УДК 523.985.7-77
DOI 10.62955/0135-3748-2026-52
ORCID: 0009-0009-5676-5022, 0009-0000-5873-8786, 0000-0001-9664-0552

# РАДИОВСПЛЕСКИ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ В ХОДЕ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ

**У.С. Зюзина[1], Б.А. Самофалова[2], Е.Г. Куприянова[1,3]**

[1]Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия,
zyuzinaylyana@gmail.com
[2]Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия
Samofalova.bela@mail.ru
[3]Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия
elenku@bk.ru

# RADIO BURSTS OF VARIOUS TYPES DURING A SOLAR FLARE

**U.S. Zyuzina[1], B.A. Samofalova[2], E.G. Kupriyanova[1,3]**

[1]St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia,
zyuzinaylyana@gmail.com
[2]Kazan Federal University, Kazan, Russia
Samofalova.bela@mail.ru
[3]Central (Pulkovo) Astronomical Observatory RAS, Saint-Petersburg, Russia
elenku@bk.ru

**Аннотация.** По данным радиоспектрографов HiRAS и e-CALLISTO проанализирована солнечная вспышка 24 февраля 2011 г. Найдено, что ее сопровождали радиовсплеск II типа, группа всплесков III типа, а также дрейфующая пульсирующая структура. Разработаны программы обработки спектрограмм и пересчета частоты всплеска в высоту с использованием трех различных моделей электронной плотности солнечной атмосферы. Оценены скорости частотного дрейфа радиовсплесков. Получено, что скорость процесса, вызывающего всплеск II типа, примерно на 30 % меньше скорости одновременно наблюдающегося коронального выброса массы. Найдено, что частотные дрейфы двух ветвей отдельных всплесков III типа имеют противоположное направление.

**Ключевые слова:** Солнце, динамические радиоспектры, радиовсплески, модели солнечной атмосферы, скорость частотного дрейфа.

**Abstract.** The solar flare of February 24, 2011, was analyzed using data from the HiRAS and e-CALLISTO radio spectrographs. It was found that the flare was accompanied by a type II radio burst, a chain of type III radio bursts, and a drifting pulsating structure. Software was developed to process spectrograms and convert the burst frequency to height above the photosphere using three different models of electron density in the solar atmosphere. The frequency drift for each type of burst was estimated. It was found that the speed of the process responsible for the type II burst was approximately 30% slower than the speed of the simultaneously observed coronal mass ejection. The frequency drifts of the two branches in each individual type III burst were found to be opposite.

**Keywords**: Sun, dynamic radio spectra, radio bursts, solar atmosphere models, frequency drift rate.

## ВВЕДЕНИЕ

Работа рассматривает одну из основных задач физики Солнца — диагностику процессов высвобождения, перераспределения и переноса энергии солнечной вспышки. Ключевыми параметрами вспышечного процесса являются объем области энерговыделения, временной масштаб, градиент параметров плазмы поперек магнитного поля и местоположение источника первичного энерговыделения. Особым диагностическим потенциалом для оценки этих величин обладают квазипериодические быстрые бегущие волновые пакеты [Nakariakov et al., 2024]. Форма волнового пакета и его вейвлет-спектр несут информацию, необходимую для проверки моделей пересоединения и высвобождения энергии.

Объектом нашего исследования является вспышка, зарегистрированная 24 февраля 2011 г. В рамках предыдущих работ по этому событию были идентифицированы КУФ-волновые пакеты и глобальная корональная волна [Zhou et al., 2022]. Кроме того, в радиодиапазоне для этого события наблюдался отклик, в котором были отождествлены вейвлет-спектры с характерным дрейфом по периоду осцилляций волнового пакета [Dmitriev et al., 2026]. Однако особенности радиоизлучения, в котором наблюдались волновые пакеты, не были определены. Поэтому поставлена задача получения количественных оценок скоростей дрейфа радиовсплесков различных типов, а также их сопоставления с уже имеющимися данными о процессах в этой вспышке.

## ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ И МЕТОДЫ ИХ ОБРАБОТКИ

Для анализа солнечной вспышки в радиодиапазоне были использованы данные радиоспектрографов HiRAS, e-CALLISTO/BLEN7M и e-CALLISTO/OOTY. Причина рассмотрения нескольких независимых инструментов, расположенных в разных частях земного шара, — в том, чтобы убедиться, что наблюдаемое явление действительно является солнечным радиовсплеском, а не инструментальным шумом, помехой техногенного происхождения или атмосферным явлением.

Для того чтобы исследовать вспышку в широком диапазоне частот, в качестве основного был выбран японский радиоспектрограф HiRAS, состоящий из трех независимых инструментов: HiRAS-1 (20–70 МГц, частотное разрешение 0.05 МГц), HiRAS-2 (50– 550 МГц, 0.5 МГц) и HiRAS-3 (500–2500 МГц, 2.0 МГц). Временное разрешение для всех трех инструментов составляет 1 с.

В дополнение к нему были использованы данные трех станций международной сети радиоспектрографов e-CALLISTO: станции BLEN7M (175–870 МГц) и PHENIX3-B1 (1000–2000 МГц, Швейцария), а также станция OOTY (45–445 МГц, Индия). Инструменты e-CALLISTO имеют более высокое временное разрешение (0.25 с) и лучше подходят для более тонкого исследования временной структуры радиовсплесков. Частотное разрешение e-CALLISTO в среднем хуже, чем у HiRAS (3.48±1.79 МГц).

Для обработки и анализа спектрограмм разработаны программы на языке Python. С целью получения единой широкополосной спектрограммы данные трех инструментов HiRAS были объединены, а зоны перекрытия по частотам обрезаны. Кроме того, данные HiRAS-1 и HiRAS-3 были интерполированы к шагу 0.5 МГц для корректного отображения ширины спектра для разных радиовсплесков. В результате получена непрерывная спектрограмма в диапазоне 20–2500 МГц с равномерным шагом 0.5 МГц (рис. 1). Отметим, что показан не весь частотный диапазон, а только тот, в пределах которого наблюдаются солнечные радиовсплески.

Важной особенностью e-CALLISTO является неравномерность частотной оси и возможное округление шагов по времени и частоте. Поэтому для точного определения координат каждого пикселя спектрограммы используется бинарная таблица, хранящаяся в отдельном блоке FITS-файла, содержащая точные значения времени и частоты.

Ключевой интерактивной возможностью программы является оценка скорости частотного дрейфа радиоизлучения и сопоставление полученной оценки с моделями солнечной атмосферы. Это позволяет количественно охарактеризовать движение источника излучения в короне Солнца.

## АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ РАДИОСПЕКТРОВ

Частотно-временной дрейф вычисляется как отношение разности частот к разности времен между двумя выбранными вручную точками на спектрограмме: $df/dt = (f_2 - f_1)/(t_2 - t_1)$, где $f_1$, $f_2$ — частоты двух точек в МГц; $t_1$, $t_2$ — соответствующие моменты времени в секундах. Полученные отрезки показаны на рис. 1. По величине дрейфа были отождествлены следующие типы радиовсплесков: быстро дрейфующие всплески III типа с противоположными направлениями дрейфа; медленно дрейфующие всплески II типа, соответствующие излучению на плазменной частоте *f* и второй гармонике *h*; дрейфующие пульсирующие структуры (DPS); всплески в дециметровом диапазоне (DCIM) с временной структурой волнового пакета. Полученные оценки $df/dt$ даны в таблице.

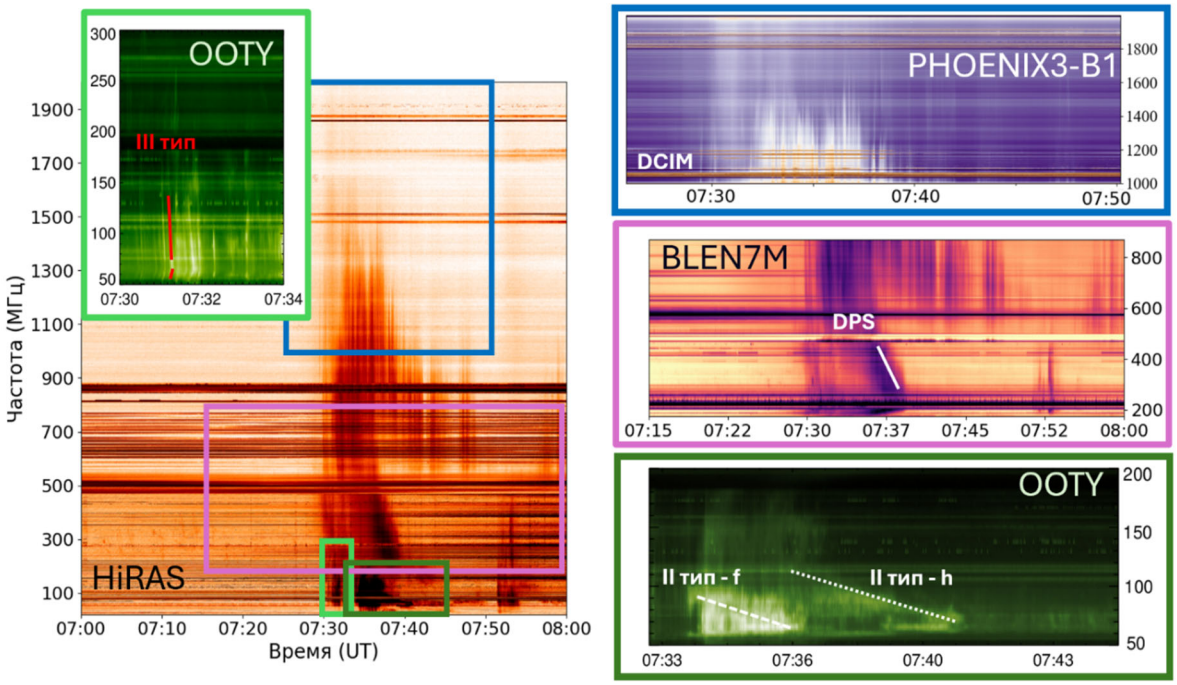


*Рис 1.* Динамические радиоспектры в ходе солнечной вспышки 24 февраля 2011 г. Большая панель слева — спектрограмма HiRAS во всем диапазоне частот в интервале 07:00–08:00 UT. Цветные прямоугольники, наложенные поверх спектрограммы, — дополнитшгельные спектрограммы других инструментов. Цвета рамок дополнительных спектрограмм соответствуют цветам прямоугольников на спектрограмме HiRAS. На всех панелях по вертикальной оси отложена частота в МГц

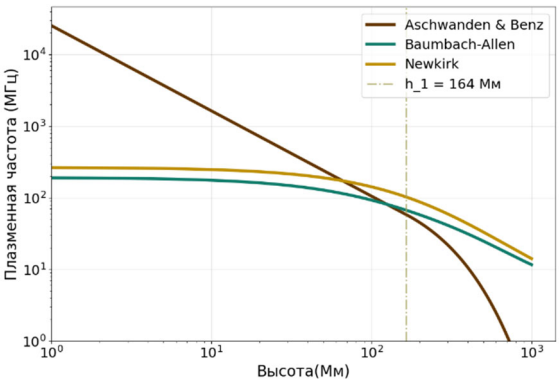


*Рис 2.* Зависимость плазменной частоты от высоты над уровнем фотосферы для трех моделей электронной плотности

## МОДЕЛИ СОЛНЕЧНОЙ АТМОСФЕРЫ

Наблюдаемый дрейф *df/dt* связан со скоростью источника радиоизлучения через модели плотности короны. Мы рассматриваем три базовые модели, описывающие зависимость электронной плотности $n_e$ от высоты (рис. 2). Отметим, что по вертикальной оси отложена не $n_e$, а плазменная частота $f_p$=8.98 · $10^{-3}\sqrt{n_e}$ МГц.

Модель Aschwanden, Benz [Aschwanden, 2002], показанная коричневой кривой, предполагает, что в нижней короне ($h < h_1$) плотность убывает по степенному закону, а в верхней ($h > h_1$) — по экспоненциальному:

$$n_{e_Asch}(h)=\begin{cases} n_1(h/h_1)^{-p} \text{ for } h<h_1 \\ n_Q \exp(-h/\lambda_T) \text{ for } h>h_1 \end{cases}$$

где $h$ — высота над фотосферой, $h_1 \approx 164$ Мм — высота перехода (вертикальная прямая на рис. 2), $n_Q$=4.6 · $10^8$см$^{-3}$, $\lambda_T$=6.9 · $10^9$см, $n_1=n_Q \cdot \exp(-p)$ и $p$=2.38. Такая структура характерна для активных областей и корональных петель, где на малых высотах плотность повышена, а на больших переходит в гидростатическое равновесие, свойственное спокойной короне.

Модель Baumbach—Allen [Baumbach 1937, Allen 1947], выраженная суммой трех степенных членов (бирюзовая кривая), и модель Newkirk [Newkirk 1967], имеющая показательный вид (желтая кривая), описывают плотность спокойной солнечной короны

$$n_{e_BA}=10^8(0.036r^{-1.5}+1.55r^{-6}+2.99r^{-16}),$$

$$n_{e_Nk}=4.2 \cdot 10^4 \cdot 10^{\frac{4.32}{r}},$$

где $r$ — расстояние от центра Солнца, выраженное в радиусах Солнца.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Полученные по спектрограммам оценки скоростей $V$ источников радиоизлучения для трех моделей атмосферы представлены в таблице в столбцах 4 [км/с], а также 5 [% от скорости света $c$]. Следует отметить, что интерактивный метод определения параметров радиовсплесков (отметка точек на спектрограмме вручную) вносит элемент субъективности с точки зрения выбора положения отрезков на спектрограмме. Разброс полученных значений скоростей достаточно велик (20 %), поэтому в таблице приведены типичные значения $V$. Погрешности, указанные в столбце 2, связаны с дискретностью осей времени и частоты. При пересчете скорости частотного дрейфа $df/dt$ в скорости источника излучения $V$ с учетом дискретности шкалы высот в моделях атмосферы погрешность скорости для медленно дрейфующих событий является малой величиной (<0.1 %), и в таблице не указана. Исключение составляют всплески III типа, где погрешность велика.

Скорости частотного дрейфа и движения радиовсплесков по моделям плотности

| Событие | *df/dt* [МГц/с] | Модель | *V* [км/с] | *V/c* [%] |
|---|---|---|---|---|
| DPS | –1.28 ± 0.02 | Aschwanden & Benz | 220 | 0.1 |
| | | Baumbach—Allen | – | – |
| | | Newkirk | 640 | 0.2 |
| Всплеск II типа ($f = f_p$) | –0.22± 0.01 | Aschwanden & Benz | 360 | 0.1 |
| | | Baumbach-Allen | 670 | 0.2 |
| | | Newkirk | 800 | 0.3 |
| Всплеск II типа ($f = 2f_p$) | –0.28 ± 0.01 | Aschwanden & Benz | 360 | 0.1 |
| | | Baumbach—Allen | 790 | 0.3 |
| | | Newkirk | 880 | 0.3 |
| Всплеск III типа | –8.00 ± 1 | Aschwanden & Benz | 25000 ± 2000 | 8 ± 1 |
| | | Baumbach—Allen | 59000 ± 4000 | 20 ± 2 |
| | | Newkirk | 65000 ± 5000 | 22 ± 3 |
| Всплеск III типа | +1 ± 0.2 | Aschwanden & Benz | 6 ± 1 | 2 ± 0.2 |
| | | Baumbach—Allen | 20 ± 2 | 7 ± 1 |
| | | Newkirk | 21 ± 2 | 7 ± 1 |

## ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Скорости источников радиоизлучения позволяют связать наблюдаемые на спектрограмме радиовсплески с определенными физическими процессами. Быстро дрейфующие всплески III типа вызваны потоками заряженных частиц, ускоренных во время вспышки до субрелятивистских скоростей. Медленно дрейфующие радиовсплески II типа связывают с ударными волнами, сопровождающими корональные выбросы массы (КВМ). Дрейфующие пульсирующие структуры ассоциируются с процессом магнитного пересоединения в токовом слое. Мы отметили следующие особенности этих радиоструктур.

Оцененная по спектрограмме скорость источника радиовсплеска II типа оказалась примерно на 30 % ниже скорости КВМ, одновременно наблюдавшегося коронографом LASCO C2 ($V \approx 1300$ км/с) [URL1]. Такое расхождение может быть объяснено несколькими причинами. Во-первых, скорость КВМ оценивается по его лидирующему краю фронта, тогда как источник радиоизлучения II типа может быть связан с флангами или хвостовой частью выброса. Косвенным подтверждением служит сложная, многокомпонентная структура полос излучения, соответствующих основной и второй гармоникам плазменной частоты. Во-вторых, используемые модели электронной плотности построены в приближении сферически-симметричной короны, однако по данным LASCO видно, что КВМ распространялся в области стримера, где плотность плазмы повышена. Это искажает результаты перевода частоты в высоту и, следовательно, влияет на оценку скорости. Если, например, в модели Baumbach—Allen повысить концентрацию всего в 1.2 раза, скорости триггерных событий станут 1310 км/с, что соответствует скорости КВМ.

Радиовсплески III типа характеризовались необычной структурой частотного дрейфа, каждый из которых состоял из двух ветвей с противоположными знаками. Ветви начинались на разных частотах (55 и 200–250 МГц) и сходились вместе на частоте порядка 65 МГц за время порядка 1–1.5 с. Такая динамика радиовсплесков свидетельствует либо о том, что ускорение происходит в разных концах сильно вытянутого токового слоя [Li et al., 2025] в противоположных направлениях.

Радиоизлучение DPS на частотах 200–500 МГц с большой вероятностью происходит во второй гармонике плазменной частоты ($f_{\mathrm{obs}}=2f_p$). Скорость DPS, составляющая, согласно модели Aschwanden—Benz, 220 км/с, отражает скорость процесса магнитного пересоединения в токовом слое в сторону больших высот.

Кроме того, волновые пакеты [Dmitriev et al. 2026], наблюдаются в DCIM-всплесках на высотах 12–40 Мм. Отдельные всплески пульсирующей структуры ассоциируются с актами ускорения электронов. Модуляция всей пульсирующей структуры свидетельствует о модуляции волновым пакетом процесса ускорения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ


Allen C.W. Interpretation of electron densities from corona brightness // Monthly Not. Royal Astron. Soc. 1947. V. 107. P. 426.

Aschwanden M.J. Particle acceleration and kinematics in solar flares — A synthesis of recent observations and theoretical concepts (Invited Review) // Space Sci. Rev. 2002. V. 101, N 1. P. 1–227.

Baumbach S. Strahlung, Ergiebigkeit und Elektronendichte der Sonnenkorona // Astronomische Nachrichten. 1937. V. 263, N 6. P. 121.

Dmitriev V.A. et al. Detector for fast wave trains in the solar radio emission // Philosophical Transactions A. 2026. Принято в печать. Препринт arXiv. 2026. arXiv:2605.13728.

Nakariakov V.M. et al. Diagnostics of the solar coronal plasmas by magnetohydrodynamic waves: magnetohydrodynamic seismology // Rev. of Modern Plasma Physics. 2024. V. 8, N 1. P. 19.

Newkirk G. Structure of the solar corona // Annual Rev. Astron. Astrophys. 1967. V. 5. P. 213.

Li S. et al. Extreme-ultraviolet wave and quasiperiodic pulsations during an eruptive M-class flare // Astrophys. J. 2025. V. 993, N 1. P. 99.

Zhou X. et al. Observations of a flare-ignited broad quasiperiodic fast-propagating wave train // Astrophys. J. Lett. 2022. V. 930, N 1. P. L5.

URL1: https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/UNIVERSAL_ver2/2011_02/htpng/20110224. 074805 .p096g.htp.html (дата обращения 27.05.2026).