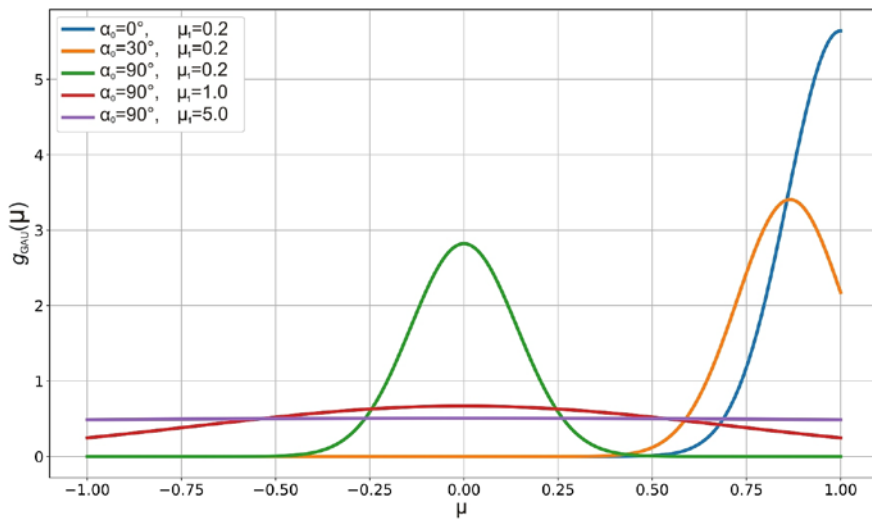


Рис. 1. Питч-угловое распределение электронов при различных значениях параметров  $\alpha_0$  и  $\mu_1$

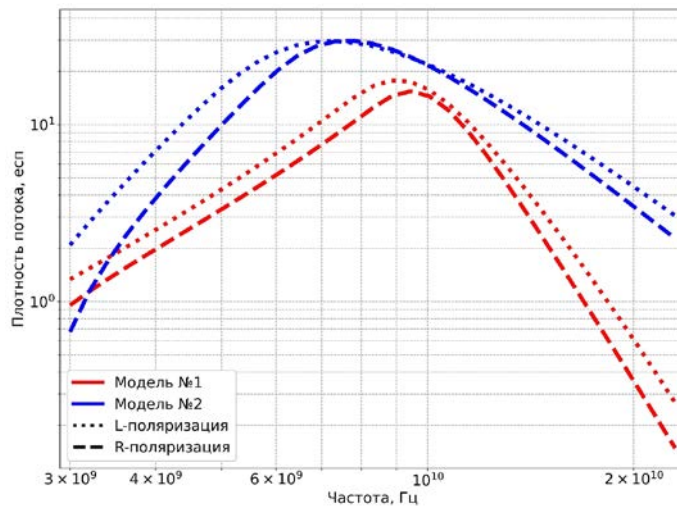


Рис. 2. Частотные спектры гиросинхротронного излучения в исследуемых модельных радиоисточниках при значении параметра  $\alpha_0=0^\circ$

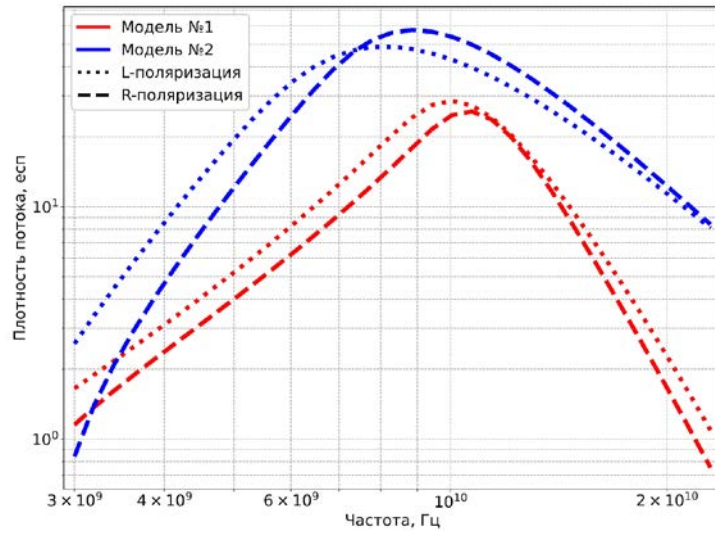


Рис. 3. Частотные спектры гиросинхротронного излучения в исследуемых модельных радиоисточниках при значении параметра  $\alpha_0=30^\circ$

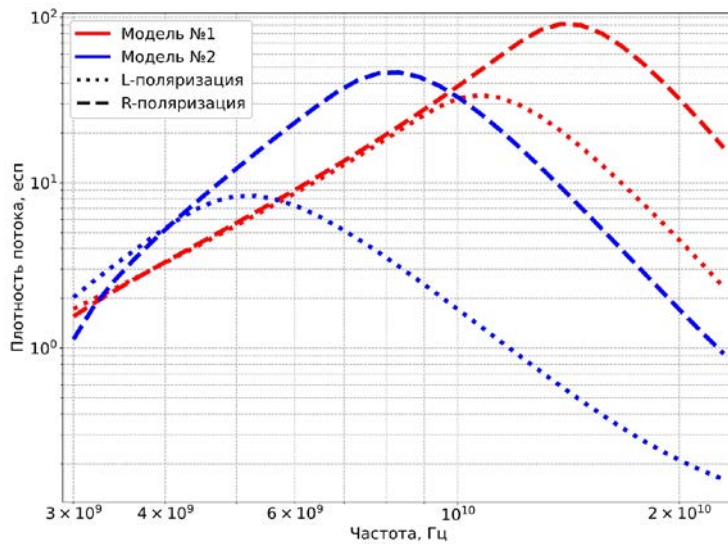


Рис. 4. Частотные спектры гиросинхротронного излучения в исследуемых модельных радиоисточниках при значении параметра  $\alpha_0=90^\circ$ .

нетепловых электронов, так и ряда анизотропных распределений ( $\alpha_0=0^\circ, 30^\circ, 90^\circ$ ).

Для каждой из двух моделей радиоисточников сравнение отклонений восстановленных параметров от заданных показывает, что учет анизотропии позволил значительно увеличить точность восстановления параметров модельных радиоисточников. Особенно это относится к следующим параметрам:

- 1) величина магнитного поля;
- 2) угол между силовыми линиями магнитного поля и лучом зрения;
- 3) концентрация ускоренных электронов;
- 4) энергия излома.

Заметное улучшение точности восстановления имеет место также для показателей энергетического спектра электронов  $\delta_1$  и  $\delta_2$ . Можно отметить, что параметр  $\mu_1$  (ширина пучка) для обеих моделей и всех значений  $\alpha_0$  при диагностике с учетом возможной анизотропии показал высокую точность восстановления.

В то же время видна тенденция увеличения погрешности некоторых параметров при малых значе-

ниях  $\alpha_0$  при восстановлении спектров в предположении изотропии. В частности, наиболее сильные отклонения от истинного значения имеют восстановленные плотность плазмы  $n_0$  (рост отклонения до 99 %) и магнитное поле  $B$  (рост отклонения до 90.3 %).

Стоит обратить особое внимание на погрешность восстановления величины магнитного поля при различных  $\alpha_0$ . Из таблицы видно, что при диагностике в предположении изотропности излучающих электронов по мере уменьшения  $\alpha_0$ , т. е. увеличения степени продольной анизотропии в радиоисточнике, погрешность восстановления  $B$  увеличивается. При этом знак отклонения восстановленной величины оказывается отрицательным ( $B$  уменьшается).

Таким образом, уменьшение степени поперечной анизотропии в радиоисточнике и увеличение степени продольной может трактоваться при диагностике в предположении изотропности излучающих электронов как уменьшение величины магнитного поля, хотя в реальности это не будет являться верным. Данное явление может быть одной из причин умень-

шения восстановленного магнитного поля [Fleishman et al., 2020, 2022; Смирнов, Мельников, 2024] во время вспышек, для которых диагностика проводилась именно в предположении изотропности, без учета возможной продольной анизотропии питч-углового распределения излучающих электронов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное численное моделирование и последующее фитирование спектров гиротронного излучения однозначно демонстрируют, что неучет возможной анизотропии питч-углового распределения нетепловых электронов приводит к систематическим и значительным ошибкам при диагностике ключевых параметров радиосточников в активных областях на Солнце. Использование подхода, учитывающего анизотропию, не просто предпочтительно, а является необходимым условием получения достоверных результатов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 22-12-00308-П. Мы благодарны коллективу Сибирского радиогелиографа за доступ к данным по зарегистрированным СРГ вспышкам, а также за всемерную помощь по их обработке и дружескую поддержку при выполнении этой работы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алтынцев А.Т., Лесовой С.В., Globa M.B. и др. Многоволновый Сибирский радиогелиограф. *Солнечно-земная физика*. 2020, т. 6, № 2, с. 37–50. <https://doi.org/10.12737/szf-62202003> / Altynstev A.T., Lesovoi S.V., Globa M.V., et al. Multiwave Siberian Radioheliograph. *Sol.-Terr. Phys.* 2020, vol. 6, iss. 2, pp. 30–40. <https://doi.org/10.12737/stp-62202003>.
- Смирнов Д.А., Мельников В.Ф. Микроволновая диагностика вспышечной плазмы методом фитирования по данным Сибирского радиогелиографа. *Солнечно-земная физика*. 2024, т. 10, № 3, с. 27–39. <https://doi.org/10.12737/szf-103202404> / Smirnov D.A., Melnikov V.F. Microwave diagnostics of flare plasma by the direct fitting method based on data from the Siberian Radioheliograph. *Sol.-Terr. Phys.* 2024, vol. 10, iss. 3, pp. 25–36. <https://doi.org/10.12737/stp-103202404>.
- Chen B., Yu S., Reeves K.K., Gary D.E. Microwave spectral imaging of an erupting magnetic flux rope: Implications for the standard solar flare model in three dimensions. *Astrophys. J. Lett.* 2020, vol. 895, p. L50. <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ab901a>.
- Fleishman G.D., Gary D.E., Chen B., et al. Decay of the coronal magnetic field can release sufficient energy to power a solar flare. *Science*. 2020, vol. 367, iss. 6475, pp. 278–280. <https://doi.org/10.1126/science.aax6874>.
- Fleishman G.D., Nita G.M., Chen B., et al. Solar flare accelerates nearly all electrons in a large coronal volume. *Nature*. 2022, vol. 606, pp. 674–677. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04728-8>.
- Gary D.E., Chen B., Dennis B.R., et al. Microwave and hard X-ray observations of the 2017 September 10 solar limb flare. *Astrophys. J.* 2018, vol. 863, no. 1, 9 p. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aad0ef>.
- Melnikov V.F., Shibasaki K., Reznikova V.E. Loop top non-thermal microwave source in extended solar flaring loops. *Astrophys. J. Lett.* 2002, vol. 580, pp. 185–188.
- Morgachev A.S., Kuznetsov S.A., Melnikov V.F. Radio diagnostics of the solar flaring loop parameters by direct fitting method. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2014, vol. 54, iss. 7, pp. 933–942. <https://doi.org/10.1134/S0016793214070081>.
- Morgachev A.S., Kuznetsov S.A., Melnikov V.F., Simoes J.A. Modeling the distribution of circular polarization degree of solar flare loops in event 19 July 2012. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2015, vol. 55, iss. 8, pp. 1118–1123. <https://doi.org/10.1134/S0016793215080228>.
- Shain A.V., Melnikov V.F., Morgachev A.S. The role of quasi-transverse propagation in observed polarization of flare loop microwave radiation. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2017, vol. 57, pp. 988–995. <https://doi.org/10.1134/S0016793217080217>.
- Yan Y., Chen Z., Wang W., et al. Mingantu spectral radioheliograph for solar and space weather studies. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*. 2021, vol. 8, 584043. <https://doi.org/10.3389/fspas.2021.584043>.

### Как цитировать эту статью:

Смирнов Д.А., Мельников В.Ф. Возможные погрешности в восстановленных методом фитирования параметрах радиосточника, связанные с анизотропностью распределения электронов. *Солнечно-земная физика*. 2026, т. 12, № 2, с. 119–123. <https://doi.org/10.12737/szf-122202612>.