

УДК 524.338

## ОБНАРУЖЕНИЕ БЫСТРЫХ РАДИОВСПЛЕСКОВ НА РАДИОТЕЛЕСКОПЕ БСА ФИАН

© 2019 г. В. А. Федорова\*, А. Е. Родин\*\*

*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,  
Пушчинская радиоастрономическая обсерватория АКЦ ФИАН, Пушкино, Россия*

Поступила в редакцию 31.05.2018 г.; принята в печать 22.06.2018 г.

В работе приведены результаты поиска одиночных импульсных сигналов на радиотелескопе БСА ФИАН на частоте 111 МГц в период с июля 2012 г. по май 2018 г. Использовался метод свертки данных с шаблоном заданной формы и последующей сверткой с пробной мерой дисперсии. Для анализа данных был выбран участок с центральными координатами  $\alpha = 05^h 32^m$ ;  $\delta = +41.72^\circ$ , а также участок неба с ранее зафиксированными импульсами FRB 121102 ( $\alpha = 05^h 32^m$ ;  $\delta = +33.1^\circ$ ). Всего в каждом луче было обработано 355 часов наблюдений. В ходе обработки удалось зарегистрировать три радиовсплеска с мерой дисперсии 247 пк/см<sup>3</sup>, 570 пк/см<sup>3</sup> и 1767 пк/см<sup>3</sup>.

DOI: 10.1134/S0004629919010031

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время поиск быстрых радиовсплесков (FRB) — одно из актуальных направлений современной астрофизики, и в первую очередь это связано с загадочной природой этих явлений. Первое событие FRB было зарегистрировано в 2007 г. в архивных данных радиотелескопа обсерватории Паркс, полученных по программе поиска пульсаров [1]. Естественная природа этого и других всплесков [2, 3] была поставлена под сомнение, так как принятые сигналы были единичными и имели параметры, схожие с перитонами [4]. После регистрации повторного сигнала FRB 121102 [5] вопрос об искусственном происхождении явления был снят, а центральное место в исследовании занял вопрос о том, какие процессы могут порождать столь мощные импульсы.

В ходе исследования явлений FRB было предложено несколько механизмов возникновения подобных радиовсплесков [6, 7]. FRB 121102 — явление, которое заинтересовало многих исследователей. В связи с многократными повторениями события в течение нескольких лет удалось достаточно точно установить координаты участка неба, откуда приходят импульсы. Эта область также была исследована с помощью оптических телескопов “Хаббл” и 8,2-метрового телескопа Subaru. В результате удалось определить, что источник

FRB 121102 находится в месте активного звездообразования практически в центре неправильной карликовой галактики на расстоянии более трех миллиардов световых лет [8].

Следует отметить, что большое внимание уделяется теоретическим моделям, сценарии которых удовлетворяют всем параметрам быстрых радиовсплесков. Сейчас известно более двух десятков различных моделей, но большинство исследователей выделяют ту, где явления FRB — это не что иное, как гигантские импульсы пульсаров [9].

На данный момент известно 33 события FRBs. Все они имеют меру дисперсии в пределах от 176.4 пк/см<sup>3</sup> до 2596.1 пк/см<sup>3</sup>. Это говорит о том, что большинство сигналов имеют внегалактическое происхождение. Длительность импульса всех событий не превышает нескольких миллисекунд. Пока все обнаруженные сигналы зафиксированы на частотах 700 МГц — 8 ГГц.

Одной из важных характеристик, объединяющей сигналы FRB, является их яркость: пиковое значение потока у подавляющего большинства всплесков лежит в пределах 0.3–8 Ян. Несмотря на сходство параметров FRB, можно выделить несколько особенных случаев. Так удалось зафиксировать три всплеска, имеющих пиковое значение потока в несколько раз больше указанных значений. Например, для FRB 150807 эта величина составляет 120 Ян [10].

При анализе явлений FRB 110523, FRB 140514 и FRB 150807 удалось измерить круговую и линейную поляризацию [10]. При наблюдении сиг-

\*E-mail: fedorova-astrofis@mail.ru

\*\*E-mail: rodin@prao.ru

нала FRB 121102 были трижды зафиксированы повторные импульсы из наблюдаемого участка неба [5, 11]. В апреле 2018 г. было зафиксировано явление FRB 180411 с рекордным соотношением сигнал/шум, которое составило 411 [12]. Импульс был зарегистрирован с помощью радиотелескопа RT-64 в Парксе (Австралия) на частоте 1.4 ГГц.

Основной задачей данной работы является анализ массива данных, полученных на радиотелескопе БСА ФИАН в ходе патрулирования мерцаний радиоисточников на неоднородностях межпланетной плазмы, с целью обнаружения импульсных сигналов со свойствами, аналогичными быстрым радиовсплескам.

В последующих разделах описываются технические характеристики радиотелескопа БСА ФИАН, приводятся результаты численного моделирования по обнаружению сигнала заданной формы на фоне белых шумов, а также показаны результаты обработки данных в период с 2012 по 2018 г.

## 2. АППАРАТУРА

БСА ФИАН — это меридианный радиотелескоп, один из самых высокочувствительных радиотелескопов метрового диапазона волн. С 2000 г. рабочий диапазон инструмента  $111 \text{ МГц} \pm 1.25 \text{ МГц}$ . Флуктуационная чувствительность радиотелескопа в полосе приема 2.5 МГц при временном разрешении 0.1 с составляет 140 мЯн [13]. Для регистрации сигнала используется многоканальный цифровой приемник, который позволяет вести запись сигнала в двух режимах. Первый режим записи — режим с относительно низким частотным разрешением с использованием шести частотных каналов с полосой приема 415 кГц каждый. При этом временной интервал между отсчетами составляет 100 мс. Данные, полученные в таком режиме, используются для непрерывного мониторинга мерцающих источников. При регистрации сигнала во втором режиме используются 32 частотных канала с полосой приема 78 кГц и временным разрешением 12.5 мс. Как в первом, так и во втором режимах используется цифровая обработка сигналов на основе процессора БПФ на 512 отсчетов. В рамках данной работы использовались данные, запись которых велась с временным разрешением 100 мс.

Для исследования большого числа межпланетных мерцаний компактных радиоисточников в режиме мониторинга была создана стационарная 96-лучевая диаграмма направленности (ДН-3), которая перекрывает область неба от  $-9^\circ$  до  $42^\circ$  по склонению. Ширина луча диаграммы направленности по половинному уровню зависит от склонения, на котором находится наблюдаемый источник, и находится в пределах  $24'$  до  $48'$ . Время прохождения источника через диаграмму направленности

составляет 4–7 минут. Максимальная эффективная площадь антенны ( $47\,000 \text{ м}^2$ ) реализуется в зените и уменьшается к горизонту пропорционально  $\cos z$ , где  $z$  — зенитное расстояние. Температура собственных шумов системы колеблется в пределах 550–3500 К и зависит от фона неба. Преимуществом радиотелескопа БСА ФИАН для поиска сигналов, аналогичных FRB, является большое поле зрения ( $\sim 50$  кв.гр.), а также непрерывный и круглосуточный мониторинг неба и сохранение данных на сервере для последующей их обработки.

## 3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Математическое моделирование обнаружения импульсного сигнала включало в себя несколько этапов. Поскольку импульсный сигнал при распространении в межзвездной среде испытывает рассеяние на неоднородностях среды, форма принимаемого сигнала отличается от формы начального импульса. В нашем случае параметры модели рассеяния импульсного сигнала зависят от меры дисперсии  $DM$ , центральной частоты приема и ширины канала. Зависимость величины рассеяния импульса от меры дисперсии  $DM$  на частоте 110 МГц  $t_s = 0.06 \left(\frac{DM}{100}\right)^{2.2}$  была взята из работы Кузьмина и др. [14]. Для моделирования сигнала была сгенерирована последовательность из 3000 точек, что с учетом интервала выборки  $\Delta t = 0.1$  с в среднем соответствует 5 минутам прохождения наблюдаемого источника через диаграмму направленности БСА.

Если принять модель тонкого экрана [15], то импульсная характеристика рассеивающей среды описывается затухающей экспонентой

$$h = \frac{1}{t_s} e^{-\frac{t}{t_s}}. \quad (1)$$

Принимаемый импульс определяется сверткой излученного импульса, который можно представить в виде дельта-функции, с передаточной функцией среды [15]

$$F(t) = \frac{1}{t_s} \int e^{-\frac{t}{t_s}} \delta(t - \tau) d\tau, \quad (2)$$

где  $t$  — время задержки прихода сигнала на отдельный частотный канал. В качестве примера на рис. 1 приводится график функции  $F(t)$ , представляющий рассеянный импульс, приходящий на каждый из шести частотных каналов. Для моделирования была использована величина  $DM = 360 \text{ пк/см}^3$ , которая дает значение  $t_s = 1 \text{ с}$ .

Принимаемый импульс, который в дополнение к рассеянию испытывает дисперсионное запаздывание в среде распространения, принимается в конечной полосе частот, что приводит к его уширению, которое также можно записать в виде свертки

**Таблица 1.** Параметры зарегистрированных импульсов

Дата	Координаты (J2000), $\alpha, \delta$	Мера дисперсии, пк/см <sup>3</sup>	С/Ш	Пиковая плотность потока, Ян	Энергия, Ян мс	Рассеяние $t_s$ , с	Красное смещение $z$
18.10.2015	0521 + 33.1	570 ± 5	6.2	1.4	3500	0.275	0.273
20.09.2016	0534 + 41.7	1767 ± 4	9.1	0.22	1100	4.33	1.973
06.06.2017	0534 + 41.7	247 ± 4	8.3	0.54	1890	0.275	0.057

принятого импульса  $F(t)$  с П-образной функцией, которая представлена в виде произведения двух функций  $\sigma(t)$  — функций Хевисайда (функция единичного скачка)

$$\Pi(t) = \sigma(t - \tau_{i-1})\sigma(\tau_i - t), \quad (3)$$

где  $\tau_i$  — время прихода на граничной частоте  $i$ -го частотного канала. Величина  $\Delta\tau = \tau_i - \tau_{i-1}$ , ( $i = 1, 2, 3, \dots, 6$ ) — уширение импульса в полосе. На рис. 2 показаны импульсы, искаженные уширением в частотных каналах и смещенные из-за дисперсионного запаздывания. Специально следует отметить, что величины уширения в полосе  $\Delta\tau$  и рассеяния  $t_s$  совершенно по-разному зависят от  $DM$ :  $\sim DM$  и  $\sim DM^{2.2}$  соответственно  $\Delta\tau = t_s$  при  $DM \approx 320$  пк/см<sup>3</sup>. Поэтому для  $DM \lesssim 320$  пк/см<sup>3</sup> главный вклад в размывание импульса вносит уширение в полосе, а для  $DM \gtrsim 320$  пк/см<sup>3</sup> — рассеяние в среде.

На следующем этапе на уширенный с дисперсионной задержкой импульс накладывались шесть реализаций аддитивного белого шума различной амплитуды. Для моделирования задавался различный уровень отношения сигнал/шум от 0.1 до 5, который соответствовал реальным наблюдениям. В зависимости от амплитуды диспергированного

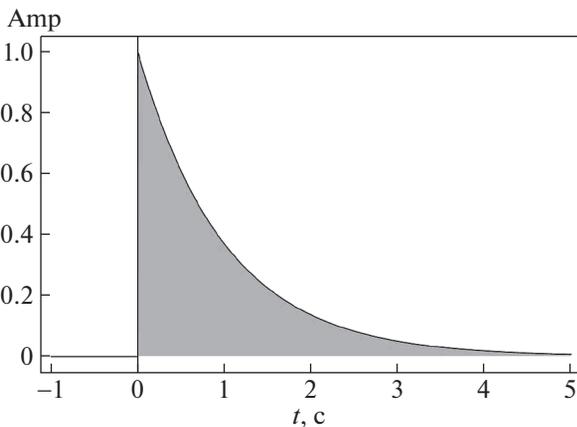
импульса и задаваемой величины С/Ш рассчитывается уровень среднеквадратичного отклонения аддитивного шума. На рис. 3 показан пример зашумленных импульсных сигналов в шести частотных каналах.

В связи с тем, что обработка данных занимает достаточно продолжительное время, было решено сравнить несколько методов выделения импульсного сигнала с точки зрения продолжительности обработки и эффективности обнаружения. Применялось три подхода для выделения импульсного диспергированного сигнала: попарная кросс-корреляция импульсов в частотных каналах с последующим сложением, кросс-корреляция зашумленного импульса с шаблоном с последующим сложением и кросс-корреляция зашумленного импульса с шаблоном и сложение с компенсацией меры дисперсии (рис. 4). Из рис. 4 видно, что при одинаковом значении уровня входного шума последний способ кросс-корреляции с шаблоном позволяет выделить сигнал с максимальным соотношением сигнал/шум в сравнении с остальными двумя. Поэтому было решено остановиться на этом методе несмотря на самое продолжительное время обработки.

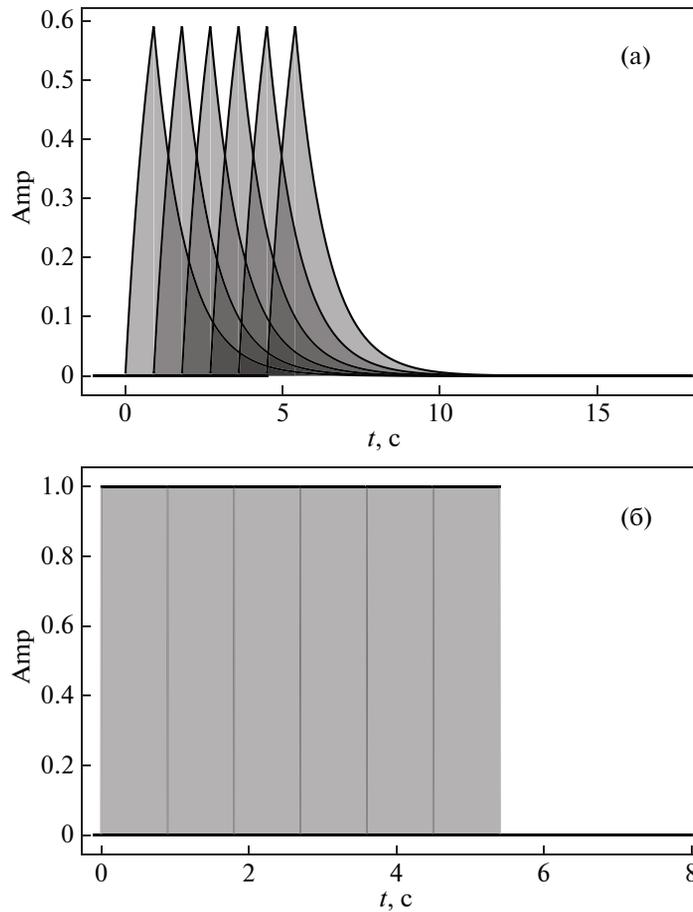
#### 4. ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Обработка данных проводилась в несколько этапов. Изначально вносились поправки, учитывающие небольшие отклонения плоскости расположения лучей радиотелескопа БСА ФИАН от меридиана места, а также прецессию. Далее из записей продолжительностью час вычитался фон, сглаженный с помощью медианного фильтра.

Для поиска быстрых радиовсплесков обрабатывались записи шести частотных каналов с временным разрешением 0.1 с. Анализировались ежедневные данные в двух из 96 лучей диаграммы направленности антенны в период с июля 2012 г. по май 2018 г. В первом случае использовались записи второго луча ( $\delta = +41.72^\circ$ ) ДН БСА. Из часовой записи был выделен участок с центральными координатами  $\alpha = 05^h 32^m \pm 10^s$ ;  $\delta = +41.72^\circ$ . Во втором случае анализировался участок в 22 луче ( $\delta = +33.25^\circ$ ) с координатами известного явления

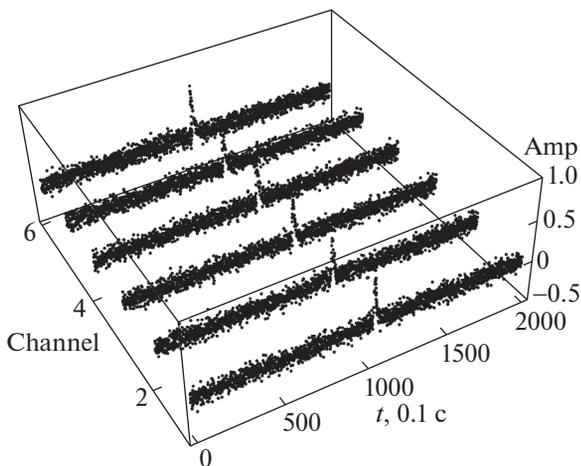


**Рис. 1.** Моделирование прихода импульсного сигнала на каждый из шести частотных каналов радиотелескопа БСА ФИАН. Величина рассеяния импульса  $t_s = 1$  с, что соответствует  $DM = 360$  пк/см<sup>3</sup>.



**Рис. 2.** а) Моделирование искажения формы импульса и задержки в каждом из шести частотных каналов радиотелескопа БСА ФИАН; б) П-образная функция, показывающая уширение импульса в шести частотных каналах для  $DM = 360 \text{ пк/см}^{-3}$ . Уширение в канале равно  $\Delta\tau_{DM=360} = 0.8 \text{ с}$ .

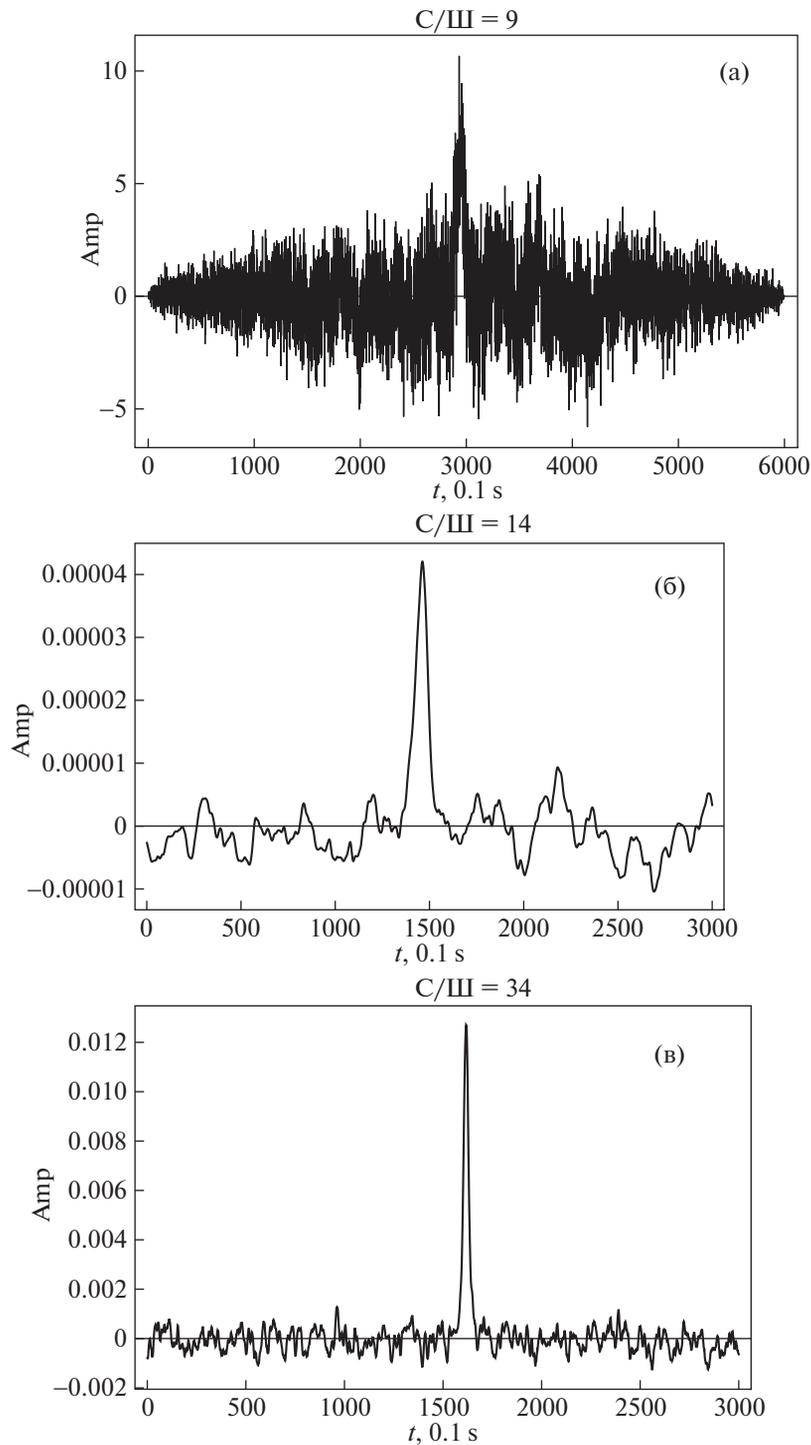
FRB 121102  $\alpha = 05^{\text{h}}32^{\text{m}} \pm 10^{\text{m}}$ ;  $\delta = +33.25^{\circ}$ . Таким образом, было проанализировано 355 часов записи в каждом луче.



**Рис. 3.** Модель полученного импульса на фоне белого шума в шести частотных каналах.

В качестве проверки корректной работы программы для определения событий FRB весь разработанный алгоритм был протестирован на двух вариантах предполагаемых импульсов: на часовую запись БСА ФИАН накладывались модели искомого сигнала с  $DM = 360 \text{ пк/см}^3$  и  $DM = 2000 \text{ пк/см}^3$  (рис. 5а и 5б). Далее проверка была проведена и на реальном объекте — пульсаре В2154+40 (рис. 5в и 5г). Во всех случаях используемый метод позволил уверенно выделить импульсный сигнал.

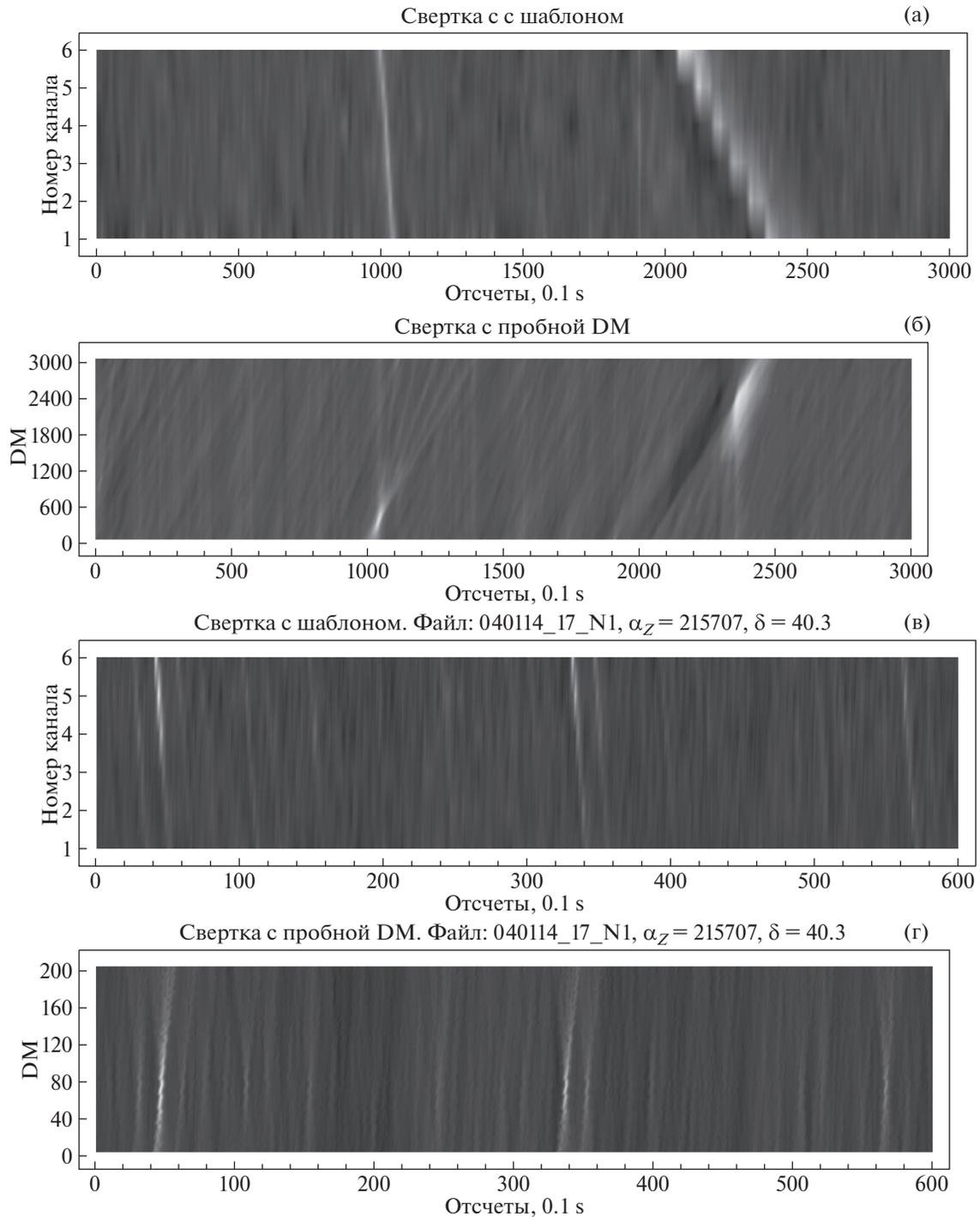
На следующем этапе анализировался пятиминутный участок с центральными координатами, указанными выше. Каждая запись первоначально сворачивалась с шаблоном, полученным в рамках математического моделирования с  $DM = 360 \text{ пк/см}^3$ . Свертка с шаблоном разной формы, соответствующей разным величинам  $t_s$ , не производилась, так как это многократно увеличило бы время обработки. Эта операция производилась уже после обнаружения импульсов для уточнения величин рассеяния  $t_s$ , приведенных в таблице. Затем



**Рис. 4.** Суммарный импульс, полученный в результате: а) попарной кросс-корреляции шести частотных каналов без компенсации меры дисперсии; б) кросс-корреляции с шаблоном без компенсации меры дисперсии; в) кросс-корреляции с шаблоном и с компенсацией меры дисперсии.

производилась свертка с пробной мерой дисперсии в диапазоне от 0 до 3000 пк/см<sup>3</sup> с шагом 50. Далее производился визуальный анализ результатов, полученных в ходе свертки с пробной *DM*, который заключался в поиске диспергированного сигнала в

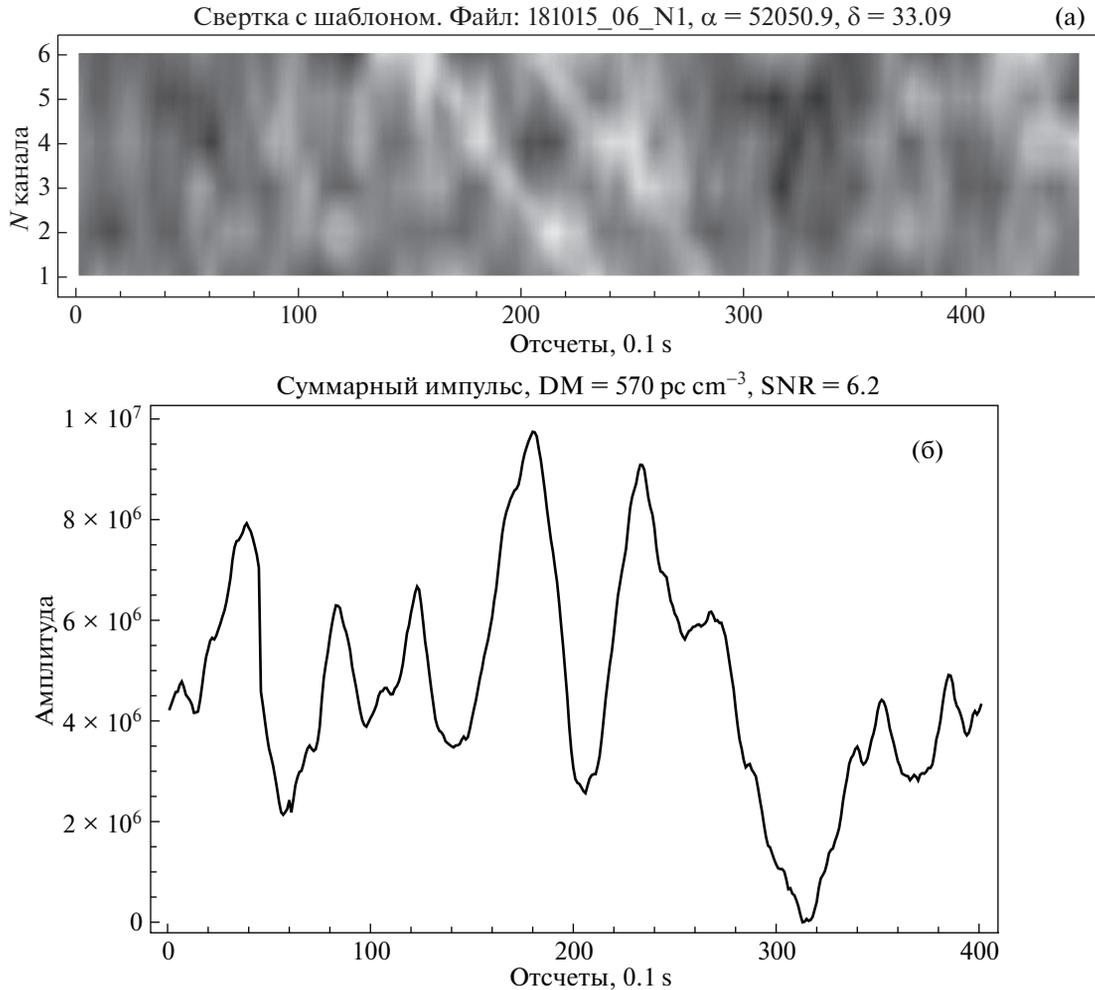
записях, свернутых с шаблоном и наличии сигнала повышенной амплитуды в данных, свернутых с пробной мерой дисперсии. Затем для найденных сигналов уточнялась мера дисперсии и строился интегральный импульс.



**Рис. 5.** а) Свертка с шаблоном модели искоемых импульсов с мерой дисперсии  $360 \text{ пк/см}^3$  и  $2000 \text{ пк/см}^3$ . б) Свертка импульсов с пробной мерой дисперсии. Искомая мера дисперсии хорошо определяется на графике в виде светлых участков, яркость которых зависит от интенсивности сигнала. в) Пример свертки импульсов пульсара B2154+40 с шаблоном. Из часовой записи выбирался участок длительностью наблюдений 60 секунд, на котором хорошо видны отдельные импульсы. Изображение (г) демонстрирует результат свертки импульсов пульсара B2154+40 с пробной мерой дисперсии. Данный пульсар имеет  $DM = 78 \text{ пк/см}^3$ .

Для более точной оценки плотности потоков найденных радиовсплесков использовался метод сравнения с калибровочной ступенькой и калибро-

вочным источником. Калибровочная ступенька — это эталонный шумовой сигнал, который добавляется в запись каждые четыре часа. В качестве



**Рис. 6.** а) Динамический спектр импульса с  $DM = 570 \text{ пк/см}^3$ , обнаруженного 18.10.2015. б) Суммарный профиль импульса с  $DM = 570 \text{ пк/см}^3$ . Пиковая плотность потока 1.4 Ян, галактические координаты  $b = 173.53^\circ$ ,  $l = -2.04^\circ$ , рассеяние  $t_s = 0.275 \text{ с}$ .

калибровочного источника был выбран ЗС 48, находящийся в том же луче, что и FRB 121102. В результате определения плотности потока ЗС 48 было получено значение потока в пределах погрешности, не превышающей 10%.

Возможное попадание импульсов между лучами БСА или не в центр диаграммы направленности антенны не учитывалось. Поэтому приведенные в таблице пиковые плотности потоков необходимо рассматривать, как нижний предел.

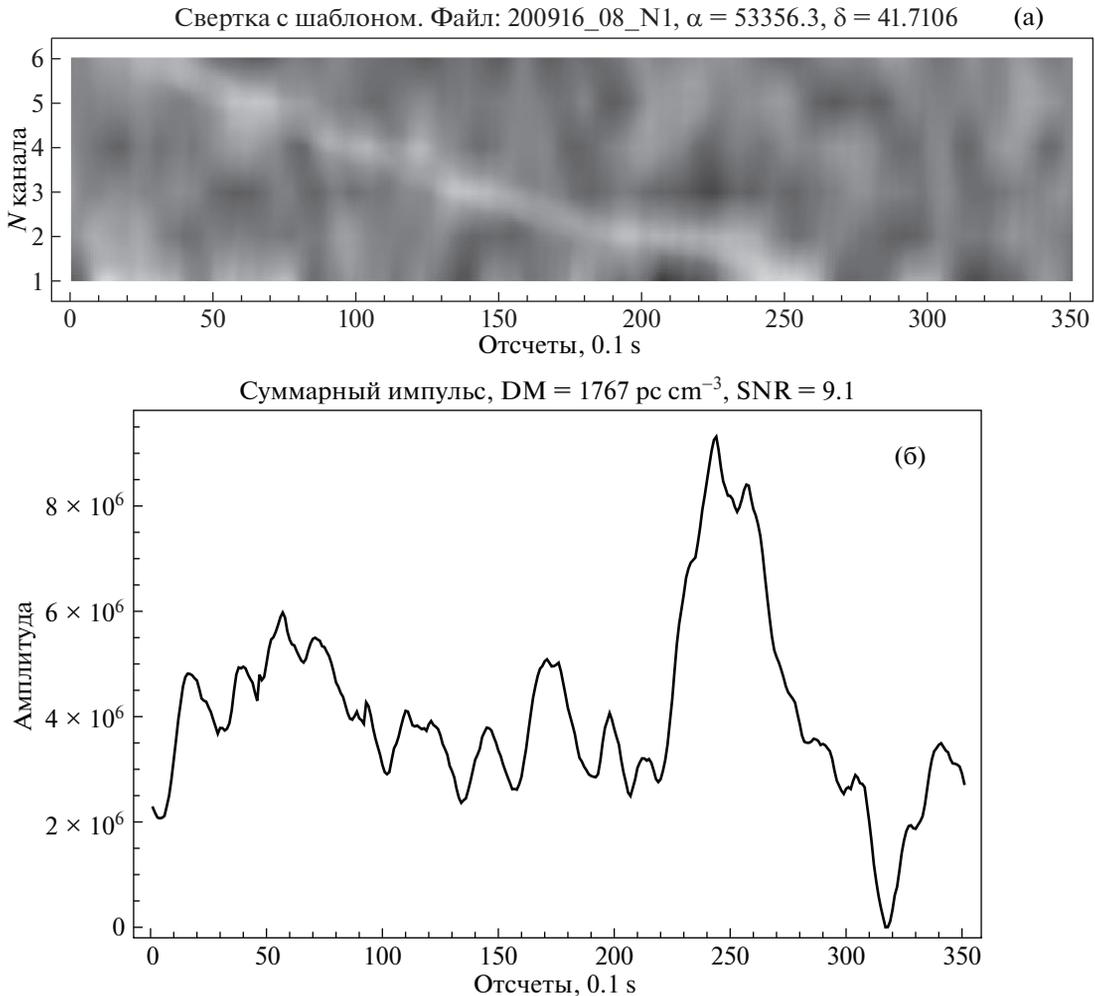
### 5. РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате визуального анализа было выделено три события с  $DM \ 247 \text{ пк/см}^3$ ,  $570 \text{ пк/см}^3$  и  $1767 \text{ пк/см}^3$  (рис. 6–8) [16]. Поскольку поиск FRB производился на низких частотах, при больших мерах дисперсии импульс имеет значительное уширение. Также предполагалось, что на наблюдаемой частоте пиковая плотность потока всплесков

находится практически на пределе чувствительности радиотелескопа БСА ФИАН. Это означает, что напрямую зарегистрировать сигнал при таких условиях не представляется возможным. Поэтому применялась свертка с шаблоном фиксированной формы. В результате профили каждого из импульсов на рис. 7 имеют практически одинаковую ширину. Следует также отметить, что, используя такой подход, мы регистрируем только верхнюю часть импульса, так как экспоненциальный “хвост” сигнала в шумах не обнаруживается.

Опираясь на модель YMW16 (см. статью [17]), удалось сделать оценку красного смещения  $z$  для всех трех импульсов, которое определялось как

$$z = \frac{DM_{IGM}H_0}{c \cdot n_{IGM}} = \frac{[DM - (DM_{Gal} + DM_{MC} + DM_{Host})]H_0}{c \cdot n_{IGM}}, \quad (4)$$



**Рис. 7.** а) Динамический спектр импульса с  $DM = 1767 \text{ пк/см}^3$ , обнаруженного 20.09.2016. б) Суммарный профиль импульса с  $DM = 1767 \text{ пк/см}^3$ . Пиковая плотность потока  $0.22 \text{ Ян}$ , галактические координаты  $b = 167.9^\circ$ ,  $l = +4.78^\circ$ , рассеяние  $t_s = 4.78 \text{ с}$ .

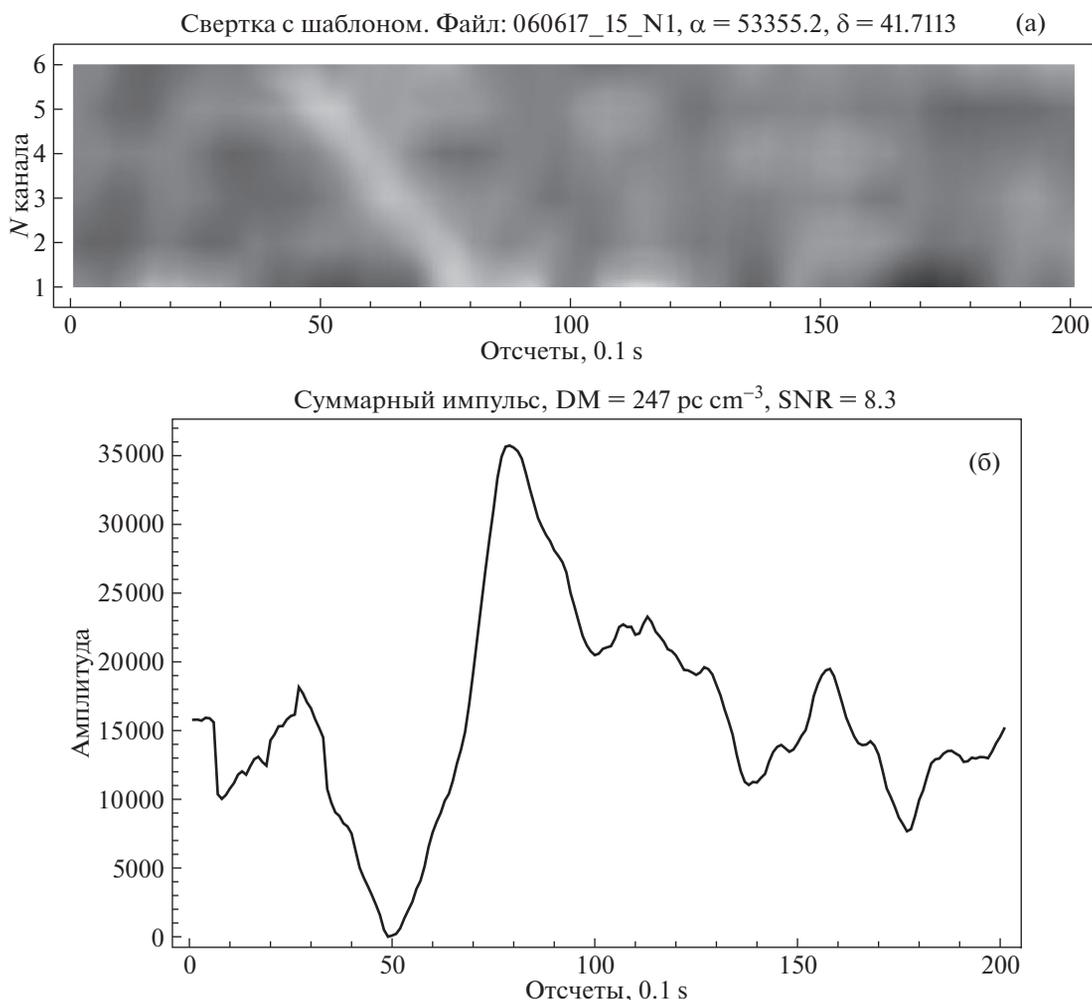
где  $DM$  — мера дисперсии, наблюдаемого FRB,  $DM_{\text{Gal}}$  — полная мера дисперсии на луче зрения к FRB,  $DM_{\text{MC}}$  — вклад меры дисперсии Магелланова Облака,  $DM_{\text{IGM}}$  — вклад межгалактической среды,  $DM_{\text{Host}}$  — мера дисперсии галактики, в которой зафиксирован FRB,  $H_0$  — постоянная Хаббла ( $H_0 = 67.3 \text{ км/с/Мпк}$ ),  $n_{\text{IGM}}$  — концентрация электронов ( $n_{\text{IGM}} = 0.16 \text{ м}^{-3}$ ). Также была получена оценка соотношения С/Ш и оценка пиковой плотности потока каждого импульса. Прямое восхождение импульсов относится к шестому частотному каналу с  $f = 111.5 \text{ МГц}$ . Результаты всех оценок и вычислений приведены в таблице.

## 6. ОБСУЖДЕНИЕ

Все зафиксированные импульсы с измеренной мерой дисперсии и пиковой плотностью потоков

имеют параметры, схожие с параметрам ранее открытых явлений FRB. Таким образом, мы полагаем, что все три сигнала не что иное, как новые быстрые радиовсплески, впервые зарегистрированные на низкой частоте. На данный момент остро стоит вопрос о спектральном индексе этих событий. Неоднократно выдвигалось предположение о том, что величина плотности потока растет к высоким частотам. На основе измеренных плотностей потока можно сделать предположение, что спектр обнаруженных радиовсплесков имеет околонулевой спектральный индекс или поток, медленно растущий к низким частотам. Обнаружения всплесков с помощью радиотелескопа БСА ФИАН на частоте  $111 \text{ МГц}$  подтверждают этот факт.

С момента открытия первого быстрого радиовсплеска и до настоящего времени в ходе теоретических исследований было предложено большое число моделей, описывающих механизм генерации мощных импульсов в виде FRB на космологиче-



**Рис. 8.** а) Динамический спектр импульса с  $DM = 247 \text{ пк/см}^3$ , обнаруженного 06.06.2017. б) Суммарный профиль импульса с  $DM = 247 \text{ пк/см}^3$ . Пиковая плотность потока  $0.54 \text{ Ян}$ , галактические координаты  $b = 167.9^\circ$ ,  $l = +4.78^\circ$ , рассеяние  $t_s = 0.275 \text{ с}$ .

ских расстояниях [9, 18–20]. Несколько механизмов образования быстрых радиовсплесков предполагают их регистрацию только на высоких частотах; в области низких частот сигнал слабый и зарегистрировать его практически невозможно [21–23]. С открытием всплесков на низкой частоте на модели, в рамках которых события имеют поток, растущий к высоким частотам, теперь накладываются ограничения. К таким моделям можно отнести, например, перетекание вещества аккреционного диска вокруг компактного объекта в тесных двойных системах, слияние заряженных черных дыр, слияние белых карликов. Эти же ограничения можно применить и к сценариям, в которых быстрые радиовсплески — это послесвечения гравитационно-волновых событий.

Одной из основных целей работы являлась попытка регистрации импульсов известного явления FRB 121102. При обработке данных в площадке с центральными координатами  $\alpha = 05^h 32^m$ ,

$\delta = +33.1^\circ$  удалось зарегистрировать импульс с мерой дисперсии  $570 \text{ пк/см}^3$ . В пределах погрешности эта величина согласуется с мерой дисперсии события FRB 121102. Отдельно следует выделить две составляющие импульса. Так как исследователям неоднократно удавалось фиксировать несколько импульсов от явления FRB 121102 за один сеанс наблюдений, то двойной профиль сигнала не противоречит природе этого повторяющегося всплеска.

## 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты данной работы таковы:

1. Разработан алгоритм поиска быстрых радиовсплесков в метровом диапазоне на радиотелескопе БСА ФИАН.
2. Обработан участок неба с известным явлением FRB 121102: за 355 часов наблюдений

в площадке с центральными координатами  $\alpha = 05^h 32^m$ ;  $\delta = +33.1^\circ$  зарегистрирован сигнал с  $DM = 570$  пк/см<sup>3</sup>, что в пределах погрешности соответствует мере дисперсии импульсов FRB 121102, которая варьируется в пределах от 555 пк/см<sup>3</sup> до 568.8 пк/см<sup>3</sup> по данным FRB Catalogue. Из таблицы видно, что прямое восхождение  $\alpha$  зарегистрированного нами импульса отличается от прямого восхождения FRB 121102 на  $10^m$ . На этом основании можно рассматривать два варианта. В первом случае можно говорить о том, что мы повторно зарегистрировали сигнал от события FRB 121102 в одном из боковых лепестков. Тогда можно предположить: если бы импульс был зарегистрирован в главном лепестке диаграммы направленности БСА, то его пиковая плотность потока должна быть в несколько раз больше, что в очередной раз подтверждает наше предположение о спектральном индексе. Во втором случае можно рассуждать об абсолютно новом зарегистрированном импульсе.

3. В общей сложности в период с июля 2012 г. по май 2018 г. зарегистрированы три быстрых радиовсплеска с мерами дисперсии 247 пк/см<sup>3</sup>, 570 пк/см<sup>3</sup>, 1767 пк/см<sup>3</sup>. Остальные параметры импульсов приведены в таблице.

Исследования В.А. Федоровой поддержаны грантом РФФИ № 16-29-13074.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. D. R. Lorimer, M. Bailes, M. A. McLaughlin, D. J. Narkevic, and F. Crawford, *Science* **318**, 777 (2007).
2. D. J. Champion, E. Petroff, M. Kramer, M. J. Keith, *et al.*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **460**, L30 (2016).
3. L. G. Spitler, J. M. Cordes, J. W. T. Hessels, D. R. Lorimer, *et al.*, *Astron. J.* **790**, 9 (2014).
4. S. Burke-Spolaor, M. Bailes, R. Ekers, J.-P. Macquart, and F. Crawford III, *Astrophys. J.* **727**, 5 (2011).
5. P. Scholz, L. G. Spitler, J. W. T. Hessels, S. Chatterjee, *et al.*, *Astrophys. J.* **833** (177), 17 (2016).
6. Wei-Min Gu, Yi-Ze Dong, T. Liu, R. Ma, and J. Wang, *Astrophys. J. Lett.* **823**, L28 (2016).
7. B. D. Fields, S. L. Shapiro, and J. Shelton, *Phys. Rev. Lett.* **113**, 151302 (2014).
8. M. Kokubo, K. Mitsuda, H. Sugai, S. Ozaki, *et al.*, *Astrophys. J.* **844**, 95, (2017).
9. S. B. Popov and M. S. Pshirkov, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **462**, L16 (2016).
10. V. Ravi, R. M. Shannon, M. Bailes, K. Bannister, *et al.*, *Science*, **354**, 1249 (2016).
11. S. Chatterjee, C. J. Law, R. S. Wharton, S. Burke-Spolaor, *et al.*, *Nature* **541**, 58 (2017).
12. S. Osłowski, R. M. Shannon, A. Jameson, G. Hobbs, *et al.*, *The Astronomer's Telegram*, No. 11396 (2018).
13. В. В. Орешко, Г. А. Латышев, И. А. Алексеев, Ю. А. Азаренков, Б. И. Иванов, В. М. Карпов, В. И. Кастромин, *Труды ИПА* **24**, 80 (2012).
14. А. Д. Кузьмин, Б. Я. Лосовский, К. А. Лапаев, *Астрон. журн.* **84**, 685, (2007).
15. Л. Уилсон, К. Рольфс, С. Хюттемейстер *Инструменты и методы радиоастрономии* (Москва Физматлит, Москва, 2013).
16. А. Е. Родин, В. А. Федорова, В. А. Самодуров, С. В. Логвиненко, *Астрон. циркуляр* **1**, 1641, (2018).
17. J. M. Yao, R. N. Manchester, and N. Wang, *Astrophys. J.* **29**, 835, (2017).
18. D. Thornton, B. Stappers, M. Bailes, B. R. Barsdell, *et al.*, *Science*, **6141**, 53 (2013).
19. H. Yu and F. Y. Wang, *Astron. and Astrophys.* **606**, A3 (2017).
20. M. Houde, A. Mathews, and F. Rajabi, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **475** (1), 514 (2018).
21. Y. Zhang, J.-J. Geng, and Y.-F. Huang, *Astrophys. J.* **858** (2), 88 (2018).
22. L.-B. Li, Y.-F. Huang, J.-J. Geng, and B. Li, *Research in Astron. Astrophys.* **18**, 61 (2018).
23. S. Bhattacharyya, preprint arXiv:1711.09083.