Секция А. Астрофизика и физика Солнца. БШФФ-2026. С. 33–36.

УДК 523.985
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-33

ИССЛЕДОВАНИЕ ВАРИАЦИЙ СКОРОСТЕЙ ЭЛЕКТРОНОВ В СОЛНЕЧНЫХ РАДИОВСПЛЕСКАХ III ТИПА

М.Ю. Бауман[3], Л.К.Кашапова[1, 2]

[1]Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия
[2]Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия
[3]Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия
baumanmary40@gmail.com

STUDYING VELOCITY VARIATIONS OF ELECTRONS IN SOLAR TYPE III RADIO BURSTS

M.Yu. Bauman[3], L.K. Kashapova[1,2]

[1]Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia,
[2]Irkutsk State University, Irkutsk, Russia
[3]Kazan (Volga region) Federal University, Kazan, Russia
baumanmary40@gmail.com

Аннотация. В работе представлены результаты анализа изменения скоростей электронов в радиовсплесках III типа. Моделирование процессов генерации солнечных радиовсплесков III типа предсказывает, что должны наблюдаться вариации скоростей электронов, измеренных в разных диапазонах частот. Для проверки распространенности такого сценария были проведены измерения скоростей в разных частотных диапазонах метрового радиоспектра для группы событий, наблюдавшихся спектрополяриметром SOLARSPEL Радиоастрофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН в диапазоне 50–3000 МГц. Показано соответствие поведения скоростей электронов результатам расчетов, и получено подтверждение, что данное свойство должно учитываться при интерпретации численных параметров плазмы, полученных из наблюдений.

Ключевые слова: радиовсплески III типа, вариации скоростей, SOLARSPEL.

Abstract. This paper presents the results of analysis of variations in electron velocities of type III radio bursts. Modeling the generation processes of type III radio bursts predicts that these variations in different frequency bands should be observed. To test the prevalence of this scenario, we measured velocities in different bands of the meter-wave radio spectrum for a group of events observed by the SOLARSPEL spectropolarimeter of the ISTP SB RAS Radio Astrophysical Observatory in the 50–3000 MHz band. The behavior of electron velocities is shown to be consistent with the results of calculations; it has been confirmed that this property should be taken into account when interpreting numerical plasma parameters obtained from observations.

Keywords: type III radio bursts, velocity variations, SOLARSPEL.

ВВЕДЕНИЕ

Солнечная вспышка — это комплексное явление, представляющее собой быстрое выделение энергии, включающее ускорение частиц, нагрев и движение плазмы. Согласно стандартной модели вспышки, от места начального энерговыделения, расположенного на уровне короны, происходит ускорение частиц и их распространение в нижние слои атмосферы и внешние слои короны. Радиовсплески III типа формируются потоком ускоренных электронов, который распространяется вдоль силовых линий магнитного поля в верхнюю корону и межпланетное пространство. Механизм формирования излучения — плазменный, в два этапа. Сначала пучок электронов генерирует продольные плазменные (ленгмюровские) волны, когда сталкивается с ионами плазмы. Затем эти волны трансформируются в поперечные электромагнитные волны в метровом радиодиапазоне [Reid, Ratcliffe, 2014]. Согласно современным представлениям о физике солнечных вспышек, оценки энергии электронов, полученные из анализа рентгеновского излучения и динамических спектров метрового диапазона, должны быть близки. Однако в большинстве случаев энергии, полученные из анализа метрового радиоизлучения, ниже энергий по данным в рентгеновском диапазоне [Raoult et al., 1988]. Результаты моделирования [Reid, Kontar, 2018] показали, что на разных частотах доминирующий вклад в излучение радиовсплесков могут вносить электроны с разной скоростью. Это может приводить к тому, что оценки скоростей электронов, полученные в разных частотных диапазонах, различаются и могут зависеть от плотности потока электронов, их распределения по скоростям и топологии магнитного поля активной области.

Цель настоящего исследования — оценить распространенность вариаций скоростей электронов в зависимости от частоты на примере группы солнечных радиовсплесков III типа, произошедших в разное время в разных активных областях.

ДАННЫЕ И МЕТОДИКА АНАЛИЗА

В работе использованы наблюдения, полученные с помощью спектрополяриметра SOLARSPEL [Алтынцев и др., 2020], расположенного в Радиоастрофизической обсерватории им. профессора Г.Я. Смолькова в урочище Бадары (Республика Бурятия). Прибор наблюдает в диапазоне частот 50 МГц–24 ГГц, мы

использовали данные диапазона 50–200 МГц.

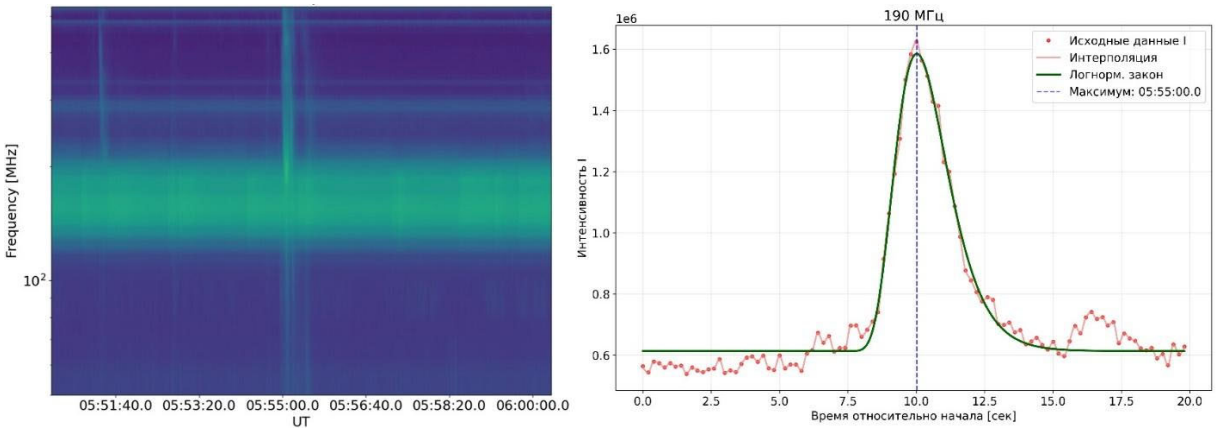

Рис. 1. Спектр радиовсплеска III типа, произошедшего 22.07.2024 г. (слева), и временной профиль всплеска на частоте 190 МГц, аппроксимированный функцией логнормального распределения (справа)

Исследованные нами радиовсплески III типа произошли в период с 22.07 по 17.09 2024 г. (11 событий). Динамический спектр одного из событий (22.07.2024) представлен на рис. 1 (слева). Для расчета скоростей электронов, сгенерировавших радиовсплеск III типа, необходимо определить временную задержку *dt* между сигналами на разных частотах. Для этого строились временные профили для нескольких частот всплеска (с интервалом 1–20 МГц) и определялись времена их максимумов. Профили хорошо аппроксимируются графиком логнормального распределения, имеющим асимметричную форму (временное разрешение 0.01 с). Выбор распределения объясняется тем, что передний фронт временного профиля радиовсплеска III типа связан с наиболее энергичными электронами, генерирующими всплеск, а задний фронт — с затуханием излучения из-за процессов передачи энергии плазменным и электромагнитным волнам. Временной профиль и логнормальное распределение для события 22.07.2024 на частоте 190 МГц представлены на рис. 1.

Для оценки скорости электронов по динамическому спектру мы воспользовались связью плотности плазмы и частоты излучения, соответствующей плазменному механизму:

$$N_e = \left(\frac{f}{2\cdot 8.98}\right)^2,$$

где N_e — фоновая концентрация (плотность) электронов в короне Солнца в м$^{-3}$, а f —частота излучения в Гц. Поскольку в большинстве случаев излучение радиовсплесков III типа соответствует второй гармонике, мы делим частоту на два.

Далее нужно было получить расстояние, которое проходят электроны. Для этого мы рассчитали высоты формирования излучения на разных частотах [Reeve, 2018], используя модель [Newkirk, 1961]:

$$R = \frac{4.32R_0}{lg(\alpha N_e / (4.2\cdot 10^4 \cdot \quad)},$$

где $R_0 = 6.69\cdot 10^8$ м — радиус Солнца, α = 3 — коэффициент увеличения электронной плотности для умеренно активного Солнца.

Зная высоты формирования излучения на двух частотах, мы рассчитали путь, который прошел поток электронов:

$$h = R_1 - R_2,$$

где R_1 и R_2 — высоты, соответствующие первой и второй частотам.

Скорость движения потока электронов в долях скорости света можно получить по стандартной формуле

$$v_c = h / (dt \cdot c),$$

где *dt* — задержка между сигналами на двух частотах в секундах, *c* — скорость света, $3\cdot 10^8$ м/с. Таким образом, получив задержки для набора частот, мы рассчитали скорости потока электронов для нескольких интервалов частот для всех исследуемых событий и проследили их динамику.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На рис. 2 представлено сравнение с теоретическими расчетами вариаций измеренных скоростей электронов для событий, для которых удалось получить оценки во всем диапазоне частот (50–300 МГц), и для событий, для которых удалось получить надежные измерения только для частот ниже 150 МГц. Для сравнения на графики нанесены теоретические кривые изменения скоростей из работы [Reid, Kontar, 2018]. На графиках отчетливо видна вариация скоростей электронов с частотой, которая значительно выше пределов ошибки расчета скоростей, показанных для каждого измерения. Заметим, что маленькие ошибки измерения связаны с использованием логнормального распределения с разрешением 0.01 с, которое позволило повысить точность измерений.

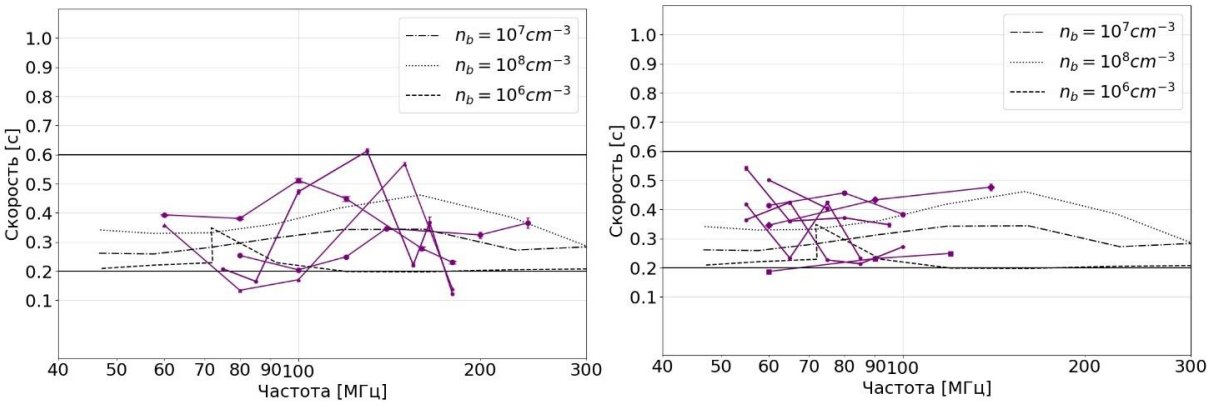

Рис. 2. Сравнение с теоретическими расчетами вариаций измеренных скоростей электронов для событий, для которых удалось получить оценки во всем диапазоне частот (50–300 МГц) (слева), и для событий, для которых удалось получить надежные измерения только для частот ниже 150 МГц (справа)

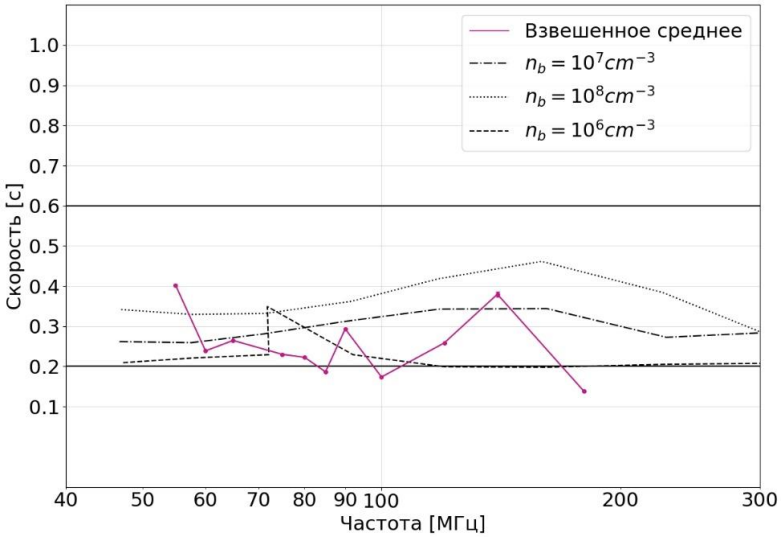

Рис. 3. Динамика средневзвешенных значений скоростей для всех 11 событий

На рис. 3 представлены вариации средневзвешенных значений скоростей, полученных по всем исследованным событиям. Значения весов для получения этих величин рассчитывались как обратно пропорциональная величина квадрата погрешности расчета скоростей, т. е. чем меньше погрешность измеренной скорости, тем больше ее вес. На рисунке также видна динамика скоростей электронов.

Отметим, что значения скоростей электронов, сгенерировавших исследуемые радиовсплески III типа, лежат преимущественно в пределах от 0.2*c* до 0.6*c*. Это согласуется с результатами моделирования в работе [Reid, Kontar, 2018], где, согласно расчетам, наблюдается увеличение скорости до 0.5*c*–0.7*c* на частоте 150–160 МГц. Наблюдаемое увеличение может быть связано с тем, что передний фронт электронного пучка, генерирующего радиовсплеск III типа, продолжает ускоряться и на высотах, соответствующих плазменному излучению на этих частотах, достигает максимальной скорости. Затем наблюдается уменьшение скоростей, которое указывает на уменьшение энергии генерирующих их электронов. Это может быть обусловлено как потерей энергии электронов при взаимодействии с плазмой, так и увеличением с высотой объема, в котором происходит взаимодействие потока ускоренных электронов с плазмой. При увеличении этого объема концентрация электронов с высокими энергиями может упасть настолько, что их вклад в сигнал радиовсплесков будет незаметен на фоне вклада менее энергичных электронов. Наблюдается также небольшое увеличение скорости на низких частотах 50–60 МГц, что может быть следствием как уменьшения числа низкоэнергетичных электронов за счет столкновений, так и рассеяния радиоволн на низких частотах.

На основании проведенного анализа можно сделать вывод о том, что скорость электронов, определенная по различным интервалам частот, различается и для большинства событий в области 100–150 МГц наблюдается ее максимум. Это может быть причиной различий между параметрами плазмы, полученными из наблюдений в метровом и рентгеновском диапазонах. Полученные результаты могут быть использованы для диагностики структуры солнечной короны в активных областях, где наблюдаются радиовсплески III типа.

Авторы выражают благодарность Институту солнечно-земной физики СО РАН за предоставление данных спектрополяриметра SOLARSPEL. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Reid H.A.S., Ratcliffe H. A Review of solar type III radio bursts // Res. Astron. and Astrophys. 2014. V. 14, N 7. P. 1–3

Reid H.A.S., Kontar E.P. Spatial expansion and speeds of type III electron beam sources in the solar corona // Astrophys. J. 2018. V. 867, N. 2. P. 6–9.

Алтынцев А.Т. и др. Многоволновый Сибирский радиогелиограф // Солнечно-земная физика. 2020. Т. 6, № 2. С. 37–50.

Reeve W.D. Analysis of a type II solar radio burst observed on 20 October 2017 // Reeve Radio Observatories [сайт]. 2018. URL: https://www.reeve.com/Documents/CALLISTO/Reeve_TypeII-Burst.pdf (дата обращения 06.07.2026).

Raoult A., et al. Relative timing of microwave bursts and metric type III bursts. Implication on the energy of type III burst exciter // Solar Phys. 1988. V. 120, N 1. P. 135.

Newkirk G.Jr. The solar corona in active regions and the thermal origin of the slowly varying component of solar radio radiation // Astrophys. J. 1961. V. 133, N. 3. P. 983.