

УДК 524.7-77

ПОИСК БЫСТРЫХ РАДИОВСПЛЕСКОВ В НАПРАВЛЕНИИ ГАЛАКТИК М31 И М33

© 2019 г. В. А. Федорова^{1*}, А. Е. Родин^{1**}¹Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН,
Пушчинская радиоастрономическая обсерватория, Пушино, Россия

Поступила в редакцию 22.02.2019 г.; после доработки 14.05.2019 г.; принята к публикации 31.05.2019 г.

В данной работе приведены результаты поиска одиночных импульсов типа быстрых радиовсплесков на радиотелескопе БСА ФИАН на частоте 111 МГц в период с июля 2012 по август 2018 г. Была использована методика выделения сигнала с помощью свертки данных с шаблоном фиксированной формы и последующей сверткой с пробной мерой дисперсии. Для поиска импульсов были выбраны участки неба с галактиками М 31 и М 33. В результате обработки данных удалось обнаружить три радиовсплеска в окрестности М 33, пять радиовсплесков в направлении М 31 и один импульс обнаружился в области, на час по прямому восхождению отстоящей от центра М 31. Меры дисперсии зарегистрированных импульсов лежат в диапазоне от 203 до 1262 пк × см⁻³.

DOI: 10.1134/S0004629919110033

1. ВВЕДЕНИЕ

Быстрые радиовсплески (fast radio burst, FRB)— это единичные импульсы шириной от 0.08 до 26 мс, имеющие, по-видимому, внегалактическое происхождение. На это указывает, например, тот факт, что в большинстве случаев мера дисперсии сигналов лежит в диапазоне от 109 до ~2600 пк/см³. Кроме того, при анализе распределения по небу зарегистрированных быстрых радиовсплесков не наблюдается концентрации к галактической плоскости (как в случае с пульсарами) и нет каких-либо выделенных направлений. По данным FRB Catalogue [1] известно около ста событий FRB. Одно из этих явлений неоднократно повторялось в период с 2012 г. по настоящее время через неравные промежутки времени, FRB 121102. Благодаря повторным импульсам, явление FRB 121102 удалось отождествить с областью неправильной карликовой галактики, в которой активно протекает процесс звездообразования [2]. Таким образом, из всего списка быстрых радиовсплесков только для одного события определена родительская галактика.

Второй повторяющийся импульс был зарегистрирован в ходе обзора на частоте 400 МГц с помощью инструмента CHIME. В период с августа по октябрь 2018 г. от события FRB 180814.J0422 + 73 удалось зарегистрировать шесть повторяющихся

импульсов с мерой дисперсии ~189 пк/см³ и шириной импульса от 2.6 до 63 мс. Кроме того, в ходе обзора удалось обнаружить еще 12 новых быстрых радиовсплесков с различными мерами дисперсий от 169.134 до 1006.84 пк/см³ [3].

Внегалактические явления FRB известны с 2007 г., когда впервые случайным образом импульс был обнаружен в архивных данных [4]. Первые целенаправленные попытки детектирования внегалактических импульсных сигналов были сделаны Линскоттом и др. в 1980 г. [5]. Далее Маккалок и др. [6] в период с 1980 по 1981 г. проводили систематические наблюдения Большого Магелланового Облака на предмет поиска радиопульсаров. Позже были сделаны попытки обнаружить гигантские импульсы пульсаров в различных галактиках: М 33, NGC 253, NGC 300, NGC 7793 [7]. В 2012 г. Рубио-Херрера и др. провели исследование, в рамках которого осуществлялся поиск импульсных сигналов в галактике М 31 [8]. В результате этого исследования впервые было зарегистрировано несколько импульсов с мерой дисперсии, соответствующей их внегалактическому происхождению в направлении галактики М 31.

Выбор относительно близких галактик для обнаружения быстрых радиовсплесков был связан с тем, что количество объектов, которые могут вызывать такого рода всплески, намного выше в густонаселенных объектах Вселенной — спиральных галактиках. Две спиральные галактики, входящие в местную группу, М 31 и М 33, попадают в

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

**E-mail: rodin@prao.ru

Таблица 1. Параметры зарегистрированных импульсов

Дата	Координаты		DM , пк/см ³	С/Ш	F_{\max} , Ян	E , Ян мс
	α	δ				
29.10.2012	0012	+42.06	732 ± 5	7.3	0.34	1380
30.10.2013	0025	+39.98	203 ± 4	10.1	0.24	800
12.02.2014	0131	+30.54	910 ± 4	9.2	0.26	945
16.12.2014	0014	+41.64	545 ± 5	7.6	0.23	1200
25.11.2015	0131	+30.98	273 ± 4	8.5	0.54	2450
28.11.2015	0132	+30.98	273 ± 4	7.2	0.52	2360
06.02.2016	0101	+41.63	1262 ± 5	7.9	0.26	1780
02.12.2016	2344	+40.80	291 ± 4	7.1	0.29	1320
21.03.2018	0033	+42.03	596 ± 5	8.2	0.54	2310

Примечание. Координаты соответствуют (J2000), α — часы, минуты, δ — градусы; DM — мера дисперсии, С/Ш — отношение сигнала к шуму, F_{\max} — пиковая плотность потока, E — энергия импульса.

поле зрения БСА, поэтому было принято решение в первую очередь исследовать их на предмет регистрации радиовсплесков.

Так как в данный момент существует большое количество теоретических моделей, которые описывают возникновение этих загадочных явлений, то заранее никаких предположений относительно природы быстрых радиовсплесков мы не делали. Ставилась и решалась чисто наблюдательная задача — обнаружить любые одиночные импульсы, имеющие дисперсионное запаздывание по частоте, в направлении М 31 и М 33.

Отметим, что так как наблюдения проводились на частоте 111 МГц, то для потенциально обнаружимых радиовсплесков уширение импульсов при мере дисперсии 10^2 – 10^3 пк см³ в отдельном канале шириной 415 кГц должно составлять единицы и десятки секунд, то есть искомые импульсы должны иметь форму, сильно искаженную дисперсионным запаздыванием и рассеянием. Очевидно также, что такое уширение приведет к падению чувствительности обнаружения в 10^3 – 10^4 раз для импульса шириной в несколько миллисекунд. Несмотря на это, если в качестве примера рассмотреть астрофизические явления с энерговыделениями $>10^{46}$ Дж, то этой энергии будет достаточно для их обнаружения в соседней галактике.

В качестве результатов данной работы представлены параметры обнаруженных девяти новых импульсов, приведенных в табл. 1. В последующих разделах описываются технические характеристики радиотелескопа БСА ФИАН, методика наблюдений и обработки данных в период с 2012 по 2018 г.

2. АППАРАТУРА

Радиотелескоп БСА ФИАН — это один из самых чувствительных инструментов метрового диапазона волн. Рабочий диапазон БСА находится в пределах 111 ± 1.25 МГц. Флуктуационная чувствительность радиотелескопа составляет 140 мЯн при временном разрешении 0.1 с в полосе приема 2.5 МГц [9]. Регистрация сигналов ведется с помощью многоканального цифрового приемника, позволяющего вести запись в двух режимах. В первом режиме сигнал записывается с относительно низким частотным разрешением с использованием шести частотных каналов с полосой приема 415 кГц каждый. В таком варианте записи временной интервал между отсчетами составляет 100 мс. Данный режим записи используют при непрерывном мониторинге мерцающих источников. Второй режим записи ведется в 32 частотных каналах с полосой приема 78 кГц. При этом временное разрешение составляет 12.5 мс. Вне зависимости от выбранного режима записи, цифровая обработка сигнала ведется с помощью процессора БПФ на 512 отсчетов. В ходе исследования галактик М 31 и М 33 использовались данные с временным разрешением 100 мс.

В связи с особенностями диаграммы направленности БСА ФИАН эффективная площадь антенны имеет максимальное значение в зените ($47\,000$ м²) и уменьшается к горизонту, пропорционально $\cos z$, где z — зенитное расстояние. Поле зрения радиотелескопа составляет ~ 50 кв. гр. Эта особенность позволяет проводить ежедневный мониторинг большого числа источников. Температура собственных шумов в системе зависит от фона неба и варьируется от 550 до 3500 К.

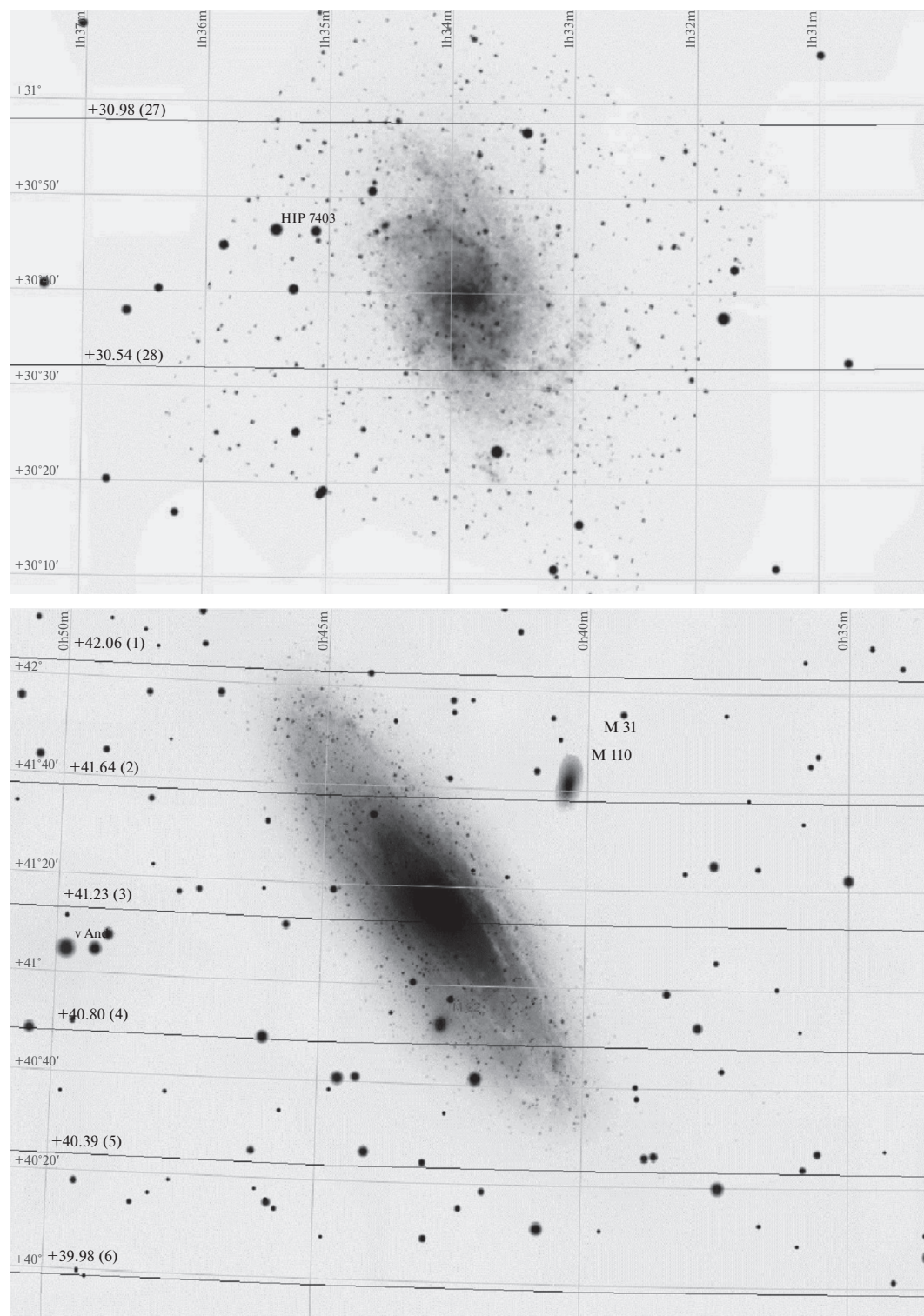


Рис. 1. Галактики М 33 (вверху) и М 31 (внизу). На изображениях сплошной черной линией показаны склонения максимумов лучей радиотелескопа БСА ФИАН. Каждый луч имеет обозначение в виде координат и номера, который соответствует его расположению в диаграмме направленности антенны ДН-3 БСА ФИАН. Координаты лучей и галактик соответствуют эпохе J2000.

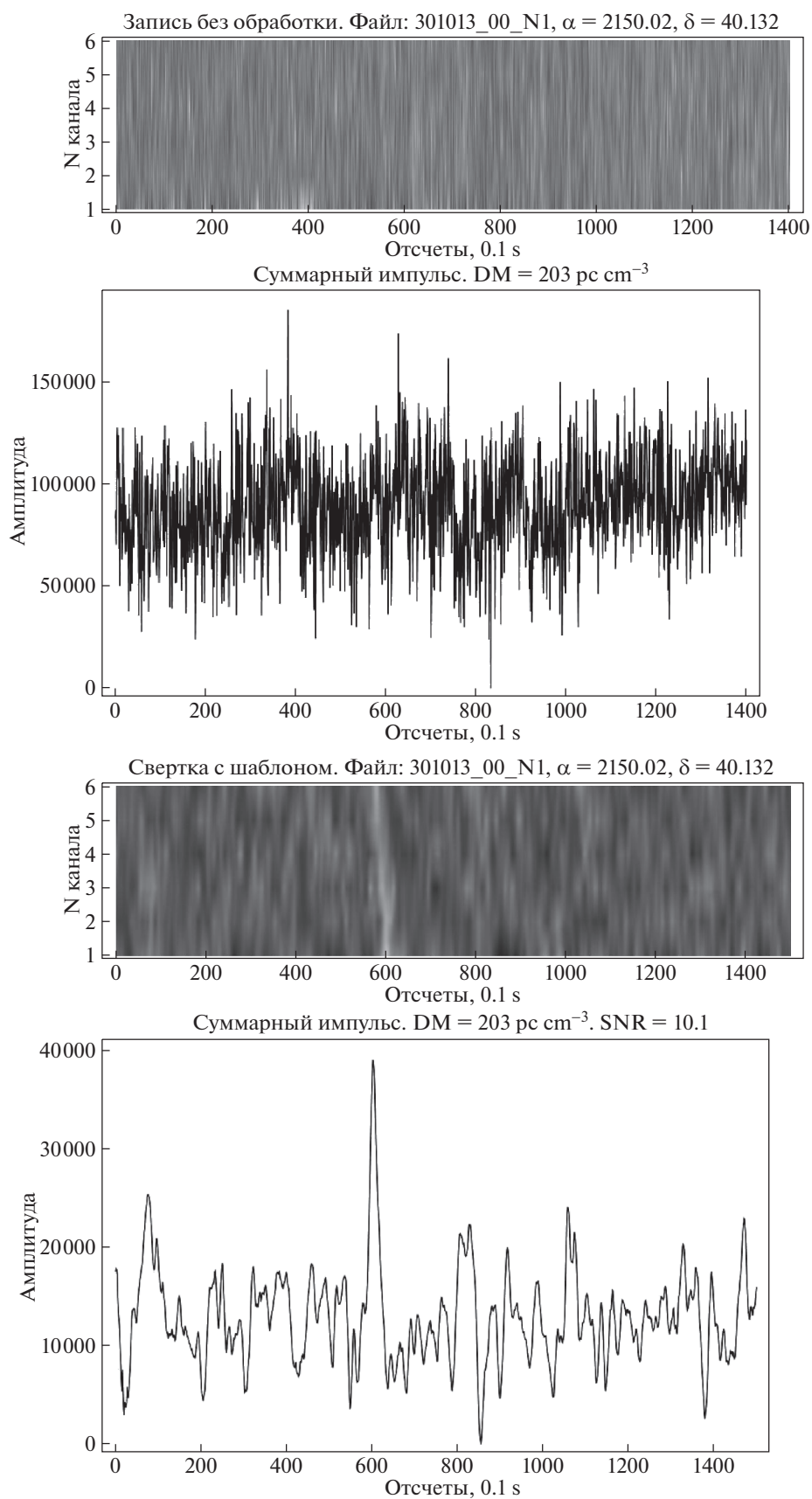


Рис. 2. Запись радиотелескопа БСА ФИАН длительностью 150 с, соответствующая радиовсплеску, обнаруженному 30.10.2013. Показан один и тот же участок без обработки (2 фрагмента сверху) и после свертки с шаблоном (2 фрагмента внизу).

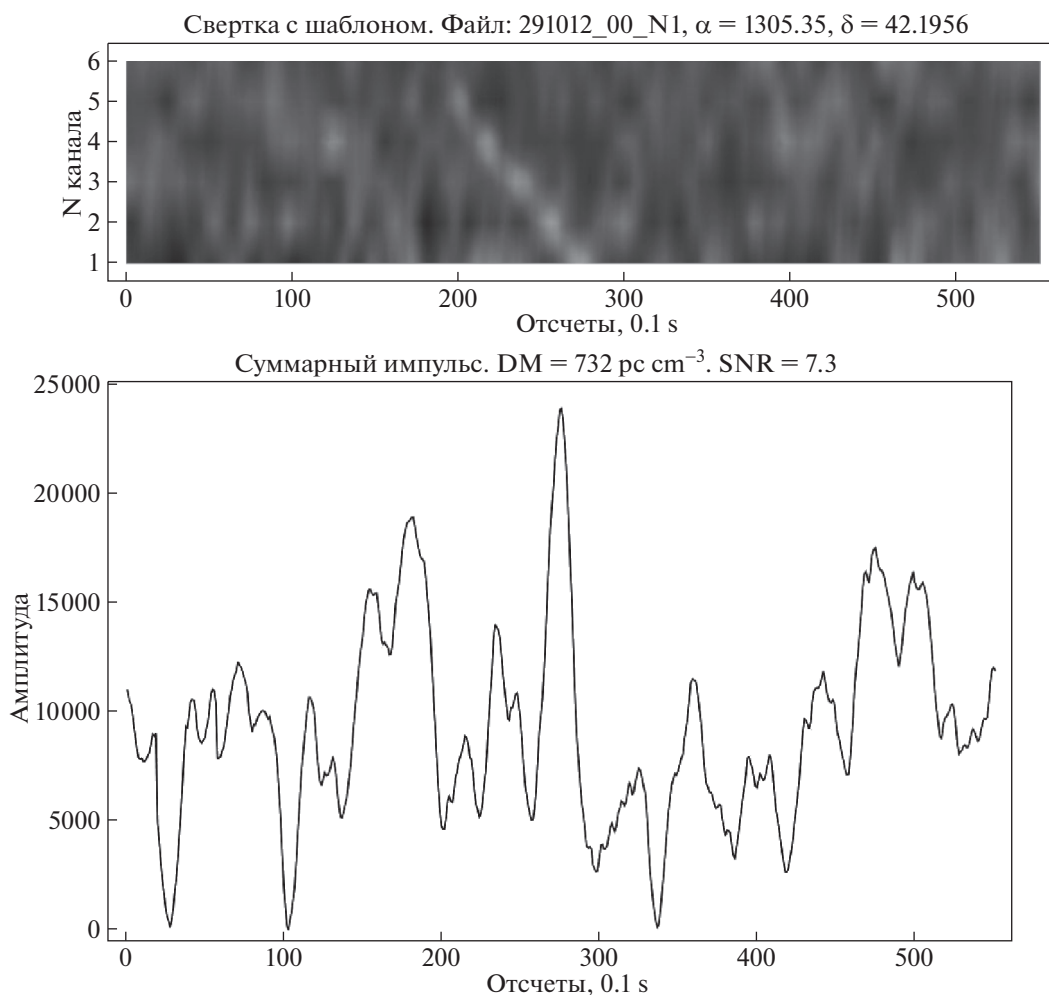


Рис. 3. Динамический спектр импульса с $DM = 732 \text{ пк/см}^3$, обнаруженного 29.10.2012. Нижнее изображение — суммарный профиль импульса. Пиковая плотность потока 0.34 Ян . Галактические координаты $l = 115.32^\circ$, $b = -20.24^\circ$.

Отличительной особенностью меридианного радиотелескопа БСА ФИАН является его диаграмма направленности (ДН), которая включает в себя управляемую по склонению ДН (ДН-1) и стационарную (ДН-3). ДН-1 применяется при исследовании пульсаров, так как способность антенны БСА проводить круглосуточный мониторинг значительной части небесной сферы уже была успешно использована для их поиска [10]. С помощью ДН-3 наблюдения ведутся в непрерывном режиме. Так как быстрые радиовсплески — это спорадические явления, мониторинг источников проводился с помощью ДН-3 — 96-лучевой диаграммы направленности, созданной с целью исследования межпланетных мерцаний большого числа компактных радиоисточников. Диаграмма перекрывает участок неба по склонению от -9° до 42° . Ширина главного луча ДН-3 по половинному уровню меняется от $24'$ до $48'$ в зависимости от склонения наблюдаемого источника.

Галактики М 33 и М 31 — это протяженные источники. Их видимые угловые размеры составляют $73' \times 45'$ (М 33) и $3.2^\circ \times 1^\circ$ (М 31). Такие протяженные источники, попадая в поле зрения БСА, прописываются в нескольких лучах диаграммы направленности. Так как М 31 имеет склонение $\delta_{J2000} = 41.27^\circ$, то наблюдения источника проводились с первого по шестой лучи стационарной диаграммы направленности. Для М 33 $\delta_{J2000} = 30.66^\circ$, соответственно объект наблюдался в 27 и 28 лучах той же диаграммы радиотелескопа БСА ФИАН. На рис. 1 приведено сопоставление исследуемых галактик в оптическом диапазоне с лучами ДН-3 антенны.

Помеховая обстановка около БСА контролируется регулярно. На основании многолетних измерений можно выделить несколько видов помех:

1. атмосферные (грозовые разряды, возмущения ионосферы во время солнечных вспышек);

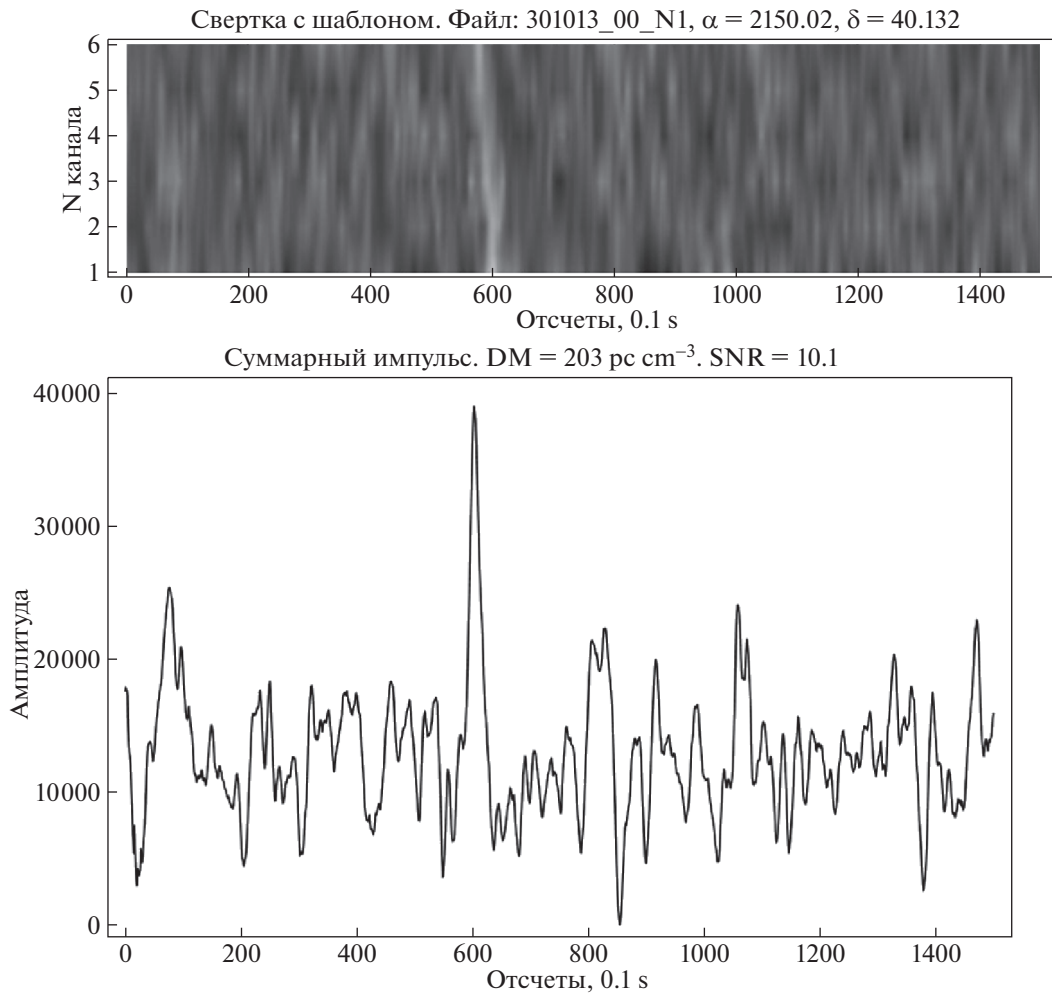


Рис. 4. Динамический спектр импульса с $DM = 203 \text{ пк/см}^3$, обнаруженного 30.10.2013. Нижнее изображение — суммарный профиль импульса. Пиковая плотность потока 0.24 Ян . Галактические координаты $l = 117.53^\circ$, $b = -22.61^\circ$.

2. индустриальные (искровые разряды от работающих электроприборов, проезжающих автомобилей, электросварки и другое);
3. помехи от радиооборудования (телевидение, УКВ-радиостанции, РЛС и прочее).

Все эти помехи с точки зрения воздействия их на БСА объединяет общая черта: хотя их можно пространственно локализовать, но воздействуют они на приемный тракт БСА в целом. На выходе антенны это выглядит так, что сигнал-помеха возникает сразу в нескольких или даже во всех лучах диаграммы направленности одновременно. При этом отсутствует зависимость времени прихода сигнала от частоты (нулевая мера дисперсии), и помеха имеет протяженный по времени характер. Это касается как индустриальных помех, так и возмущений ионосферы от Солнца, которые регистрируются во всех лучах и даже боковых лепестках антенны. Напомним, что в отличие от земных помех

космический импульсный сигнал приходит с определенного направления на небе и имеет частотную зависимость времени прихода.

Иногда регистрируются помехи, которые показывают частотную зависимость времени прихода и имитируют космический диспергированный сигнал. Но в этом случае мощность сигнала намного превышает космический, и он регистрируется в нескольких лучах диаграммы, поэтому легко отличим.

В целом с наступлением лета и началом гроз помеховая обстановка ухудшается, и возрастает процент брака в данных.

Мы считали кандидатами в радиовсплески все импульсы, которые удовлетворяли условиям:

1. видны в одном луче диаграммы,
2. имеют частотную зависимость времени прихода,

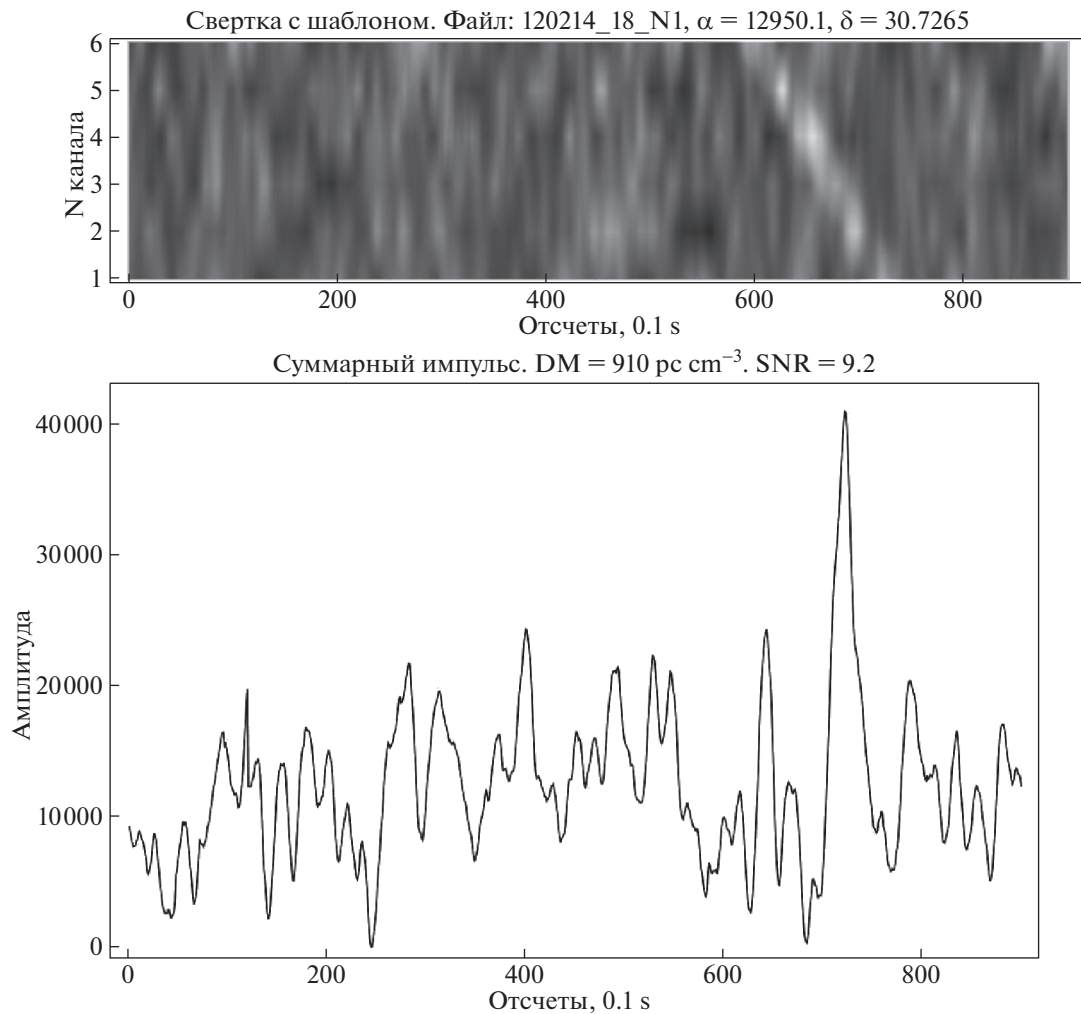


Рис. 5. Динамический спектр импульса с $DM = 910$ пк/см³, обнаруженного 12.02.2014. Нижнее изображение — суммарный профиль импульса. Пиковая плотность потока 0.26 Ян. Галактические координаты $l = 133.10^\circ$, $b = -31.54^\circ$.

3. регистрируются во всех шести каналах.

Импульсы, которые не удовлетворяли приведенным выше условиям, считались помехами и не рассматривались в качестве кандидатов в радиовсплески.

3. ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Обработка данных проводилась следующим образом. С помощью математического моделирования были получены ожидаемые импульсные сигналы типа быстрых радиовсплесков с учетом их распространения в межзвездной среде и регистрации на низких частотах. При моделировании сигнала учитывалось, что форма принятого импульса отлична от начального. Так как при распространении в межзвездной среде на него оказывают влияние неоднородности среды, то форма импульса искажается, а величина его рассеяния t_s коррелирует с

мерой дисперсии DM . Эта корреляция описывается в работе Кузьмина и др. [11] и определяется формулой $t_s = 0.06(0.01DM)^{2.2}$ для частоты 110 МГц. В дополнение к этому импульс испытывает и дисперсионное запаздывание по частоте. В результате регистрации сигнала в конечной полосе частот это также приводит к его уширению, которое описывается результатом свертки принятого импульса и П-образной функции:

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

где $\sigma(t)$ — функция единичного скачка, τ_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. Для выделения импульсного диспергированного сигнала применялись свертка зашумленного импульса с шаблоном и сложение с компенсацией меры дисперсии, что позволило получить максимальное соотношение сигнал/шум. Процесс

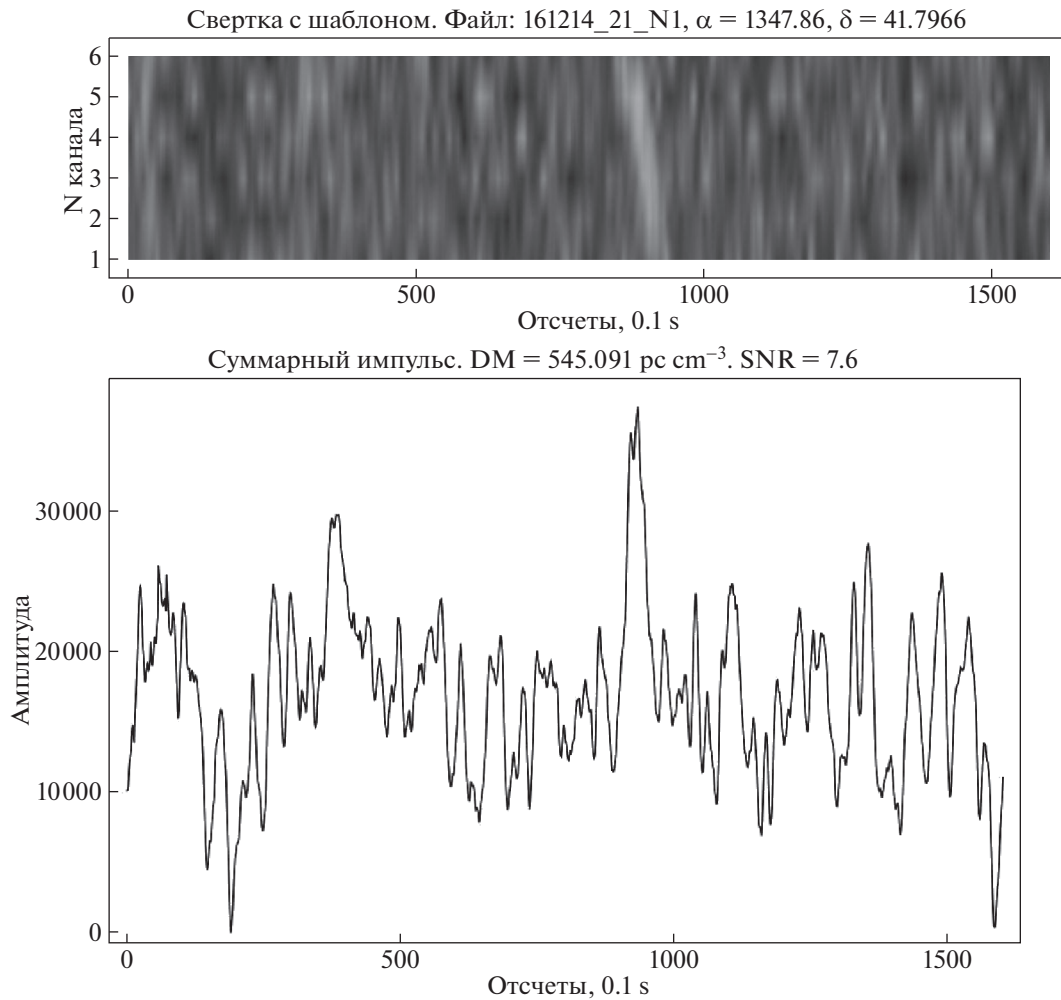


Рис. 6. Динамический спектр импульса с $DM = 545 \text{ пк/см}^3$, обнаруженного 16.12.2014. Нижнее изображение — суммарный профиль импульса. Пиковая плотность потока 0.23 Ян . Галактические координаты $l = 115.55^\circ$, $b = -20.70^\circ$.

моделирования и получения шаблона детально описан в статье авторов [12].

Методика поисков событий FRB заключалась в следующем. Первоначально анализировались ежедневные записи шести частотных каналов с временным разрешением 0.1 с в лучах, направление которых совпадает с источниками М 31 и М 33. Затем вносились поправки, учитывающие отклонение лучей диаграммы направленности БСА ФИАН от плоскости небесного меридиана и прецессию. Для М 33 в 27 и 28 лучах из часовой записи выбирался пятиминутный участок, соответствующий прямому восхождению галактики ($\alpha_{J2000} = 01^{\text{h}}34^{\text{m}}$). В случае М 31 выбирался получасовой участок записи в первых шести лучах ДН с серединой, соответствующей прямому восхождению $\alpha_{J2000} = 00^{\text{h}}43^{\text{m}}$, что соответствует центру этой галактики. Далее производилась свертка записи в каждом луче с шаблоном, полученным в ходе математического моделирования, после чего производилась свертка

с пробной мерой дисперсии в диапазоне от 0 до 3000 пк/см^3 с шагом 50 [12].

Так как быстрые радиовсплески из-за значительного рассеяния и уширения на частоте 111 МГц представляют собой слабые одиночные импульсы, то без использования дополнительной методики выделения сигнала напрямую их регистрация не представляется возможной. Используемый нами метод свертки с шаблоном согласованной формы позволяет усилить импульс на фоне шумов. В качестве примера достоинства такого подхода на рис. 2 приведены записи одного и того же участка до и после применения шаблона.

Дальнейшая обработка сводилась к визуальному анализу результатов, полученных на последнем этапе обработки. В случае обнаружения сигналов такие параметры, как мера дисперсии, пиковая плотность потока, соотношение сигнал/шум, определялись отдельно в каждом случае. Результаты приведены в табл. 1.

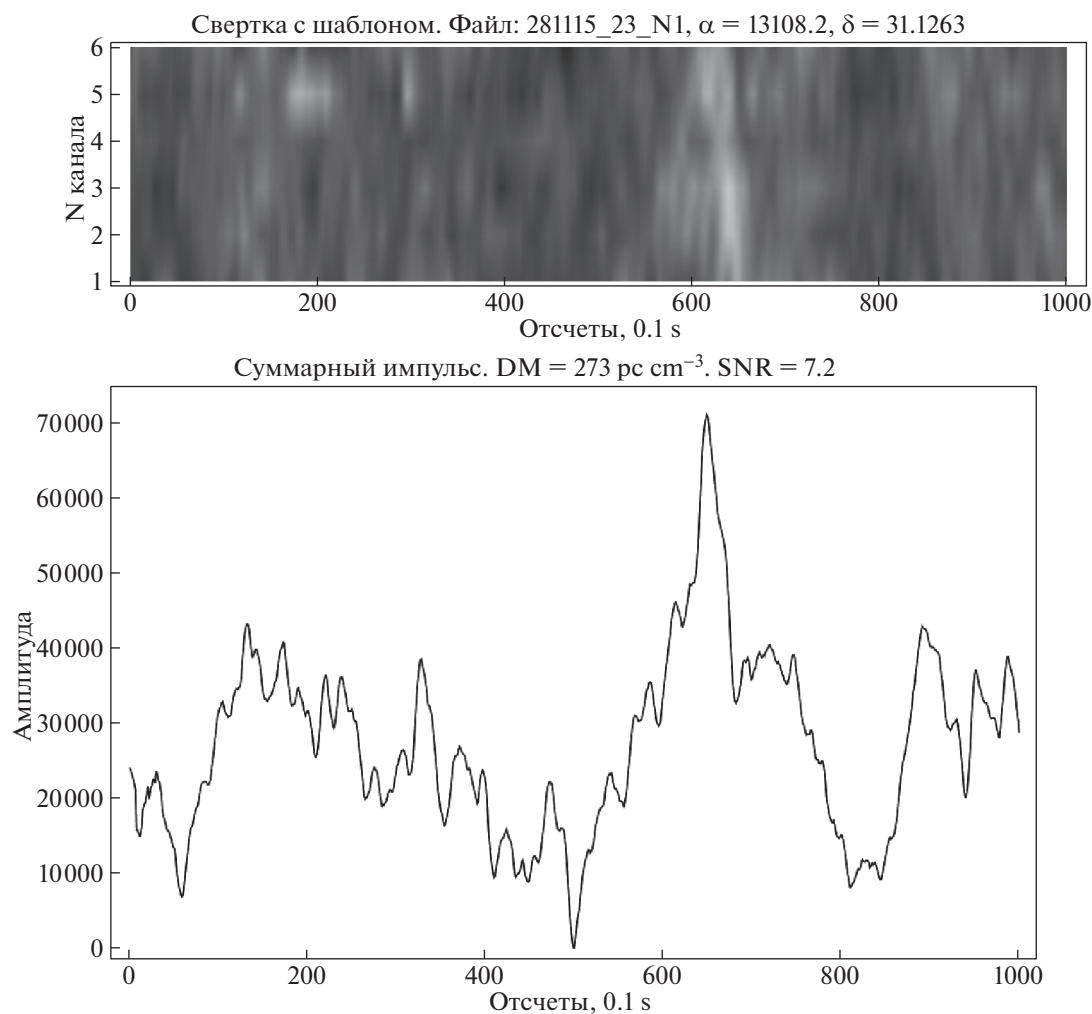


Рис. 7. Динамический спектр импульса с $DM = 273 \text{ пк/см}^3$, обнаруженного 25.11.2015. Нижнее изображение — суммарный профиль импульса. Пиковая плотность потока 0.54 Ян . Галактические координаты $l = 133.02^\circ$, $b = -31.1^\circ$.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате визуального анализа данных было обнаружено девять быстрых радиовсплесков с DM от 203 до 1262 пк/см^3 (см. рис. 3–11), один из которых, предположительно, повторяющийся. На это указывают координаты, которые совпадают в пределах полуширины диаграммы направленности БСА ФИАН, а также мера дисперсии, которая совпала у двух событий с точностью $\pm 4 \text{ пк/см}^3$. Повторяющиеся события были зарегистрированы с разницей в несколько дней (25.11.2015 и 28.11.2015).

Отношение сигнал/шум для всех зарегистрированных импульсов после применения согласованного фильтра $\lesssim 10$, из чего следует, что пиковая плотность потоков зарегистрированных импульсов, указанных в табл. 1, находится на пределе чувствительности антенны. Также следует отметить, что при такой методике мы выделяем только

верхнюю часть импульса, поскольку нижняя часть импульса при экспоненциальном затухании теряется в шумах.

Отдельное внимание привлекает всплеск, зарегистрированный 21.03.2018 (рис. 11). На динамическом спектре хорошо виден основной сигнал, но через ~ 300 отсчетов, справа от него, можно заметить еще один импульс. В суммарной записи по шести частотным каналам повторный импульс отчетливо заметен в правой части. Данное явление представляет особый интерес и требует дальнейшего более детального исследования.

Также в табл. 1 приведены прямое восхождение, соответствующее шестому частотному каналу ($f = 111.5 \text{ МГц}$), и оценки отношения С/Ш.

Величины мер дисперсии пульсаров из нашей Галактики лежат в диапазоне от ~ 3 до $\sim 1800 \text{ пк/см}^3$ для пульсаров в направлении галактического центра, что полностью перекрывает диапазон мер дисперсии обнаруженных нами

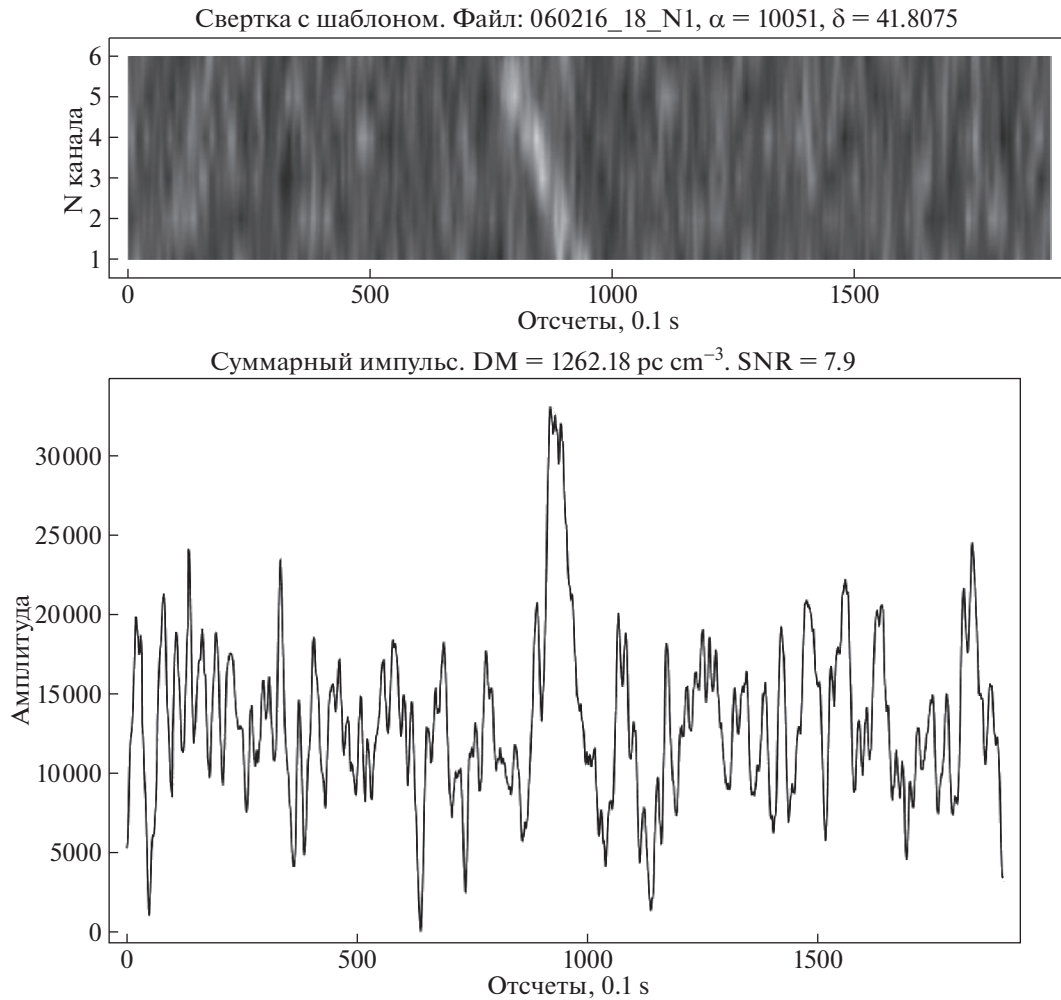


Рис. 8. Динамический спектр импульса с $DM = 273 \text{ пк/см}^3$, обнаруженного 28.11.2015. Нижнее изображение — суммарный профиль импульса. Пиковая плотность потока 0.52 Ян , Галактические координаты $l = 133.20^\circ$, $b = -31.07^\circ$.

радиовсплесков. Часть обнаруженных импульсов с большими величинами DM лежит далеко от оптически ярких частей галактик М 31 и М 33, где концентрация вещества значительно меньше по сравнению с центральными областями, поэтому можно сделать предположение: так как достаточного количества вещества не набирается для объяснения наблюдаемых величин DM , то не все импульсы ассоциируются с исследуемыми галактиками и лишь совпадают с ними по направлению.

Наличие шумов в записях в некоторые дни наводит на мысль, что обнаруженные импульсы могут образоваться случайно путем наложения вариаций интенсивности в “нужных” местах записей в шести частотных каналах. Поэтому было решено подвергнуть полученные результаты детальному статистическому анализу. Такой анализ проводился двумя способами: вычислялась вероятность случайного выстраивания импульсов в динамический спектр и вероятность образования случайного импульса в зависимости от отношения сигнал/шум.

Напомним, что анализировались ежедневные записи длительностью $T_{rec} = 300 \text{ с}$. Запись пропускалась через согласованный фильтр с характерной шириной $t_s = 1 \text{ с}$, что приводит к количеству независимых отсчетов в записи равному $m = T_{rec}/t_s$. Рис. 12 схематично показывает динамический спектр со всеми используемыми величинами. Введем величину $k = t_{pulse}/t_s$. Ширина обнаруженных импульсов t_{pulse} равна нескольким секундам, что дает величину $k \sim 1-5$. Также введем величину $p = T_{rec}/t_{pulse}$. Вероятность того, что отсчеты в одном канале выстроятся друг за другом, формируя импульс, равна $P_m = 1/[(m-1)(m-2)\dots(m-k)]$. Вероятность того, что отдельные импульсы в каналах сформируют динамический спектр, равна $P_n = 1/p^{(n-1)}$, где $n = 6$ — число частотных каналов. “-1” в показателе степени знаменателя вероятности P_n учитывает, что импульс может появиться в любом месте записи и на факт обнаружения это не влияет.

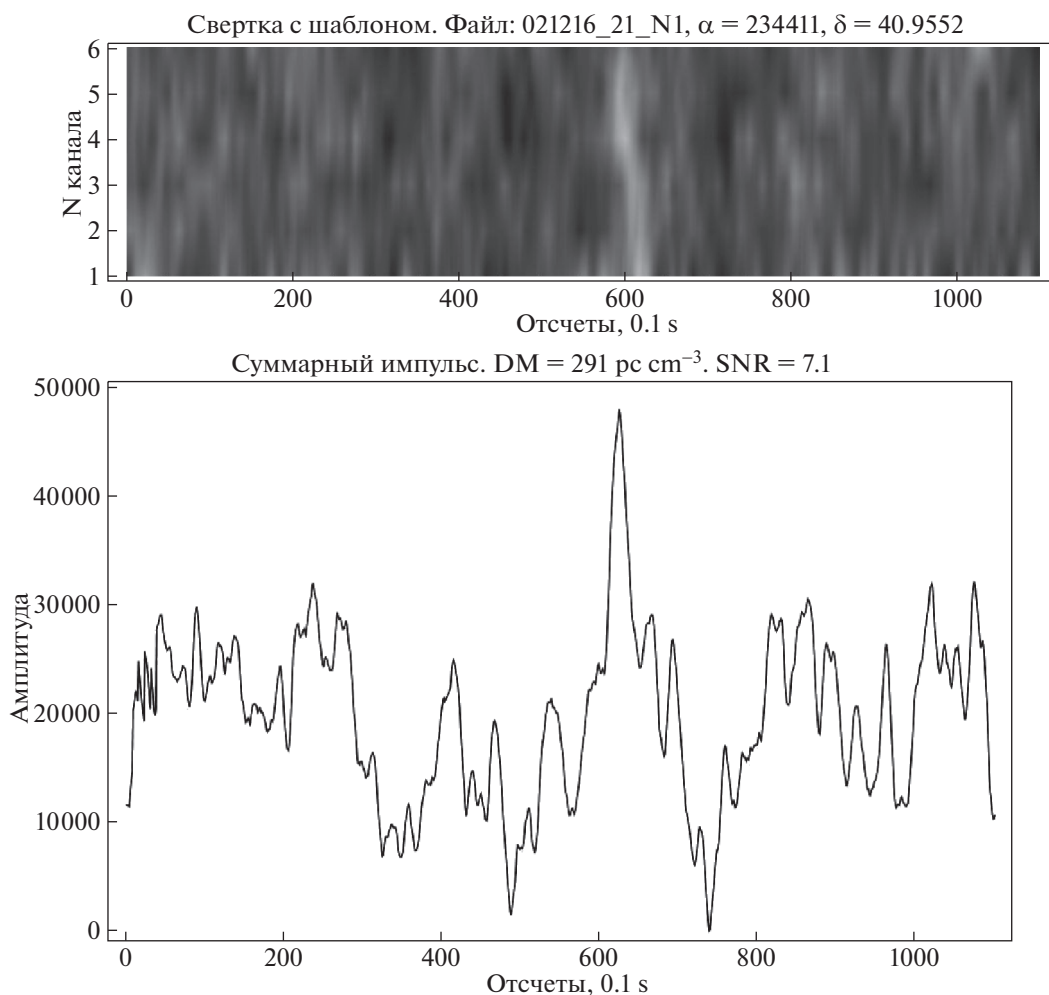


Рис. 9. Динамический спектр импульса с $DM = 1262 \text{ пк/см}^3$, обнаруженного 06.02.16. Нижнее изображение — суммарный профиль импульса. Пиковая плотность потока 0.26 Ян . Галактические координаты $l = 124.90^\circ$, $b = -21.20^\circ$.

Таким образом, общая вероятность выстраивания отсчетов в динамический спектр равна $P_{tot} = P_m P_n \sim 10^{-12} - 10^{-19}$.

Вероятность превышения отсчета пороговой величины сигнал/шум вычислялась следующим образом. Из поканальных записей вычиталось сглаженное по 150 отсчетам среднее значение, полученное с помощью медианного фильтра. Далее строилось эмпирическое распределение отсчетов. Оказалось, что оно лучше всего описывается распределением Лапласа (двойное экспоненциальное распределение). Определялись параметры этого распределения (среднее и дисперсия), и из этих параметров вычислялась вероятность превышения заданной величины сигнал/шум. Для $S/\text{Ш} \sim 7-10$ вероятность превышения равна $P_r = 3 \times 10^{-2} - 8 \times 10^{-3}$.

Таким образом, обнаружение быстрого радиовсплеска сводится к одновременному выполнению двух условий: превышению отсчетов порогового

значения сигнал/шум и выстраиванию этих отсчетов в динамический спектр. Вероятность одновременного совпадения двух этих факторов равна $P = P_r P_{tot} \sim 10^{-14} - 10^{-23}$, что, на наш взгляд, является достаточно малой величиной, чтобы произойти случайным образом за 6 930 часов проанализированных данных в $\sim 82\,000$ отдельных сканов.

5. ОБСУЖДЕНИЕ

Первоначальной задачей нашей работы были поиск и оценка параметров быстрых радиовсплесков в направлении галактик М 31 и М 33 в архивных данных радиотелескопа БСА ФИАН. Исходя из оценок меры дисперсии обнаруженных импульсов, приведенных в табл. 1, а также из-за отсутствия видимой концентрации всплесков к центру исследуемых галактик возникает естественное предположение, что области, в которых были сгенерированы некоторые всплески, находятся гораздо дальше, чем указанные галактики. Таким

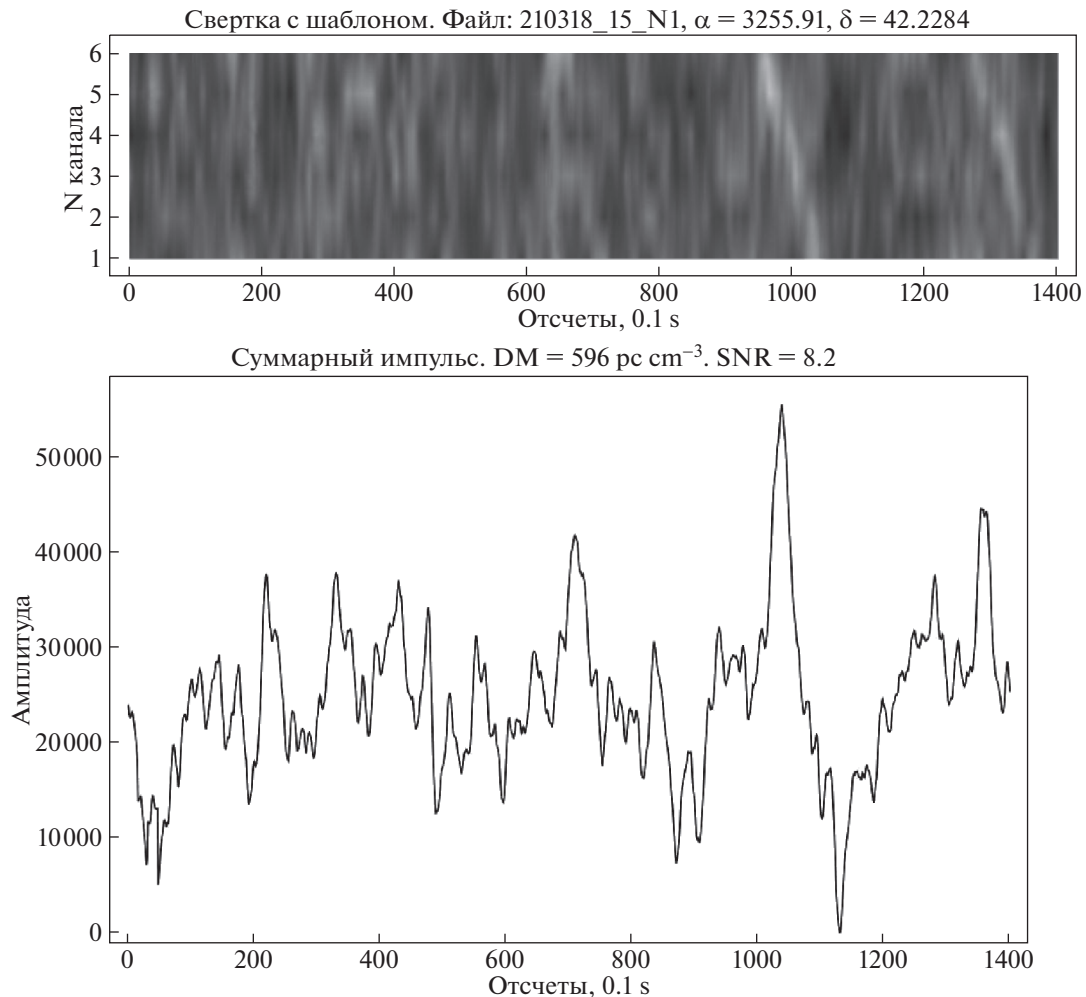


Рис. 10. Динамический спектр импульса с $DM = 291 \text{ пк/см}^3$, обнаруженного 02.12.2016. Нижнее изображение — суммарный профиль импульса. Пиковая плотность потока 0.29 Ян . Галактические координаты $l = 109.48^\circ$, $b = -20.32^\circ$.

образом, можно сделать вывод, что не для всех зарегистрированных сигналов галактики М 31 и М 33 являются родительскими.

Ранее мы зафиксировали подобные импульсы в других участках неба [13]. Новые зарегистрированные сигналы по своим характеристикам схожи с импульсами из работы [12], а также с параметрами быстрых радиовсплесков из каталога FRB.

Отдельно коснемся вопроса наблюдаемого количества радиовсплесков. За шесть лет проанализирована область неба $\sim 30 \text{ кв. гр}$. За это время обнаружено девять импульсов. Пересчитывая это количество на всю площадь неба и предполагая, что обнаруженные всплески никак не связаны с галактиками М 31 и М 33, получаем средний темп регистрации всплесков антенной БСА на частоте $110 \text{ МГц} \sim 2000 \text{ импульсов/год}$.

На данный момент одной из проблем в исследовании этих событий является оценка величины

спектрального индекса. В различных статьях оценка этой величины FRB 121102 колеблется от 1 до 10 [14]. Такой большой разброс величины спектрального индекса объясняется, на наш взгляд, в первую очередь тем, что измерения проводились в полосе приема, в которой мгновенное распределение пиковой плотности потока по частотам определяется мерцаниями при распространении импульса в межзвездной среде, а не физикой излучения. После обнаружения большого числа новых импульсов FRB 121102 в течение 2018 г. авторами в статье [15] дана оценка спектрального индекса $\alpha = -1.6$. В телеграмме [16] мы также даем оценку спектрального индекса FRB 121102 $\alpha \sim -0.6 \pm 0.4$. Такой результат основан на анализе измеренных плотностей потока повторяющего радиовсплеска FRB 121102 и на нашем предположении [12], что на частоте 111 МГц мы зарегистрировали и измерили повторный импульс указанного события.

Егоров и Постнов [17] предложили механизм возникновения радиовсплесков через взаимодей-

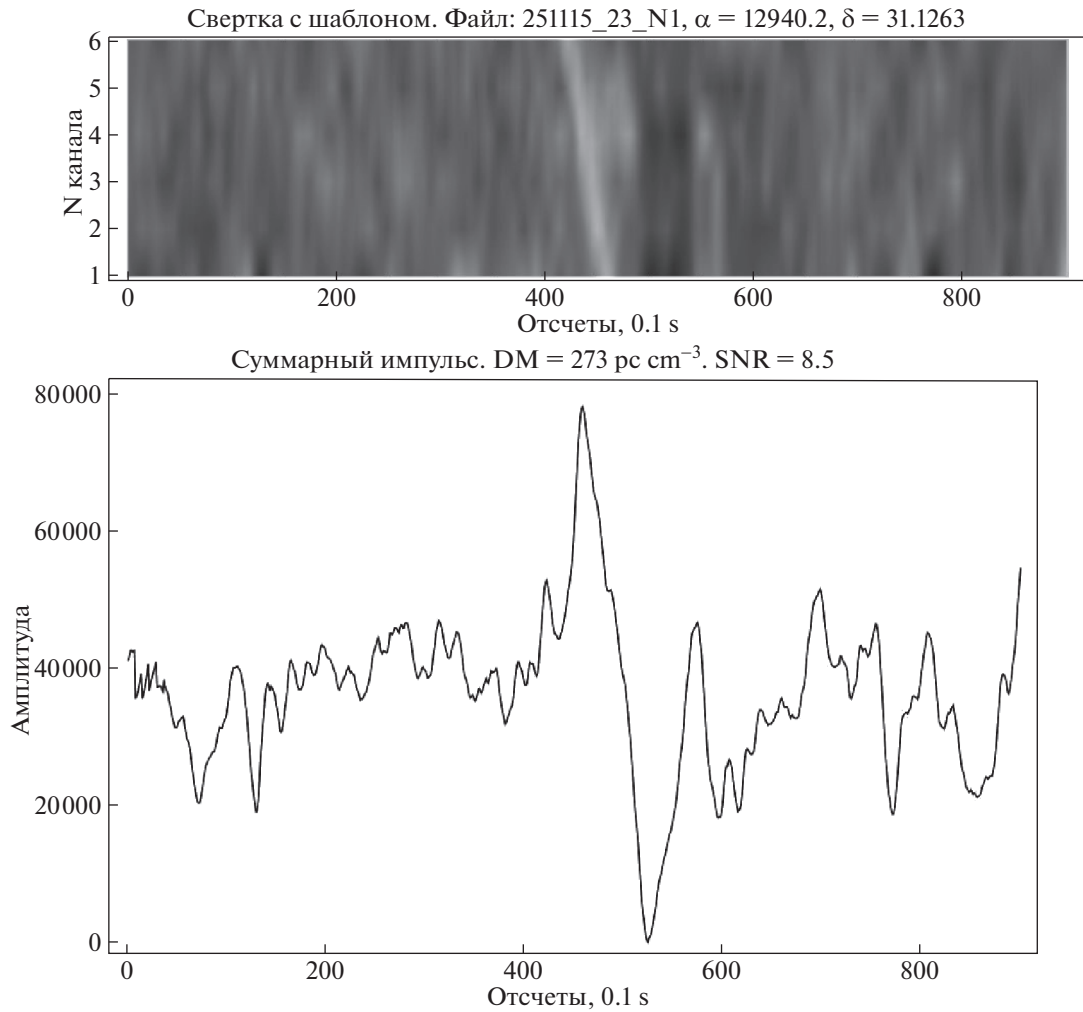


Рис. 11. Динамический спектр импульса с $DM = 596 \text{ пк/см}^3$, обнаруженного 21.03.2018. Нижнее изображение — суммарный профиль импульса. Пиковая плотность потока 0.54 Ян . Галактические координаты $l = 119.46^\circ$, $b = -20.72^\circ$.

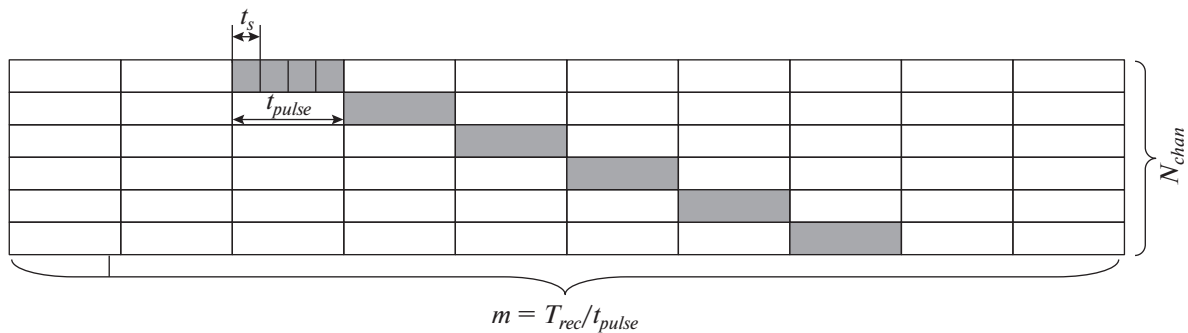


Рис. 12. Схематическое изображение динамического спектра для расчета вероятности его случайного возникновения. $T_{rec} = 300 \text{ с}$ — длина записи, $N_{chan} = 6$ — число частотных каналов, $t_s = 1 \text{ с}$ — величина рассеяния для шаблона, t_{pulse} — характерная ширина импульса.

ствии потока плазмы, истекающей от магнитных полюсов нейтронной звезды, и ударной волны, возникающей после взрыва сверхновой и проходящей через пульсар. В настоящее время этот механизм

не рассматривается как основной, так как не обеспечивает сопутствующих явлений в других диапазонах и не объясняет повторных радиовсплесков. Тем не менее идея “поджиг” вещества конусом из-

лучения пульсара представляется достаточно интересной. Если рассмотреть гипотетическую двойную систему с пульсаром, в которой звезда-компаньон проявляет активность в виде выброса вещества, то при таком механизме будут возникать радиовсплески через неравные промежутки времени.

Дополнительно хочется высказать идею в отношении больших мер дисперсий радиовсплесков. При удачной взаимной геометрии ударной волны, нейтронной звезды и наблюдателя может возникнуть такая ситуация, что импульс будет вынужден проходить через значительную толщину ионизованного вещества. Это, в свою очередь, приведет к значительным величинам наблюдаемых значений DM . Таким образом, если принять такой механизм, то масштаб космологических расстояний, на которых предположительно возникают радиовсплески, и энерговыделений при возникновении вспышки можно будет снизить.

Возвращаясь к вопросу о моделях событий, генерирующих быстрые радиовсплески, мы предполагаем следующее.

Во-первых, из всего списка радиовсплесков выделяется два — FRB 121102 и FRB 180814.J0422+73. Импульсы от них были приняты неоднократно, в отличие от других. Этот факт уже указывает на то, что повторные и единичные явления FRB имеют различный механизм возникновения.

Во-вторых, визуальный анализ зарегистрированных радиовсплесков показывает, что все они имеют совершенно разный вид, в частности ширину, которая не объясняется только лишь уширением в полосе приема, а обусловлена внутренними свойствами импульсов.

В-третьих, большой диапазон мер дисперсий DM и оценка энерговыделения всех событий могут указывать на принципиально новое явление, не известное до сих пор или предсказанное только в теории. К таким моделям можно отнести, например, модель, указанную в работе [18]. В данной модели с помощью процесса Примакова объясняется механизм превращения аксионов, частиц темной материи, в фотоны в магнитном поле. Следует отметить, что разрушение облаков такой материи объектом с мощным магнитным полем может дать импульсы длительностью несколько секунд [19]. Все обнаруженные импульсы также имеют характерную ширину в несколько секунд. Учет рассеяния в среде и уширения в частотных каналах позволяет уменьшить их ширину до $\sim 0.1-2$ с.

Таким образом, несмотря на наличие моделей, объясняющих как одиночные, так и повторные радиовсплески, авторы придерживаются более естественного, на их взгляд, предположения, что зарегистрированные явления могут иметь разную природу.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты данной работы.

1. В архивных данных радиотелескопа БСА ФИАН в период с июля 2012 г. по август 2018 г. обнаружено три быстрых радиовсплеска в направлении галактики М 33, два из которых предположительно возникли в одной и той же области неба и, таким образом, являются повторными.
2. В этот же период в направлении галактики М 31 обнаружено шесть быстрых радиовсплесков с различной мерой дисперсии.

Таким образом, в общей сложности в период с июля 2012 г. по август 2018 г. в архивных данных радиотелескопа БСА ФИАН удалось обнаружить девять быстрых радиовсплесков с мерами дисперсии в диапазоне от 203 до 1262 пк/см³. Все параметры импульсов приведены в табл. 1.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа В.А. Федоровой выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант 16-29-13074).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность директору ПРАО Р.Д. Дагкесаманскому и заместителю директора ПРАО В.В. Орешко за обсуждение статьи, приведшее к ее улучшению.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. E. Petroff, L. Houben, K. Bannister, S. Burke-Spolaor, et al., arXiv:1710.08155 [astro-ph.IM] (2017).
2. M. Kokubo, K. Mitsuda, H. Sugai, S. Ozaki, et al., *Astrophys. J.* **844**, id. 95 (2017).
3. M. Amiri, K. Bandura, M. Bhardwaj, P. Boubel, et al., *Nature* **566**, 230 (2019).
4. D. R. Lorimer, M. Bailes, M. A. McLaughlin, D. J. Narkevic, and F. Crawford, *Science* **318**(5851), 777 (2007).
5. I. R. Linscott and J. W. Erkes, *Astrophys. J.* **236**, L109 (1980).
6. P. M. McCulloch, P. A. Hamilton, J. G. Ables, and A. J. Hunt, *Nature* **303**, 307 (1983).
7. M. A. McLaughlin and J. M. Cordes, *Astrophys. J.* **596**, 982 (2003).

8. E. Rubio-Herrera, B. W. Stappers, J. W. T. Hessels, and R. Braun, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **428**(4), 2857 (2013).
9. 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).
10. А. Е. Родин, В. В. Орешко, В. А. Самодуров, *Астрон.журн.* **94**(1), 35 (2017).
11. А. Д. Кузьмин, Б. Я. Лосовский, К. А. Лапаев, *Астрон. журн.* **84**(8), 685 (2007).
12. В. А. Федорова, А. Е. Родин, *Астрон. журн.* **96**(1), 41 (2019).
13. А. Е. Родин, В. А. Федорова, В. А. Самодуров, С. В. Логвиненко, *Астрон. циркуляр* **1641**, 1 (2018).
14. L. G. Spitler, J. M. Cordes, W. T. Hessels, D. R. Lorimer, et al., *Astrophys. J.* **790**, id. 101 (2014).
15. J.-P. Macquart, R. M. Shannon, K. W. Bannister, C. W. James, R. D. Ekkers, and J. D. Bunton, arXiv:1810.04353 [astro-ph.HE] (2018).
16. А. Е. Родин and V. A. Fedorova, *Astron. Telegram* № 11932 (2018).
17. А. Е. Егоров, К. А. Постнов, *Письма в Астрон. журн.* **35**(4), 272 (2009).
18. I. I. Tkachev, *JETP Letters* **101**(1), 1 (2015).
19. M. S. Pshirkov, *Intern. J. Modern Physics D* **26**(07), id. 1750068, (2017).