

**Обнаружение быстрых радиовсплесков на БСА ФИАН****А.Е. Родин<sup>1</sup>, В.А. Фёдорова<sup>1</sup>, В.А. Самодуров<sup>1,2</sup>, С.В. Логвиненко<sup>1</sup>***<sup>1</sup>Пушчинская радиоастрономическая обсерватория,  
Астрокосмический центр, Физический институт имени П.Н. Лебедева  
Российской Академии наук, Пушчино, Московская область, 142290, Россия  
E-mail: rodin@pra0.ru**<sup>2</sup>Национальный исследовательский университет  
“Высшая школа экономики”, Москва, Россия*

Поступила в редакцию 23 мая 2018 г.

**Резюме.** В работе приведены результаты поиска одиночных импульсных сигналов на радиотелескопе БСА ФИАН на частоте 111 МГц в период 2012–2018 гг. Для анализа данных были выбраны окрестности FRB 121102 ( $\alpha = 05^{\text{h}}32^{\text{m}}$ ,  $\delta = 33^{\circ}05'$ ), а также площадка с центром  $\alpha = 05^{\text{h}}32^{\text{m}}$ ,  $\delta = 41^{\circ}40'$ . В ходе обработки зарегистрировано три радиовсплеска с мерой дисперсии  $DM=247$ , 570 и 1767 пк см<sup>-3</sup>.

**Введение**

В настоящее время поиск и изучение быстрых радиовсплесков (fast radio bursts – FRB) является одним из самых актуальных направлений современной астрофизики. В значительной степени это связано с загадочной природой этих явлений. Первый FRB был открыт в 2007 году в архивных данных обсерватории Паркс (Австралия), полученных по программе поиска пульсаров [1]. После регистрации повторного сигнала FRB 121102 [2] вопрос об искусственном происхождении явления был снят, и главным стал вопрос происхождения столь мощных импульсов. С помощью оптических телескопов Хаббл и Субару удалось достаточно точно установить координаты области неба, откуда приходят импульсы. Оказалось, что источник FRB 121102 находится в месте активного звездообразования в центре неправильной карликовой галактики.

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, сходными с FRB.

**Аппаратура**

Радиотелескоп БСА ФИАН является одним из самых высокочувствительных для своего диапазона радиотелескопов в мире. Флуктуационная чувствительность радиотелескопа на частоте 111 МГц в полосе 2.5 МГц и при временном разрешении 0.1 с равна

140 мЯн [3]. Для исследования межпланетных мерцаний компактных радиоисточников была создана 96-лучевая диаграмма направленности, которая перекрывает полосу неба от  $-9^\circ$  до  $42^\circ$  по склонению. Время прохождения источника через диаграмму направленности составляет 4–7 минут.

Максимальная эффективная площадь антенны в зените равна  $47\,000\text{ м}^2$  и уменьшается к горизонту пропорционально  $\cos z$ , где  $z$  – зенитное расстояние. Температура шумов системы колеблется в пределах  $550\text{--}3500\text{ К}$  и зависит от температуры фона неба. Неоспоримым преимуществом радиотелескопа БСА для поиска импульсных сигналов является непрерывный круглосуточный мониторинг большого участка неба и сохранение данных на сервере для их последующей обработки.

## Метод

Для обнаружения импульсных сигналов использовался метод свёртки данных с шаблоном заданной формы и последующим сложением с пробной мерой дисперсии. Форма шаблона определялась импульсной характеристикой среды распространения, соответствующей модели тонкого экрана [4] и описываемой убывающей экспонентой

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

где  $t_s$  – величина рассеяния импульса в среде. Принимаемый импульс определяется свёрткой излучённого импульса, который можно представить в виде дельта-функции, с передаточной функцией среды [4]

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

Так как импульс распространяется в диспергирующей среде и принимается в частотном канале конечной ширины, то он испытывает дополнительное уширение и искажение формы, которое определяется такой свёрткой

$$\Phi(t) = \int F(t) \Pi(t - \tau) d\tau, \quad (3)$$

где  $\Pi$  – прямоугольная функция, соответствующая уширению сигнала в частотном канале, которая записывается в виде  $\Pi(t) = \sigma(t - \tau_{i-1}) \sigma(\tau_i - t)$ , где  $\sigma(t)$  – функция Хевисайда (единичного скачка),  $\tau_i$  – время прихода на граничной частоте  $i$ -го частотного канала.  $\tau_i - \tau_{i-1}$  равно уширению в полосе канала.

Рисунок 1 показывает графики прямоугольной функции в шести частотных каналах и экспоненциально-затухающих импульсов (шаблонов), соответствующих  $DM = -360\text{ пк см}^{-3}$  и  $t_s = 1\text{ с}$ . Экспериментальная зависимость  $t_s(DM) = 60(DM/100)^{2.2 \pm 0.1}\text{ мс}$  была взята из работы Кузьмина, Лосовского, Лапаева [5].

Для проверки работоспособности метода был применён метод наложения импульса с известными свойствами на реальную запись с последующим его обнаружением. Был взят импульс с  $DM = -360$  и  $2000\text{ пк см}^{-3}$ . Рисунок 2 показывает а) свёртку записи с шаблоном и б) свёртку поканальной записи с пробной мерой дисперсии. Импульс с  $DM = -360\text{ пк см}^{-3}$  виден в районе отсчётов  $N = 1000\text{--}1100$ , импульс с  $DM = 2000\text{ пк см}^{-3}$  виден в районе отсчётов  $N = 2000\text{--}2500$ .

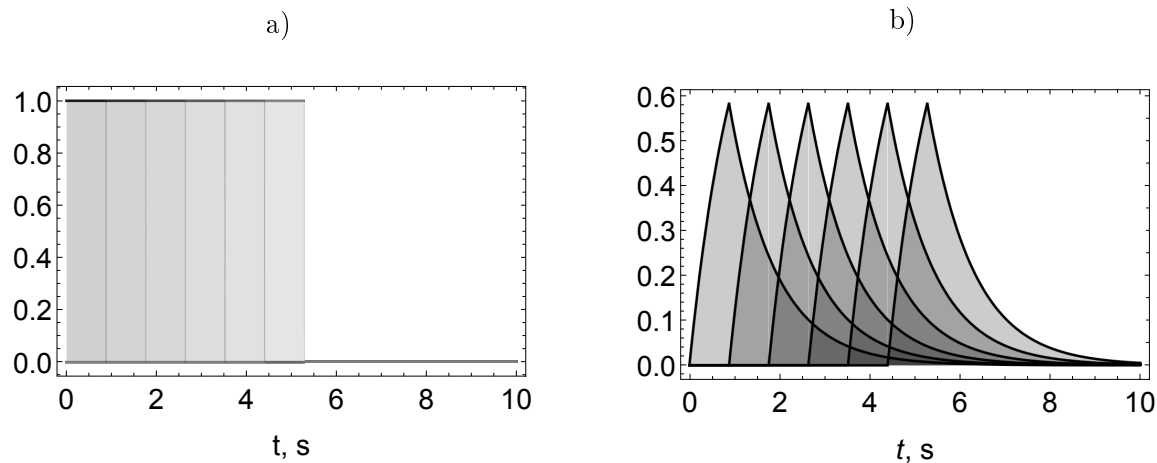


Рис. 1: а) Уширение в шести частотных каналах, соответствующих  $DM=360$  пк см<sup>-3</sup>, б) экспоненциально-затухающие импульсы, искажённые из-за уширения в полосе. Величина рассеяния взята  $t_s(DM = 360) = 1$  с.

Таблица 1: Список обнаруженных быстрых радиовсплесков

Дата	Координаты (J2000)	Мера дисп., пк/см <sup>3</sup>	С/Ш	Плотность потока, Ян
18.10.2015	0522+33.1	$570 \pm 5$	6.2	1.4
20.09.2016	0535+41.7	$1767 \pm 4$	9.1	0.22
06.06.2017	0534+41.7	$247 \pm 4$	8.3	0.54

**Примечания к Таблице 1.** Координаты радиовсплесков даны в виде hhmm+dd.d. Средняя погрешность координат по прямому восхождению и склонению составляет 2<sup>m</sup> и 0.6 градуса, соответственно. Последняя колонка показывает пиковую плотность потока. Относительная погрешность отношения сигнал/шум и плотности потока составляет 20%.

Для обработки данных была разработана компьютерная программа, которая реализовала вышеописанный алгоритм и на каждый день создавала пару графиков, пример которых показан на рис. 2. Обнаружение импульсного сигнала производилось путем визуального просмотра сгенерированных графиков.

## Результаты

В результате обработки данных в период с июля 2012 г. по апрель 2018 г. было найдено три импульса, параметры которых представлены в Таблице 1. Общая продолжительность наблюдений импульсов составила  $3 \times 175 = 525$  часов.

Динамические спектры и свёрнутые с найденной мерой дисперсии импульсы показаны на рис. 3–5.

Импульс от 18.10.2015 (рис. 3) имеет меру дисперсии  $DM=570 \pm 5$  пк см<sup>-3</sup>, что в пределах погрешности совпадает с мерой дисперсии повторяющегося радиовсплеска FRB 121102, однако отличается на 10<sup>m</sup> по прямому восхождению, что может говорить либо об обнаружении радиовсплеска боковым лепестком антенны БСА ФИАН либо о совершенно новом всплеске. В случае попадания в боковой лепесток измеренная

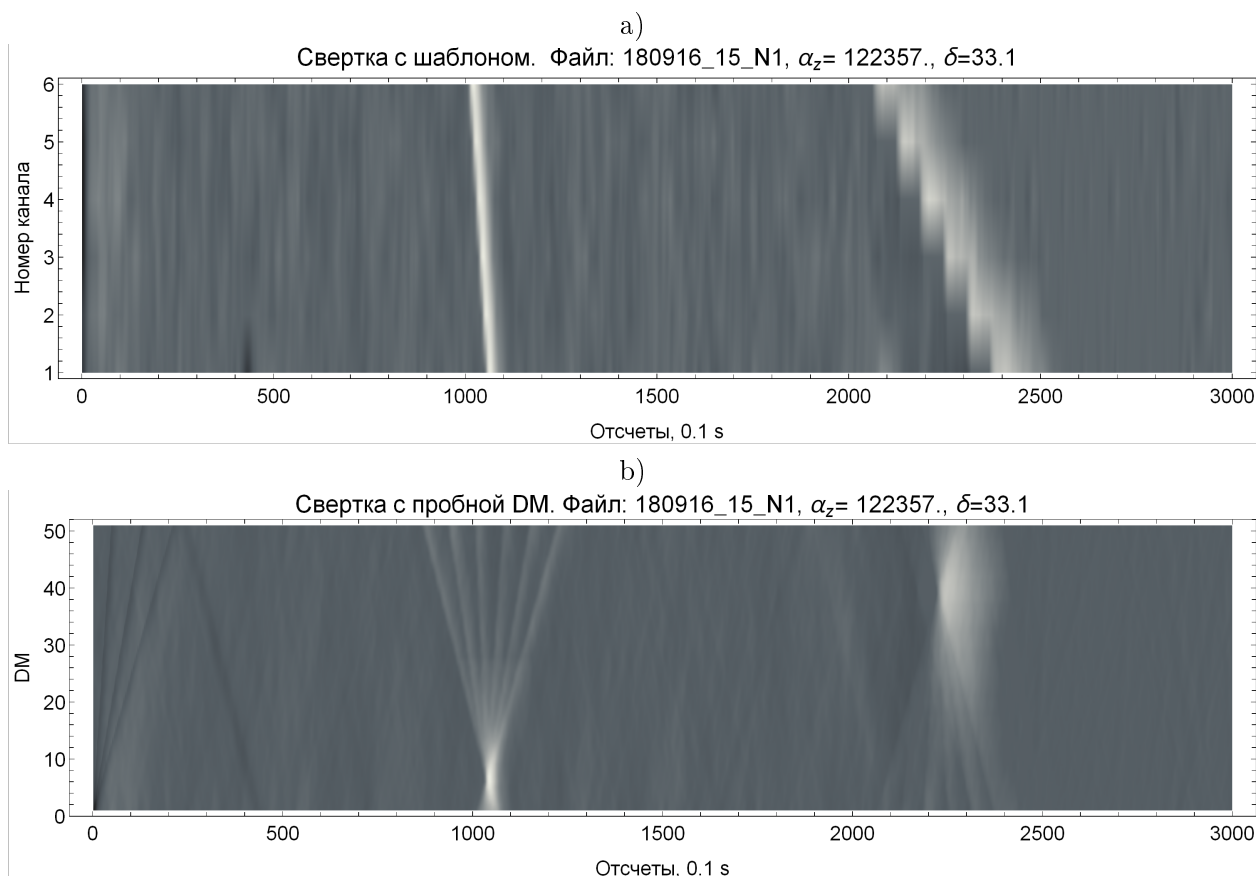


Рис. 2: а) Свёртка записи с шаблоном. Импульс с  $DM=360$  пк см $^{-3}$  виден в диапазоне отсчётов 1000–1100, импульс с  $DM=2000$  пк см $^{-3}$  виден в диапазоне отсчётов 2000–2500. Светлые участки соответствуют большей интенсивности сигнала. б) Свёртка поканальной записи с пробной мерой дисперсии. Импульсный сигнал виден на графике в виде светлого пятна, соответствующего найденной мере дисперсии.

плотность потока данного всплеска составит величину порядка 10–20 Ян. Интересной особенностью этого импульса является его двойственность, что уже заметно на динамическом спектре и в принципе укладывается в повторяющуюся природу FRB 121102.

При анализе формы импульсов следует учитывать, что все они представляют собой свёртку с шаблоном и по этой причине не могут быть уже, чем ширина шаблона. Корреляционный приёмник импульсных сигналов, который реализован в алгоритме обнаружения, наилучшим образом обнаруживает сигналы, которые по форме совпадают с используемым шаблоном. Длинный экспоненциально затухающий „хвост“ импульса искажается фоном неба и не участвует в обнаружении, детектируется только вершина импульса. Это является причиной того, что все зарегистрированные радиовсплески имеют примерно одинаковую ширину.

Определение пиковой плотности потока обнаруженных радиовсплесков на частоте 111 МГц даёт ограничения на некоторые из предложенных моделей FRB, которые предполагают регистрацию радиовсплесков только на высоких частотах [6–8].

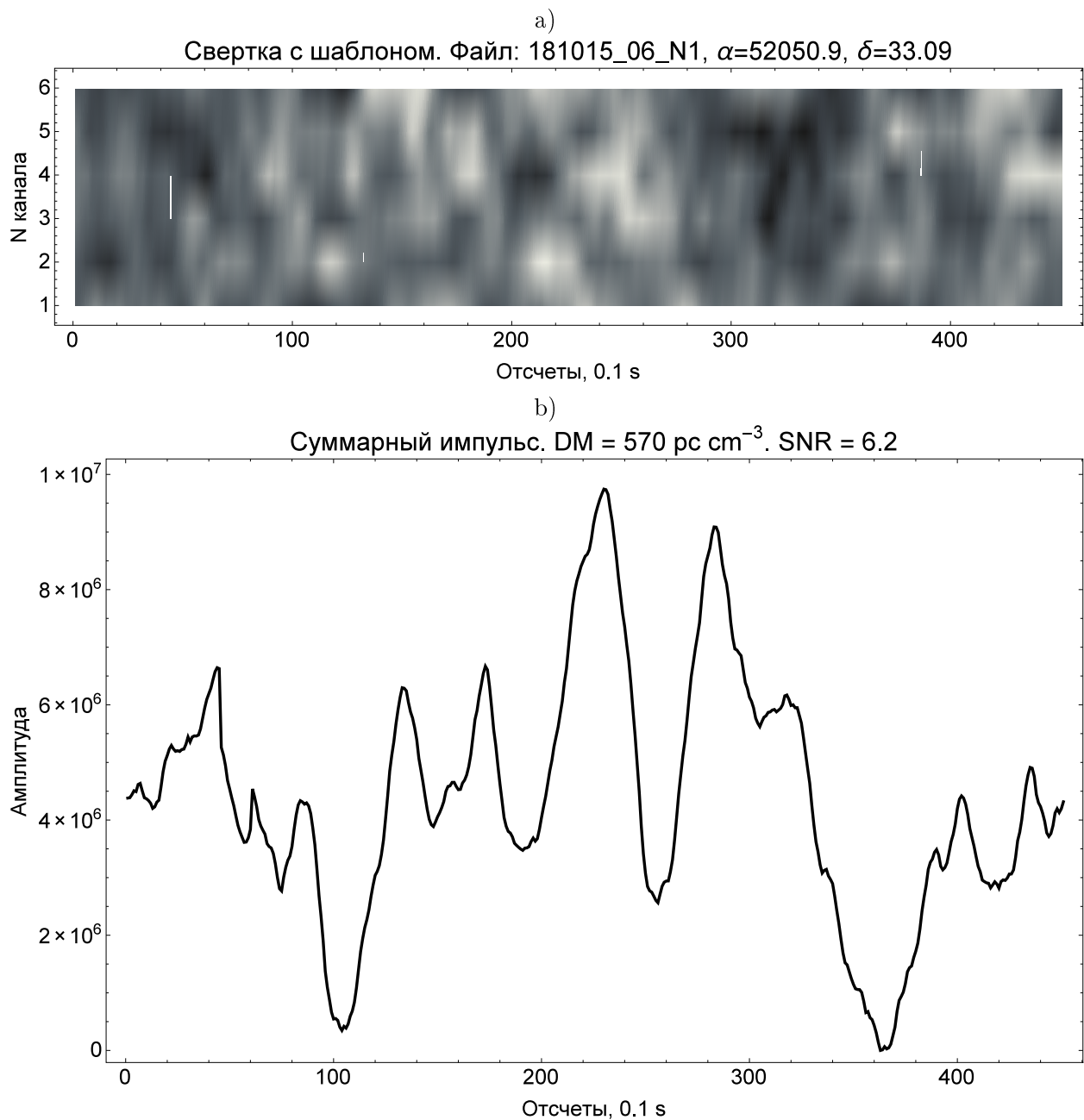


Рис. 3: а) Динамический спектр импульса от 18.10.2015 с  $DM=570 \text{ пк см}^{-3}$ . б) Суммарный импульс, свёрнутый с найденной мерой дисперсии.

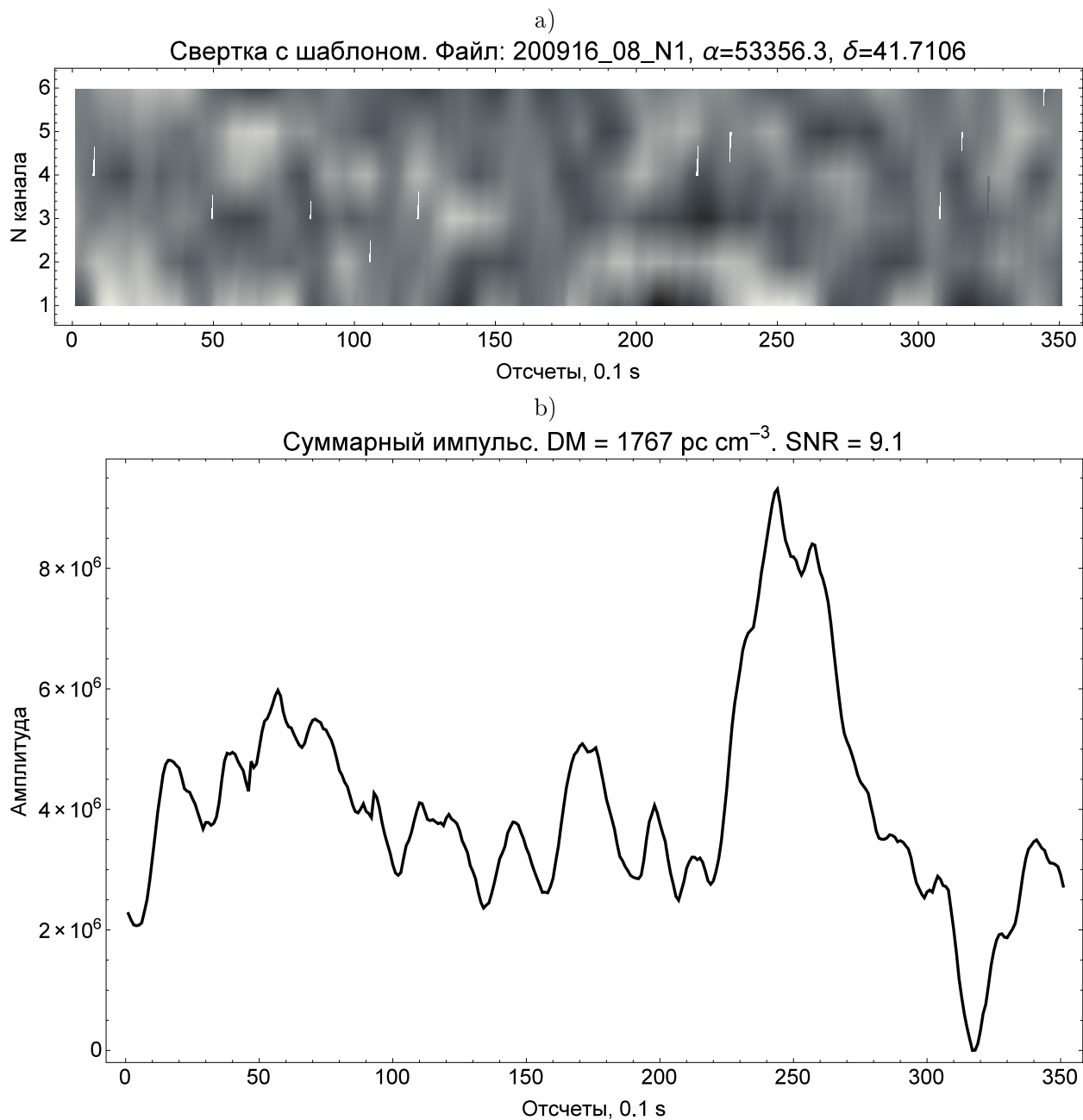


Рис. 4: а) Динамический спектр импульса от 20.09.2016 с  $DM=1767 \text{ пк см}^{-3}$ . б) Суммарный импульс, свёрнутый с найденной мерой дисперсии.

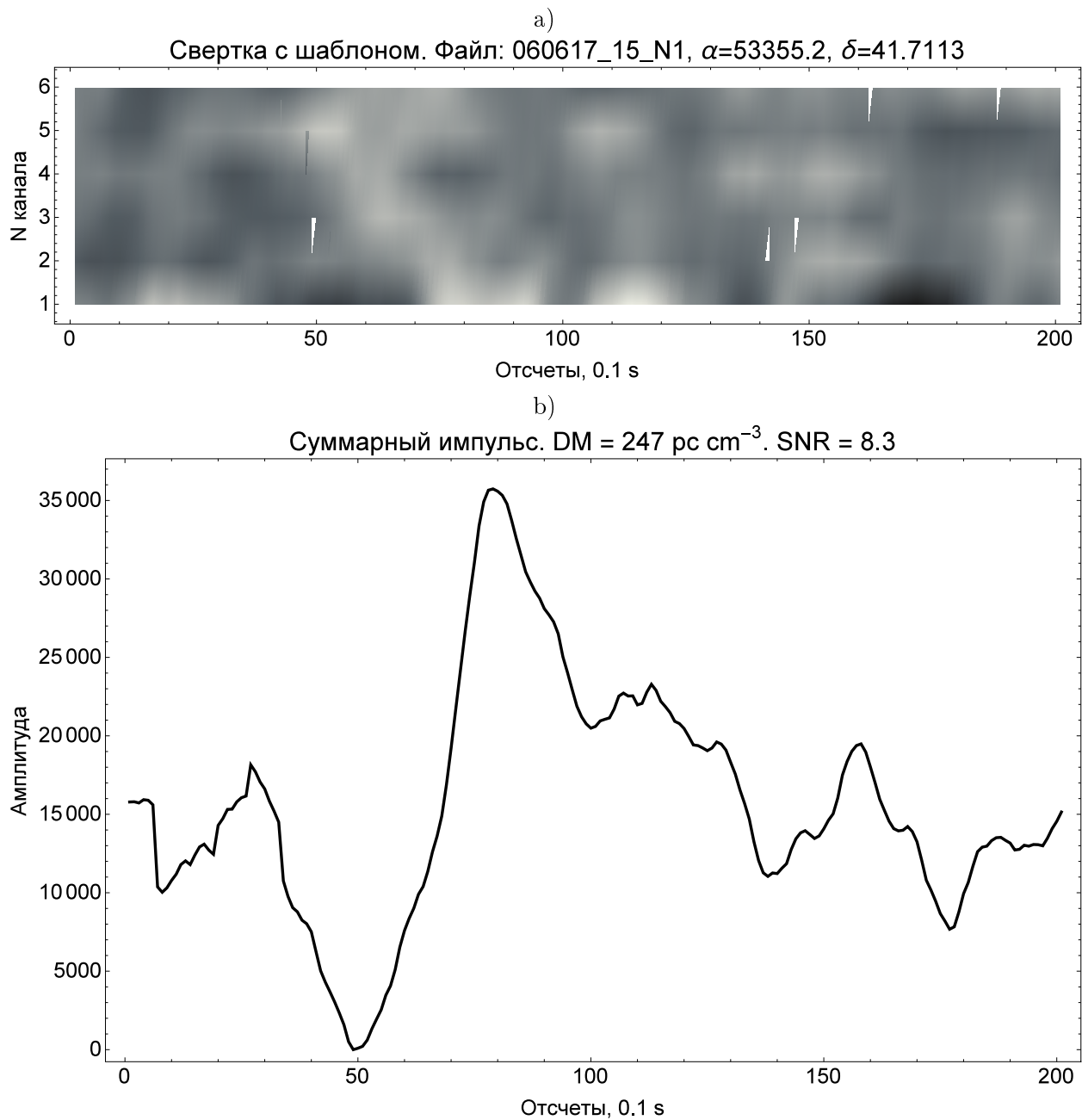


Рис. 5: а) Динамический спектр импульса от 06.06.2017 с  $DM=247 \text{ пк см}^{-3}$ . б) Суммарный импульс, свёрнутый с найденной мерой дисперсии.

## Заклучение

В работе представлен алгоритм, разработанный для обнаружения отдельных импульсных сигналов в данных, получаемых с антенны БСА ФИАН. Алгоритм основан на корреляционном приёме сигналов заданной формы. В результате применения алгоритма к двум областям на небе были зарегистрированы три радиовсплеска, параметры которых приведены в Таблице 1. В будущем планируется провести анализ других областей неба.

## Благодарности

Исследования В.А. Фёдоровой выполнены при поддержке гранта РФФИ № 16-29-13074.

## Литература

1. Lorimer D.R., Bailes M., McLaughlin M.A., Narkevich D.J., and Crawford F., *Science* **318**, 777 (2007).
2. Scholz P., Spitler L.G., Hessels J.W.T., Chatterjee S., Cordes J.M., Kaspi V.M., Wharton R.S., Bassa C.G., Bogdanov S., Camilo F., Crawford F., Deneva J., van Leeuwen J., Lynch R., Madsen E.C., McLaughlin M.A., Mickaliger M., Parent E., Partel C., Ransom S.M., Seymour A., Stairs I.H., Stappers B.W., and Tendulkar S.P., *ApJ* **833**, 17 (2016).
3. Орешко В.В., Латышев Г.А., Алексеев И.А., Азаренков Ю.И., Иванов Б.И., Карпов В.М. и Костромин В.И., *Труды ИПА* **24**, 80 (2012).
4. Уилсон Л., Рольфс К. и Хюттемейстер С., *Инструменты и методы радиоастрономии*. Москва: Физматлит (2013).
5. Кузьмин А.Д., Лосовский Б.Я. и Лапаев К.А., *АЖ* **84**, 685 (2007)
6. Zhang Y., Geng J.-J., and Huang Y.-F., *ApJ* **858**, № 2, 88 (2018).
7. Li L.-B., Huang Y.-F., Geng J.-J., and Li B., *Res. Astron. Astrophys.* **18**, 61 (2018).
8. Bhattacharyya S., preprint (arXiv:1711.09083).

### Detection of Fast Radio Bursts at the LPA LPI Radio Telescope

A.E. Rodin, V.A. Fedorova, V.A. Samodourov, and S.V. Logvinenko

*Pushchino Radio Astronomy Observatory  
Astrospace Centre, P.N. Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences  
Pushchino, Moscow Region, 142290 Russia  
E-mail: rodin@prao.ru*

Received May 23, 2018

**Abstract.** We present results of searching for single pulse signals at the LPA LPI radio telescope at a frequency of 111 MHz in 2012–2018. Areas around FRB 121102 ( $\alpha = 05^{\text{h}}32^{\text{m}}$ ,  $\delta = 33^{\circ}05'$ ) and  $\alpha = 05^{\text{h}}32^{\text{m}}$ ,  $\delta = 41^{\circ}40'$  were analysed. We detected three radio bursts with  $DM = 247, 570, \text{ and } 1767 \text{ pc cm}^{-3}$ .