

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физический институт имени П. Н. Лебедева Российской Академии наук
«ФИАН»

На правах рукописи

Федорова Виктория Александровна

**Обнаружение и исследование спорадических всплесков на
радиотелескопе БСА ФИАН**

Специальность 1.3.1 - Физика космоса, астрономия
(физико-математические науки)

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
кандидат физико-математических наук
Родин Александр Евгеньевич

Москва – 2023

Оглавление

Введение	4
1 Математическое моделирование и методика обработки данных	21
1.1 Математическое моделирование	21
1.2 Обработка данных	25
1.3 Заключение	31
2 Наблюдения и свойства быстрых радиовсплесков	32
2.1 Технические характеристики радиотелескопа БСА ФИАН	32
2.2 Результаты поиска быстрых радиовсплесков на 111 МГц	36
2.2.1 Поиск быстрых радиовсплесков от известного события FRB121102	36
2.2.2 Поиск быстрых радиовсплесков в направлении галактик M31 и M33	39
2.2.3 Поиск быстрых радиовсплесков в области неба, доступной для наблюдений на радиотелескопе БСА ФИАН	58
2.2.4 Каталог быстрых радиовсплесков на 111 МГц	72
2.3 Заключение	79
3 Сравнение свойств быстрых радиовсплесков на 111 МГц и бо- лее высоких частотах	81
3.1 Распределение быстрых радиовсплесков по мере дисперсии DM .	81
3.2 Измерение рассеяния $\tau(DM)$ быстрых радиовсплесков на разных частотах	82
3.3 Рассмотрение зависимости $\log N - \log F$ и определение среднего спектрального индекса	91
3.4 Заключение	93

4	Поиск импульсного излучения от магнетара SGR 1935+2154	95
4.1	Наблюдения магнетара SGR 1935+2154 на частоте 111 МГц . . .	99
4.2	Результаты поиска импульсного излучения от магнетара SGR 1935+2154	100
4.3	О связи магнетаров и быстрых радиовсплесков	102
4.4	Заключение	105
	Заключение	106
	Список литературы	109

Введение

Начало исследованиям импульсного излучения космических радиоисточников впервые было положено после открытия Э. Хьюишем пульсаров в 1967 году [1]. В настоящее время в пульсарный каталог занесено почти 3 000 пульсаров [2]. Все эти источники обладают уникальными характеристиками и делятся на два больших класса: различают пульсары секундные, период которых 0.1 с и более, и миллисекундные. Кроме того существует отдельная категория объектов с мощным магнитным полем $10^{13} - 10^{15}$ Гс. Эти объекты называются магнетарами и в данный момент в нашей Галактике их открыто более 30 [3, 4]. Как пульсары, так и магнетары широко используются в различных астрофизических и астрометрических исследованиях. Например, миллисекундные пульсары активно используют для построения высокоточной пульсарной шкалы времени и космической навигации [5, 6]. Также пульсары в качестве космических зондов используют для исследования межзвездной среды [7, 8, 9]. Тесные двойные системы, куда входит пульсар, представляют особый интерес. Такие системы – это уникальная лаборатория для проверки различных релятивистских эффектов и теорий гравитации, в том числе, теории относительности [10]. С помощью магнетаров исследуются различные физические эффекты при сверхсильных магнитных полях. Например, изучение момента сил, действующих на вращающийся намагниченный шар в вакууме или магнитоупругие колебания магнетаров с учетом влияния сильных магнитных полей на намагниченную кору [11, 12].

Для наблюдений, как пульсаров, так и магнетаров необходимы очень чувствительные инструменты. К таким инструментам относится Большая Синфазная антенна Физического института им. П.Н. Лебедева (БСА ФИАН) Пушчинской радиоастрономической обсерватории. Это эквидистантная фазированная решетка, состоящая из 16 384 волновых диполей, которые равномерно расположены на участке 200 x 400 м. На сегодняшний день этот радиотелескоп является самым чувствительным в мире на частоте 111 МГц, поскольку его мгновенная чувствительность составляет 140 мЯн при временном разрешении 0.1 с. Отдельного внимания заслуживает его широкое поле зрения, благодаря которому производится ежедневный мониторинг большого участка неба. Изначально диапазон частот радиотелескопа был 101 – 104 МГц. В результате модернизации антенны в 2010 – 2012 годах рабочий диапазон частот сместился на 109 – 111.5 МГц. В первую очередь радиотелескоп создавался для наблюдений пульсаров и

мерцающих источников. В данный момент этот инструмент является основным в Пушинской радиоастрономической обсерватории.

Также отличительной особенностью телескопа является наличие стационарной (ДН-3) и нестационарной (ДН-1) диаграмм направленности. ДН-3 имеет 128 лучей и была создана в ходе модернизации антенны. Сейчас диаграмма используется для ежедневного непрерывного мониторинга источников. ДН-3 ориентирована в плоскости меридиана и перекрывает участок неба в полосе от -8.20° до $+55.5^\circ$ по склонению. Вторая нестационарная диаграмма используется в основном для наблюдений пульсаров.

За последнее десятилетие в радиоастрономии выделился новый отдельный класс импульсных источников – это быстрые радиовсплески, открытые в 2007 году [13]. Одной из характерных особенностей этих явлений – отсутствие выделенных направлений и короткая длительность 0.1 – 30 мс. Большое поле зрения и высокая чувствительность БСА ФИАН позволяют обнаруживать импульсы данного типа.

Поиск быстрых радиовсплесков проводился на частоте 111 МГц – самой низкой частоте на данный момент [14, 15]. В результате за более 50 000 часов наблюдений было обнаружено и проанализировано 62 новых импульса. Критерием того, что действительно выделяются новые космические импульсы, является: 1). импульс виден только в одном луче многолучевой диаграммы БСА ФИАН, 2). импульс имеет задержку по частоте, 3). импульс виден во всех шести частотных каналах. Помехи в отличие от реальных импульсов ведут себя по-другому: они имеют протяженный по времени характер, гораздо большую интенсивность, видны в нескольких лучах одновременно. Это позволяет их отличить от космических сигналов.

Работа была проведена на радиотелескопе БСА ФИАН, предельная чувствительность которого при $\tau = 1$ с 44 мЯн, что является рекордным показателем в сравнении с другими инструментами метрового диапазона. Кроме того радиотелескоп обладает большим полем зрения, что позволяет ежедневно просматривать значительный участок небесной сферы. Из этого следует, что вероятность обнаружения быстрых радиовсплесков намного выше, чем на зарубежных инструментах. По чувствительности и общей экспозиции (время $\times$ площадь) ни один зарубежный радиотелескоп даже частично не достиг наблюдательных параметров БСА. Например, попытки поиска быстрых радиовсплесков предпринимались на радиотелескопе LOFAR, работающем в диапазоне 110

– 190 МГц. За 18.3 часа наблюдений при анализе участка неба 0.007 кв. град. не было обнаружено ни одного импульса [16]. При этом чувствительность радиотелескопа составляла 10 Ян. Более подробные технические характеристики радиотелескопа БСА ФИАН, а также сравнительные характеристики аналогичных инструментов приведены в Главе 2 в Таблице 2.1.

Впервые идея о поиске быстрых радиовсплесков с помощью радиотелескопа БСА ФИАН возникла в 2014 году. Автором такого замысла являлся Дагкесаманский Рустам Давудович, который параллельно с этим проектом разрабатывал методику поиска других импульсов – сигналов от нейтрино, пронизывающих лунную поверхность.

В качестве первого объекта исследования по наставлениям Дагкесаманского Р. Д. был взят известный FRB121102 ($DM = 557$ пк/см³, ширина импульса 3 – 8 мс), поскольку во-первых, область, в которой зарегистрирован импульс, отлично попадает в поле зрения БСА, а во-вторых, на момент реализации алгоритма уже была накоплена небольшая статистика по нескольким этим событиям на разных инструментах. Таким образом, была некая ясность, импульс с какими параметрами можно обнаружить на частоте 111 МГц. Было принято решение исследовать участок неба, в котором находился радиоисточник FRB121102, с временным разрешением 0.1 с. Данные за один месяц предварительно усреднялись по 5 с и пропускались через винеровский фильтр с заданными параметрами. Далее все полученные ежедневные результаты складывались и появлялось некое усредненное значение – шаблон за месяц. Полученный шаблон вычитался из каждого дня, за который имелись данные с участком с указанным радиовсплеском. Далее производился поиск каких-либо вариаций. Таким методом были обработаны данные в период с 2014 по 2016 гг. Для обработки был написан ряд программ на языке Python 2.7. Результат поиска вариаций в направлении FRB121102 оказался отрицательным.

В конце 2017 года Родиным Александром Евгеньевичем был предложен другой алгоритм поиска быстрых радиовсплесков. Методика поиска импульсов была существенно сложнее предыдущей и учитывала многие тонкости. Так, например, использовался шаблон, форма которого учитывала особенности распространения в межзвездной среде. При расчете шаблона также учитывалось уширение искомого импульса в канале. Кроме того был осуществлен алгоритм перебора мер дисперсии, что позволило в дальнейшем довольно точно определять этот параметр у других импульсов. Все программы для обработки данных

были специально написаны под данную задачу на языке Wolfram Mathematica. Тестирование программ на первом этапе тут же дало положительные результаты: в одном из лучей диаграммы направленности БСА было обнаружено два быстрых радиовсплеска с мерами дисперсии 247 и 1767 пк/см³. Более подробно весь алгоритм поиска быстрых радиовсплесков изложен в Главе 2.

Поскольку к началу 2020 года в архивных данных радиотелескопа БСА было обнаружено более 60 быстрых радиовсплесков, был проведен подробный анализ импульсов, который включал в себя сравнение импульсов, обнаруженных на 1400 МГц, и импульсов, зарегистрированных на 111 МГц. Были подробно рассмотрены зависимость $\text{Log}N - \text{Log}F$, распределение по DM на двух частотах, а также построена зависимость ширины импульса τ_{sc} от меры дисперсии DM для разных частот. В результате анализа было убедительно продемонстрировано, что параметры импульсов на 111 МГц и на более высоких частотах в пределах погрешности совпадают, что дает право утверждать: импульсные источники радиоизлучения, обнаруженные на частоте 111 МГц – это ни что иное, как быстрые радиовсплески.

Как было указано ранее, быстрые радиовсплески – это внегалактические импульсы миллисекундной длительности, возникающие, предположительно, в результате мощнейшего катастрофического события. Первый радиовсплеск был зарегистрирован в ходе пульсарного обзора неба. Длительность импульса не превышала 5 мс, пиковая плотность потока составила 30 Ян на частоте 1.4 ГГц, а оценка меры дисперсии дана 375 ± 1 пк/см⁻³. С учетом отсутствия события одновременно в оптическом диапазоне, было показано, что источник явления, при котором возник импульс, находился на расстоянии от 600 Мпк до 1 Гпк, а сама область локализации находилась в трех градусах от Малого Магелланового Облака. После 90 часов дополнительных наблюдений не было получено ни одного импульса. Этот факт, а также оценка энерговыделения, позволили сделать вывод о том, что новое явление возникло в результате единичного катастрофического события, аналогичного взрыву сверхновой или слиянию релятивистских объектов [17, 18]. Первый импульс получил название FRB010724 (FRB YYMMDD). В дальнейшем такая аббревиатура использовалась для всех быстрых радиовсплесков. Яркостная температура этого импульса оценивается как $\sim 10^{34}(D_{500}/W_5)^2$ К. При этом энерговыделение $\sim 10^{33}W_5D_{500}^2$ Дж, где $D_{500} = D/500$ Мпк, $W_5 = W_{int}/5$ мс.

В 2011 году в работе [19] сообщалось о регистрации 16 импульсов, аналогич-

ных FRB010724. Авторами было показано, что импульсы были обнаружены в боковых лепестках радиотелескопа Паркс и имеют земное происхождение. Новые обнаружения поставили под сомнение внегалактическую интерпретацию уже известного всплеска. Но уже в 2012 году в другом участке неба был обнаружен второй быстрый радиовсплеск, свойства которого не оставляли сомнения в том, что этот импульс имеет естественное внегалактическое происхождение [20].

Радиовсплеск FRB121102 был обнаружен также в архивных данных радиотелескопа Аресибо 2012 года в ходе пульсарного обзора, результаты работы были опубликованы только в 2014 году. Импульс был зарегистрирован в направлении антицентра Галактики на частоте 1.4 ГГц. Оценка меры дисперсии $DM = 557$ пк/см³, а также оценка концентрации электронов на луче зрения в указанном направлении позволили сделать вывод, что импульс, без сомнения, является внегалактическим. На этот факт в значительной мере указывала ширина импульса, составляющая 3 ± 1 мс и отсутствие признаков рассеяния в межзвездной среде. Наблюдаемая задержка времени прихода сигнала с частотой совпадала с ожидаемой дисперсией сигнала в ионизированной среде. Позже, в 2015 году, Штольцем было обнаружено еще десять непериодически повторяющихся импульсов от FRB121102 [21]. По своим характеристикам импульсы соответствовали сигналу, зарегистрированному ранее, а мера дисперсии в очередной раз подтверждала их внегалактическое происхождение. Регистрация повторных событий от одного и того же источника позволила наложить ограничения на некоторые модели возникновения быстрых радиовсплесков. Так, например, долгое время господствовали теории о различных катастрофических событиях, которые могли произойти только один раз: слияние двойных нейтронных звезд [22], связь с гамма-вспышками [23], мощные вспышки сверхновых [24], коллапс магнитосфер черных дыр Керра – Ньюмана [25]. Полный список моделей опубликован в электронном ресурсе [26], а также в работе [27].

Регистрация повторяющихся импульсов FRB121102 в ходе радиоинтерферометрических наблюдений с высоким временным разрешением позволила впервые отождествить событие с родительской галактикой – постоянным слабым радиоисточником с потоком 180 мЯн с непрерывным спектром, который согласуется с нетепловым излучением, и слабым (25-й звездной величины) оптическим аналогом [28]. Наблюдения показали, что источник быстрых радиовсплесков находится в области активного звездообразования или совмещен с активным

галактическим ядром с низкой светимостью. В ходе регистрации импульсов в 2016 и 2018 годах было установлено, что родительская галактика FRB121102 является карликовой и находится на расстоянии более 3 миллиардов световых лет от Земли [21, 29].

Радиовсплеск FRB150418 был зарегистрирован радиотелескопом Паркс. Совместно с телескопом ATCA (Australia Telescope Compact Array) вспышку наблюдали несколько часов подряд. Послесвечение в радиодиапазоне исчезло через несколько дней. После этого к наблюдениям был подключен телескоп Subaru с целью отождествления импульса с родительской галактикой и определением ее красного смещения [30]. В результате связь FRB150418 с наблюдаемым послесвечением опроверглась. Позже было сделано заключение о том, что «послесвечением» являлось излучение активного ядра галактики, которое со временем не исчезло, а лишь ослабло [31].

В марте 2018 года австралийская обсерватория Паркс сообщила о регистрации нескольких новых импульсов, один из которых, FRB180309, имел рекордное соотношение сигнал/шум, равное 411 [32].

10 августа 2018 года в Астрономических телеграммах появляется сообщение об обнаружении в архивных данных радиотелескопа БСА ФИАН трех быстрых радиовсплесков с различными мерами дисперсий на частоте 111 МГц [33]. Один из этих импульсов, FRB151018, по свойствам совпадает с известным повторяющимся FRB121102. Частота 111 МГц на данный момент является самой низкой частотой, на которой были обнаружены подобные импульсы.

В этот же момент группа канадских ученых опубликовала результаты поиска быстрых радиовсплесков на радиотелескопе CHIME. Первым импульсом, зарегистрированным на частоте 600 МГц был FRB180725A [34]. С помощью этого же инструмента позднее удалось зарегистрировать второй повторяющийся всплеск – FRB180916.J0158+65 [35]. В результате дополнительных совместных наблюдений источника на телескопах VLBI, Gemini North, импульс был отождествлен с родительской галактикой. В случае с FRB121102 импульс возникал в неправильной карликовой галактике с низкой металличностью, а при исследовании FRB180924 определено, что импульс приходит из массивной линзовидной галактики раннего типа [36]. При отождествлении FRB180916.J0158+65 родительской галактикой оказалась спиральная галактика SDSSJ015800.28+654253.0, находящаяся на расстоянии около $5 \cdot 10^8$ св. лет. Этот факт может говорить о том, что импульсы могут иметь различное проис-

хождение. Также отличительной особенностью обнаруженного импульса является его периодичность, примерно равная 16 суткам: всплески регистрируются на протяжении пяти дней и далее в течении следующих одиннадцати дней они не регистрируются. Этот результат был получен впервые в исследовании быстрых радиовсплесков. Дальнейшие исследования FRB180916.J0158+65 в других более высокочастотных диапазонах не дали никаких результатов [37, 38, 39, 40]. Всего на радиотелескопе CHIME было обнаружено около 700 быстрых радиовсплесков, 19 из которых повторяющиеся [41, 42].

В период 2012 – 2018 года в архивных данных радиотелескопа БСА ФИАН на частоте 111 МГц проводился поиск быстрых радиовсплесков в направлении галактик М31 и М33. В результате исследования было найдено восемь новых быстрых радиовсплесков, один из которых повторяющийся, FRB151125.1 и FRB151125.2 [43, 15]. С учетом меры дисперсии можно сделать выводы, что зарегистрированные импульсы не относятся к исследуемым галактикам, а находятся гораздо дальше.

Одно из последних ярких событий в области исследований быстрых радиовсплесков произошло в конце апреля 2020 года. Канадские ученые сообщили об обнаружении на частотах 600 и 1400 МГц ярчайшего импульса, аналогичного импульсу FRB, от известного галактического магнетара SGR1935+2154 [44].

Как уж было сказано выше, магнетар представляет собой нейтронную звезду с мощным магнитным полем $\sim 10^{13} - 10^{14}$ Гс, теоретическое предсказание которой было сделано еще в 1992 году [45, 46]. В 1979 году в гамма- и рентгеновском диапазоне был зарегистрирован яркий сигнал, предположительно испущенный источником в Большом Магеллановом облаке, и по свойствам напоминающий позже открытые магнетары [47]. Первый галактический магнетар, SGR1900+14, был открыт в 1998 году при наблюдении мощной вспышки также в гамма- и рентгеновском диапазоне [48].

Предполагалось, что магнетары являются объектами, излучающими только в двух диапазонах – гамма- и рентгеновском. Но в 1997 году Кузьминым впервые был зарегистрирован сигнал в радиодиапазоне на частоте 102 МГц от известного источника PSR J0633+1746 (Геминга) [49]. На данный момент ученым известен 31 магнетар [3].

Впервые вспышка от источника SGR1935+2154 была зарегистрирована в 2014 году [50]. Космическая обсерватория «Чандра» наблюдала пульсации SGR1935+2154 на уровне 10σ , что позволило определить источник как канди-

дат в магнетары. Объект также наблюдался с помощью аппарата Конус-Винд [51]. Оценка продолжительности импульса, равная 1.7 с, и измерение флюэнса $\sim 2.5 \cdot 10^{-5}$ эрг $\cdot$ см $^{-2}$ позволили отнести источник к объектам, имеющим редкие промежуточные вспышки в мягком гамма-диапазоне. В результате наблюдений остатка галактической сверхновой G57.2 + 0.8 на частотах 1420 и 408 МГц Козес и др. отождествил его с SGR1935+2154, поскольку оценка возраста, расстояния, поляризации и спектрального индекса остатка показали, что объекты физически связаны [52]. В ноябре 2019 года аппарат Konus-Wind зарегистрировал повышенную активность объекта [53]. Пиковая энергия импульсов в γ -диапазоне достигала 29.4 ± 1.9 keV. Вплоть до конца апреля 2020 года иная вспышечная активность не была зарегистрирована.

27 апреля 2020 года телескопами Swift и Fermi/GMB были вновь зарегистрированы вспышки от SGR1935+2154 [54]. Уникальность события состояла в том, что за первые 24 минуты наблюдений было зарегистрировано около 35 отдельных импульсов. При более ранних наблюдениях в пик активности регистрировалось всего несколько вспышек. Менее чем через сутки, 28 апреля, от источника на частоте 400 МГц радиотелескопом CHIME/FRB впервые было зарегистрировано мощное импульсное радиоизлучение [44]. Оценка меры дисперсии импульса составила $DM = 332.8$ пк/см 3 , что согласуется с ранее полученными оценками модели плотности электронов на луче зрения в Галактике NE2001 [55]. Сигнал имел структуру, состоящую из двух импульсов шириной около 5 мс, разделённых временным интервалом около 30 мс. Благодаря дальнейшим наблюдениям SGR1935+2154 на STARE2 была зарегистрирована вспышка, флюэнс которой составил > 1.5 МЯн $\cdot$ мс [56]. Этот факт позволил утверждать, что явления подобного рода хорошо вписываются в модели, описывающие быстрые радиовсплески (FRBs), впервые открытые в 2007 году и являющиеся внегалактическими объектами [13, 57].

Периодическое излучение от SGR 1935+2154 в радиодиапазоне впервые было зарегистрировано радиотелескопом MNC (Medicina Northern Cross) на частоте $408 \text{ МГц} \pm 16 \text{ МГц}$ [58]. По этим наблюдательным данным периодический сигнал с мерой дисперсии $DM = 316 \text{ пк/см}^3 \pm 18 \text{ пк/см}^3$ и шириной импульса около 100 мс имеет период $P = 3.24760$ с. Кроме того периодическое излучение было обнаружено радиотелескопом FAST на частоте $1.25 \text{ ГГц} \pm 460 \text{ МГц}$ [59].

Поскольку магнетар SGR1935+2154 попадает в поле зрения радиотелескопа БСА ФИАН, было принято решение провести мониторинг источника, начиная

с сентября 2019 года по март 2021 года. В результате 2 сентября 2020 года был обнаружен импульс на частоте 111 МГц, полные характеристики которого приводятся в Главе 4 в Таблице 4.2 [144, 145].

В каталог быстрых радиовсплесков сигнал от магнетара SGR 1935+2154, впервые зарегистрированный радиотелескопом CHIME, занесен как FRB200428. На данный момент FRB200428 – это единственное событие подобного рода, зарегистрированное в Млечном Пути. Таким образом, на сегодняшний день в каталоге быстрых радиовсплесков числится более 600 подтвержденных событий [60].

В ходе выполнения данной работы коллегами ПРАО были высказаны различные пожелания, призванные улучшить качество работы, которые приводятся ниже.

1. «Необходимо применить метод свертки к известному пульсару и показать, что предложенная методика работает» В главе «Математическое моделирование» подробно дан ответ на этот вопрос. Данная методика была применена к известному пульсару B2154+40 (Рис. 1.6) с мерой дисперсии 78 пк/см^3 . Из рисунка видно, что при применении методики увеличилось отношение сигнал/шум на мере дисперсии $DM = 78 \text{ пк/см}^3$.
2. «В результате обработки большого массива данных можно обнаружить случайное выстраивание шумовых вариаций в динамический спектр» Ответ на это предположение дан в Главе «Наблюдательные свойства быстрых радиовсплесков». В разделе 2.2.2 показано, что вероятность случайного выстраивания шумов в сигнал с поканальной задержкой по времени ограничивается величиной $P < 2 \cdot 10^{-12}$.
3. «Все искомые импульсы должны быть видны в записях БСА ФИАН без какой-либо обработки, а методика свертки данных с шаблоном согласованной формы недопустима» В Главе «Математическое моделирование» приводится пример записи с FRB 131030 без обработки и после сглаживания шаблоном (Рис. 1.7). На рисунках ярко продемонстрировано, что методика выделения сигнала на фоне шумов отлично работает. Во-первых, она хорошо позволяет выделить импульс на фоне шумов, что является важным при визуальном обнаружении. Во-вторых, заметно увеличивается отношение сигнал/шум в сравнении с первоначальной записью.

4. «Для поиска быстрых радиовсплесков неправильно использовать 6-канальные данные с низким временным разрешением (100 мс). Нужно использовать только 32-канальные данные с временным разрешением 1/80 сек.» Методика поиска быстрых радиовсплесков на частоте 110 МГц предназначена для обнаружения импульсов длительностью более 100 мс. Поэтому, хотя уширение в отдельном, более узком частотном канале уменьшится, это не приведет к значительному увеличению отношения сигнал/шум. К тому же при обработке 32-канальных данных их объём возрастает в 43 раза, что требует совершенно других вычислительных мощностей, которыми мы не обладаем.
5. Один из рецензентов статьи «Сравнительный анализ наблюдательных свойств быстрых радиовсплесков на частотах 111 и 1400 МГц» [61] в качестве убедительного аргумента того, что найденные импульсы являются быстрыми радиовсплесками, посоветовал построить зависимость $\text{Log}N - \text{Log}F$. Такая зависимость для импульсов, обнаруженных на частоте 111 МГц, была построена и оказалась похожей на зависимость $\text{Log}N - \text{Log}F$ для импульсов на частоте 1400 МГц и следует закону $-3/2$. Подробно данное исследование описано в Главе «Сравнение свойств быстрых радиовсплесков на частоте 111 МГц и более высоких частотах» (Раздел 3.3).
6. «Необходимо привести вероятность ложной тревоги» Вероятность ложной тревоги для быстрых радиовсплесков, обнаруженных на частоте 111 МГц, приводится в Главе «Наблюдательные свойства быстрых радиовсплесков», в Разделе 2.2.2.
7. «Наблюдательная полоса слишком узкая, поэтому не видна нелинейность в динамическом спектре DM/f^2 , соответственно невозможно однозначно доказать астрофизическое происхождение импульсов» Для ярких импульсов нелинейность видна даже в такой узкой полосе, но для слабых ее действительно сложно заметить. Но, несмотря на это, к импульсам применяются другие критерии, которые позволяют отличить их от помех: импульсы должны быть видны в одном луче диаграммы направленности антенны, должны иметь частотную зависимость времени прихода и должны регистрироваться во всех шести частотных каналах.

Актуальность темы

Со времени открытия быстрых радиовсплесков в 2007 году прошло уже много лет, но до сих пор нет достаточно полной статистики по их свойствам, не проводилось детальное сравнение их характеристик на разных частотах. Данная работа призвана частично восполнить этот пробел. Хотя после обнаружения галактического радиовсплеска в виде мощнейшей вспышки от магнетара SGR 1935+2154 механизм их возникновения более-менее определен, тем не менее остаются и другие теории возникновения радиовсплесков, количество которых на момент написания диссертации составляет несколько десятков. Возможность исследовать импульсы на низких частотах трудно переоценить, поскольку это дает возможность более полно представить картину данного явления. Наблюдения одного и того же события на разных частотах позволяют вычислить спектральный индекс между этими частотами. Также возможность наблюдений импульсов как на высоких, так и на низких частотах позволяет сузить диапазон моделей, описывающих механизмы возникновения быстрых радиовсплесков. Ежедневный мониторинг большого участка неба с помощью высокочувствительного радиотелескопа БСА ФИАН позволяет накапливать огромную статистику по быстрым радиовсплескам, а также позволяет анализировать свойства межгалактической среды и распределение в ней вещества. Кроме того, существует мнение о том, что быстрые радиовсплески не имеют выделенных направлений. Обзор доступной для БСА части неба поможет частично дать более точный ответ на этот вопрос.

Цели и задачи исследования

Основной задачей работы являлось обнаружение с помощью специально разработанного метода быстрых радиовсплесков и измерение их характеристик. Измеренные характеристики сравнивались с характеристиками импульсов на частоте 1400 МГц. На основании сравнительного анализа параметров обнаруженных быстрых радиовсплесков на различных частотах делаются выводы о свойствах межгалактической среды в широком диапазоне красных смещений z и мер дисперсий DM.

Также целью настоящей работы являлась регистрация радиоизлучения от магнетара SGR 1935+2154 на частоте 111 МГц и измерение его характеристик.

Научная новизна

В диссертации получен ряд принципиально новых результатов. Во-первых, разработан алгоритм для поиска быстрых радиовсплесков на низких частотах, с помощью которого слабые импульсы выделяются на фоне шумов. Во-вторых, в несколько этапов проведен поиск быстрых радиовсплесков на частоте 111 МГц. В результате работы было зарегистрировано более 60 импульсов и составлен каталог импульсов на 111 МГц. Обнаружение импульсов на столь низкой частоте также является результатом, полученным впервые. В-третьих, впервые проведен сравнительный анализ радиовсплесков, зарегистрированных на частоте 111 и 1400 МГц, в ходе которого были получены новые результаты о свойствах межгалактической среды. В-четвертых, по измерениям флюэнса на частотах 111 и 1400 МГц впервые измерен средний по популяции спектральный индекс быстрых радиовсплесков.

В-пятых, впервые на частоте 111 МГц было зарегистрировано импульсное излучение от магнетара SGR 1935+2154, в период активности которого были зарегистрированы сигналы, по мощности аналогичные быстрым радиовсплескам.

Достоверность результатов

Представленные в работе результаты получены с использованием как ранее разработанных методов, так и с помощью новых алгоритмов. Кроме того, для всех оценок параметров быстрых радиовсплесков на 111 МГц даны оценки погрешностей, которые приведены в Главе 3. В качестве независимого подтверждения достоверности результатов посчитана вероятность случайного выстраивания шумовых вариаций в динамический спектр, которая для отдельно анализируемого скана даже без учета отношения «сигнал/помеха» оказалась равной $P \sim 10^{-12}$, что на практике является исчезающе малой величиной. Таким образом, все приведенные в работе спорадические импульсы являются не случайными. Половина импульсов имеет отношение сигнал/шум больше 5.

Практическая значимость

На август 2023 года на опубликованные по результатам работы статьи имеется 40 ссылки (с учетом Астрономических телеграмм 49), в том числе в ведущих зарубежных журналах. Часть обнаруженных импульсов уже внесена в каталог FRB (FRBSTATS: Catalogue) [62]. Полученные результаты при анализе быстрых радиовсплесков, зарегистрированных на 111 МГц, в первую очередь

применимы к исследованиям свойств межгалактической среды. Также, как уже отмечалось выше, сам факт обнаружения быстрых радиовсплесков на столь низкой частоте позволяет отбросить часть моделей, которые запрещают появление импульсного излучения на 111 МГц, например, таких как слияние белого карлика или нейтронной звезды и черной дыры [63, 64]. Поиск импульсов по всему доступному участку неба позволит на практике подтвердить изотропность появления быстрых радиовсплесков на небе.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации – 122 страниц, включая список литературы из 156 библиографических ссылок, 44 рисунка и 5 таблиц.

Во Введении кратко представлена основная информация по теме диссертации.

Глава 1 включает в себя описание математического моделирования искомого сигнала, состоящего из нескольких этапов: определение формы искомого импульса, определение методики выделения импульсного сигнала на фоне шумов, проверка работоспособности метода на реальных источниках и, непосредственно, поиск быстрых радиовсплесков в архивных данных радиотелескопа БСА ФИАН.

Глава 2 содержит подробное описание технических характеристик радиотелескопа БСА ФИАН. В главе также описываются быстрые радиовсплески, приводятся их характеристики и особенности, приводятся результаты поиска импульсов на 111 МГц.

Глава 3 посвящена сравнению свойств быстрых радиовсплесков на частотах 111 и 1 400 МГц. Построена зависимость $\text{Log}N - \text{Log}F$, определен спектральный индекс, построено распределение по DM на разных частотах, показана зависимость ширины импульса τ_{sc} от меры дисперсии DM .

В Главе 4 приводятся результаты поиска импульсного излучения от магнетара SGR 1935+2154 в архивных данных радиотелескопа БСА ФИАН в период с сентября 2019 года по март 2021 года. В результате анализа обнаружен импульс от указанного магнетара. Параметры SGR 1935+2154, зарегистрированные на 111 МГц, согласуются с результатами, полученными на других инструментах на более высоких частотах.

Заключение представляет собой обобщение всех полученных результатов.

Основные результаты, выносимые на защиту:

1. Разработан метод на основе согласованных фильтров для обнаружения импульсных сигналов.
2. Впервые обнаружено 62 быстрых радиовсплеска на частоте 111 МГц. Определены их параметры.
3. Показано, что по ряду свойств спорадические импульсы на 111 МГц не отличаются от быстрых радиовсплесков на более высоких частотах.
4. Измерен средний спектральный индекс $\alpha = -0.63 \pm 0.20$ по радиовсплескам, обнаруженным на 111 МГц, в сравнении с импульсами на 1400 МГц.
5. Путем сравнения ширины импульсов на 111 и 1400 МГц показано, что зависимость ширины от частоты подчиняется закону $\tau \sim f^{-2}$, и, таким образом, если интерпретировать ширину импульсов как рассеяние в среде, то свойства межгалактической среды принципиально отличаются от свойств межзвездной среды.
6. Обнаружено импульсное излучение от магнетара SGR 1935+2154, измерены его параметры на 111 МГц.

Апробация результатов:

1. Фёдорова В.А., «FRBs: поиск вариаций низкочастотного радиоизлучения из соответствующих участков неба», Всероссийская астрофизическая конференция «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра (НЕА — 2016)» (Москва, 20 — 23 декабря 2016 г.);
2. Фёдорова В.А., Родин А.Е., Дагкесаманский Р.Д., Самодуров В.А., Логвиненко С.В., «Обнаружение быстрых радиовсплесков (FRB) на радиотелескопе БСА ФИАН», XXXV Всероссийская конференция «Актуальные проблемы внегалактической астрономии», (Пушино, 24 — 27 апреля 2018г.);
3. Фёдорова В.А., Родин А.Е., «Метод поиска и обнаружение FRBs на радиотелескопе БСА ФИАН», Всероссийская Радиоастрономическая конференция (ВРК — 2018), (Санкт — Петербург, 17 — 21 сентября 2018г.);

4. Фёдорова В.А., Родин А.Е., «Поиск быстрых радиовсплесков в галактиках М 31 и М33», Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра 2018 (НЕА — 2018), (Москва, 18 — 21 декабря 2018);
5. Родин А.Е., Фёдорова В.А., «Обнаружение быстрых радиовсплесков на БСА ФИАН», Сессия АКЦ, (Пушино, 6 марта 2019).
6. Фёдорова В.А., Родин А.Е., «Обнаружение быстрых радиовсплесков в направлении галактик М31 и М33», XVI Конференция молодых ученых (Москва, 15 — 17 апреля 2019г.);
7. Фёдорова В.А., Родин А.Е., «Обнаружение быстрых радиовсплесков на радиотелескопе БСА ФИАН», XXXVI Всероссийская конференция «Актуальные проблемы внегалактической астрономии» (Пушино, 24 — 26 апреля 2019);
8. Фёдорова В.А., Родин А.Е., «Измерение рассеяния быстрых радиовсплесков на частоте 111 МГц», Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра 2019 (НЕА — 2019), (Москва, 17 — 20 декабря, 2019г.);
9. Fedorova V.A., Rodin A.E., «Comparative analysis of observational properties of fast radio bursts at frequencies 111 and 1400 MHz», «FRB2021», (online conference, July 28 – August 5, 2021);
10. Фёдорова В.А., Родин А.Е., «Исследование быстрых радиовсплесков на радиотелескопе БСА ФИАН», Всероссийская Астрономическая конференция (ВАК-2021), (23 – 28 августа, 2021г.).
11. Фёдорова В.А., Родин А.Е., «Исследование быстрых радиовсплесков на 111 и 1400 МГц», Конференция, посвященная 90-летию Николая Семёновича Кардашёва «Вселенная: от большого взрыва до наших дней» (Москва, 25-26 апреля 2022 г.).
12. Фёдорова В.А., Родин А.Е., «Обнаружение и исследование быстрых радиовсплесков на частоте 111 МГц», Всероссийская радиоастрономическая конференция «Радиотелескопы, аппаратура и методы радиоастрономии» (ВРК-2022), (Санкт – Петербург, 19-23 сентября 2022 г.).

Публикации по теме диссертации:

- A1. Фёдорова В.А., Родин А.Е. Обнаружение быстрых радиовсплесков на радиотелескопе БСА ФИАН // *Астрономический журнал*. – 2019. – Т. 96. – № 1. – стр. 41 – 50.
- A2. Фёдорова В.А., Родин А.Е. Поиск и обнаружение быстрых радиовсплесков в направлении галактик М31 и М33 // *Краткие сообщения по физике*. – 2019. – Т. 46. – № 9. – стр. 38 – 42.
- A3. Фёдорова В.А., Родин А.Е. Обнаружение быстрых радиовсплесков в направлении галактик М31 и М33 // *Астрономический журнал*. – 2019. – Т. 96. – № 11. – стр. 883 – 897.
- A4. Фёдорова В.А., Родин А.Е. Сравнительный анализ наблюдательных свойств быстрых радиовсплесков на частотах 111 и 1400 МГц // *Астрономический журнал*. – 2021. – Т. 98. – № 10. – стр. 804 – 833.
- A5. Фёдорова В.А., Родин А.Е. Поиск импульсного излучения от магнетара SGR 1935+2154 // *Краткие сообщения по физике*. – 2021. – Т. 48. – № 10. – стр. 37 – 42.
- A6. Родин А.Е., Фёдорова В.А. Обнаружение периодического излучения от магнетара SGR 1935+2154 // *Астрономический журнал*. – 2022. – Т. 99. – № 1. – стр. 37 – 42.

Личный вклад

Во всех основных результатах, выносимых на защиту, личный вклад автора является основным или равным вкладу соавторов. А именно:

1. В работах [A1 – A6] вклад диссертанта в написание текста статей является определяющим или равным вкладу соавторов.
2. В работе [A1] вклад диссертанта по моделированию различных методов обнаружения одиночных импульсных сигналов является равным вкладу соавтора.
3. В работах [A1 – A6] вклад диссертанта в обработку большого массива данных радиотелескопа БСА ФИАН (около 600 000 отдельных сканов) и поиск в них импульсных радиоисточников является определяющим.

4. В работах [A1 – A6] вклад диссертанта в измерение характеристик обнаруженных импульсов является определяющим.
5. В работе [A4] вклад диссертанта в построение экспериментальных зависимостей: распределение по мере дисперсии, зависимость рассеяния от меры дисперсии, зависимость $\text{Log}N - \text{Log}F$ является равным вкладу соавтора.
6. В работах [A5, A6] вклад диссертанта в обнаружение магнетара SGR 1935+2154 на частоте 111 МГц и измерение его параметров является определяющим.

Глава. 1

Математическое моделирование и методика обработки данных

1.1. Математическое моделирование

Выделение слабых сигналов типа FRB на фоне шумов – это отдельная сложная задача. Применение имеющихся методик при более ранних анализах данных радиотелескопа БСА ФИАН не дало положительных результатов. Поэтому необходимо было создать новый метод поиска крайне слабых импульсов. Трудностей добавляет и тот факт, что основной задачей работы являлся поиск быстрых радиовсплесков в широком диапазоне мер дисперсий. Следовательно, в ходе обработки данных необходимо делать перебор этих значений в заданном диапазоне. Подобные операции в значительной мере сказываются на времени обработки данных. Кроме того, необходимо было также учитывать все эффекты, сказывающиеся на импульсном сигнале в ходе его регистрации антенной. К таким эффектам можно отнести рассеяние в межзвездной и межгалактической среде, уширение в частотных каналах. Поэтому на начальном этапе работы было принято решение найти оптимальный вариант анализа данных с радиотелескопа БСА ФИАН с временным разрешением 0.1 с.

Таким образом, с учетом всех особенностей слабых сигналов и наблюдения их в метровом диапазоне в ходе работы было проделано моделирование обнаружения искомого импульса с дальнейшей проверкой алгоритма поиска быстрых радиовсплесков на известных объектах.

Математическое моделирование обнаружения импульсного сигнала включа-

ло в себя несколько этапов. Так как импульсный сигнал при распространении в межзвездной среде испытывает рассеяние на неоднородностях среды, то это приводит к тому, что сигнал принимается по форме, отличающейся от начального импульса. В данном 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 $t_s = 0.06(\frac{DM}{100})^{2.2}$ была взята из работы Кузьмина и др.[65]. 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 [66], то импульсная характеристика рассеивающей среды описывается затухающей экспонентой

$$h = \frac{1}{t_s} e^{-\frac{t}{t_s}}, \quad (1.1)$$

где t_s – характерная ширина импульса на высоте $1/e$. Принимаемый импульс определяется сверткой излученного импульса, который можно представить в виде дельта-функции, с передаточной функцией среды [66].

$$F(t) = \frac{1}{t_s} \int e^{-\frac{t}{t_s}} \delta(t - \tau) d\tau = \frac{1}{t_s} e^{-\frac{t}{t_s}}, \quad (1.2)$$

где t – время прихода сигнала на отдельный частотный канал. В качестве примера на Рисунке 1.1 приводится график функции $F(t)$, представляющий рассеянный импульс, приходящий на каждый из шести частотных каналов. Для моделирования была использована величина $DM = 360$ пк·см⁻³, которая дает значение $t_s = 1$ с.

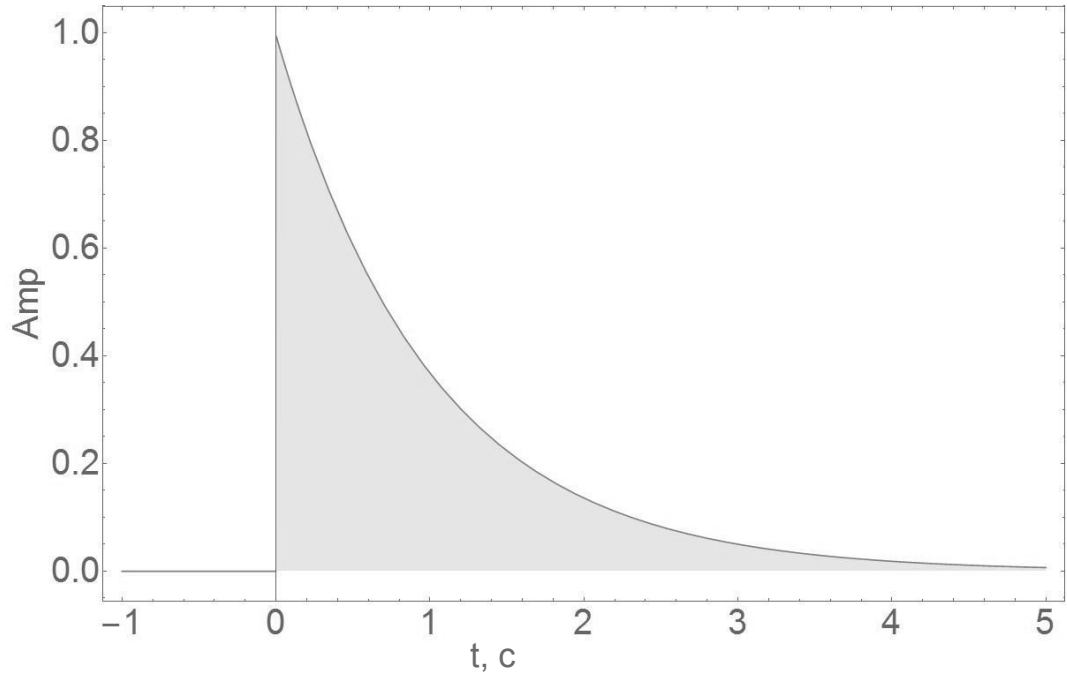


Рис. 1.1: Моделирование прихода импульсного сигнала на каждый из шести частотных каналов радиотелескопа БСА ФИАН. Полоса приема антенны 2.5 МГц. Центральные частоты каждого из шести каналов: 109.21, 109.62, 110.03, 110.45, 110.87, 111.29 МГц. Полоса приема каждого частотного канала 415 кГц. Величина рассеяния импульса $t_s = 1$ с, что соответствует $DM = 360$ пк/см³. Рисунок из работы диссертанта [14].

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

$$\Pi(t) = \sigma(t - \tau_{i-1})\sigma(\tau_i - t) \quad (1.3)$$

где 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. Рисунок 1.2 показывает импульсы, искаженные уширением в частотных каналах и смещенные из-за дисперсионного запаздывания.

Форма этого импульса, усеченная до длины 50 точек и нормированная так, чтобы площадь импульса была равна единице, далее использовалась в качестве шаблона для свертки с реальными импульсными сигналами.

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/см³. Поэтому для $DM \lesssim 320$ пк/см³ главный вклад в размывание импульса вносит уширение в полосе, а для $DM \gtrsim 320$ пк/см³ – рассеяние в среде.

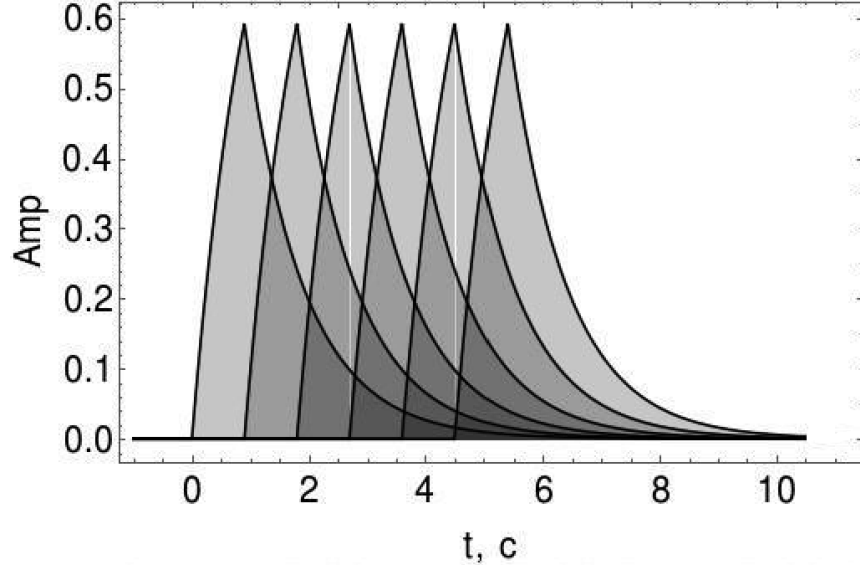


Рис. 1.2: Моделирование искажения формы импульса и задержки в каждом из шести частотных каналов радиотелескопа БСА ФИАН. Центральные частоты каждого из шести каналов: 109.21, 109.62, 110.03, 110.45, 110.87, 111.29 МГц. Полоса приема каждого частотного канала 415 кГц. Уширение в канале равно $\Delta\tau_{DM=360} = 0.8$ с. Рисунок из работы диссертанта [14].

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 10, который соответствовал реальным наблюдениям. В зависимости от амплитуды диспергированного импульса и задаваемой величины С/Ш рассчитывался уровень среднеквадратичного отклонения аддитивного шума. Рисунок 1.3 показывает пример зашумленных импульсных сигналов в шести частотных каналах.

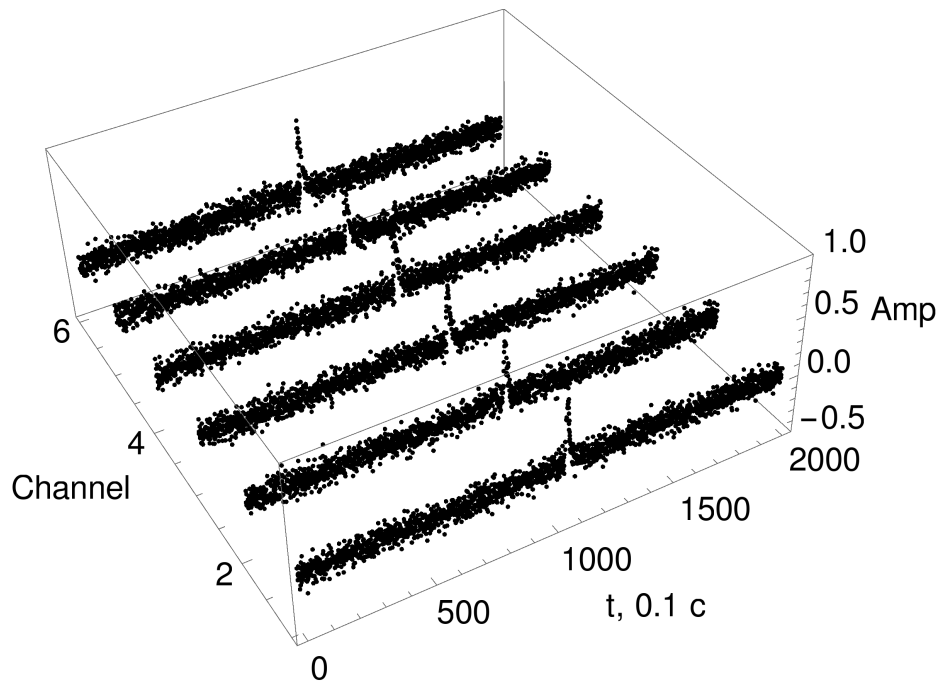


Рис. 1.3: Модель полученного импульса на фоне белого шума в шести частотных каналах. Отношение $C/\Pi = 10$. Рисунок из работы диссертанта [14].

1.2. Обработка данных

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. Далее для краткости изложения под импульсным сигналом мы везде подразумеваем свертку зарегистрированного импульса с шаблоном, полученным в ходе моделирования.

Применялось три подхода для выделения импульсного диспергированного сигнала: попарная кросс-корреляция импульсов во всех 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 (Рисунок 1.4). Из Рисунка 1.4 видно, что при одинаковом значении уровня входного шума последний способ кросс-корреляции с шаблоном, как и ожидалось, 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.

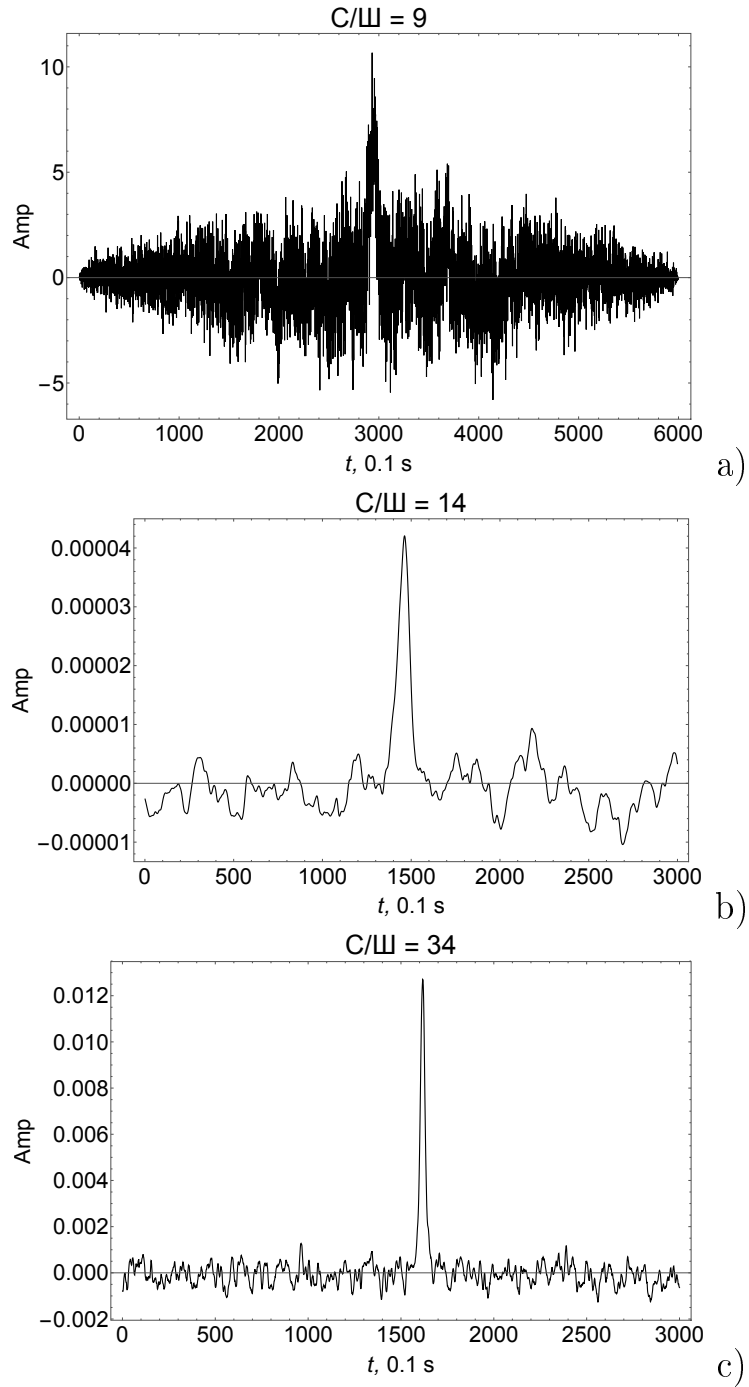


Рис. 1.4: Суммарный импульс, полученный в результате: а) попарной кросс-корреляции шести частотных каналов без компенсации меры дисперсии; б) кросс-корреляции с шаблоном без компенсации меры дисперсии; в) кросс-корреляции с шаблоном и с компенсацией меры дисперсии. Рисунок из работы диссертанта [14].

В качестве проверки корректной работы программы для детектирования событий FRB весь разработанный алгоритм был протестирован на двух вариантах предполагаемых импульсов: на часовую запись БСА ФИАН накладывались модели искомых сигналов с $DM = 360$ пк/см³ и $DM = 2000$ пк/см³ (Рисунки

1.5a 1.5b). Далее проверка была проведена и на реальном объекте – пульсаре B2154+40 с периодом 1.5253 сек (Рисунки 1.6a – 1.6d). Во всех случаях используемый метод позволил уверенно выделить импульсный сигнал.

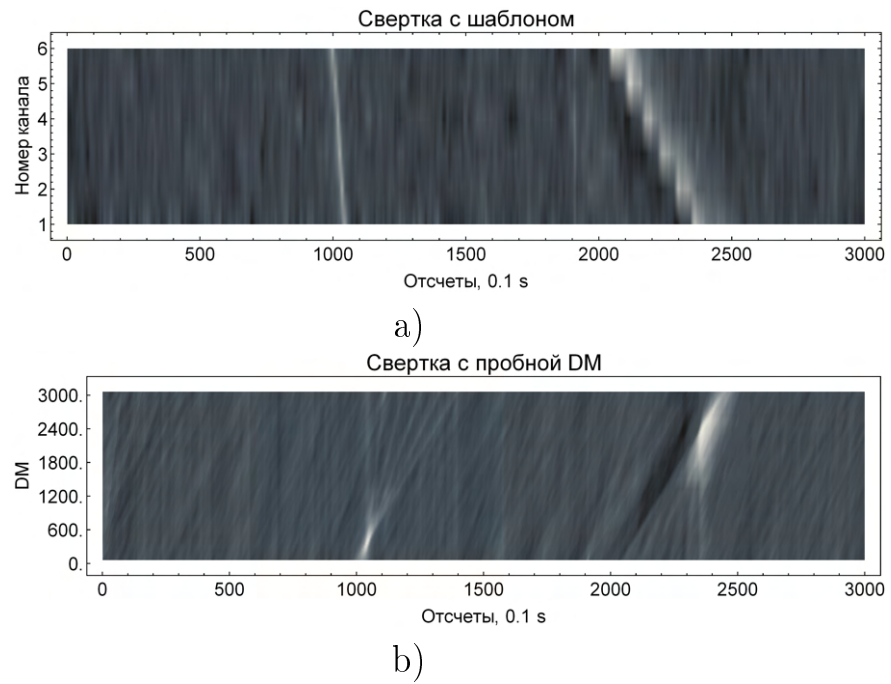


Рис. 1.5: а) Свертка с шаблоном модельных импульсов с мерой дисперсии 360 $\text{пк}/\text{см}^3$ и 2000 $\text{пк}/\text{см}^3$. б) Свертка импульсов с пробной мерой дисперсии. Искомая мера дисперсии хорошо определяется на графике в виде светлых участков, яркость которых зависит от амплитуды сигнала. Отношение $\text{С}/\text{Ш} = 35.2$. Рисунок из работы диссертанта [14].

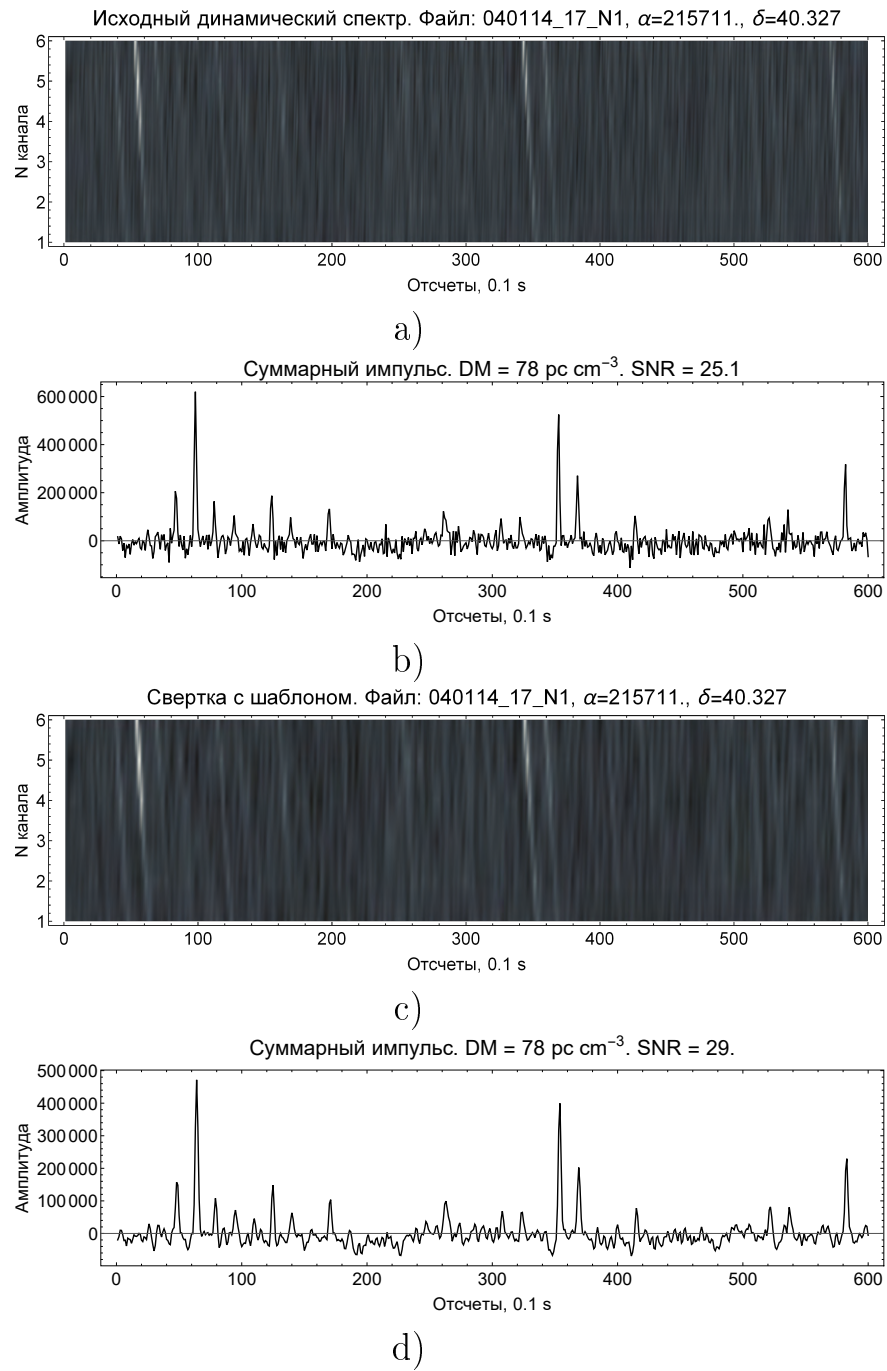


Рис. 1.6: а) Динамический спектр импульсов пульсара B2154+40 без свертки с шаблоном. б) Суммарный профиль импульсов пульсара B2154+40 без свертки с шаблоном. Из часовой записи выбирался участок длительностью наблюдений 60 секунд, на котором хорошо видны отдельные импульсы. Изображение в) демонстрирует результат свертки импульсов пульсара B2154+40 с пробной мерой дисперсии. Данный пульсар имеет $DM = 78 \text{ пк/см}^3$. г) Суммарный профиль импульсов пульсара B2154+40 после свертки с шаблоном. Рисунок из работы диссертанта [14].

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 тем или иным интересующим участком неба. Затем вносились поправки, учитывающие отклонение лучей диаграммы направленности БСА ФИАН от плоскости небесного меридиана и прецессию. Далее из часовой записи выбирался пятиминутный участок с интересующими координатами или, как в случае с М 31, выбирался получасовой участок записи в шести лучах ДН с серединой, соответствующей прямому восхождению центра галактики $\alpha_{J2000} = 00^h43^m$. Следующим шагом была свертка записи в каждом луче с шаблоном, полученным в рамках моделирования, описанного выше, и свертка с пробной мерой дисперсии в диапазоне от 0 пк/см³ до 3000 пк/см³ с шагом 60. Значение меры дисперсии DM определялось вписыванием полинома в максимум зависимости $SNR(DM)$ [14].

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 Рисунке 1.7 приводятся записи одного и того же участка до и после применения шаблона.

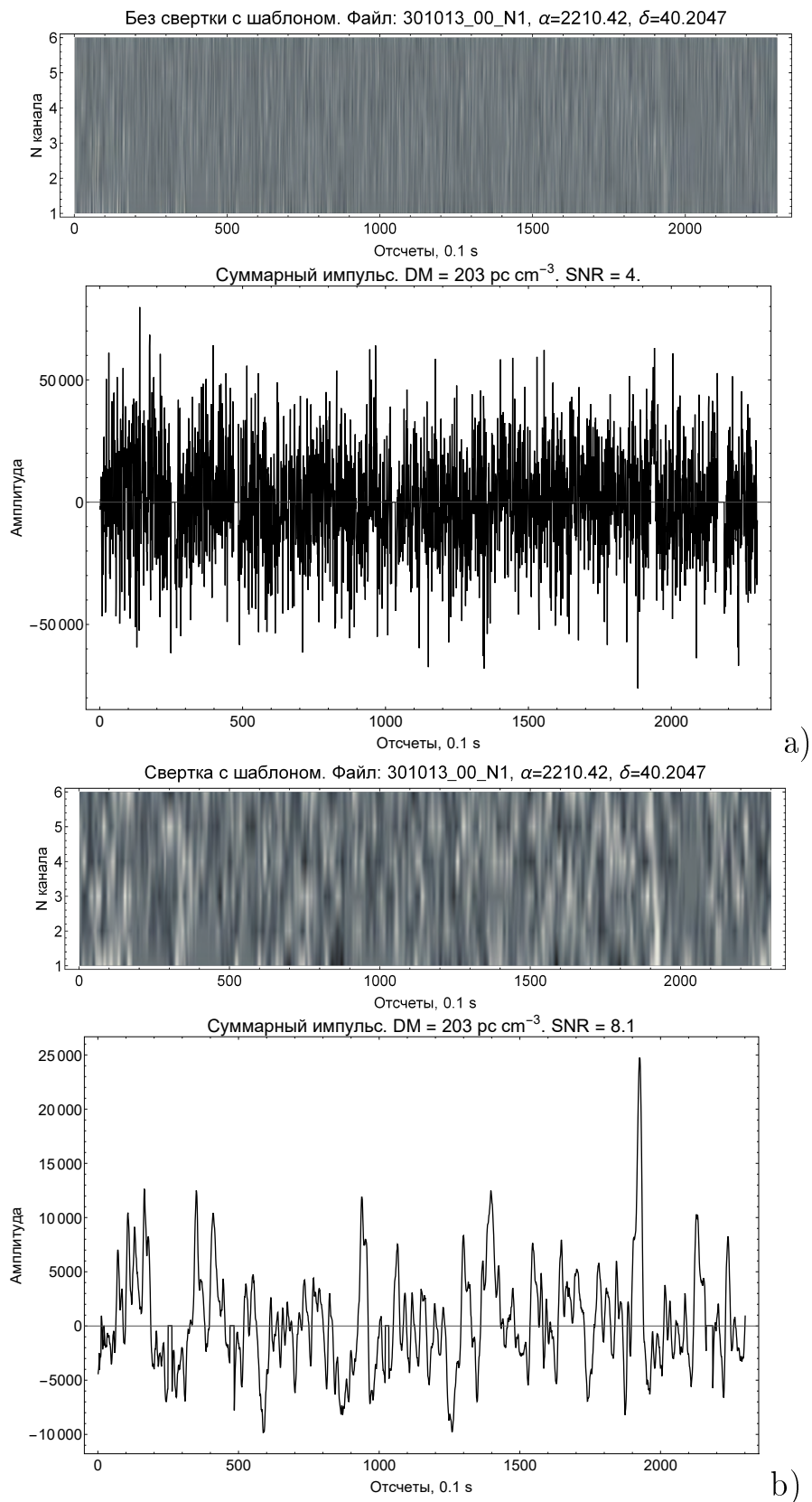


Рис. 1.7: Запись с радиотелескопа БСА ФИАН длительностью 150 с, соответствующая радиовсплеску FRB131030, обнаруженному 30.10.2013. Показан одинаковый участок а) без обработки, б) после свертки с шаблоном. Рисунок из работы диссертанта [14].

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.

1.3. Заключение

К результатам, полученным на данном этапе работы, можно отнести следующие пункты:

1. Разработан алгоритм поиска быстрых радиовсплесков в метровом диапазоне на радиотелескопе БСА ФИАН;
2. Данная методика применима для выделения слабых сигналов на фоне шумов, что было продемонстрировано на примере пульсара B2154+40 (Рисунок 1.5);
3. На примере FRB131030 показано преимущество данного метода в выделении коротких спорадических импульсов с большой мерой дисперсии (Рисунок 1.6) перед общепринятыми методиками.

Глава. 2

Наблюдения и свойства быстрых радиовсплесков

2.1. Технические характеристики радиотелескопа БСА ФИАН

БСА ФИАН – это меридианный радиотелескоп, один из самых высокочувствительных радиотелескопов метрового диапазона волн. С 2000 года рабочий диапазон инструмента $110 \text{ МГц} \pm 1.25 \text{ МГц}$. Флуктуационная чувствительность радиотелескопа в полосе приема 2.5 МГц при временном разрешении 0.1 с составляет 140 мЯн [67]. 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 128 – лучевая диаграмма направленности (ДН – 3), которая перекрывает область неба от -8.20° до 55.5° по склонению. Ширина луча диаграммы направленности по по-

ловинному 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. Поскольку быстрые радиовсплески – это спорадические явления, которые не имеют выделенных направлений, мониторинг источников проводился с помощью ДН-3 – 128-лучевой диаграммы направленности, имеющей широкое поле зрения.

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 (~ 60 кв.гр.), а также непрерывный и круглосуточный мониторинг неба и сохранение данных на сервере для последующей их обработки.

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),
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 (более нескольких секунд). Это касается как индустриальных помех, так и возмущений ионосферы от Солнца, которые регистрируются во всех лучах и даже боковых лепестках антенны. 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.

Кандидатами в радиовсплески считались все импульсы, которые удовлетворяли условиям:

1. Видны в одном луче диаграммы,
2. Имеют частотную зависимость времени прихода,
3. Регистрируются во всех шести частотных каналах.

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

Хотелось бы еще раз отметить, что радиотелескоп БСА ФИАН является самым чувствительным инструментом в мире в метровом диапазоне волн. Эта техническая особенность дает возможность наблюдать предельно слабые импульсы, к которым, в том числе, относятся радиовсплески. Кроме того большой объем данных позволяет проводить поиск импульсов в большом временном интервале.

Попытки обнаружить радиовсплески на низких частотах предпринимались неоднократно многими исследователями за рубежом. Эти наблюдения можно кратко охарактеризовать как безуспешные, так как на частотах ниже 300 МГц никаких радиовсплесков обнаружено не было вплоть до конца 2020 года [68]. На основании этого была составлена Таблица 2.1, в которой сведены наблюдательные параметры проведенных обзоров и специальных наблюдений. В ней приведена частота наблюдений (МГц), полоса приема (МГц), интервал выборки (сек), общая продолжительность наблюдений (ч), площадь на небе (кв. град.), охватываемая обзором, и пороговая чувствительность (Ян). Сразу же обращает на себя внимание, что общая продолжительность наблюдений на БСА ~ 50000 ч. на порядки превышает все проводимые ранее наблюдения (было проанализировано порядка $6 \cdot 10^5$ отдельных сканов). Из этого параметра и общего количества обнаруженных на БСА 63 импульсов легко можно оценить, что на антенне для обнаружения одного импульса требуется порядка 10^3 часов или 10^4 сканов.

Другой параметр, который сильно отличает радиотелескоп БСА от других инструментов – это флуктуационная чувствительность радиотелескопа (J_n). Во многих работах приводится предельный флюэнс ($J_n \cdot \text{мс}$). Он пересчитывался в пороговую чувствительность, исходя из задаваемого времени выборки или длительности импульса. Чувствительность радиотелескопов зарубежных коллег на порядки хуже чувствительности БСА.

Таблица 2.1: Наблюдательные параметры проведённых обзоров и специальных наблюдений быстрых радиовсплесков.

Теле- скоп	Частота набл., МГц	Полоса, МГц	Интервал выборки τ , с	T , ч поис- ка	Площадь кв. град.	S_{fl} , J_n	Статья
MWA	170 - 200	1.28x24	0.5	?	450	0.84*, 4.57*, 6.64*	Sokolowski, 2018 [69]
MWA	139 - 170	1.28x24	2	10.5	400	0.35	Tingay, 2015 [70]
LOFAR (UK)	145	6	0.005	1445	4193	62	Karastergiou, 2015 [71]
LOFAR**	110 - 190	80	0.05	2x0.67	-	2	Chawla, 2020 [72]
LOFAR**	110 - 188	78	0.004	18.3	0.007	10	Houben, 2019 [16]
БСА	111	2.5	1	49910	310	0.044 [†]	Fedorova, Rodin, 2019 [14, 15]

Примечания. *Для радиотелескопа MWA величина S_{fl} дается для разных источников. **Для радиотелескопа LOFAR представлены характеристики при наблюдении FRB180916.J0158+65 и FRB121102. [†]Для радиотелескопа БСА ФИАН среднее расчетное значение чувствительности определяется как $140 \text{ мЯн}/\sqrt{10}$. $\sqrt{10}$ берётся из характерной ширины шаблона.

Круглосуточный режим работы и полнота получаемых данных БСА ФИАН практически сразу же после запуска мониторингового режима в 2012 году привели к идее попытаться зарегистрировать импульсные сигналы космического происхождения. Эта идея была реализована сначала для поиска новых пульсаров [73], а осенью 2017 года была начата разработка алгоритма для обнаружения одиночных импульсных сигналов.

2.2. Результаты поиска быстрых радиовсплесков на 111 МГц

Поиск быстрых радиовсплесков на частоте 111 МГц на радиотелескопе БСА ФИАН осуществлялся в несколько этапов. На этапе отладки программы обработки данных был проанализирован участок пятиминутной записи во втором луче диаграммы БСА. На следующем этапе был проанализирован участок неба с повторяющимся FRB 121102 . $\alpha = 05^h32^m \pm 10^m$; $\delta = +33.25^\circ$, $DM = 557$ пк/см³.

Далее был проведен поиск импульсов в направлении галактик М 31 и М 33 в период с июля 2012 года по август 2018 года. Всего проанализировано 6 930 часов наблюдений.

На последнем и самом объемном этапе проводился поиск быстрых радиовсплесков по всей доступной области неба для наблюдений на радиотелескопе БСА ФИАН. Поскольку большой объем данных требует значительных технических и временных ресурсов, работа в рамках этого этапа будет проводиться еще продолжительное время. Первые результаты были получены при обработке участка неба в площадке $\delta = 21.38^\circ \div 41.72^\circ$ и $\alpha = 11^h45^m \div 12^h45^m$. В период с января по июнь 2018 года было обработано более 50 000 часов наблюдений.

2.2.1 Поиск быстрых радиовсплесков от известного события FRB121102

Обработка данных проводилась в несколько этапов. Изначально вносились поправки, учитывающие небольшие отклонения плоскости расположения лучей радиотелескопа БСА ФИАН от небесного меридиана, а также прецессию. Далее из записей продолжительностью час вычитался фон, сглаженный с помощью медианного фильтра с шириной окна 2000 точек. Затем сглаживание проводилось с помощью свертки с шаблоном согласованной формы, и сдвигом на одну точку. Сглаженная запись имела длину $N - m + 1$, где N – длина начальной записи (3000 точек), m – ширина шаблона (50 точек).

Для поиска быстрых радиовсплесков обрабатывались записи шести частотных каналов с временным разрешением 0.1 с. Анализировались ежедневные данные в двух из 128 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 $\alpha = 05^h 32^m \pm 10^m$; $\delta = +41.72^\circ$. Во втором случае анализировался участок в 22 луче ($\delta = +33.25^\circ$) с координатами известного радиовсплеска FRB 121102 $\alpha = 05^h 32^m \pm 10^m$; $\delta = +33.25^\circ$. Таким образом, было обработано 355 часов записи в каждом луче.

Анализировался пятиминутный участок с центральными координатами, указанными выше. Каждая запись первоначально сворачивалась с шаблоном, полученным в рамках математического моделирования, описанного в Главе 1. Свертка с шаблоном разной формы, соответствующих разным величинам рассеяния t_s , не производилась, так как это многократно увеличило бы время обработки. Затем производилась свертка с пробной мерой дисперсии в диапазоне от 0 до 3000 пк/см³ с шагом 60. 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.

Для более точной оценки плотности потоков найденных радиовсплесков использовался метод сравнения с калибровочной ступенькой и калибровочным источником. Калибровочная ступенька – это эталонный шумовой сигнал, который добавляется в запись каждые четыре часа. В качестве 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 2.2 пиковые плотности потоков необходимо рассматривать, как нижний предел.

В результате визуального анализа было выделено три события с DM 247 пк/см³, 570 пк/см³ и 1767 пк/см³, которые мы, однако, рассматриваем только как кандидаты в радиовсплески из-за малого отношения «сигнал-шум» и не используем при сравнительном анализе в Главе 3. Поскольку поиск FRB's 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 чув-

ствительности радиотелескопа БСА ФИАН. Это означает, что напрямую зарегистрировать сигнал при таких условиях не представляется возможным. Поэтому применялась свертка с шаблоном согласованной формы. Следует также отметить, что, используя такой подход, мы регистрируем только верхнюю часть импульса, так как экспоненциальный «хвост» сигнала в шумах не обнаруживается.

Также была получена оценка отношения С/Ш и оценка пиковой плотности потока каждого импульса. Величина сигнал/шум вычислялась как отношение амплитуды и СКО записи за вычетом самого импульса. Прямое восхождение импульсов относится к шестому частотному каналу с $f = 111.5$ МГц. Результаты всех оценок и вычислений приведены в Таблице 2.2.

Таким образом, одной из основных целей данного этапа 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 пк/см³. 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 профиль сигнала с двойным импульсом не противоречит природе этого повторяющегося всплеска.

Основные результаты первого этапа данной работы:

1. 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-кандидат в радиовсплески с $DM = 570$ пк/см³, что, в пределах погрешности, соответствует мере дисперсии импульсов FRB 121102, которая варьируется в пределах от по 555 пк/см³ до 568.8 пк/см³ по данным FRB Catalogue. Из Таблицы 2.2 видно, что прямое восхождение δ 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 был повторно зарегистрирован сигнал от события FRB 121102 в одном из боковых лепестков. В этом случае можно сказать, что если бы импульс был зарегистрирован в главном лепестке диаграммы направленности БСА, то его пиковая плотность потока должна быть в несколько раз больше.

2. В общей сложности в период с июль 2012 г. по май 2018 г. зарегистрировано три кандидата в быстрые радиовсплески с мерами дисперсии 247 пк/см^3 , 570 пк/см^3 , 1767 пк/см^3 . Другие параметры импульсов приведены в Таблице 2.2.

2.2.2 Поиск быстрых радиовсплесков в направлении галактик М31 и М33

Первые целенаправленные попытки детектирования внегалактических импульсных сигналов были сделаны Линскоттом и др. в 1980 г. [?]. Далее Маккалок и др. [74] в период с 1980 по 1981 гг. проводили систематические наблюдения Большого Магелланового облака на предмет поиска радиопульсаров. Позже были сделаны попытки обнаружить гигантские импульсы пульсаров в различных галактиках: М 33, NGC253, NGC300, NGC7793 [75]. В 2012 году Рубио –Херрера и др. провели исследование, в рамках которого осуществлялся поиск импульсных сигналов в галактике М 31 [76]. В результате этого исследования впервые было зарегистрировано несколько импульсов с мерой дисперсии 54.7 пк/см^3 , 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 поле зрения БСА, поэтому было принято решение в первую очередь исследовать их на предмет регистрации радиовсплесков.

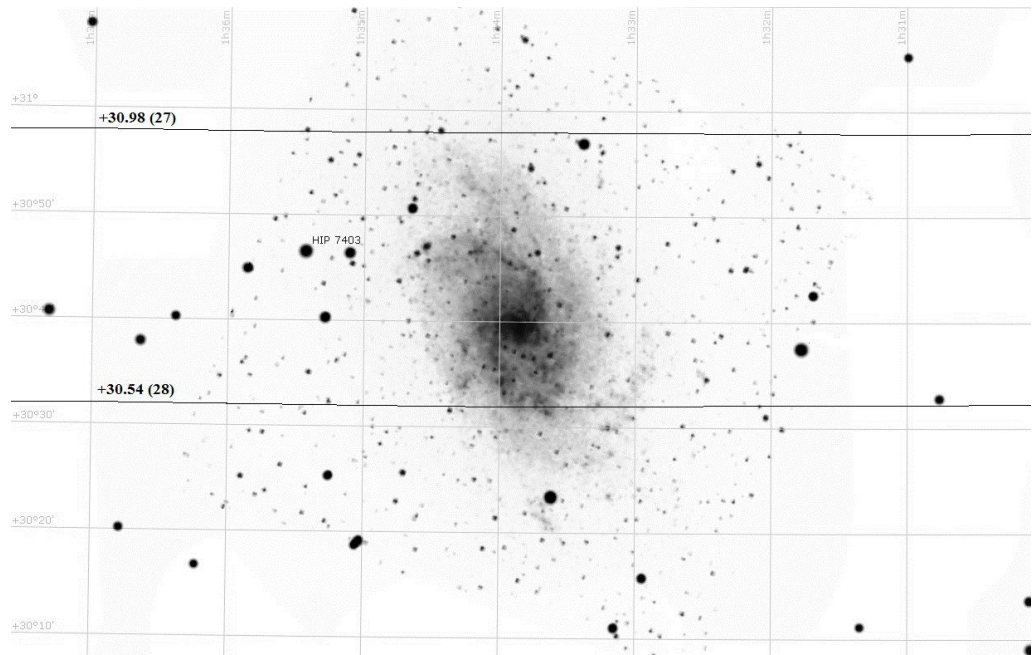
Так как в данный момент существует большое количество теоретических моделей, которые описывают возникновение этих загадочных явлений, то заранее никаких предположений относительно природы быстрых радиовсплесков не делалось. Ставилась и решалась чисто наблюдательная задача – обнаружить любые одиночные 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 $10^2 - 10^3 \text{ пк/см}^3$ в отдельном канале шириной 415 кГц должно составлять единицы и десятки секунд, то есть искомые импульсы должны иметь фор-

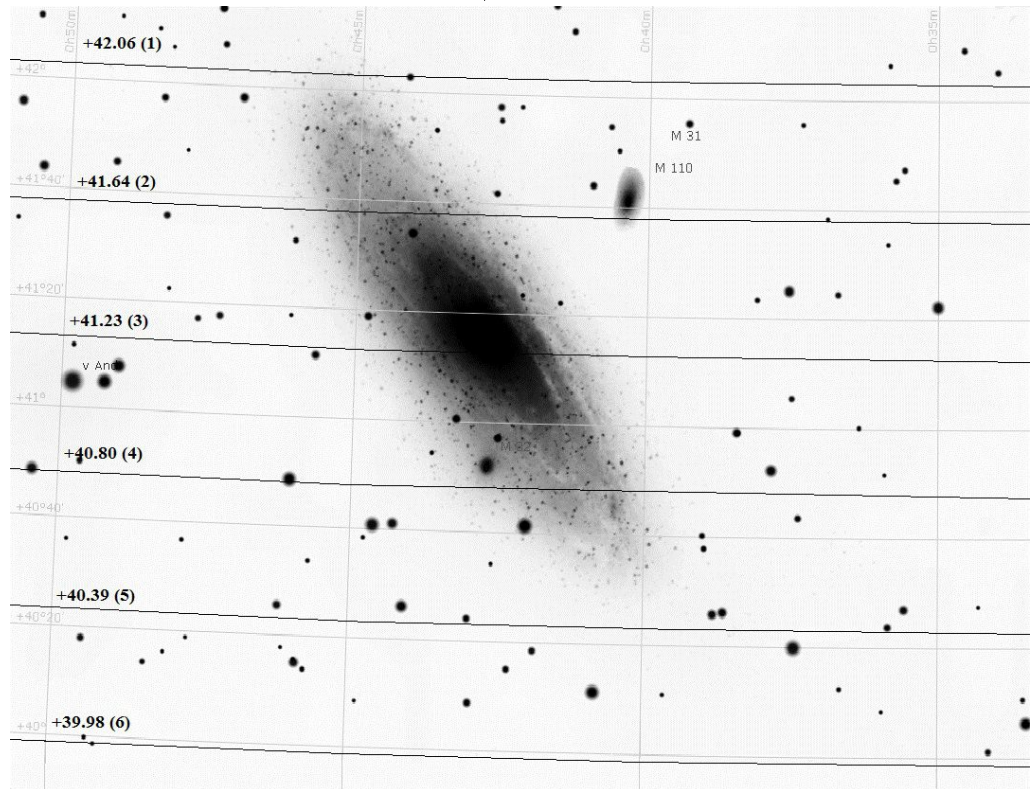
му сильно искаженную дисперсионным запаздыванием и рассеянием. Очевидно также, что такое уширение приведет к падению чувствительности обнаружения в $10^3 - 10^4$ раз для импульса шириной несколько миллисекунд. Несмотря на это, если в качестве примера рассмотреть астрофизические явления с энерговыделениями $> 10^{46}$ Дж, то этой энергии будет достаточно для их обнаружения в соседней галактике.

В качестве результатов данной работы представлены параметры обнаруженных восьми новых импульсов, приведенных в Таблице 2.2.

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 Рисунках 2.1 приведено сопоставление исследуемых галактик в оптическом диапазоне с лучами ДН-3 антенны.



a)



b)

Рис. 2.1: а) Галактика М 33. б) Галактика М 31. 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 даны на эпоху J2000. Рисунки из работы диссертанта [15].

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 ($\alpha_{J2000} = 01^h34^m$). В случае М 31 выбирался получасовой участок записи в первых шести лучах ДН с серединой, соответствующей прямому восхождению $\alpha_{J2000} = 00^h43^m$, 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 пк/см³ до 3000 пк/см³ с шагом 60.

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 Таблице 2.2.

В результате визуального анализа данных было обнаружено восемь быстрых радиовсплесков с DM от 203 пк/см³ до 1262 пк/см³, 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 ± 4 пк/см³. 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 Таблице 2.2, находится на пределе чувствительности антенны. Также следует отметить, что при такой методике выделяется только верхняя часть импульса, поскольку нижняя часть импульса при экспоненциальном затухании теряется в шумах.

Величины мер дисперсии пульсаров из нашей Галактики лежат в диапазоне от ~ 3 пк/см³ до ~ 1800 пк/см³ для пульсаров в направлении галактического центра, что полностью перекрывает диапазон мер дисперсии обнаруженных 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, что, 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.

Таким образом к основным результатам данной работы можно отнести:

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 повторяющимися.
2. В этот же период в направлении галактики М 31 обнаружено пять быстрых радиовсплесков с различной мерой дисперсии.

Динамические спектры и профили импульсов приведены на Рисунках 2.2 – 2.9.

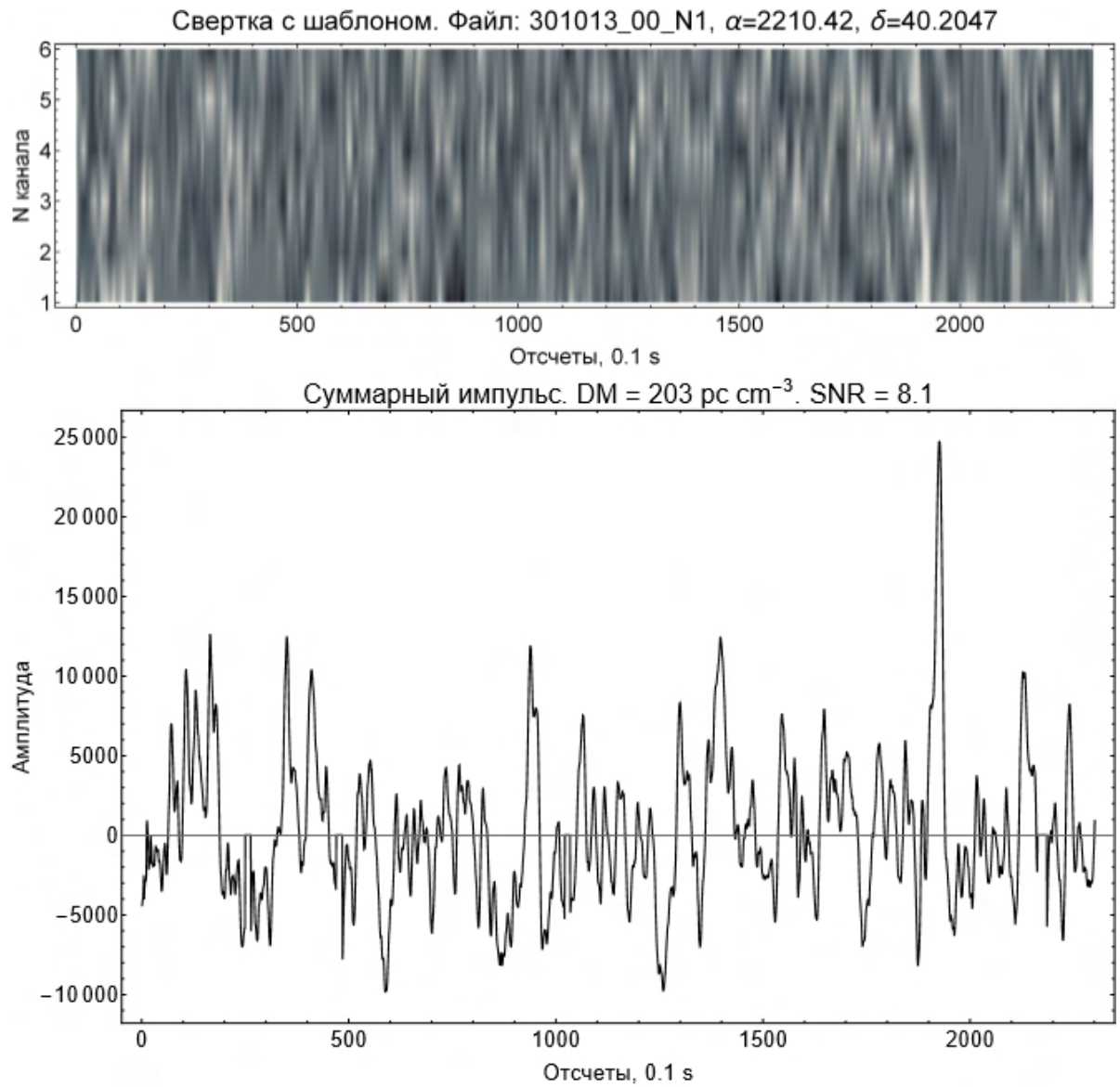


Рис. 2.2: Динамический спектр импульса с $DM = 203 \text{ пк/см}^3$, обнаруженного 30.10.2013 (верхнее изображение) и суммарный профиль импульса с $DM = 203 \text{ пк/см}^3$ (нижнее изображение) по результатам работ диссертанта [15, 61].

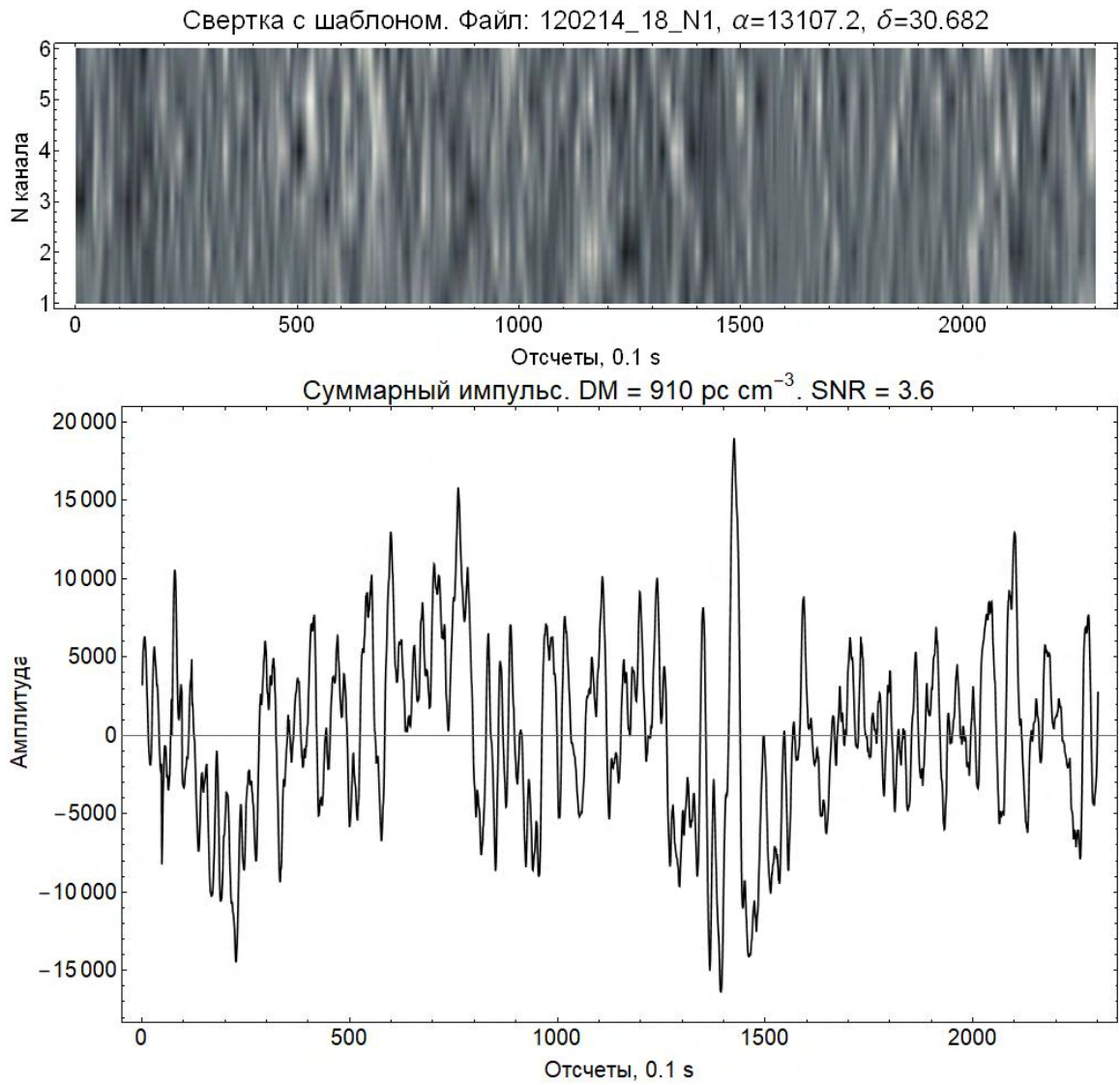


Рис. 2.3: Динамический спектр импульса с $DM = 910 \text{ пк/см}^3$, обнаруженного 12.02.2014 (верхнее изображение) и суммарный профиль импульса с $DM = 910 \text{ пк/см}^3$ (нижнее изображение) по результатам работ диссертанта [15, 61].

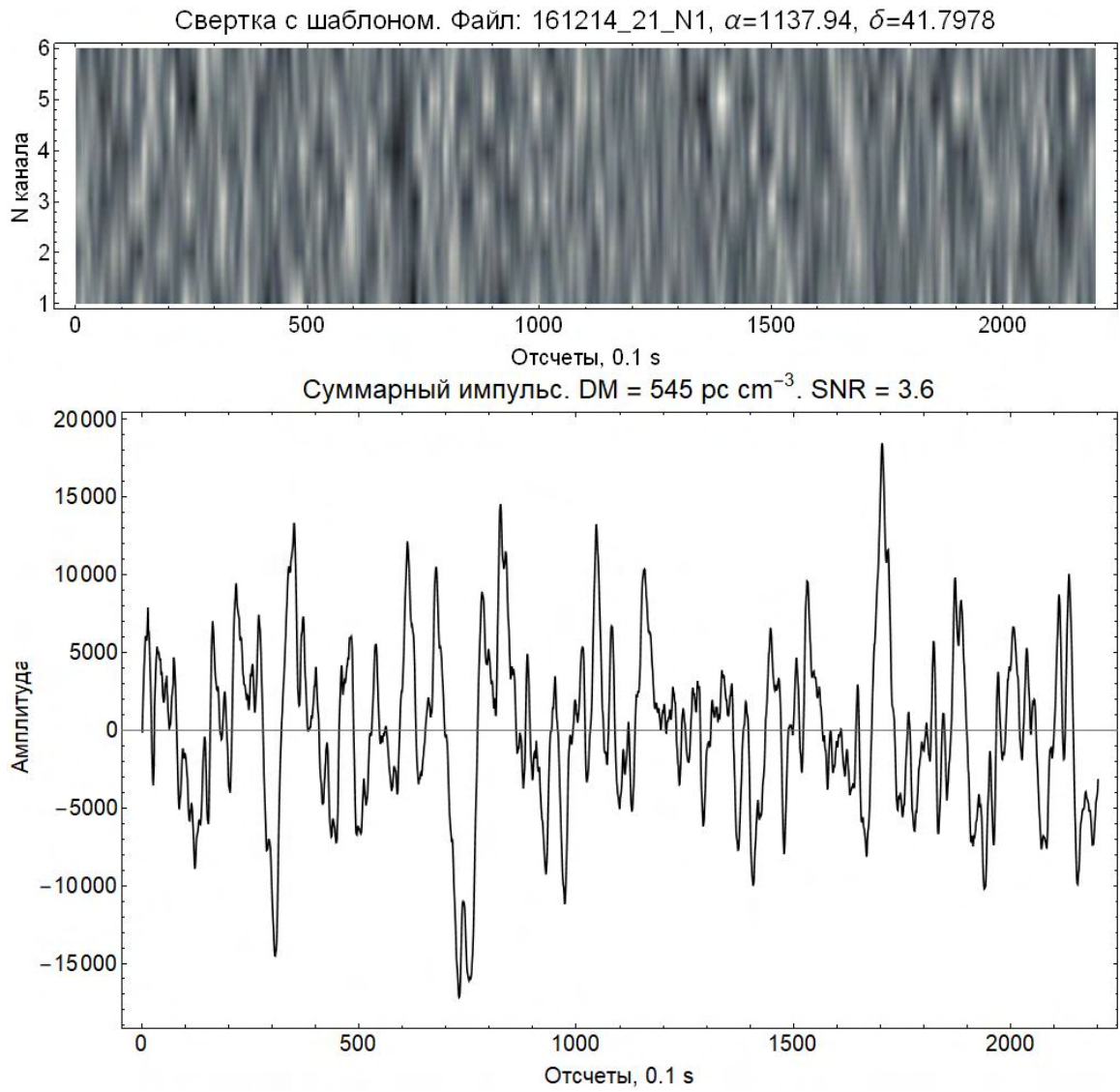


Рис. 2.4: Динамический спектр импульса с $DM = 545 \text{ пк/см}^3$, обнаруженного 16.12.2014 (верхнее изображение) и суммарный профиль импульса с $DM = 545 \text{ пк/см}^3$ (нижнее изображение) по результатам работ диссертанта [15, 61].

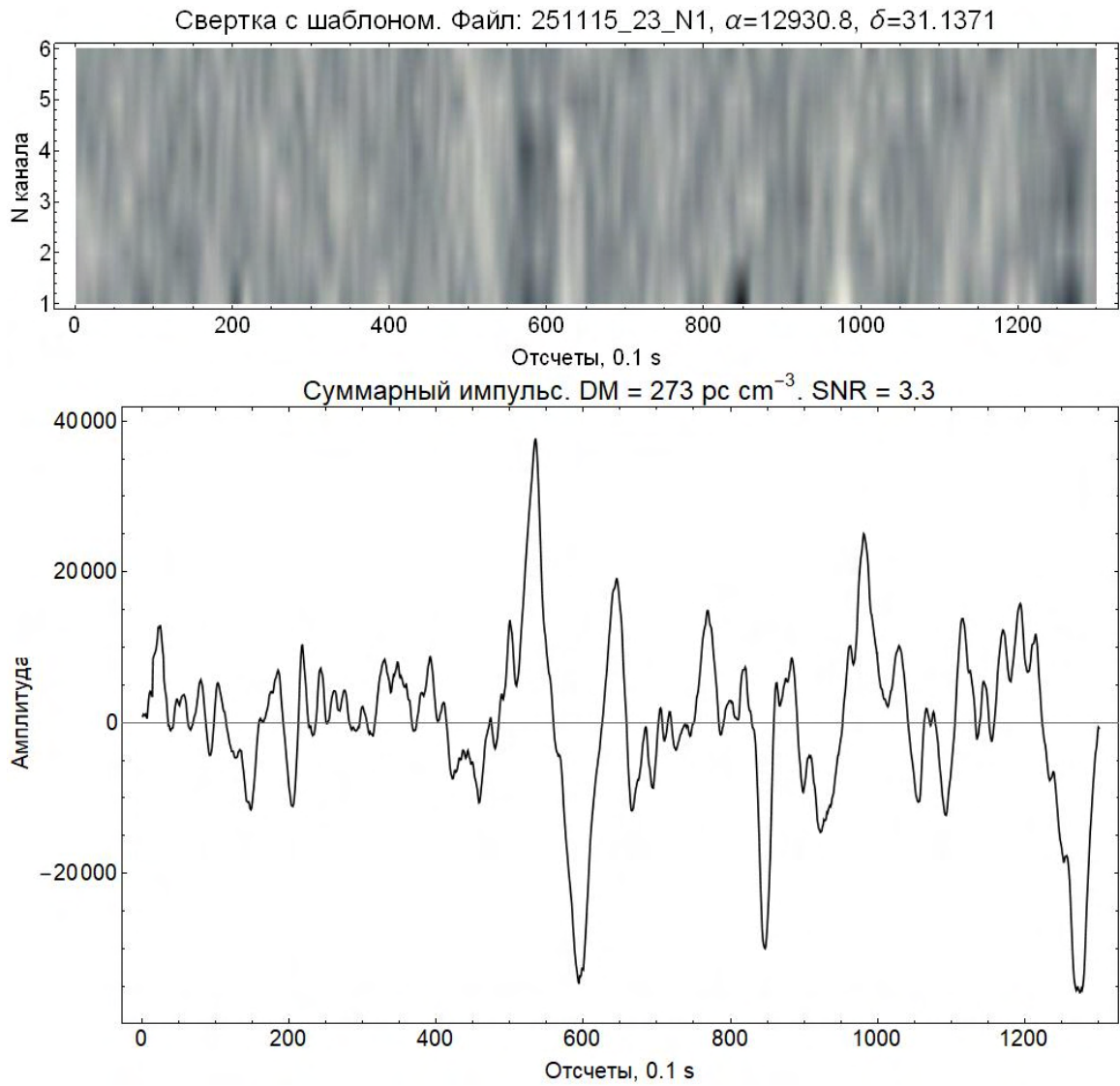


Рис. 2.5: Динамический спектр импульса с $DM = 273 \text{ пк/см}^3$, обнаруженного 25.11.2015 (верхнее изображение) и суммарный профиль импульса с $DM = 273 \text{ пк/см}^3$ (нижнее изображение) по результатам работ диссертанта [15, 61].

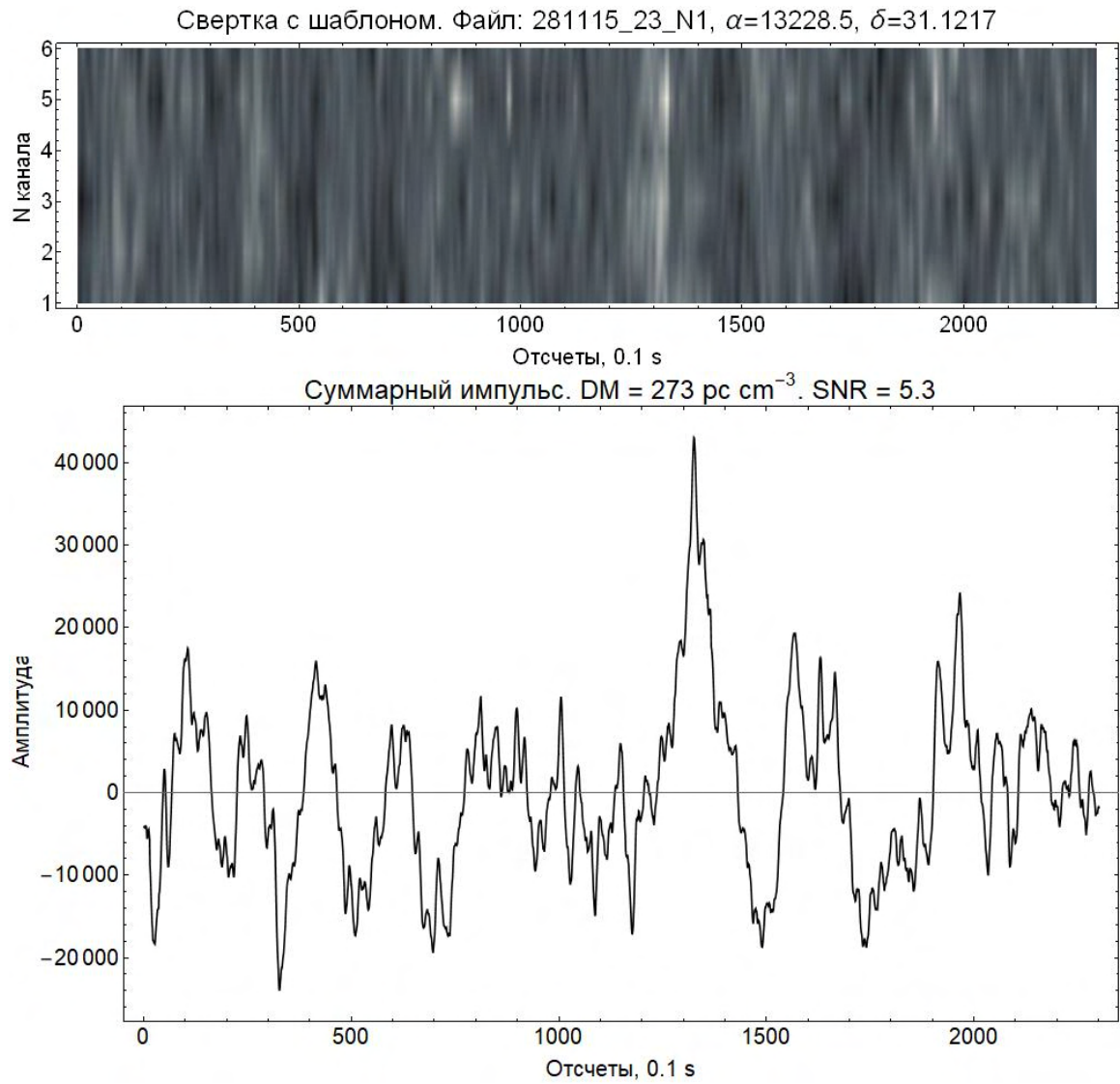


Рис. 2.6: Динамический спектр импульса с $DM = 273 \text{ пк/см}^3$, обнаруженного 28.11.2015 (верхнее изображение) и суммарный профиль импульса с $DM = 273 \text{ пк/см}^3$ (нижнее изображение) по результатам работ диссертанта [15, 61].

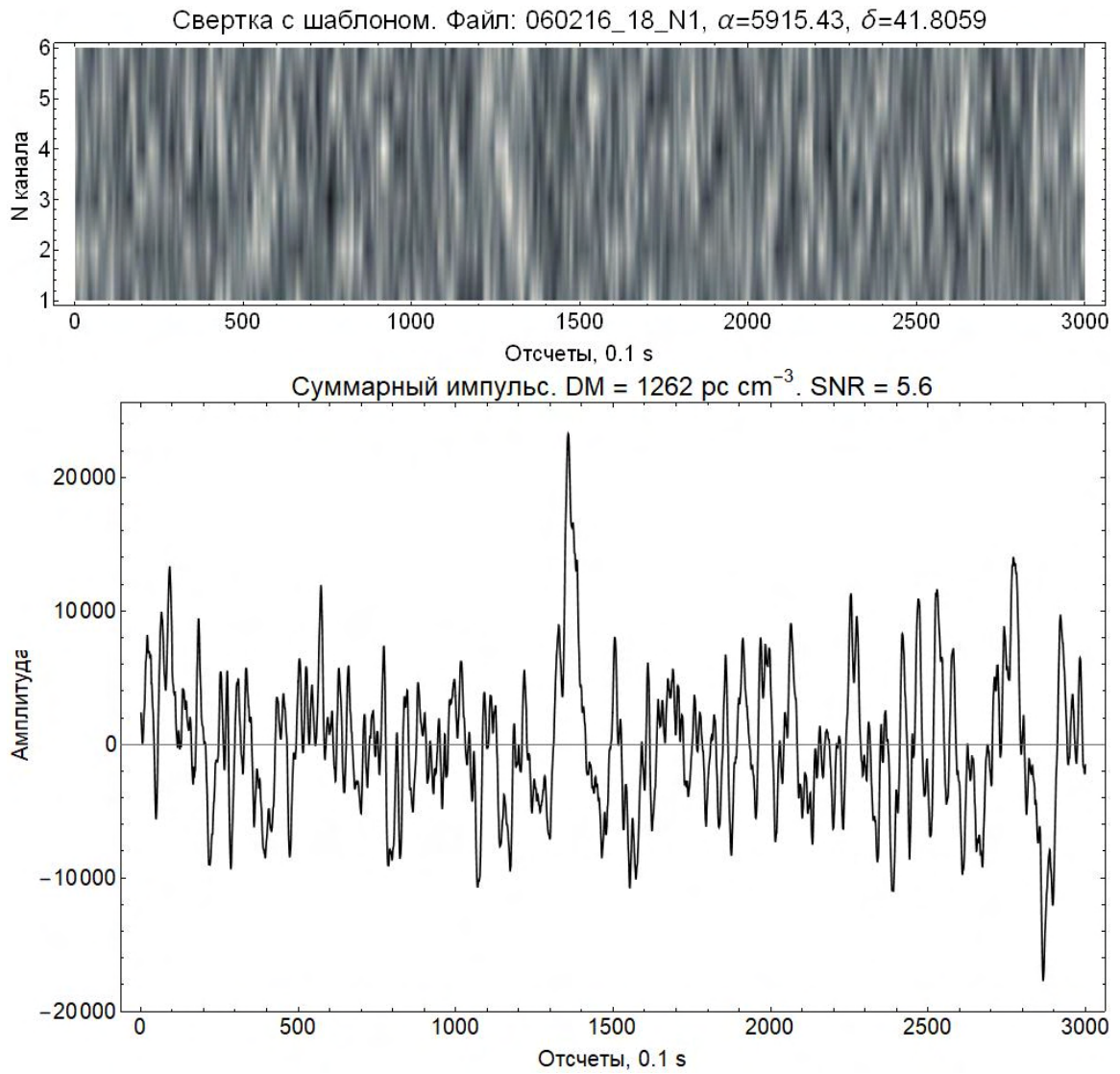


Рис. 2.7: Динамический спектр импульса с $DM = 1262 \text{ пк/см}^3$, обнаруженного 06.02.2016 (верхнее изображение) и суммарный профиль импульса с $DM = 1262 \text{ пк/см}^3$ (нижнее изображение) по результатам работ диссертанта [15, 61].

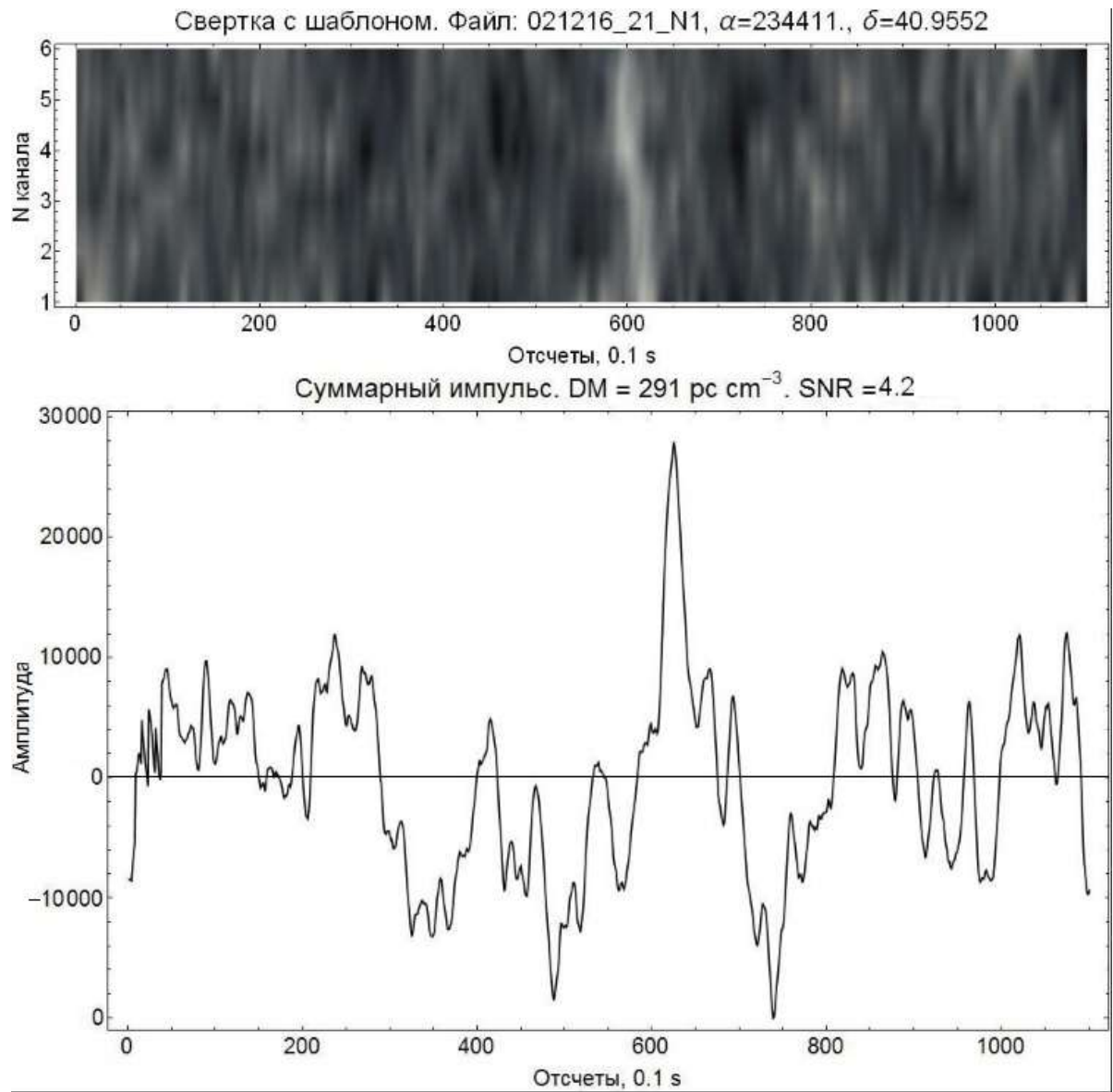


Рис. 2.8: Динамический спектр импульса с $DM = 291 \text{ пк/см}^3$, обнаруженного 02.12.2016 (верхнее изображение) и суммарный профиль импульса с $DM = 291 \text{ пк/см}^3$ (нижнее изображение) по результатам работ диссертанта [15, 61].

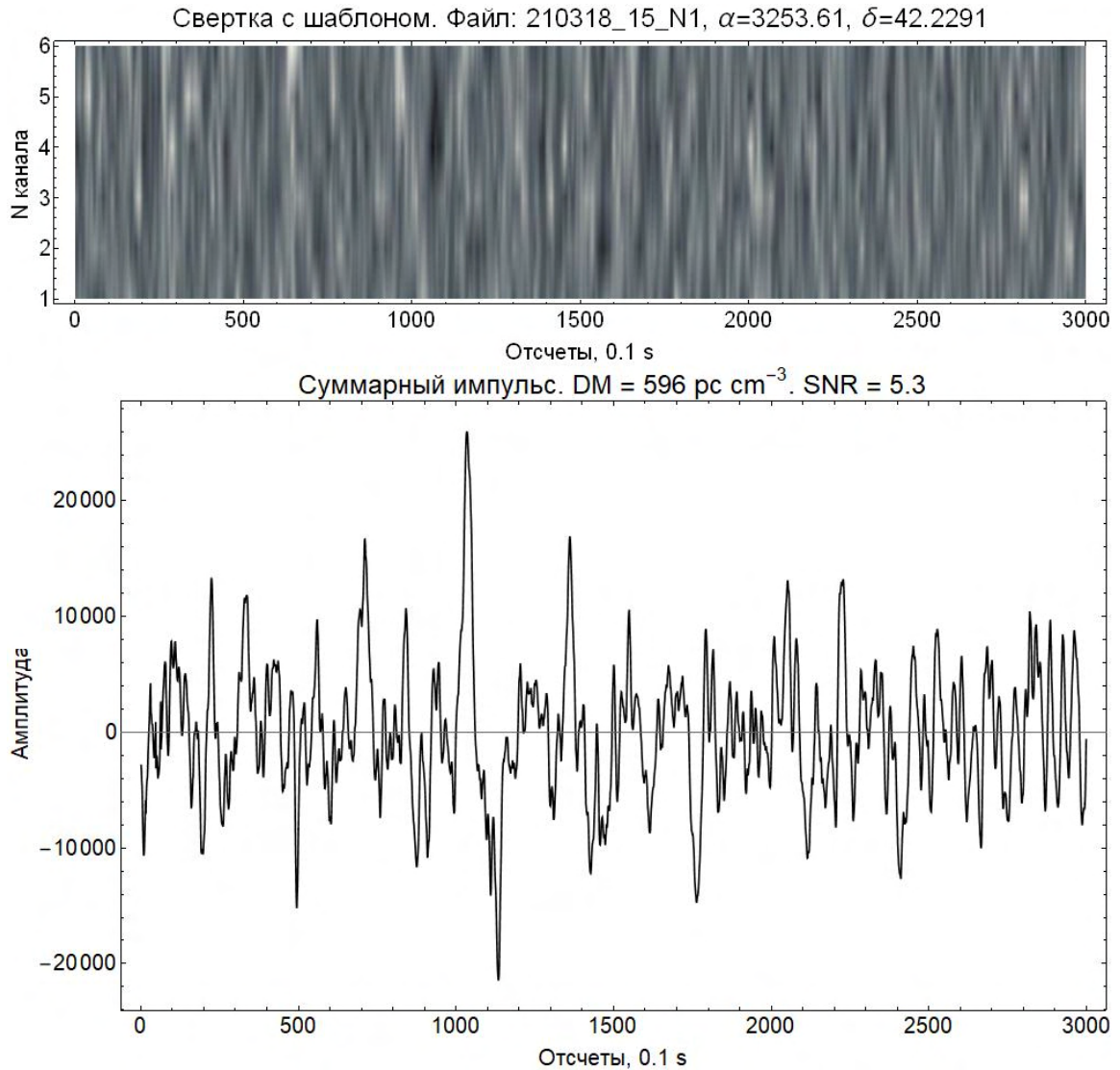


Рис. 2.9: Динамический спектр импульса с $DM = 596$ пк/см³, обнаруженного 21.03.2018 (верхнее изображение) и суммарный профиль импульса с $DM = 596$ пк/см³ (нижнее изображение) по результатам работ диссертанта [15, 61].

Одним из распространенных "доводов" оппонентов является их "аргумент" о том, что анализируется настолько огромный объем данных, что чисто статистически будут наблюдаться случайные выбросы с формально высоким отношением сигнал/шум. На этот "аргумент" можно ответить следующее: алгоритм обнаружения не является пороговым. Это принципиальное непонимание, которые показывают читатели статей [14, 15]. Алгоритм основан не на пороговом обнаружении, а на распознавании образов, где самым образом является диспергированный импульс, наблюдаемый одновременно во всех частотных каналах. То есть, визуально анализируется динамический спектр и в нем ищется наклонная линия, соответствующая диспергированному сигналу. Одновремен-

но на графике "С/Ш-DM" анализируется, на какой мере дисперсии импульс имеет максимальное отношение "сигнал-помеха". В качестве примера на Рисунке 2.10 приведена запись быстрого радиовсплеска FRB131030 при различных значениях меры дисперсии.

Тем не менее, если представить, что алгоритм обнаружения быстрых радиовсплесков основан не на визуальном анализе, а на пороговом обнаружении, то специально проведенное численное моделирование ясно показывает, что за 50 000 часов наблюдений случайным образом возникают порядка пяти импульсов с отношением "сигнал-помеха" ≈ 6 . Ни в одном из этих случаев сигнал не наблюдался одновременно во всех шести каналах. Всегда это были флуктуации в двух частотных каналах, которые при сложении с подходящей мерой дисперсии давали импульс с высокой амплитудой.

Таким образом, требование появления импульса во всех шести частотных каналах является гораздо более серьезным критерием, чем превышение заданного порога $C/\text{Ш} > 6$.

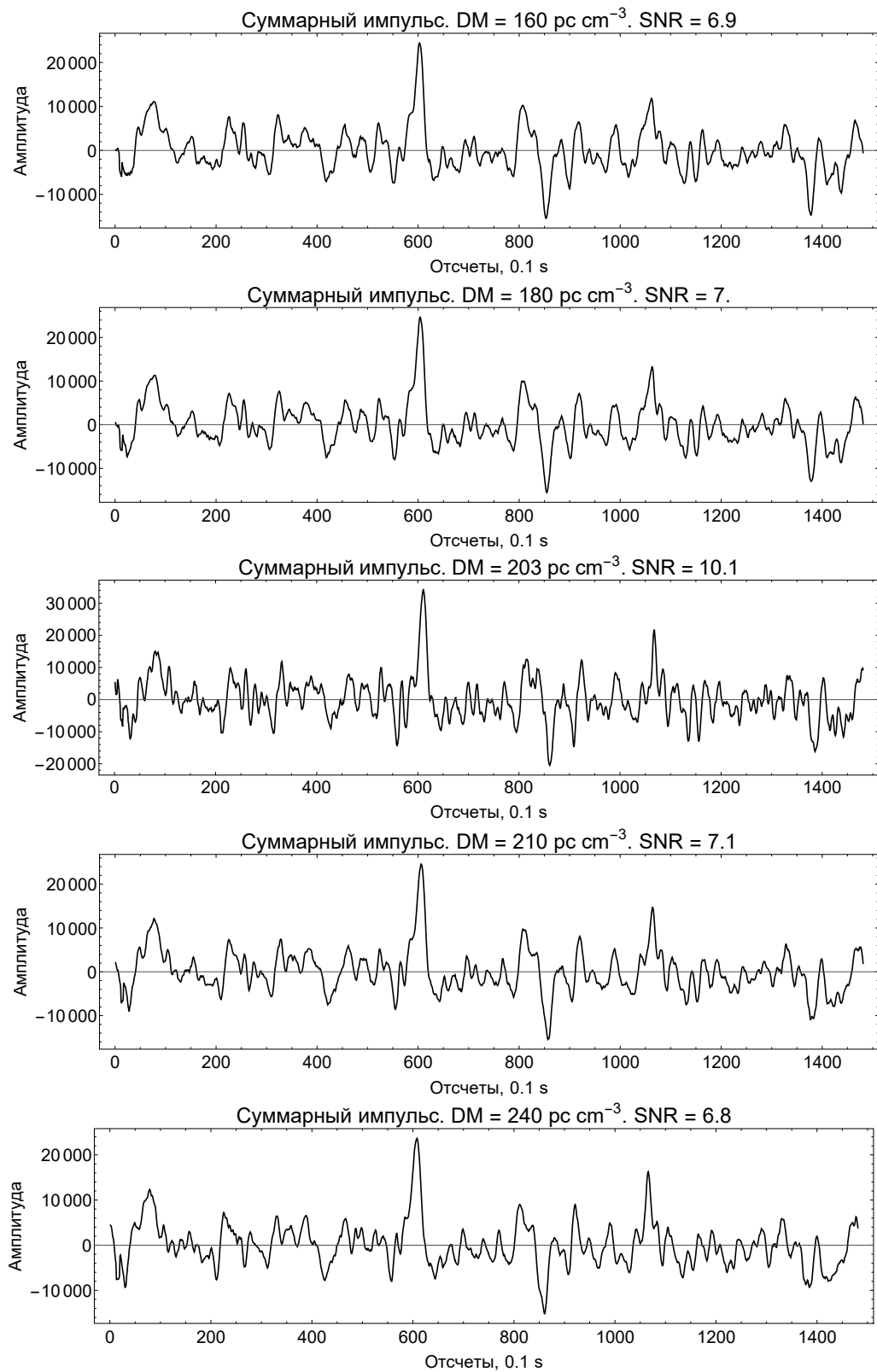


Рис. 2.10: Профиль зарегистрированного импульса FRB131030 при различной мере дисперсии. По оси X приведено время в секундах, по оси Y – амплитуда. Рисунок носит иллюстративный характер и не выносится на защиту.

Ниже приводится расчет вероятности случайного выстраивания вариаций в

динамический спектр и показывается, что эта вероятность крайне низка.

В работе анализировались ежедневные записи длительностью $T_{rec} = 300$ с. Запись пропускалась через шаблон согласованной формы с характерной шириной $t_s = 1$ с, что приводит к количеству независимых отсчетов в записи равному $m = T_{rec}/t_s$. Рисунок 2.11 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 $P_m = 1/(m-1)(m-2)...(m-k)$. 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. Таким образом, общая вероятность выстраивания отсчетов в динамический спектр равна $P_{tot} = P_m \cdot P_n \sim 10^{-12}-10^{-19}$.

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 $C/\Pi \sim 7 \div 10$ вероятность превышения равна $P_r = 3 \cdot 10^{-2} \div 8 \cdot 10^{-3}$.

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 $P = P_r \cdot P_{tot} \sim 10^{-14} \div 10^{-23}$, что, на наш взгляд, является достаточно малой величиной, чтобы произойти случайным образом за 50 000 часов проанализированных данных в $\sim 600\,000$ отдельных сканов.

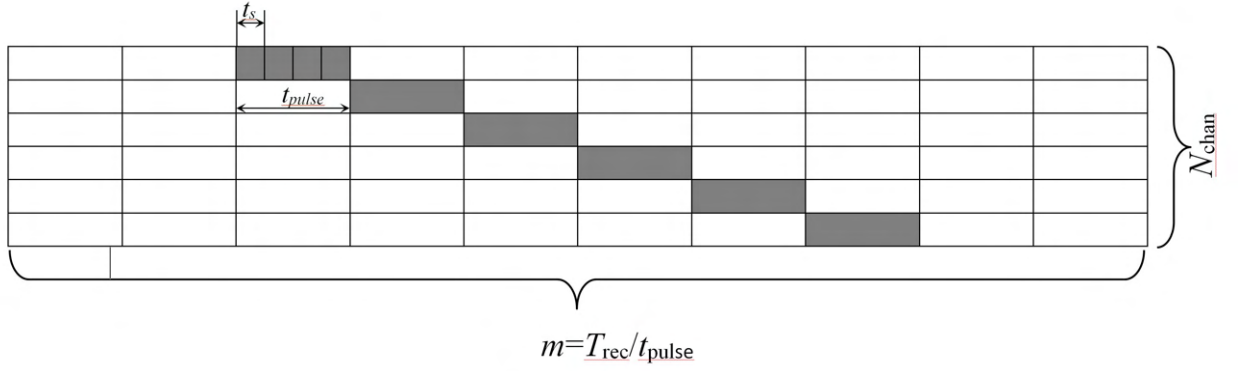


Рис. 2.11: Схематическое изображение динамического спектра для расчета вероятности его случайного возникновения. $T_{rec} = 300$ с – длина записи, $N_{chan} = 6$ – число частотных каналов, $t_s = 1$ с – величина рассеяния для шаблона, t_{pulse} – характерная ширина импульса. Схема представлена диссертантом в работе [15].

Можно предложить другой подход к вычислению вероятности выстраивания случайных вариаций в динамический спектр. Введем сквозную нумерацию отсчетов по всем каналам. Всего отсчетов в динамическом спектре будет $N = N_z N_{ch} = 300 \cdot 6 = 1800$, где N_z – число независимых отсчетов в записи, N_{ch} – число частотных каналов. Появление импульсного диспергированного сигнала в динамическом спектре сводится к «выпадению» определенных номеров в отсчетах. Число таких комбинаций определяется формулой:

$$C_N^{N_{ch}} = \frac{N!}{N_{ch}!(N - N_{ch})!} = 46\,846\,777\,478\,732\,700 \quad (2.1)$$

Верхняя оценка благоприятных случаев определяется произведением N_z^2 , которая определяется тем, что сигнал может появиться в любом месте динамического спектра и иметь меру дисперсии от 0 до максимально обнаружимой в записи, и где мы пренебрегли задержкой (наклоном) сигнала из-за дисперсии.

Таким образом, вероятность случайного появления диспергированного сигнала равна:

$$P = N_z^2 / C_N^{N_{ch}} < 1.92 \cdot 10^{-12} \quad (2.2)$$

Учет отношения сигнал/помеха еще снизит вероятность P на несколько порядков.

Кроме всего прочего, была сделана оценка вероятности ложной тревоги – это вероятность превышения шумовыми вариациями некоторого наперед заданного

порога α (отношение сигнал/шум), и, как следствие, ошибочное принятие шумовых вариаций за реальный сигнал. Рассчитаем вероятность для двух типов распределения шума: нормального (распределение Гаусса) и экспоненциального (распределение Лапласа).

Вероятность ложной тревоги для распределения Гаусса ($\mu = 0$, $\sigma = 1$) записывается следующей формулой:

$$P_1(\alpha) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\alpha}^{\infty} e^{-\frac{x^2}{2}} dx \approx \frac{e^{-\frac{\alpha^2}{2}}}{\sqrt{2\pi}\alpha}, \alpha \gg 1. \quad (2.3)$$

Распределение Лапласа со средним $\mu = 0$ и масштабным параметром $\beta = 1$ задаётся следующей формулой:

$$p_2(x) = \begin{cases} \frac{e^{-x}}{2}, & x \geq 0, \\ \frac{e^x}{2}, & x < 0. \end{cases} \quad (2.4)$$

Вероятность ложной тревоги для распределения Лапласа в зависимости от пороговой величины α выражается следующим интегралом:

$$P_2(\alpha) = \int_{\alpha}^{\infty} p_2(x) dx = 1 - \int_{-\infty}^{\alpha} p_2(x) dx = \begin{cases} \frac{e^{-\alpha}}{2}, & \alpha \geq 0, \\ 1 - \frac{e^{\alpha}}{2}, & \alpha < 0. \end{cases} \quad (2.5)$$

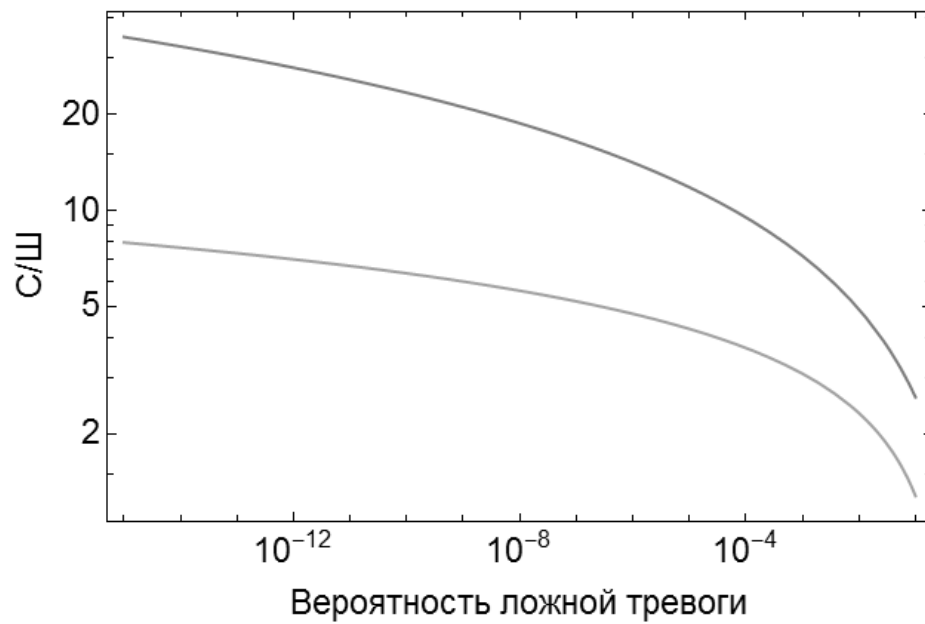


Рис. 2.12: График зависимости порогового отношения сигнал/шум от вероятности ложной тревоги. Верхняя кривая соответствует распределению шумов по Лапласу, нижняя кривая соответствует распределению шумов в шумовой дорожке по Гауссу. График носит иллюстративный характер и не выносится на защиту.

Ранее в работе была посчитана вероятность случайного выстраивания шумовых вариаций в импульсный сигнал в случае многоканального приема. Если рассмотреть случай одноканального приемника и классическое пороговое обнаружение, то окажется, что верхней оценке вероятности ложной тревоги $P = 10^{-12}$ соответствует отношение сигнал/шум $C/\text{Ш} \cong 7$ и 25 для распределений Гаусса и Лапласа соответственно, и с точки зрения самих величин они являются достоверными. Это один из принципиальных моментов в диссертации, на который нужно обязательно обратить внимание.

Отдельно следует коснуться вопроса наблюдаемого количества радиовсплесков. За шесть лет проанализирована область неба ~ 30 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 вспышек антенной БСА на частоте 110 МГц ~ 2000 импульсов/год.

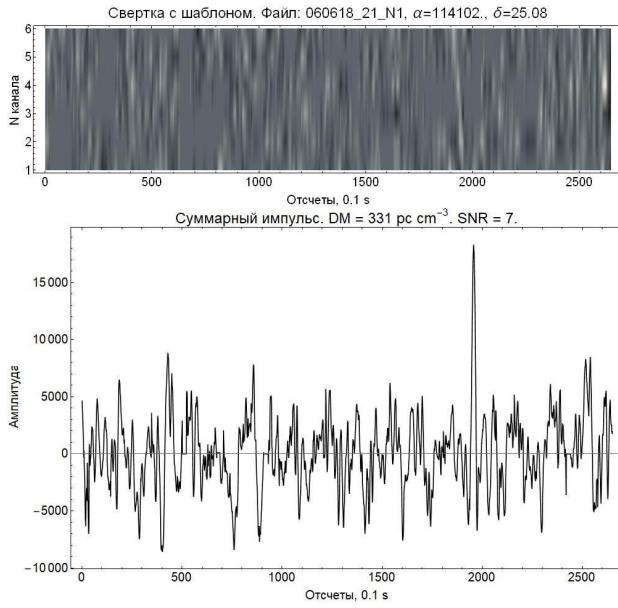
2.2.3 Поиск быстрых радиовсплесков в области неба, доступной для наблюдений на радиотелескопе БСА ФИАН

До недавнего времени быстрые радиовсплески фиксировались эпизодически либо в архивных данных, либо при проведении наблюдений других космических объектов, и статистика по ним была крайне скудна. Ситуация изменилась с введением в строй специальных мониторинговых радиотелескопов, работающих непрерывно в круглосуточном режиме. За рубежом к таким инструментам относятся, например, CHIME [77], ASKAP [78]. Такого рода радиотелескоп есть и в России – это Большая синфазная антенна Пушинской радиоастрономической обсерватории АКЦ ФИАН (БСА ФИАН).

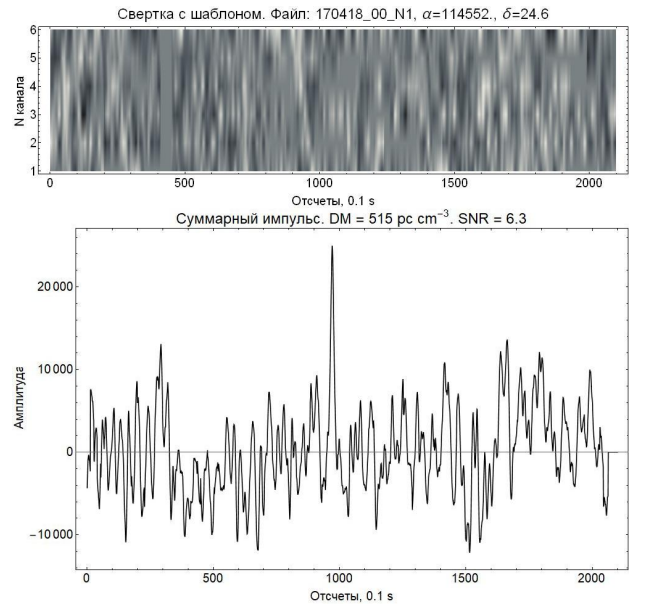
Чтобы начать делать значимые достоверные выводы о свойствах новых импульсов, обнаруженных на частоте 111 МГц, необходимо было увеличить их статистику до нескольких десятков, поэтому был начат поиск по всему доступному участку неба. На момент написания диссертации на телескопе БСА ФИАН всего обнаружено 62 импульса. Хотя с самого начала эти события были определены как быстрые радиовсплески, необходимо было исследовать их наблюдательные свойства и сравнить с аналогичными свойствами радиовсплесков, наблюдаемых на других частотах, чтобы уверенно говорить об этом.

В дальнейшем в ходе данного этапа работы был проведен сравнительный анализ таких наблюдательных характеристик как мера дисперсии, зависимость рассеяния импульсов от меры дисперсии, которая принципиально отличается от аналогичной зависимости для пульсаров, и, наконец, зависимость $\text{Log}N - \text{Log}F$ на частотах 111 и 1400 МГц, из которой выведен средний спектральный индекс импульсов. Все результаты анализа более подробно приводятся в Главе 3.

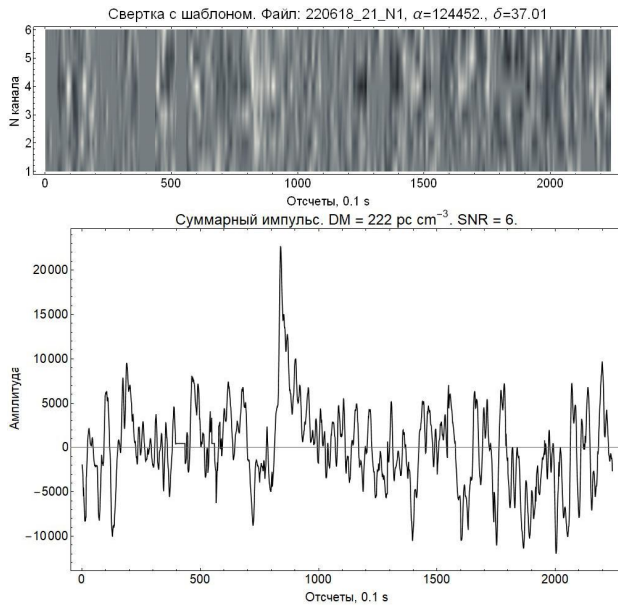
Метод выделения одиночных импульсных сигналов включал все этапы, подробно описанные в Главе 2. В ходе обработки данных в период с января по июль 2018 года в площадке с координатами $\delta = 21.38^\circ \div 41.72^\circ$ и $\alpha = 11^h45^m \div 12^h45^m$ был обнаружен 51 новый быстрый радиовсплеск с широким диапазоном мер дисперсии DM . Все импульсы, а также их параметры занесены в Таблицу 2.2. Динамические спектры и профили импульсов приведены на Рисунках 2.13 – 2.26.



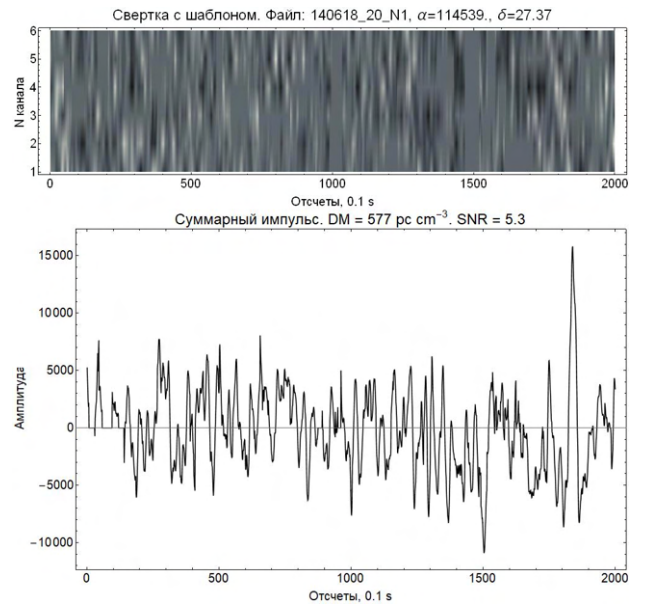
FRB180606



FRB180417

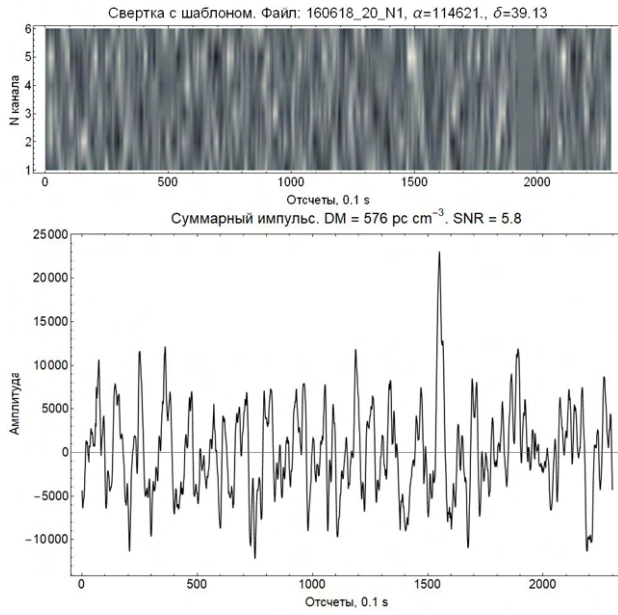


FRB180622

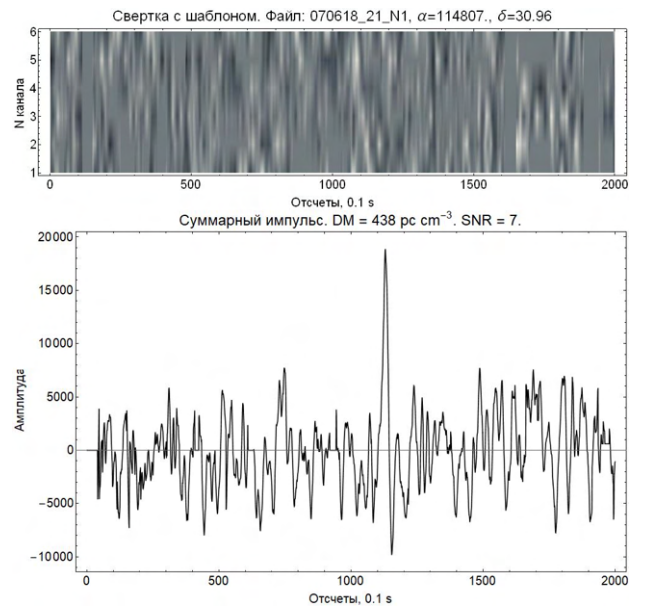


FRB180614

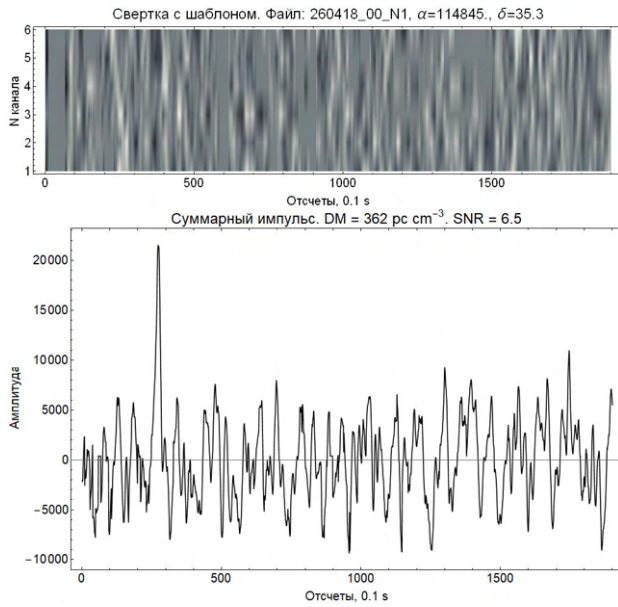
Рис. 2.13: Динамические спектры и профили импульсов FRB180606, FRB180622, FRB180417 и FRB180614 по результатам работы диссертанта [61].



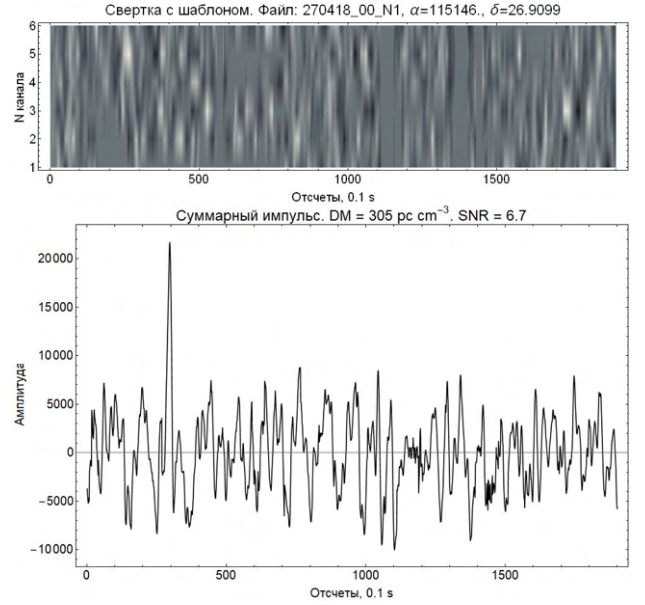
FRB180616



FRB180607

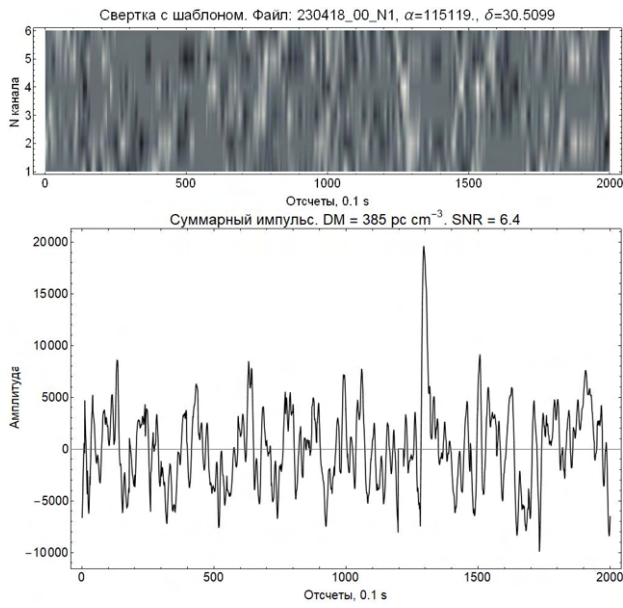


FRB180426

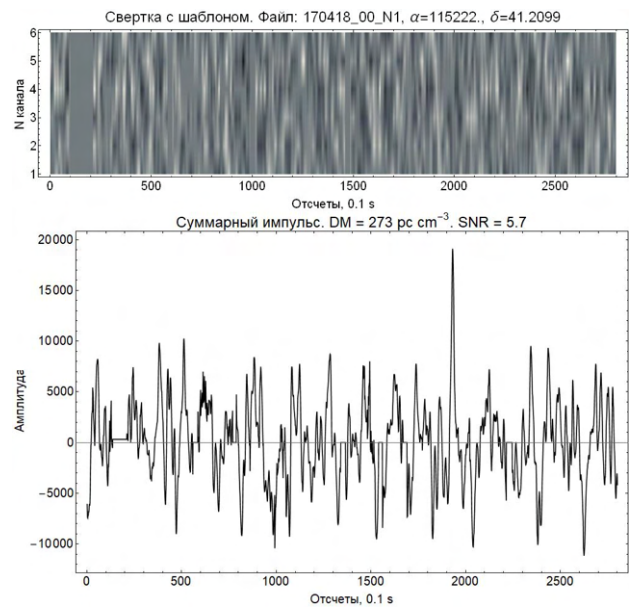


FRB180427

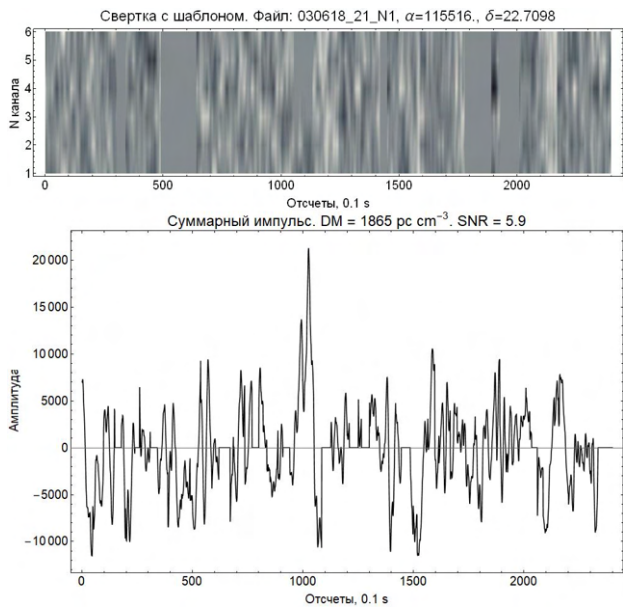
Рис. 2.14: Динамические спектры и профили импульсов FRB180616, FRB180426, FRB180607 и FRB180427 по результатам работы диссертанта [61].



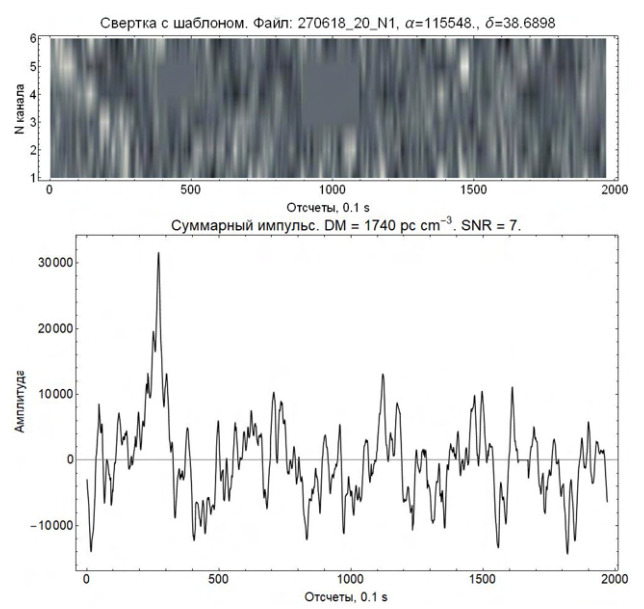
FRB180423



FRB180417J1155+4112

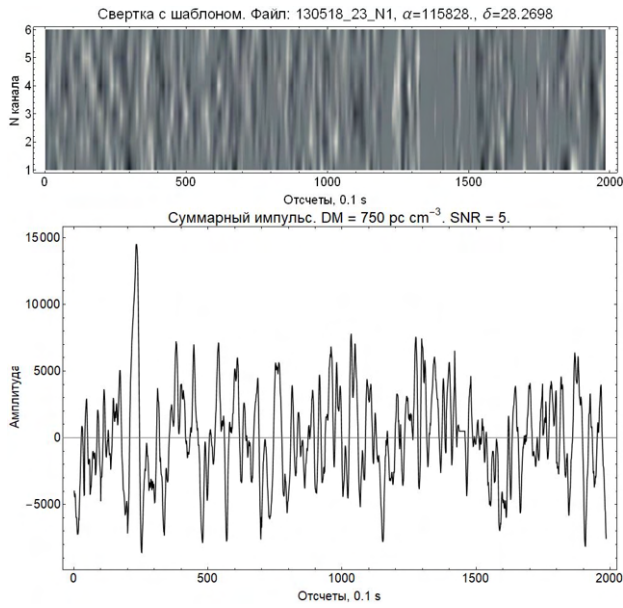


FRB180603

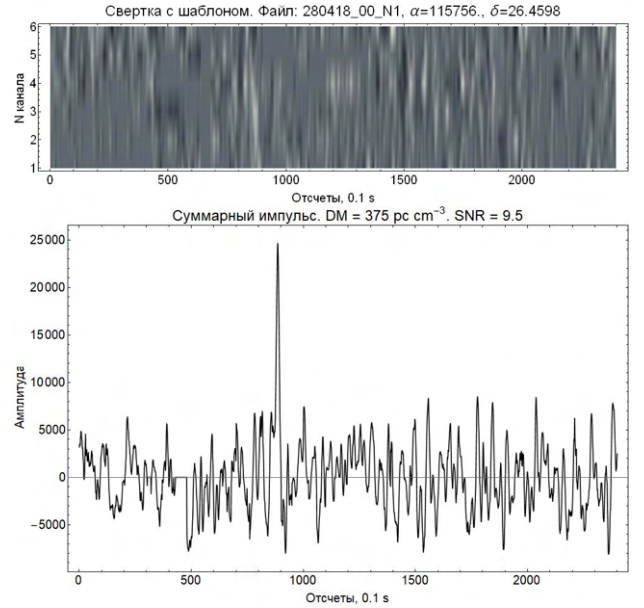


FRB180627

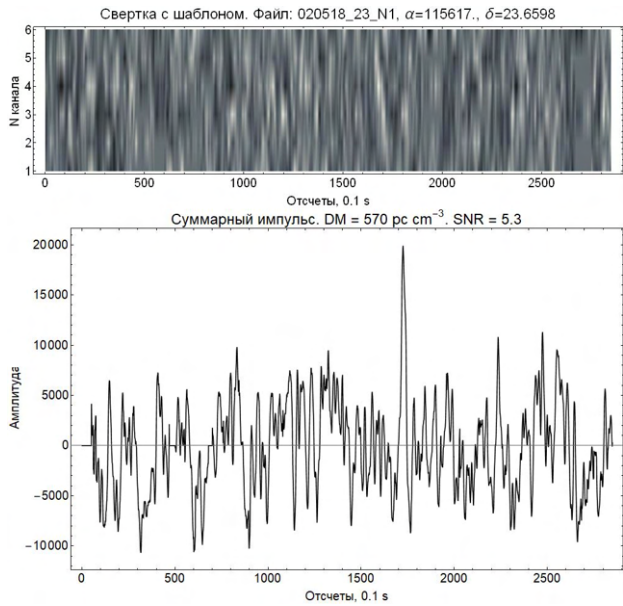
Рис. 2.15: Динамические спектры и профили импульсов FRB180423, FRB180603, FRB180417J1155+4112 и FRB180627 по результатам работы диссертанта [61].



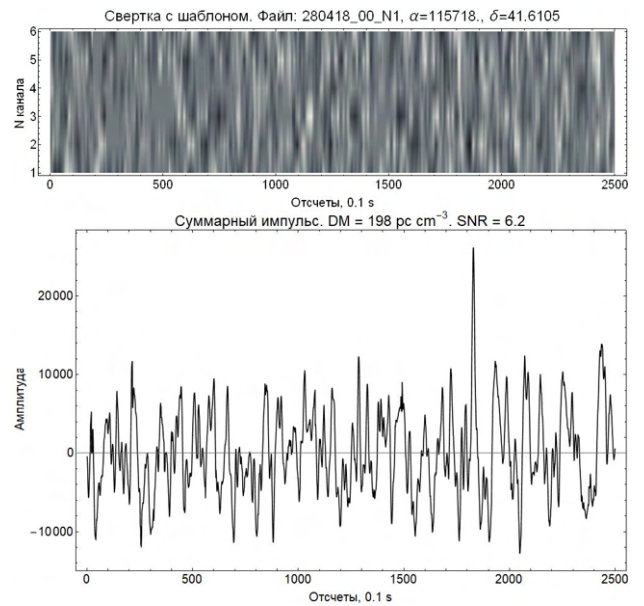
FRB180513



FRB180428

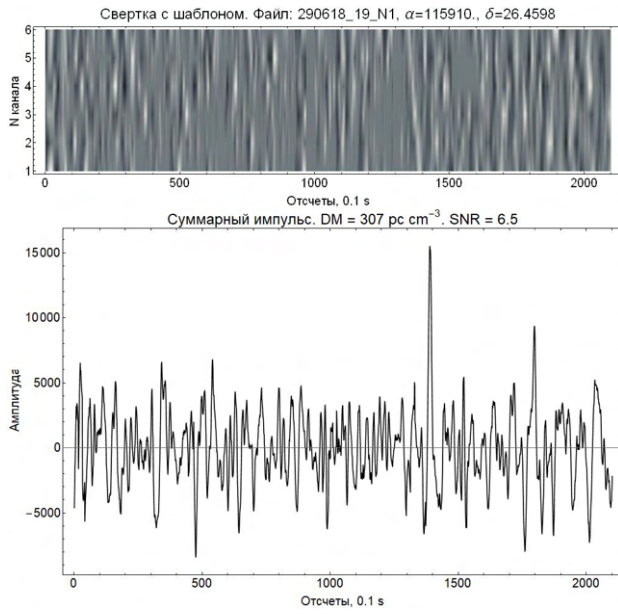


FRB180502

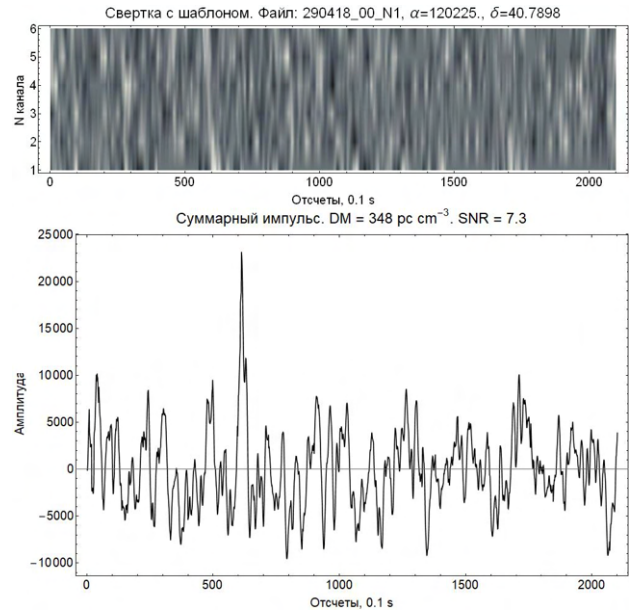


FRB180428J1200+4136

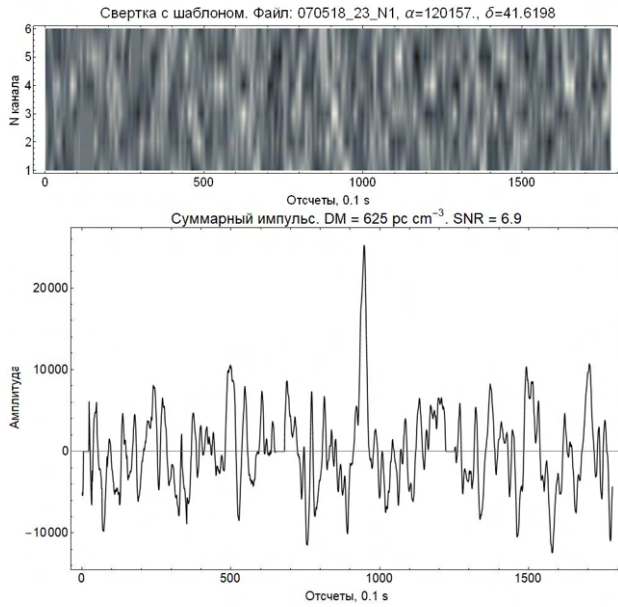
Рис. 2.16: Динамические спектры и профили импульсов FRB180513, FRB180502, FRB180428 и FRB180428J1200+4136 по результатам работы диссертанта [61].



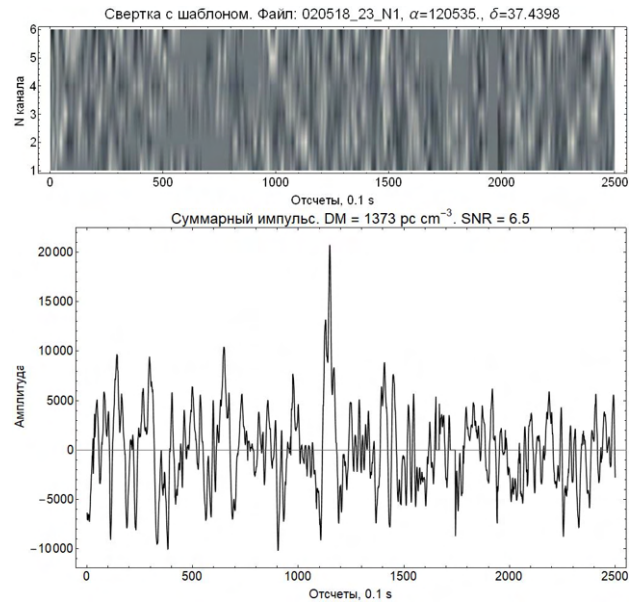
FRB180629



FRB180429

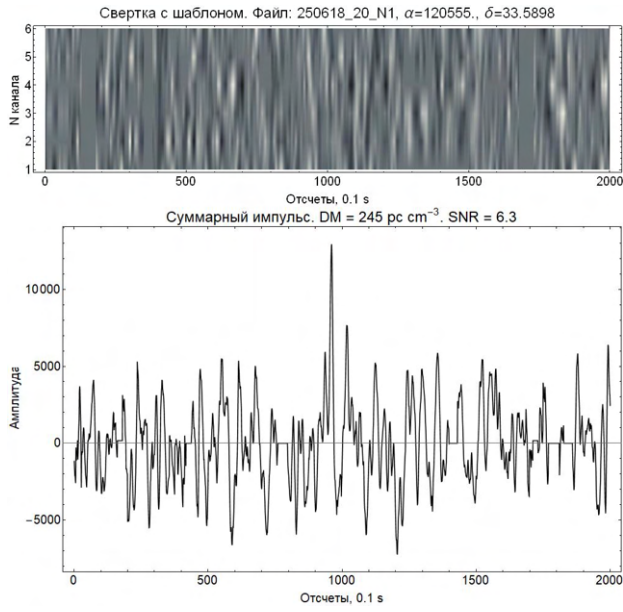


FRB180507

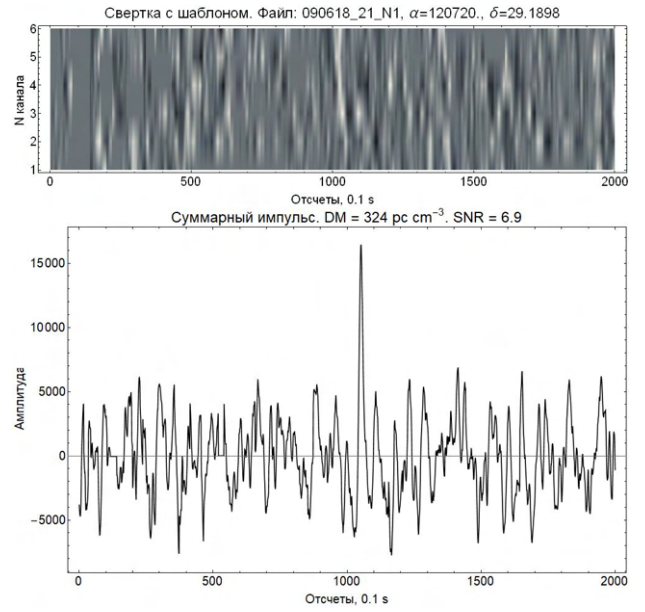


FRB180502J1207+3726

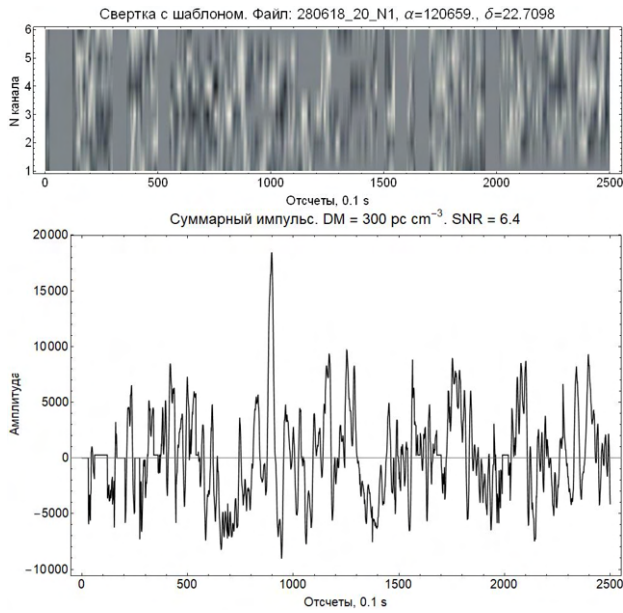
Рис. 2.17: Динамические спектры и профили импульсов FRB180629, FRB180507, FRB180429 и FRB180502J1207+3726 по результатам работы диссертанта [61].



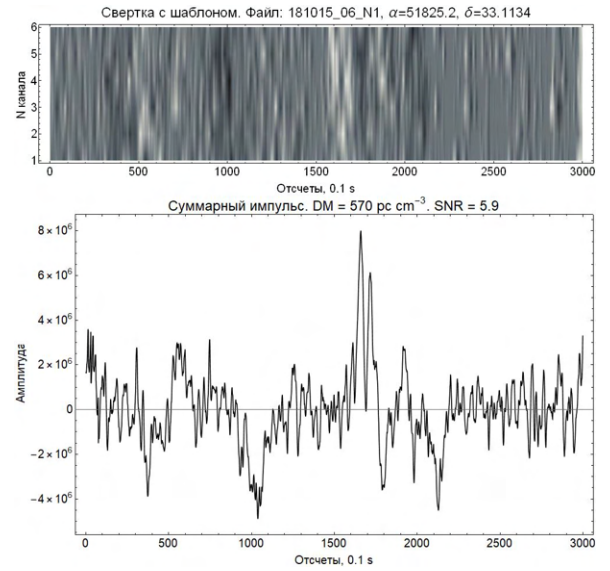
FRB180625



FRB180609

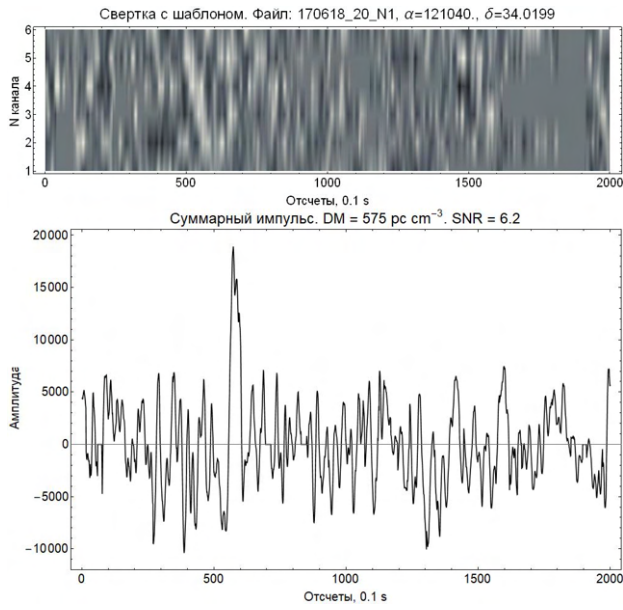


FRB180628

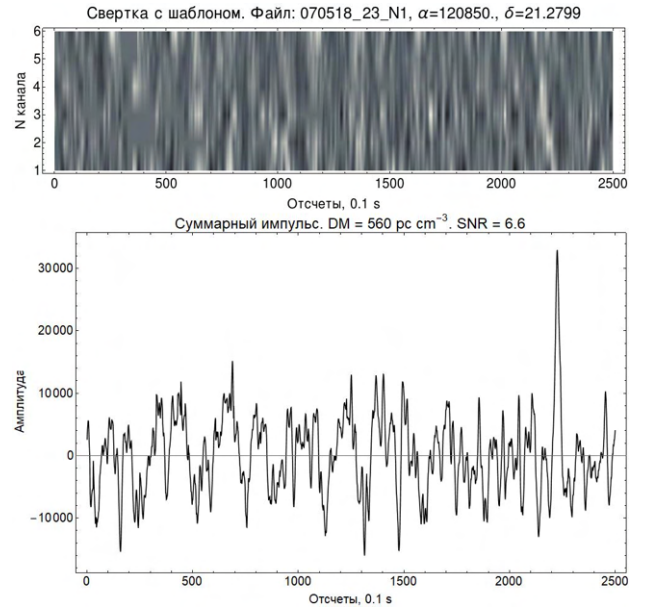


FRB151018

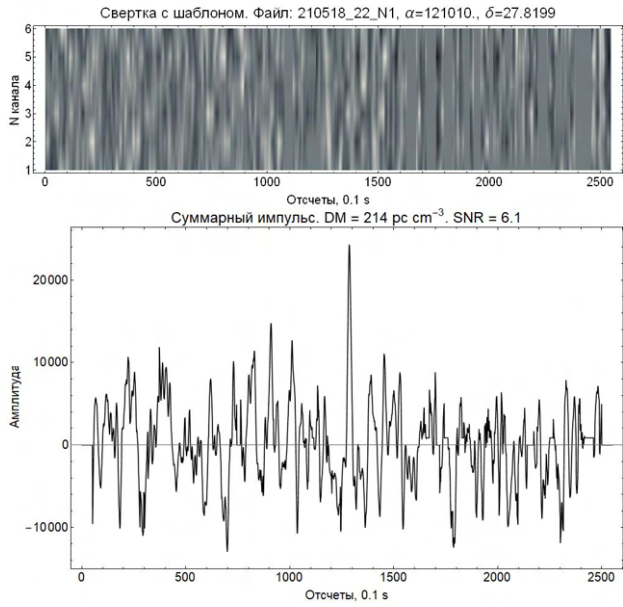
Рис. 2.18: Динамические спектры и профили импульсов FRB180625, FRB180628, FRB180609 и FRB151018 по результатам работы диссертанта [14, 61].



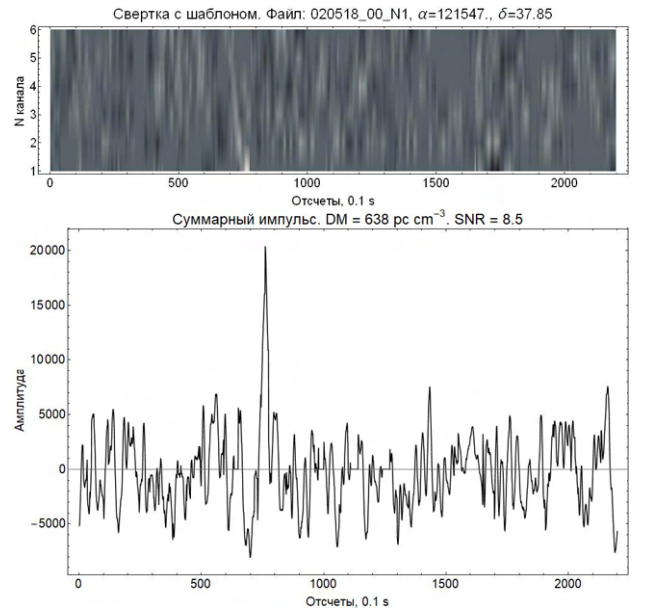
FRB180617



FRB180507J1212+2116

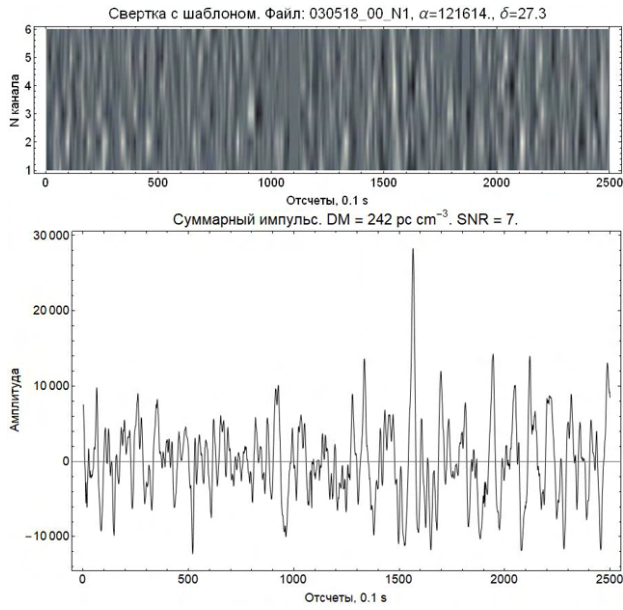


FRB180521

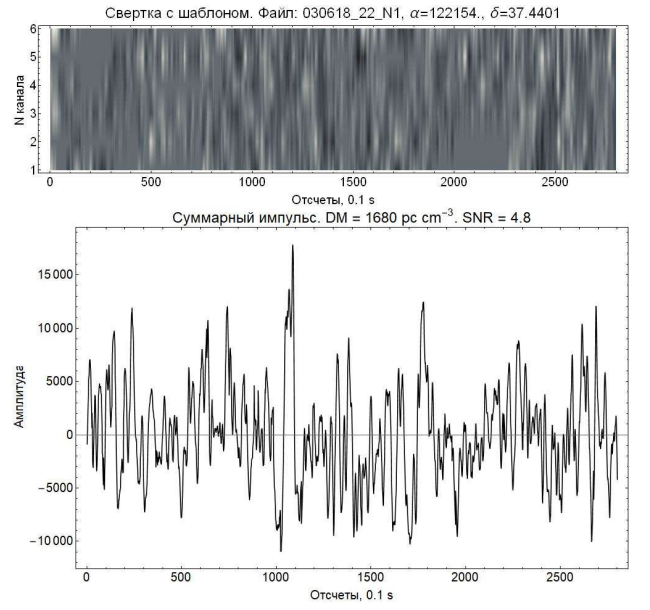


FRB180502J1216+3750

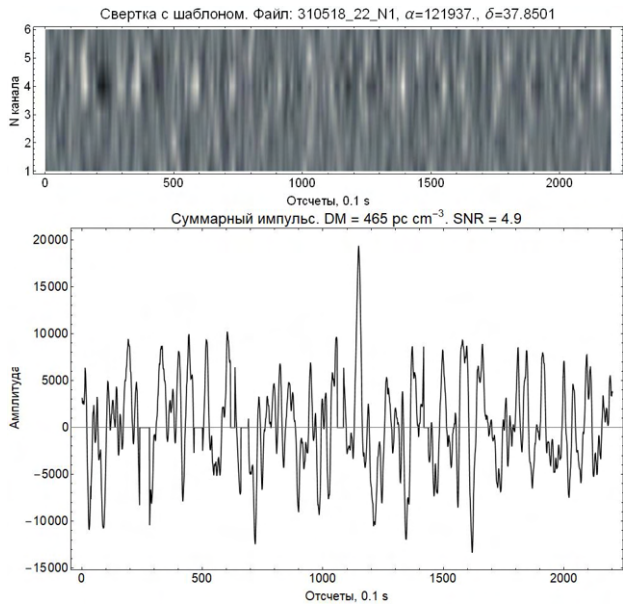
Рис. 2.19: Динамические спектры и профили импульсов FRB180617, FRB180521, FRB180507J1212+2116 и FRB180502J1216+3750 по результатам работы диссертанта [61].



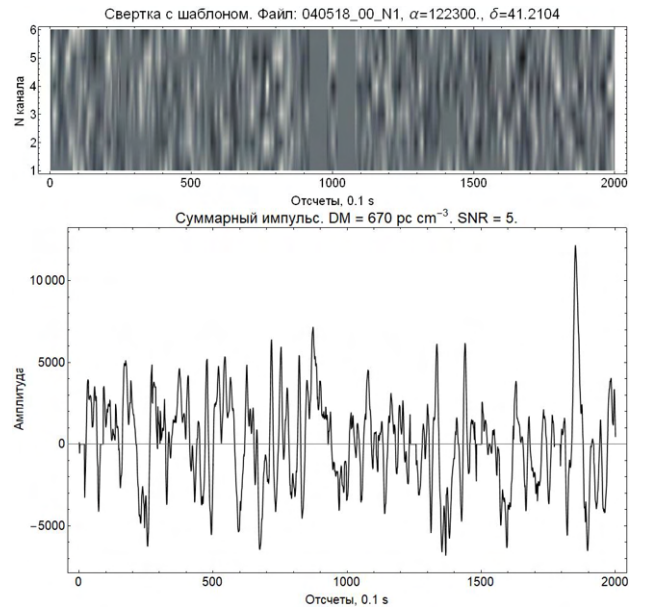
FRB180503



FRB180603.J1223+3726

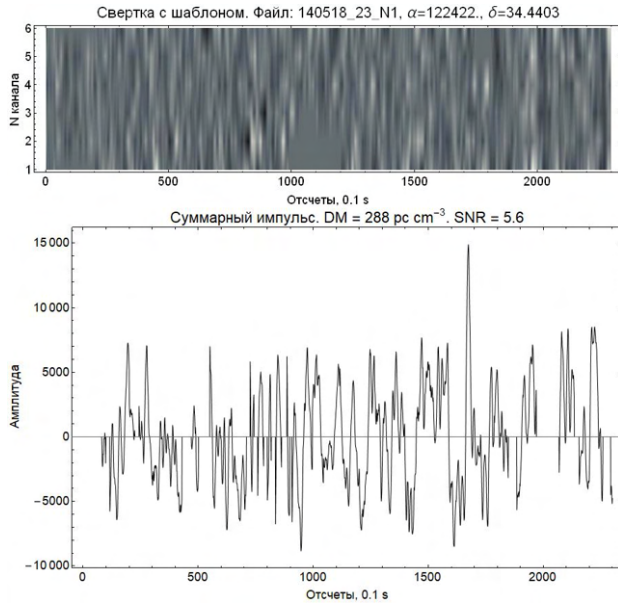


FRB180531J1221+3751

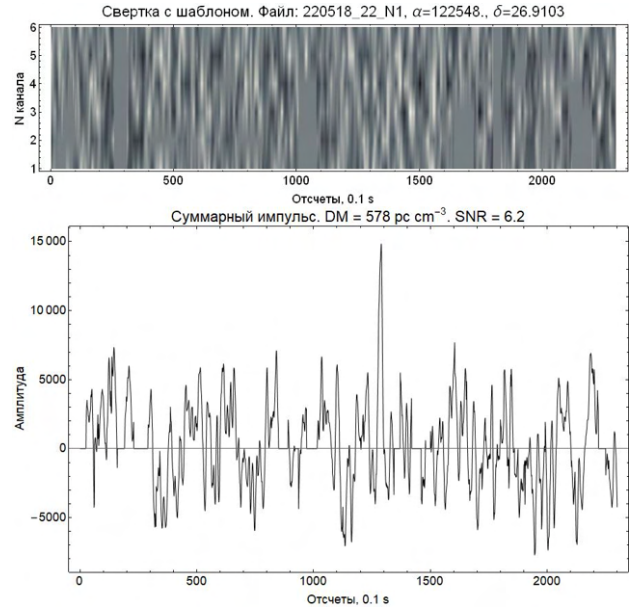


FRB180504

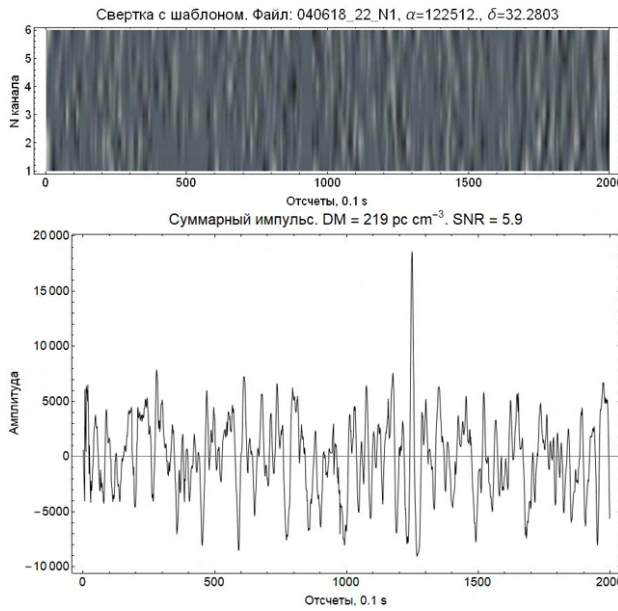
Рис. 2.20: Динамические спектры и профили импульсов FRB180503, FRB180531J1221+3751, FRB180603.J1223+3726 и FRB180504 по результатам работы диссертанта [61].



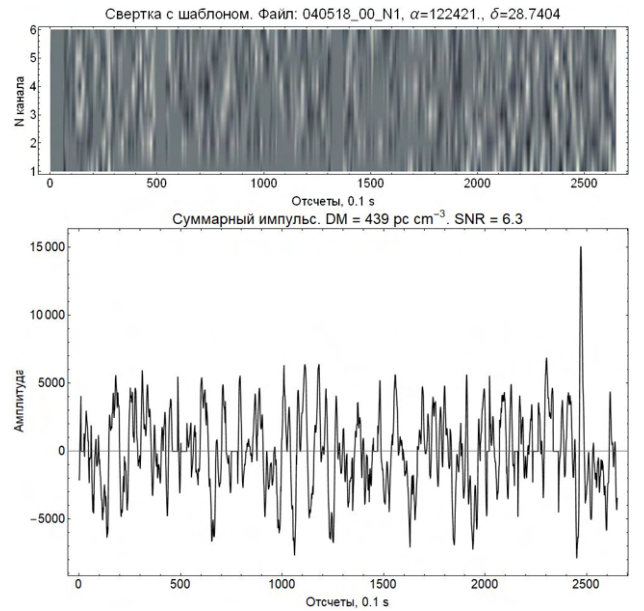
FRB180514



FRB180522

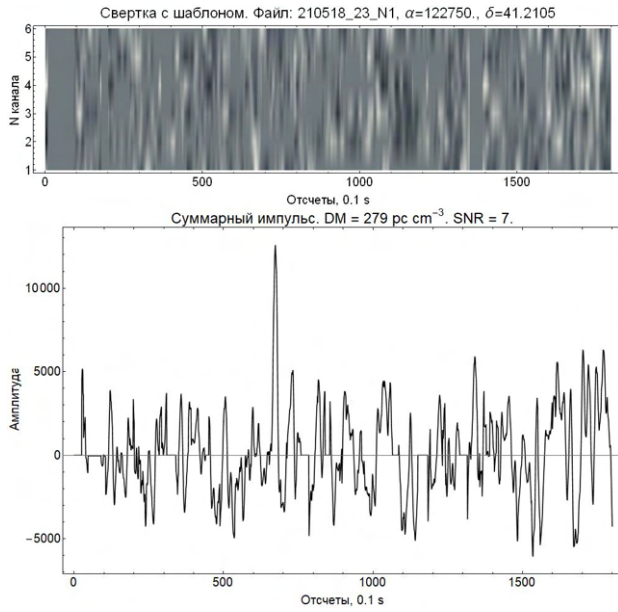


FRB180604

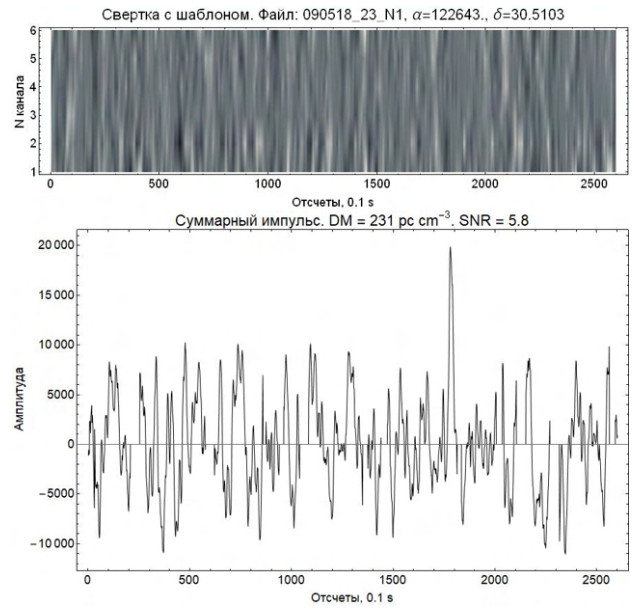


FRB180504J1228+2844

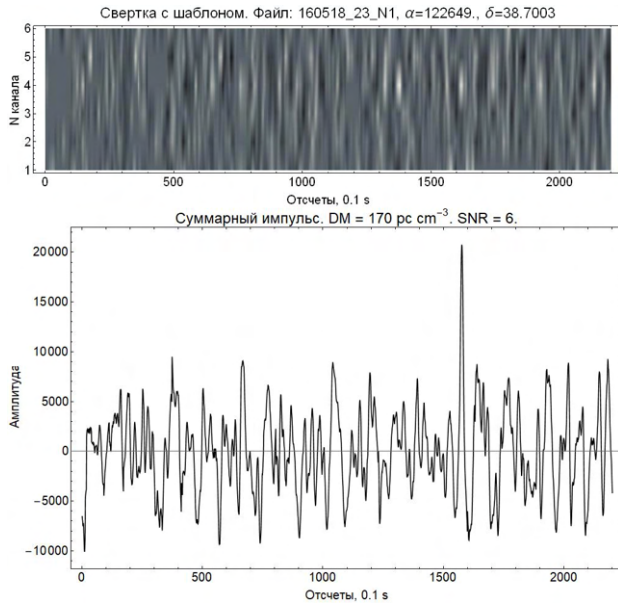
Рис. 2.21: Динамические спектры и профили импульсов FRB180514, FRB180604, FRB180522 и FRB180504J1228+2844 по результатам работы диссертанта [61].



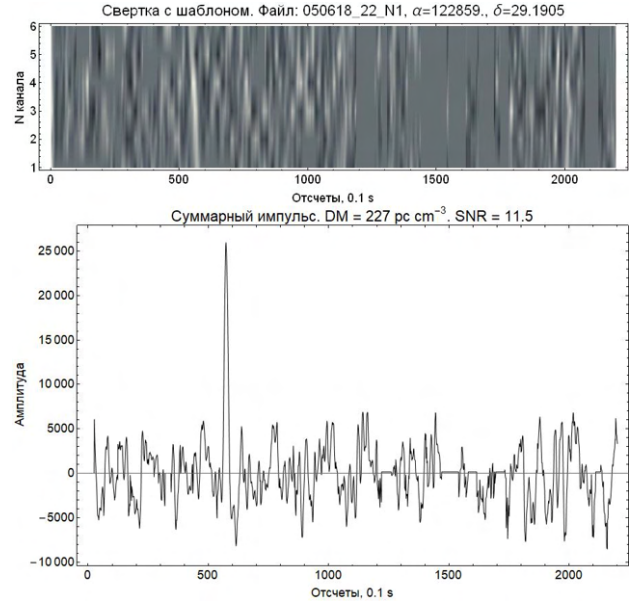
FRB180521J1228+4112



FRB180509J1229+3030

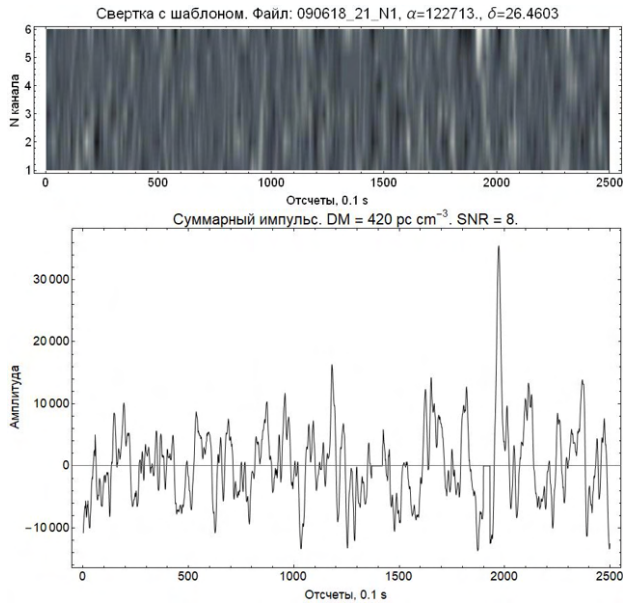


FRB180516

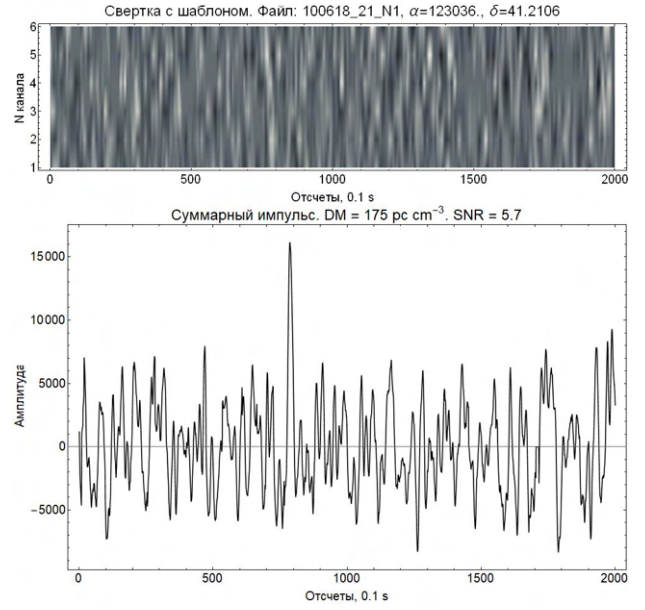


FRB180605

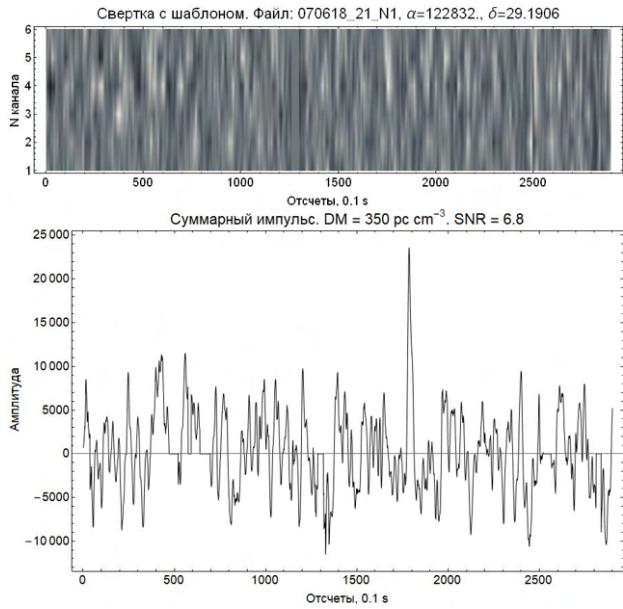
Рис. 2.22: Динамические спектры и профили импульсов FRB180521J1228+4112, FRB180516, FRB180509J1229+3030 и FRB180605 по результатам работы диссертанта [61].



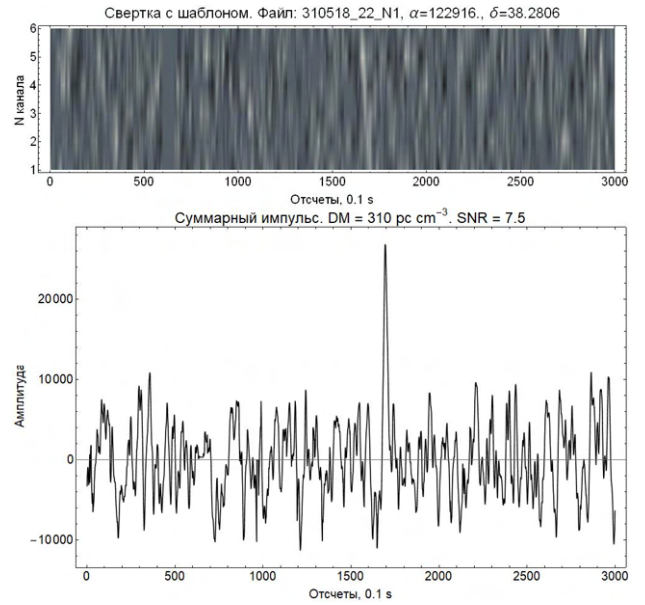
FRB180609J1230+2627



FRB180610

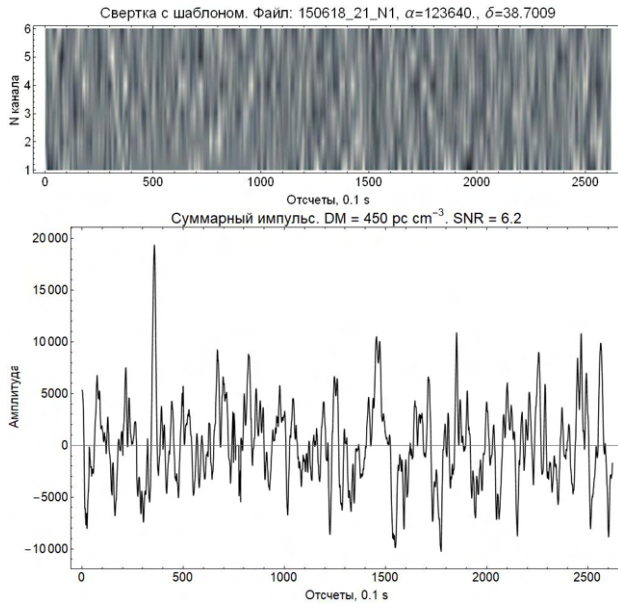


FRB180607J1231+2911

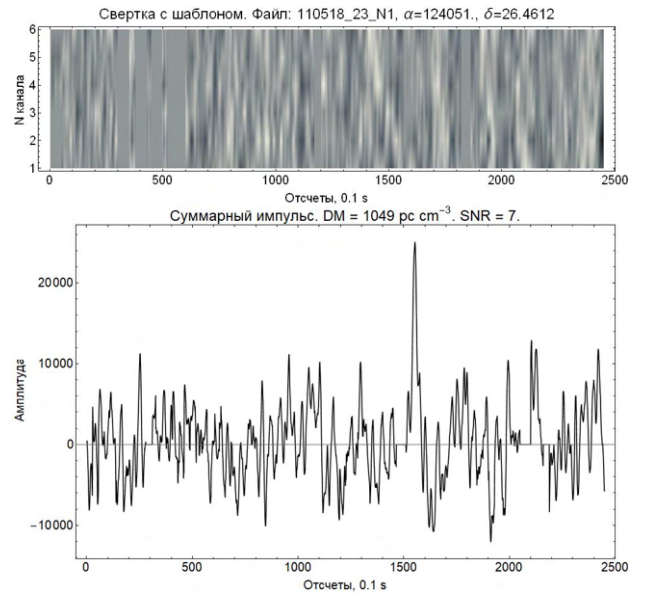


FRB180531

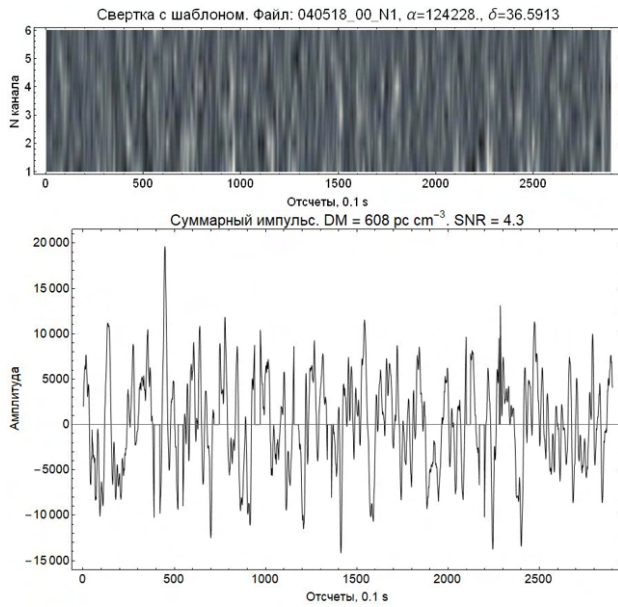
Рис. 2.23: Динамические спектры и профили импульсов FRB180609J1230+2627, FRB180607J1231+2911, FRB180610 и FRB180531 по результатам работы диссертанта [61].



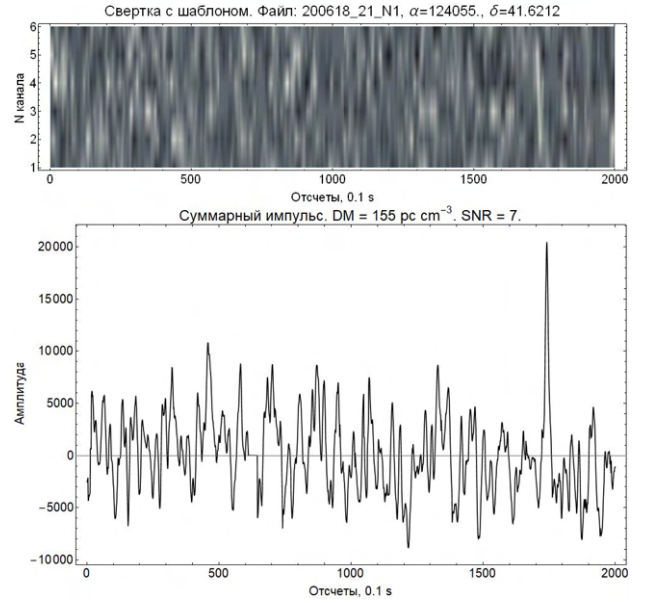
FRB180615



FRB180511

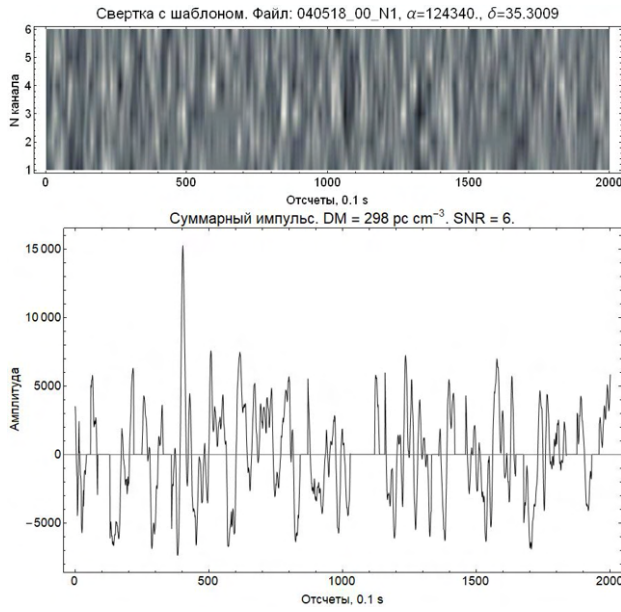


FRB180504J1243+3635

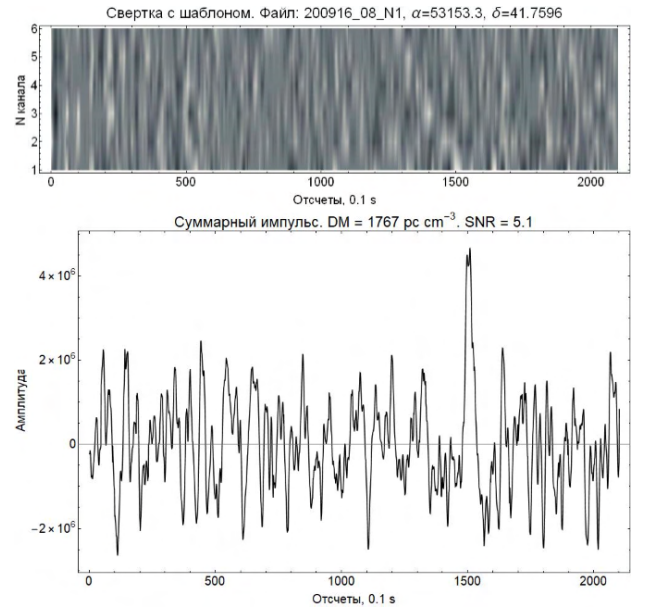


FRB180620

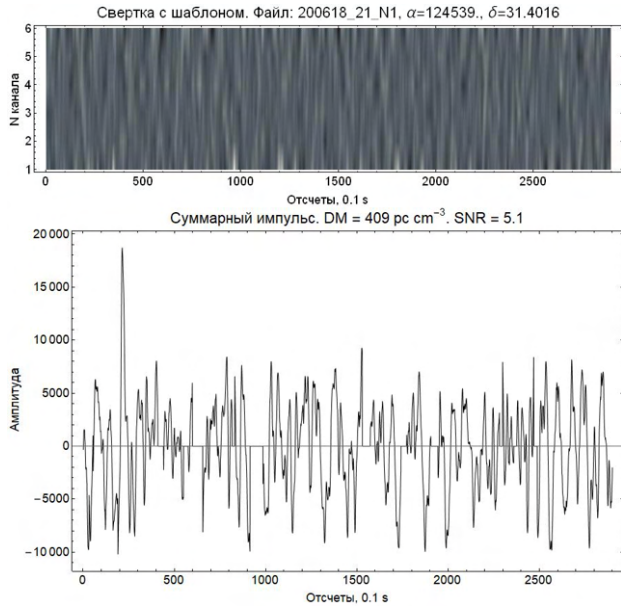
Рис. 2.24: Динамические спектры и профили импульсов FRB180615, FRB180504J1243+3635, FRB180511 и FRB180620 по результатам работы диссертанта [61].



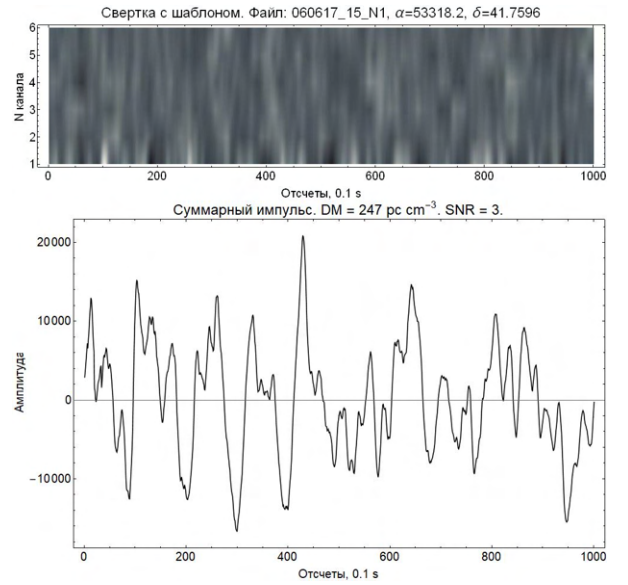
FRB180504J1244+3518



FRB160920

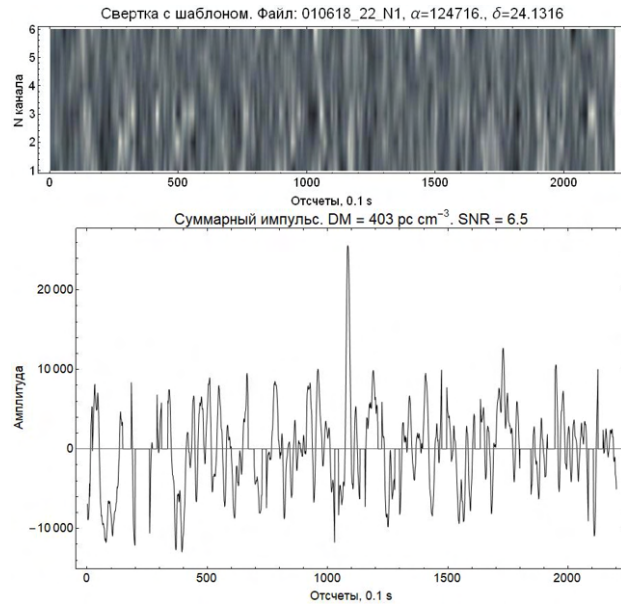


FRB180620J1245+3124



FRB170606

Рис. 2.25: Динамические спектры и профили импульсов FRB180504J1244+3518, FRB180620J1245+3124 и кандидатов в импульсы FRB160920 и FRB170606 по результатам работы диссертанта [61].



FRB180601

Рис. 2.26: Динамический спектр и профиль события FRB180601 по результатам работы диссертанта [61].

2.2.4 Каталог быстрых радиовсплесков на 111 МГц

В работе [15] было показано, что средний темп регистрации всплесков радиотелескопом БСА ФИАН на частоте 111 МГц ~ 2000 импульсов/год. На момент начала 2021 года произведена обработка архивных данных 2018 года с января по июнь в участке неба $\alpha = 11^h45^m \div 12^h45^m$ и $\delta = 21.38^\circ \div 41.72^\circ$. За указанный период было обнаружено 51 новое событие, что в пересчете на все небо за год соответствует количеству 10^3 импульсов/день и соответствует оценкам, данным в различных исследованиях [79]. В связи с тем, что количество обнаруженных импульсов превысило несколько десятков, был создан отдельный каталог радиовсплесков, зарегистрированных на 111 МГц – "PRAO FRBs at 111 MHz"¹. Данный ресурс находится в свободном доступе и включает в себя следующие параметры:

1. FRB_name – название импульса. Приводится в виде FRB yymmdd.Jra+dec [77].
2. RA, DEC – координаты импульсов приводятся в формате RA(J2000) hh:mm:ss, DEC(J2000) deg. Оценка погрешности определения прямого восхождения составляет $\pm 2^m$, по склонению эта величина соответствует $\pm 15'$.

¹<https://fedorova-astrofis.wixsite.com/website/catalogue-prao-frb>

3. GL, GB – галактические координаты на эпоху J2000.
4. Date – дата в формате уууу/мм/дд соответствует дате в архивных данных момента обнаружения импульса.
5. UTC_time – значение UTC в формате hh:mm:ss.
6. Flux – значение пикового потока быстрых радиовсплесков (Ян). Оценка точности составляет ± 0.05 Ян.
7. DM – величина меры дисперсии (пк/см³). Оценка погрешности составляет ± 5 пак/см³.
8. S/N – величина отношения сигнал/шум. Для ранее обнаруженных импульсов из [14, 15] величина S/N пересчитана в более консервативную сторону.
9. Width_observed – ширина суммарного импульса после свертки с шаблоном (мс). Погрешность измерения составляет ± 100 мс.
10. Width_original – первоначальная ширина рассеянного импульса, принятого антенной (мс), рассчитанная по формуле 2.9. Погрешность ± 100 мс.
11. Fluence – плотность энергии быстрого радиовсплеска (Ян · мс).
12. z_YMW16 – значение красного смещения z в соответствии с моделью электронной плотности YMW16 electron-density model [80]. Данная величина носит только оценочный характер, так как зависит от принятой величины средней плотности в межгалактической среде. Красное смещение z определялось по формуле 2.6:

$$z = \frac{DM_{IGM}H_0}{c \cdot n_{IGM}} = \frac{[DM - (DM_{Gal} + DM_{MC} + DM_{Host})]H_0}{c \cdot n_{IGM}}, \quad (2.6)$$

где DM – это мера дисперсии, наблюдаемого FRB, DM_{Gal} – полная мера дисперсии на луче зрения к FRB, DM_{MC} – вклад меры дисперсии Магелланового облака, DM_{IGM} – вклад межгалактической среды, DM_{Host} – мера дисперсии галактики, в которой зафиксирован FRB, H_0 – постоянная Хаббла ($H_0 = 67.3$ км · с⁻¹), n_{IGM} – концентрация электронов ($n_{IGM} = 0.16$ м⁻³).

Выше для каждого импульса приведен динамический спектр в шести частотных каналах (верхнее изображение) и профиль (нижнее изображение). Амплитуда импульса приводится в единицах АЦП, под отсчетом понимается единица времени, равная 0.1 с.

В данной главе рассматривается уширение импульса из-за рассеяния. Ниже описана процедура измерения ширины радиовсплеска. Аналитически форма шаблона $p(t)$ и рассеянного импульса $s(t)$ записывается в виде

$$(p(t), s(t)) = (a, b) \begin{cases} 1 - \exp(-t/t_s), & 0 \leq t \leq \tau, \\ \exp(-t/t_s)(\exp(-t/t_s) - 1), & 0 \leq \tau \leq t, \end{cases} \quad (2.7)$$

где a, b – амплитуды шаблона и импульса соответственно, t_s – рассеяние импульса, τ – уширение импульса в частотном канале. Для шаблона, как уже было сказано ранее, величина $t_s = 1$ с. Также необходимо потребовать выполнения условия $\int_0^\infty p(t) dt = 1$ для сохранения энергии импульса. Рисунок 2.27 показывает вид шаблона и импульса.

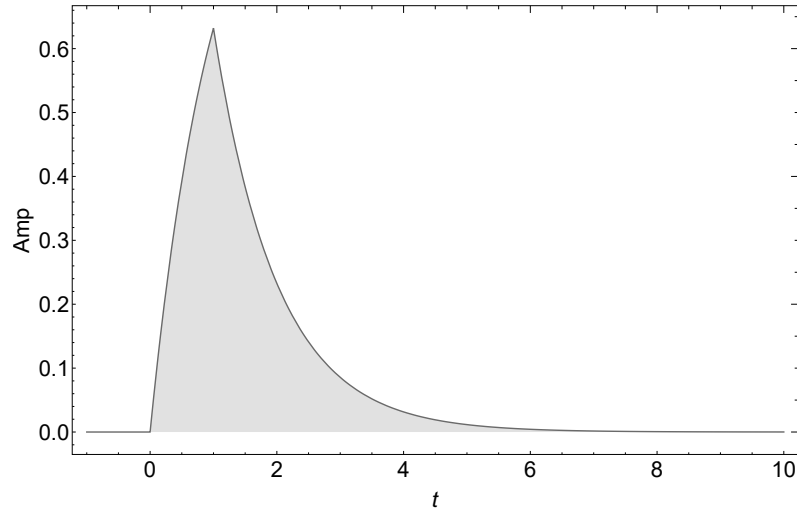


Рис. 2.27: Шаблон, аналогичный форме принимаемого импульса. Amp – амплитуда сигнала, t – время, с. Рисунок взят из работы диссертанта [61].

Сигнальная функция представляет собой свертку зашумленного сигнала $s(t)$ и шаблона $p(t)$:

$$f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} p(t)s(t - t_1)dt_1. \quad (2.8)$$

Её график показан на Рисунке 2.28.

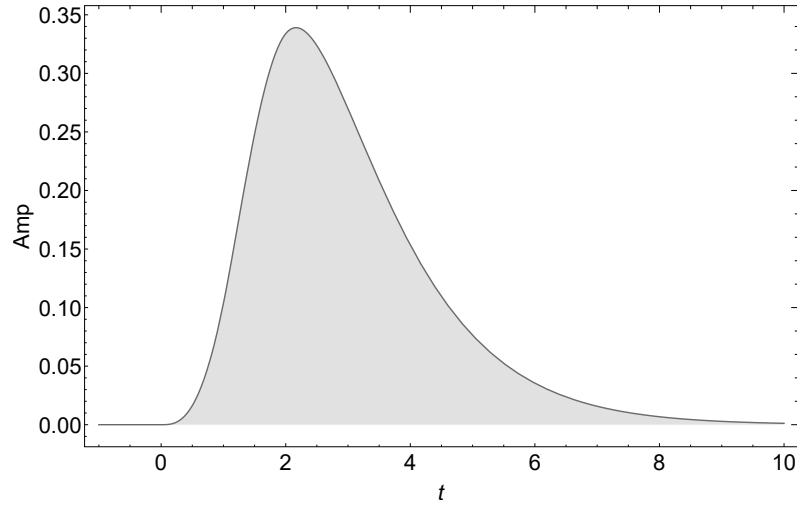


Рис. 2.28: Сигнальная функция $f(t)$ – результат свертки зашумленного сигнала $s(t)$ и шаблона $p(t)$. Amp – амплитуда сигнала, t – время, с. Рисунок взят из работы диссертанта [61].

Так как форма сигнальной функции сильно искажена влиянием шумов, то при практическом подходе для измерения ширины импульса использовалось вписывание гауссианы и асимметрия импульса не учитывалась. Положение импульса определялось положением максимума в записи, амплитуда импульса приводилась к единице, таким образом, единственным определяемым параметром была ширина импульса σ . Так как параметр σ гауссианы определен на высоте $1/\sqrt{e}$, а величина рассеяния измеряется на высоте $1/e$, то рассеяние импульса, принимаемого антенной, вычислялось по формуле 2.9:

$$\tau_{sc} = 2\sqrt{2}\sigma - \tau - t_s, \quad (2.9)$$

где τ – уширение в одном частотном канале, $t_s = 1$ с – характерная ширина применяемого для сглаживания шаблона для $DM = 360$ пк/см³.

Ниже приведена полная Таблица 2.2, включающая все обнаруженные импульсы, а также их характеристики. В указанной Таблице 2.2 приводятся названия одиннадцати ранее обнаруженных импульсов [14, 15] и 51 нового. Если импульсы регистрировались в один день, но в разных лучах диаграммы направленности радиотелескопа БСА ФИАН, то к стандартной форме наименования явления добавлялись координаты. Координаты каждого импульса на эпоху J2000 приведены во второй колонке Таблицы 2.2. В третьей колонке записана мера дисперсии радиовсплесков, измеренная с точностью ± 5 пк·см⁻³. В четвертой колонке Таблицы 2.2 находится величина рассеяния импульсов τ_{sc} .

Таблица 2.2: Параметры быстрых радиовсплесков, зарегистрированных на частоте 111 МГц

FRB	Координаты, α, δ	DM , пк/см ³	Величина рассеяния τ_{sc} , мс	Fluence, Ян·мс	С/Ш
FRB141216	00:14:00 +41.64	545	869	752	3.6
FRB131030	00:25:00 +39.98	203	526	494	8.1
FRB180321	00:33:00 +42.03	596	1634	2326	5.3
FRB160206	01:01:00 +41.63	1262	1594	1506	5.6
FRB140212	01:31:00 +30.54	910	389	973	3.6
FRB151125.1	01:31:00 +30.98	273	1679	1856	3.3
FRB151125.2	01:32:00 +30.98	273	1466	1671	5.3
FRB151018	05:21:00 +33.1	570	494	3500	5.9
FRB160920	05:34:00 +41.75	1767	423	1100	3.3
FRB170606	05:33:48 +41.75	247	100	1782	3.0
FRB180606	11:43:58 +25.08	331	492	445	7.0
FRB180622	11:46:06 +37.01	222	315	603	6.0
FRB180417	11:47:06 +24.6	515	481	757	6.3
FRB180614	11:48:35 +27.34	577	520	757	5.3
FRB180616	11:48:48 +39.13	576	415	723	5.8
FRB180426	11:49:01 +35.30	362	574	551	6.5
FRB180607	11:49:54 +30.96	438	314	512	7.0
FRB180427	11:52:07 +26.91	305	471	586	6.7

См. следующую страницу

FRB	Координаты, α, δ	DM , пк/см ³	Величина рассеяния τ_{sc} , мс	Fluence, Ян·мс	С/Ш
FRB180423	11:53:20 +30.51	385	387	475	6.4
FRB180603	11:56:29 +22.71	1865	1281	1627	5.9
FRB180417.J1155+4112	11:55:27 +41.21	273	866	590	5.7
FRB180627	11:55:58 +38.69	1740	1205	2456	7.0
FRB180513	11:58:41 +28.27	750	947	620	5.0
FRB180502	11:58:57 +23.66	570	533	690	5.3
FRB180428	11:59:14 +26.50	375	358	534	9.5
FRB180428.J1200+4136	12:00:13 +41.61	198	134	476	6.2
FRB180629	12:01:20 +26.50	307	280	352	6.5
FRB180507	12:03:18 +41.62	625	792	985	6.9
FRB180429	12:03:32 +40.79	348	503	551	7.3
FRB180502.J1207+3726	12:07:07 +40.79	1373	2612	2292	6.5
FRB180625	12:07:23 +33.59	245	190	273	6.3
FRB180628	12:08:20 +22.71	300	302	414	6.4
FRB180609	12:08:56 +29.19	324	269	357	6.9
FRB180617	12:11:25 +34.02	575	453	586	6.2
FRB180521	12:12:10 +27.82	214	255	487	6.1
FRB180507.J1212+2116	12:12:19 +21.28	560	256	916	6.6
FRB180502.J1216+3750	12:16:51 +37.85	638	528	729	8.5

См. следующую страницу

FRB	Координаты, α, δ	DM , пк/см ³	Величина рассеяния τ_{sc} , мс	Fluence, Ян·мс	С/Ш
FRB180503	12:18:42 +27.30	242	561	633	7.0
FRB180531.J1221+3751	12:21:26 +37.85	465	519	679	4.9
FRB180603.J1223+3726	12:23:11 +37.44	1680	1165	1037	4.8
FRB180504	12:25:51 +41.21	670	626	502	5.0
FRB180514	12:26:59 +34.44	288	305	348	5.6
FRB180604	12:27:08 +32.28	219	632	403	5.9
FRB180522	12:27:43 +26.91	578	217	432	6.2
FRB180504.J1228+2844	12:28:19 +28.74	439	764	463	6.3
FRB180521.J1228+4112	12:28:49 +41.21	279	220	290	7.0
FRB180516	12:29:19 +38.70	170	184	389	6.0
FRB180509.J1229+3030	12:29:37 +30.50	231	744	491	5.8
FRB180605	12:29:47 +29.19	227	560	536	11.5
FRB180609.J1230+2627	12:30:19 +26.46	420	913	1018	8.0
FRB180607.J1231+2911	12:31:20 +29.19	350	431	583	6.8
FRB180610	12:31:46 +41.21	175	508	372	5.7
FRB180531	12:31:56 +38.28	310	786	723	7.5
FRB180615	12:37:05 +38.70	450	597	633	6.2
FRB180504.J1243+3635	12:43:05 +36.59	608	793	872	4.3
FRB180511	12:43:07 +26.46	1049	1234	1282	7.0

См. следующую страницу

FRB	Координаты, α, δ	DM , пк/см ³	Величина рассеяния τ_{sc} , мс	Fluence, Ян·мс	С/Ш
FRB180620	12:43:42 +41.62	155	121	349	7.0
FRB180504.J1244+3518	12:44:11 +35.30	298	293	329	6.0
FRB180620.J1245+3124	12:45:49 +31.40	409	244	459	5.1
FRB180601	12:48:59 +24.13	403	311	704	6.5
FRB161202	23:44:00 +40.80	291	808	705	4.2

2.3. Заключение

В ходе многоэтапной работы были получены следующие результаты:

1. Обработано более 50 000 часов записей наблюдений на радиотелескопе БСА ФИАН;
2. На первом этапе обнаружено три импульса в период с июль 2012 г. по май 2018 г. с мерами дисперсии 247 пк/см³, 570 пк/см³, 1767 пк/см³.
3. Впервые на частоте 111 МГц обнаружено излучение от FRB121102. Параметры импульса, полученные на частоте 111 МГц, согласуются с параметрами на других частотах в пределах погрешности.
4. На втором этапе в период с июля 2012 г. по август 2018 г. в архивных данных радиотелескопа БСА ФИАН удалось обнаружить восемь быстрых радиовсплесков с мерами дисперсии в диапазоне от 203 пк/см³ до 1262 пк/см³ в направлении галактик М 31 и М 33;
5. С учетом расстояния до галактик М 31 и М 33 и измеренных значений мер дисперсии импульсов можно сделать вывод о том, что источник импульсов находился гораздо дальше указанных галактик и не связан с ними.
6. В рамках данного этапа работы был обнаружен повторяющийся импульс FRB151125, сигналы от которого были получены 25.11.2015 и 28.11.2015. Параметры импульсов совпадают.

7. В ходе обработки данных в период с января по июль 2018 года в площадке с координатами $\delta = 21.38^\circ \div 41.72^\circ$ и $\alpha = 11^h 45^m \div 12^h 45^m$ был обнаружен 51 новый быстрый радиовсплеск с широким диапазоном мер дисперсии DM . Подробный анализ полученных результатов изложен в Главе 3.

Глава. 3

Сравнение свойств быстрых радиовсплесков на 111 МГц и более высоких частотах

3.1. Распределение быстрых радиовсплесков по мере дисперсии DM

Плотность распределения по мере дисперсии обнаруженных радиовсплесков изучалась многими авторами. Так, например, в работе Кордеса и др. [81] анализируются мера дисперсии и величина рассеяния 17 быстрых радиовсплесков для определения количества свободных электронов вдоль луча зрения. Это позволило ограничить расстояние до самих источников радиовсплесков. В результате исследования было получено, что при рассмотрении рассеяния импульсов необходимо учитывать рассеяние в межгалактической среде и рассеяние в родительской галактике. Кроме того, оценки красного смещения источников FRB могут быть значительно завышены, если они основаны на предположении, что во внегалактической части DM преобладает IGM .

В работе [82] авторы делают вывод, что наблюдаемое распределение DM согласуется с космологической популяцией на красных смещениях $z = 0.6 - 0.9$ вне зависимости от того, как быстрые радиовсплески распределены по отношению к крупномасштабной структуре или свойствам родительских галактик.

Сравнение двух распределений DM на 111 и 1400 МГц (Рисунки 3.4 и 3.5) показало, что оба они описываются логнормальным распределением (3.1) с параметрами $\mu = 6.1 \div 6.2$, $\sigma = 0.7$ и, таким образом, на статистически значимом уровне совпадают и соответствуют диапазону характерных величин

$$DM = 252 \div 954 \text{ пк} \cdot \text{см}^{-3}.$$

$$P(x) = \frac{\exp^{-\frac{(\mu+\ln x)^2}{2\sigma^2}}}{x\sqrt{2\pi}\sigma} \quad (3.1)$$

В некоторых работах авторы выводят распределения, вычитая вклад Галактики DM_{MW} из общей DM . В данной работе мы используем полную величину DM , так как DM_{MW} зачастую известна с относительной точностью 0.5 и, таким образом, её исключение вносит дополнительную погрешность в распределение.

3.2. Измерение рассеяния $\tau(DM)$ быстрых радиовсплесков на разных частотах

Рассеяние импульсов на неоднородностях среды представляет собой важный инструмент для исследования свойств как межзвездной, так и межгалактической среды. На роль источников импульсного излучения для изучения свойств межзвездной среды наиболее подходят пульсары. Рассеяние радиоволн на мелкомасштабных флуктуациях электронной плотности в межзвездной среде впервые было признано причиной изменений интенсивности излучения пульсаров в работах [83, 84]. Галактическая среда является весьма неоднородной, и подробное исследование происходящих внутри нее процессов началось практически сразу же после открытия пульсаров. На тот момент изучать межзвездную среду можно было на относительно небольших расстояниях от наблюдателя, поскольку первые зарегистрированные пульсары являлись близкими объектами и имели относительно высокую плотность потоков излучения [1, 85, 86]. Кордес и др. [87] впервые предложили двухкомпонентную модель турбулентности электронной плотности. Под первой составляющей авторы рассматривают неоднородную среду в области до галактических высот $z < 100$ пк, которую авторы связывают с населением Галактики I типа. Область на расстоянии $\gtrsim 0.5$ кпк является второй составляющей модели и определяет рассеяние на больших галактических высотах $|b| \gtrsim 10^\circ$. На таких масштабах среда, по мнению авторов, является практически однородной. Этот результат оказался одним из важнейших, поскольку ранее считалось, что турбулентные потоки распределены не равномерно.

Более подробно вопрос, связанный с механизмом рассеяния излучения, был рассмотрен Саттоном [88]. Он подробно описывает все факторы, приводящие к

многолучевому распространению сигнала, а также показывает теоретическую зависимость между уширением импульса, частотой декорреляции и мерой дисперсии. В работе также рассматривается аномально сильное рассеяние при малых мерах дисперсии. Такой эффект может наблюдаться в результате взаимодействия импульса с сильными турбулентными потоками, например, в областях НII.

Также пример сильной зависимости рассеяния от меры дисперсии приведен в работе [89]. Авторами показано, что для галактических пульсаров с одинаковым значением DM величина рассеяния может различаться на три порядка.

Главный вклад в рассеяние импульсов вносит галактическая среда, где плотность вещества значительно выше по сравнению с межгалактической средой. Соответственно рассеяние импульсов в галактической среде должно сильнее зависеть от меры дисперсии, чего нельзя сказать об импульсах, рассеянных межгалактической средой. На такой эффект было указано в работах Лоримера и Карастергио [71, 90]. Из их исследований следует, что рассеяние быстрых радиовсплесков на межгалактической среде крайне мало, или даже полностью отсутствует и что импульсы, регистрируемые на частотах ниже 1 ГГц, испытывают гораздо меньшее уширение, в отличие от импульсов галактического происхождения. Это, по мнению авторов, дает возможность наблюдать быстрые радиовсплески на более низких частотах.

В работе [91] авторы рассматривают рассеяние быстрых радиовсплесков на межгалактической среде на больших космологических расстояниях, поскольку среднее расстояние до области возникновения импульса 400 – 500 Мпк. В статье с помощью моделирования показано, что рассеяние импульсов в войдах является довольно слабым, но оно может усиливаться неоднородным распределением газа в галактических кластерах и филаментах. В статье [82] авторы моделируют распределение межгалактического вещества в зависимости от крупномасштабной структуры Вселенной. Также они дают оценку вклада вещества нашей Галактики примерно в два раза выше, чем было ранее до них, за счет вклада гало Галактики на уровне $DM_{halo} \approx 30 \text{ пк/см}^3$.

В отличие от упомянутых выше статей [91] и [82] в диссертации сделаны минимально необходимые допущения, что хотя межгалактическое вещество является неоднородным, но в сравнении с вкладом в рассеяние импульсов от вещества нашей и, возможно, родительской галактики вкладом межгалактического вещества в рассеяние можно пренебречь и считать его в первом приближении

однородным.

Если возвращаться к вопросу о рассеянии на низких частотах, то в качестве примера можно привести работу Кузьмина и соавторов 2007 года [65]. В ней проводились измерения уширения импульсов выборки 100 галактических пульсаров на частоте 102 и 111 МГц. В результате анализа было установлено, что зависимость уширения импульсов от меры дисперсии описывается степенным законом (3.2):

$$\tau_{sc}(DM) = 0.06 \left(\frac{DM}{100} \right)^{2.2 \pm 0.1} [\text{с}] \quad (3.2)$$

Также авторами статьи [65] показано, что на расстоянии до 3 кпк турбулентные потоки рассеивающей среды являются статистически однородными. Но этот вывод сделан для галактических областей. Данный раздел диссертации направлен на исследование эффектов, возникающих в межгалактической среде. Для этих целей в полной мере подходят такие импульсные источники как радиовсплески, которые в настоящее время являются единственным средством для изучения межгалактических эффектов распространения.

На основе данных Таблицы 2.2 был построен график зависимости величины рассеяния τ_{sc} от меры дисперсии DM вместе с зависимостью для пульсаров, приведенной в статье [65]. Данный график приведен на Рисунке 3.1.

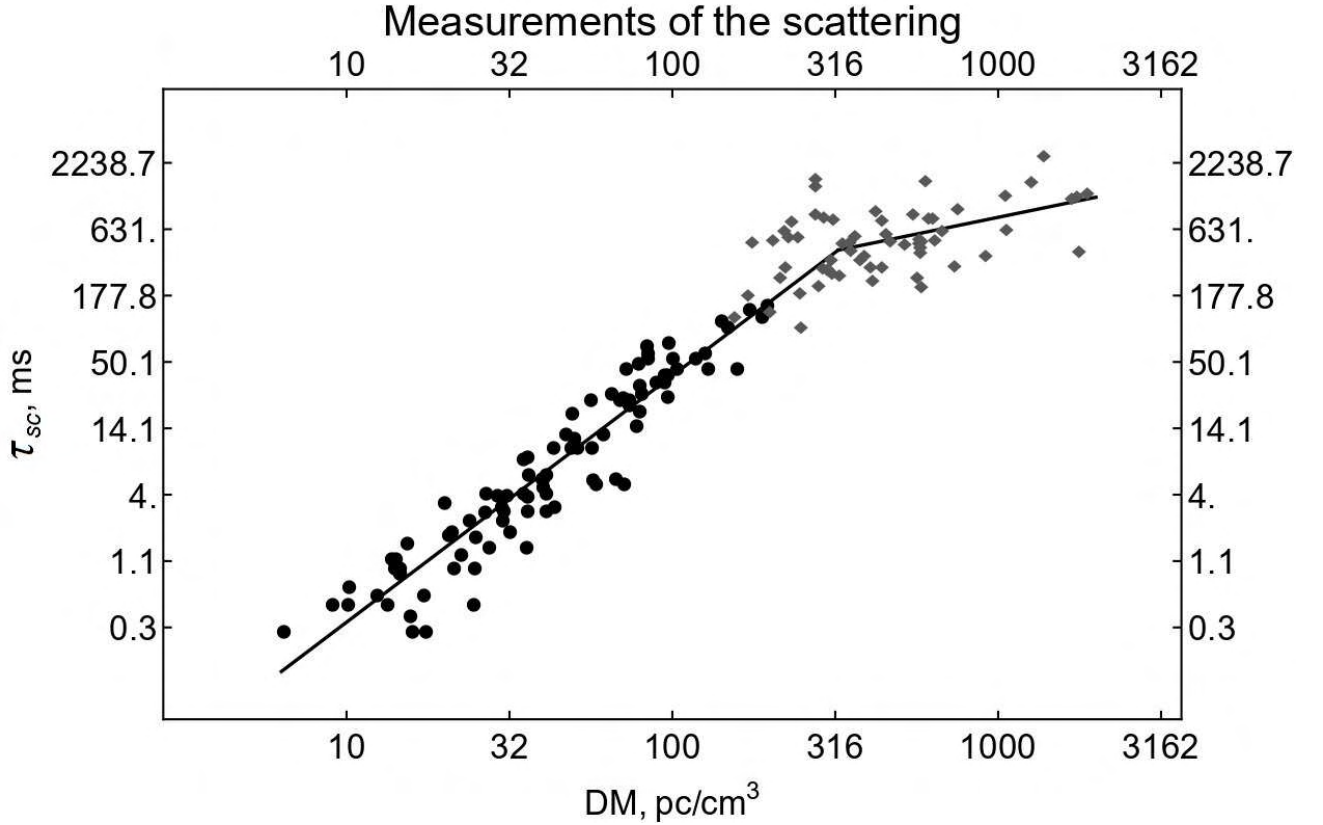


Рис. 3.1: Зависимость уширения импульсов пульсаров и радиовсплесков от меры дисперсии $\tau_{sc}(DM)$. Черными кругами показаны измерения на 111 МГц для пульсаров. Серыми ромбами показаны измерения на 111 МГц для быстрых радиовсплесков. Зависимость для пульсарных измерений $\tau_{sc} \sim DM^{2.2}$, для быстрых радиовсплесков – $\tau_{sc} \sim DM^{0.49}$. График взят из работы диссертанта [61].

Точка излома ($DM \sim 350$ пк/см³) на графике имеет вполне понятный физический смысл. Источники с мерой дисперсии менее 350 пк/см³ можно рассматривать в среднем как галактические, с DM более этого значения – как внегалактические.

Для быстрых радиовсплесков степенная зависимость является более слабой в сравнении с зависимостью для пульсаров: если для пульсаров, наблюдаемых на частоте 111 МГц, авторы статьи [65] определяют коэффициент наклона $k = 2.2 \pm 0.1$ (формула 3.2), то для быстрых радиовсплесков, зарегистрированных также на частоте 111 МГц, приводится формула $\tau_{sc}(DM) = 20.2 DM^{0.49 \pm 0.18}$ мс.

Зависимость $\tau_{sc}(DM)$ была построена и для быстрых радиовсплесков на частоте 1.4 ГГц из каталога FRB [92]. График этой зависимости приведен на Рисунке 3.2.

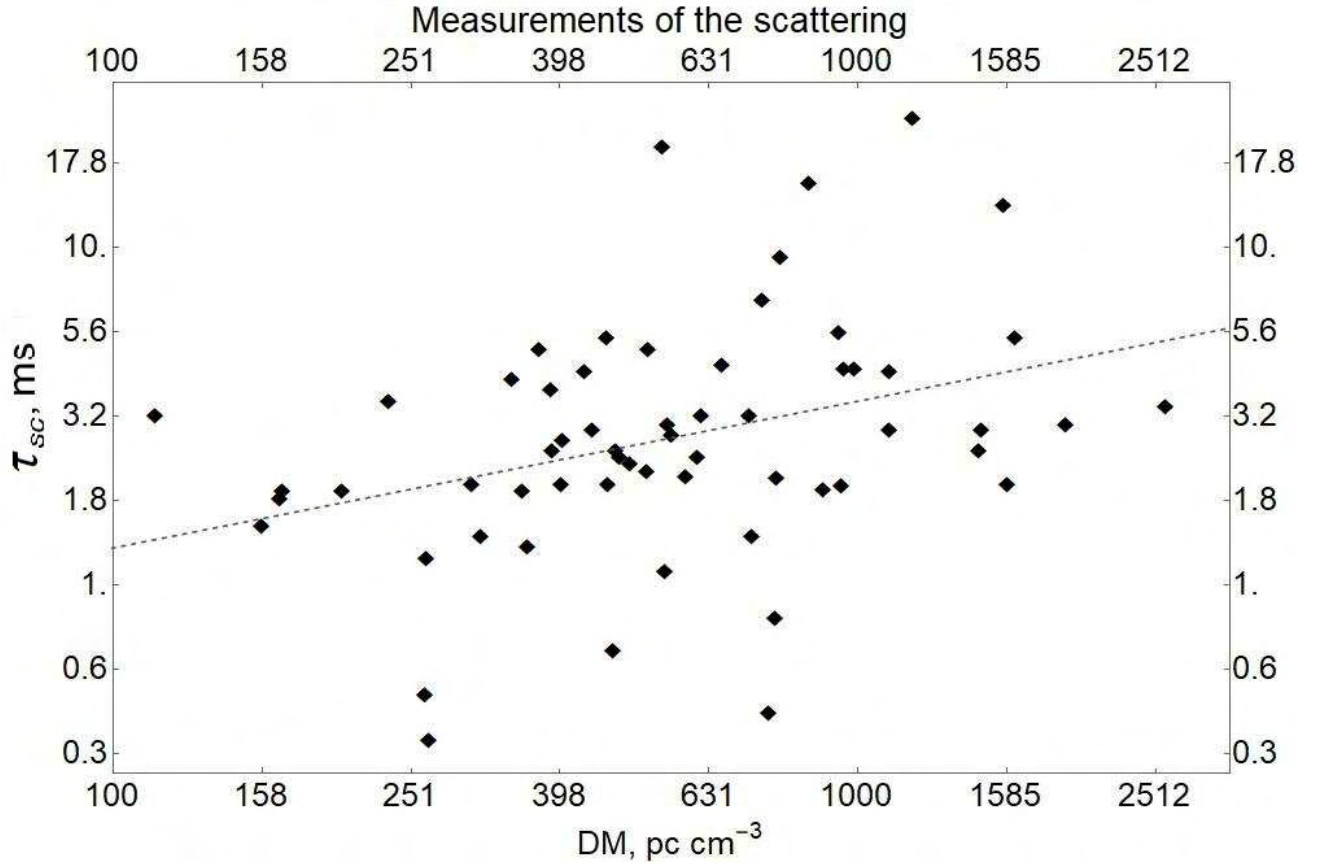


Рис. 3.2: Зависимость уширения импульсов радиовсплесков из – за рассеяния от меры дисперсии $\tau_{sc}(DM)$ на 1.4 ГГц по данным каталога FRB. $\tau_{sc} \sim DM^{0.43}$. График взят из работы диссертанта [61].

Для построения зависимости использовалось 60 импульсов с величиной рассеяния от 0.34 мс до 24.3 мс и мерой дисперсии от $114 \text{ пк} \cdot \text{см}^{-3}$ до $2596 \text{ пк} \cdot \text{см}^{-3}$. В данном случае зависимость рассеяния от DM описывается формулой $\tau_{sc} = 0.176 DM^{0.43 \pm 0.15}$ мс, коэффициент наклона $k = 0.43 \pm 0.15$ в пределах погрешности согласуется с результатом, полученным для радиовсплесков на 111 МГц.

Полученная степенная зависимость $\tau_{sc}(DM)$ на частоте 111 МГц оказалась более слабой в сравнении с $\tau_{sc}(DM)$ для пульсаров (показатель степени $k \sim 0.5$ вместо $k \sim 2$). Показатель степени k в пределах погрешности согласуется с показателем k зависимости $\tau_{sc}(DM)$, построенной для выборки быстрых радиовсплесков на частоте 1.4 ГГц из каталога FRB [92].

В отличие от подхода, который использовался в работе [93], где авторы моделировали рассеяние, задавая разный размер неоднородностей вдоль луча зрения, полученную взаимосвязь также можно объяснить в рамках идеи, в которой импульс рассеивается вдоль всего луча зрения, но основное рассеяние происходит в родительской и нашей галактике, а межгалактическая среда на пути

распространения является разреженной и не оказывает существенного влияния на величину рассеяния импульсов несмотря на большие величины DM . Следует подчеркнуть, что рассеяние в межгалактической среде не отменяется но, им можно пренебречь. Величина показателя степени k в экспериментальной зависимости $\tau_{sc}(DM)$ определяется положением рассеивающего экрана вдоль линии "источник–наблюдатель". Положение рассеивающего экрана ассоциируется с границей нашей или родительской галактики, где направление распространения импульса отклоняется от первоначального. Классический пример модели рассеяния импульсного сигнала на тонком экране можно посмотреть в работе [83]. При таком подходе, так как при исследовании зависимости $\tau_{sc}(DM)$ мы имеем дело с веществом на луче зрения, расстояние удобно измерять в единицах $DM = \int_0^L n_e dl$. Очевидно, что так как концентрация вещества n_e в галактической и межгалактической среде существенно различается, то зависимость $DM(L)$ не будет линейной.

Разделим измеренную меру дисперсии радиовсплеска DM на следующие компоненты:

$$DM = DM_{MW} + DM_{halo} + DM_{EG} + \frac{DM_{host}}{1+z}, \quad (3.3)$$

где DM_{MW} – вклад вещества Галактики, который моделируется на основании наблюдений пульсаров. Оставшаяся сумма $DM_{halo} + DM_{EG} + \frac{DM_{host}}{1+z}$ – это вклад вещества гало DM_{halo} нашей Галактики, DM_{EG} – вклад внегалактического вещества, $\frac{DM_{host}}{1+z}$ – вклад вещества родительской галактики, z – её красное смещение. Из всех этих величин хорошо известны только DM и DM_{MW} . Для гало, как уже упоминалось ранее, известна оценка $DM_{halo} \approx 30 \text{ пк} \cdot \text{см}^{-3}$.

На Рисунке 3.3 приведена схема распространения сигнала от источника к наблюдателю. Точкой C обозначена область возникновения быстрого радиовсплеска, точкой A – наблюдатель. Кривой линией на схеме показан тонкий рассеивающий экран. R и r – расстояние от наблюдателя до рассеивающего экрана и от экрана до точки возникновения импульса соответственно.

Из точки C импульс распространяется в сторону наблюдателя. Далее попадает на рассеивающий экран, который отклоняет импульс на угол δ , и попадает к наблюдателю. При этом набег фазы Δ , который мы связываем с рассеянием τ_{sc} и формой импульса, определяется как:

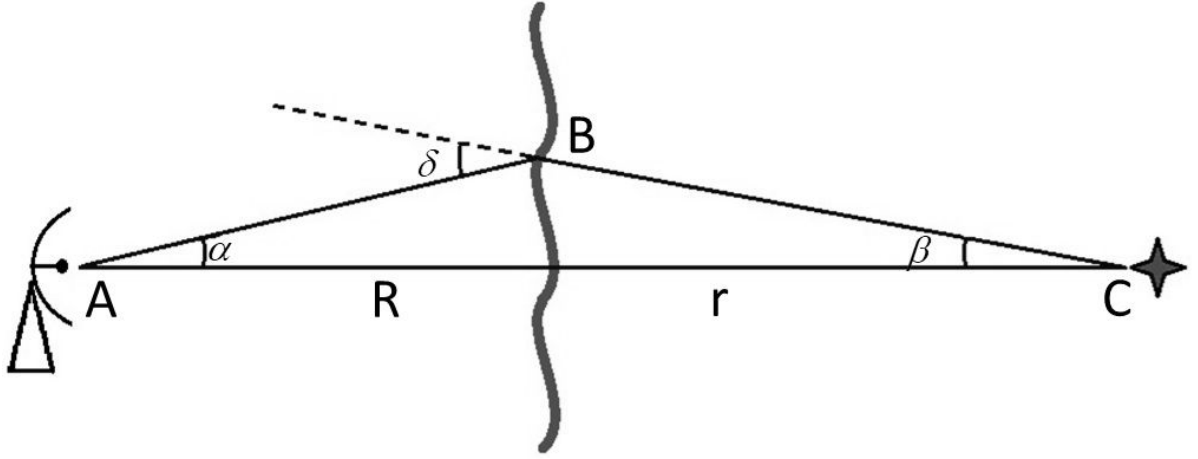


Рис. 3.3: Схема распространения сигнала от источника к наблюдателю. Точка A – наблюдатель, точка C – место возникновения импульса, B – рассеивающий экран, R и r – расстояние от наблюдателя до экрана и от экрана до места возникновения быстрого радиовсплеска, δ – угол отклонения импульса. Схема взята из работы диссертанта [61].

$$\Delta = AB + BC - AC = K \frac{\delta^2}{2} R \left(1 + \frac{R}{r + R} \right), \quad (3.4)$$

где $\delta = \alpha + \beta$. В соответствии с использованием величин DM в качестве характеристики расстояния в формуле (3.3) за расстояние $r + R$ отвечает наблюдаемая $DM \equiv r + R$, за r отвечает $DM_{MW} + DM_{halo} + \frac{DM_{host}}{1+z} \equiv r$, за R отвечает $DM_{MW} \equiv R$. Выражение (6) симметрично относительно переменных r и R , поэтому для простоты при моделировании можно рассмотреть один экран.

В рамках работы было проведено моделирование, которое, как было сказано выше, заключалось в изменении положения экрана вдоль луча зрения. Расстояние $r + R$ до радиовсплесков задавалось в соответствии с экспериментальным распределением DM всех зарегистрированных радиовсплесков, которое приведено на Рисунках 3.4 и 3.5.

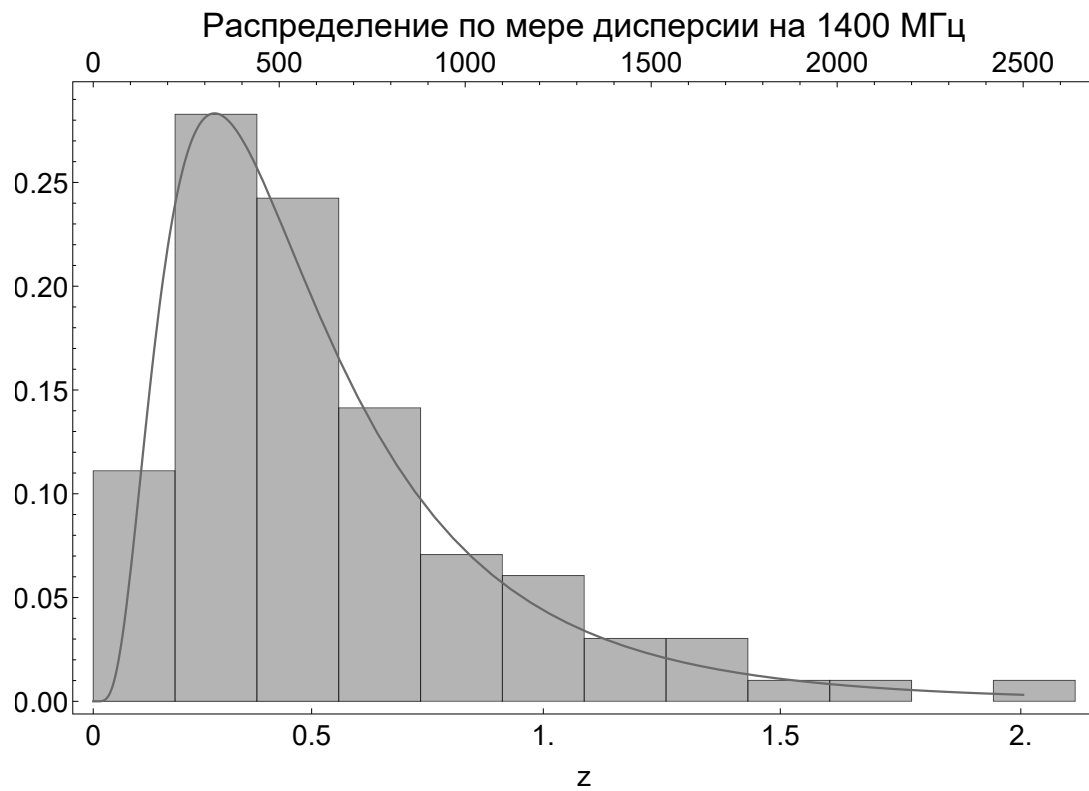


Рис. 3.4: Гистограмма распределения DM быстрых радиовсплесков на 1400 МГц. Гистограмма взята из работы диссертанта [61].

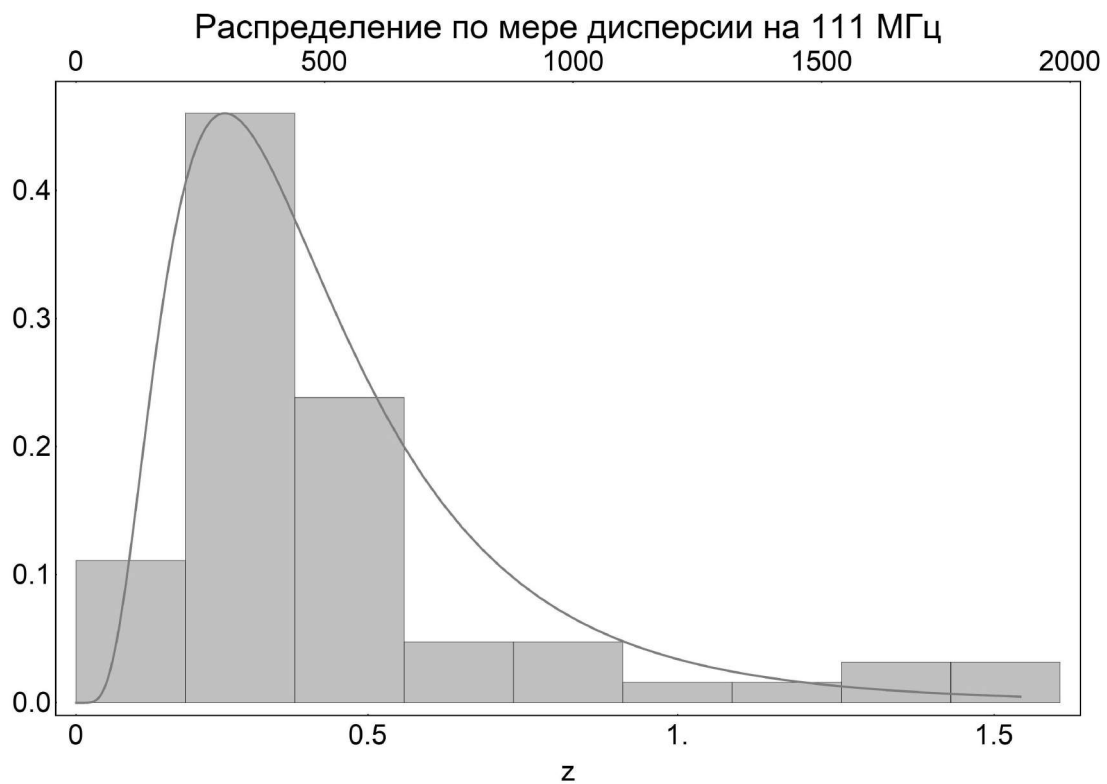


Рис. 3.5: Гистограмма распределения DM быстрых радиовсплесков на 111 МГц. Гистограмма взята из работы диссертанта [61].

Угол отклонения δ задавался как нормально распределенная величина со средним 0 и $\sigma = 10^{-9}$ рад, что по порядку величины соответствует наблюдательным данным рассеяния пульсаров. Величина K подбиралась экспериментально, чтобы величина рассеяния τ_{sc} при заданных DM и δ соответствовала наблюдаемой. Расстояние r задавалось логнормальным распределением с параметрами $\mu = 2.7$ и $\sigma = 0.3$, соответствующими модельному распределению DM_{MW} в нашей Галактике [80, 94], взятой из каталога FRB. Результаты моделирования приведены на Рисунке 3.6. Экспериментальный коэффициент $k \sim 0.5$ зависимости $\tau_{sc} \sim DM^k$ соответствует вкладу в DM родительской и нашей галактики на уровне $DM_{MW} + DM_{halo} + \frac{DM_{host}}{1+z} = 105$ пк/см³. Для характерной величины $DM_{MW} \sim 45$ пк/см³, соответствующей максимуму логнормального распределения, получаем, что суммарный вклад вещества родительской и гало нашей Галактики в меру дисперсии составляет величину $DM_{halo} + \frac{DM_{host}}{1+z} \sim 60$ пк/см³, что соответствует принятой в настоящее время величине $DM_{halo} \sim 30$ пк/см³ [82] при условии равенства вклада вещества гало нашей и вещества родительской галактики.

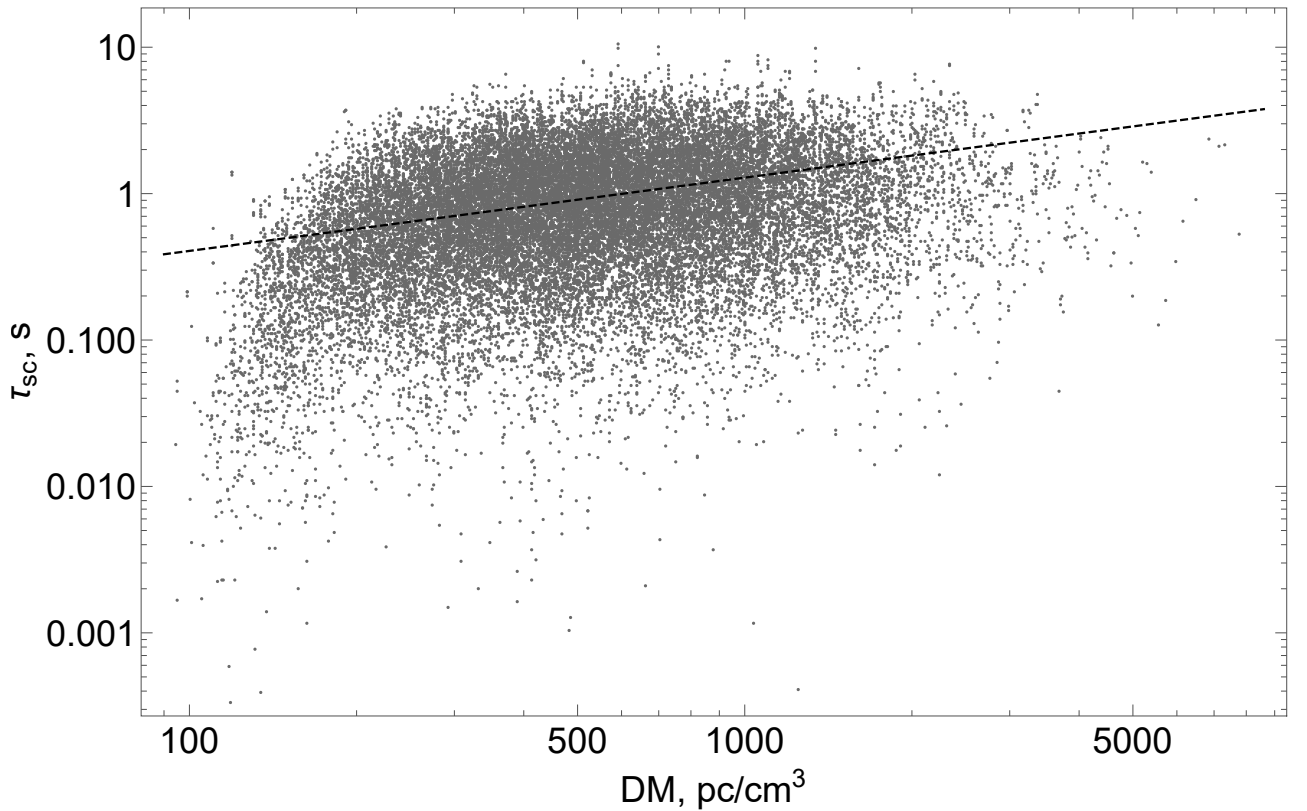


Рис. 3.6: Модельная зависимость рассеяния импульсов τ_{sc} от меры дисперсии DM . График взят из работы диссертанта [61].

Ширина импульсов от частоты может быть выведена из двух выборок ра-

диовсплесков на 111 и 1400 МГц (см., например, Рисунки 3.1 и 3.2). В этом интервале частот зависимость ширины импульсов описывается зависимостью $\tau \sim f^{-1.9 \pm 0.7}$ и, таким образом, сильно отличается от зависимости f^{-4} , выведенной для пульсаров [61].

Дополнительным и независимым аргументом, что зависимость ширины импульсов принципиально отличается от зависимости f^{-4} , являются данные измерений из статьи [95] и измерений активности быстрого радиовсплеска FRB20221012A осенью 2022 г.

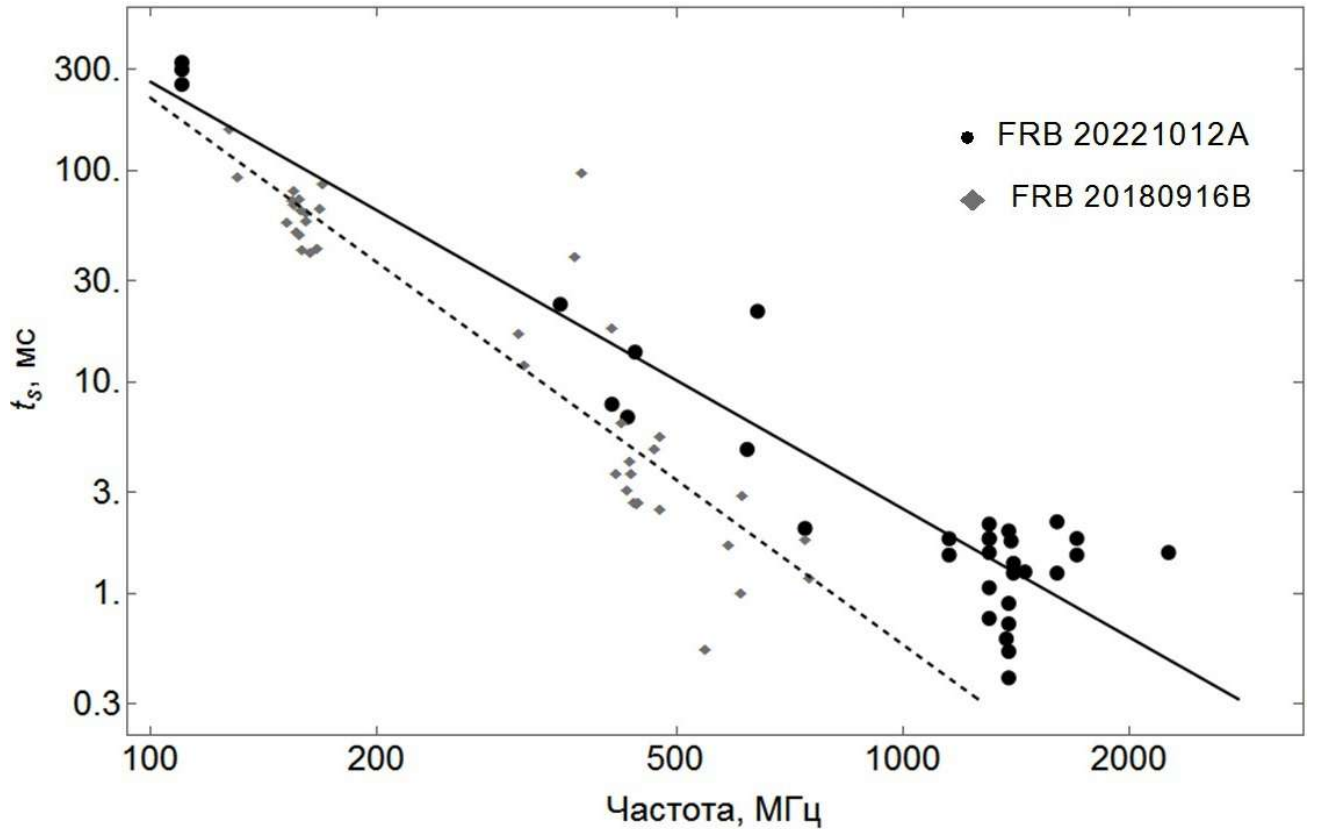


Рис. 3.7: Зависимость ширины импульса от частоты для двух радиовсплесков FRB 20221012A и FRB 20180916B. Данные взяты из работ [61, 95], а также из [96] – [111]. Рисунок не выносится на защиту, а служит иллюстративным материалом.

3.3. Рассмотрение зависимости $\text{Log}N - \text{Log}F$ и определение среднего спектрального индекса

Интегральное распределение быстрых радиовсплесков по пиковому потоку ($\text{Log}N - \text{Log}F$) было проанализировано в работах [112, 113, 114]. Для рассмотрения зависимости использовались импульсы, зарегистрированные на частотах

> 700 МГц. Авторы работы [112] показывают, что распределение импульсов по потоку согласуется с равномерным распределением источников в евклидовом пространстве. В работе [113] Маккарт и Экерс показывают, что распределение быстрых радиовсплесков в пространстве не только соответствует закону $F^{-3/2}$, но и может иметь более крутую зависимость. В статье [114] проанализировано интегральное распределение по флюэнсу $N(> F) - F$ и показано, что импульсы разделены на две популяции: $0.5 < F < 3$ Ян · мс и $3 < F < 100$ Ян · мс. Такая особенность, по мнению авторов, может объясняться либо малой статистикой, либо эффектом селекции.

На Рисунке 3.8 приведен график зависимости $\text{Log}N - \text{Log}F$, построенный по наблюдениям на разных частотах. Если предположить, что наблюдаемые выборки обладают одинаковыми свойствами, то по взаимному сдвигу графиков можно вывести средний спектральный индекс радиовсплесков $\alpha = -0.63 \pm 0.20$.

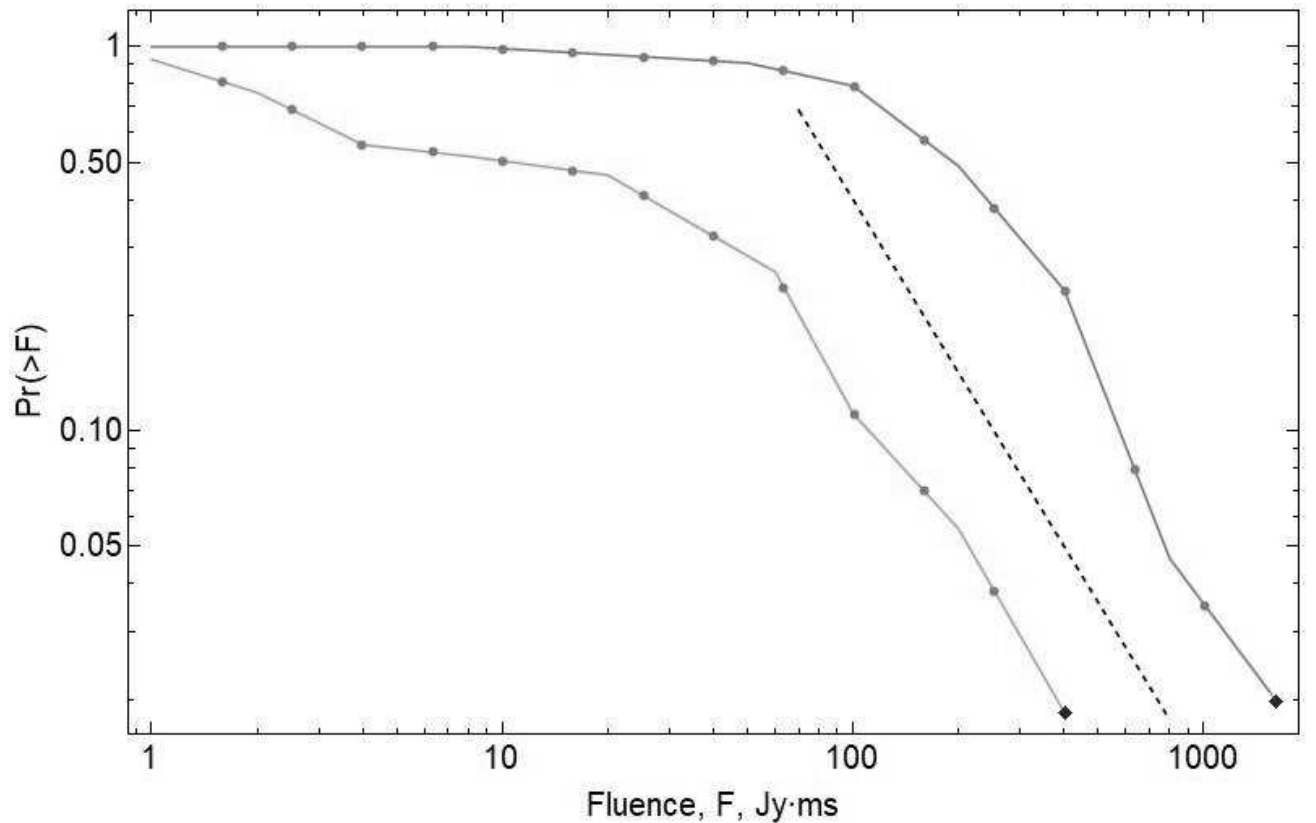


Рис. 3.8: График зависимости $\text{Log}N - \text{Log}F$ для быстрых радиовсплесков на частотах 111 МГц и 1.4 ГГц. Нижняя кривая соответствует импульсам, зарегистрированным на 1.4 ГГц, верхняя кривая – импульсам на 111 МГц. Пунктирная линия между кривыми соответствует наклону $-3/2$. График взят из работы диссертанта [61].

Так как есть предположение, что по аналогии с пульсарами в спектрах ра-

диовсплесков должен наблюдаться низкочастотный излом, вызванный поглощением на свободных электронах или особенностями излучения, то в предположении нескольких спектральных индексов на частоте 1400 МГц и плоского спектра в низкочастотной области можно вычислить частоту излома f_1 , которая приведена в Таблице 3.1 [115].

Таблица 3.1: Частота излома f_1 при различных спектральных индексах α .

α	f_1 , МГц
-1	130
-1.3	230
-1.7	350

Анализ зависимостей $\text{Log}N - \text{Log}F$ на двух частотах показывает, что в целом эти зависимости соответствуют друг другу и ни одна из них не следует в точности закону $F^{-3/2}$. Если предположить, что наблюдаемые выборки импульсов статистически эквивалентны, то можно вывести их среднестатистический спектральный индекс, который равен $\alpha = -0.63 \pm 0.20$. Эта величина в целом соответствует ожидаемому отрицательному значению, хотя ряд авторов предпочитают приводить более крутые индексы $\alpha = -1.8 \div -1.5$.

3.4. Заключение

К основным результатам работы, представленной в Главе 3, можно отнести:

1. Форма распределения DM , построенная для обнаруженных импульсных сигналов на 111 МГц и быстрых радиовсплесков на 1400 МГц, в пределах погрешности совпадает и описывается формулой для логнормального распределения с параметрами $\mu = 6.2$, $\sigma = 0.7$, что соответствует величинам $DM = 493 \pm 245$.
2. Построена зависимость уширения импульсов τ_{sc} от меры дисперсии DM для импульсных сигналов, зарегистрированных на частоте 111 МГц и быстрых радиовсплесков на 1400 МГц. Показатель степени $k = 0.49 \pm 0.18$ в зависимости $\tau_{sc} \sim DM^k$ в пределах погрешности совпадает с показателем $k = 0.43 \pm 0.15$ в зависимости $\tau_{sc}(DM)$ для импульсов на 1.4 ГГц.

3. Полученная степенная зависимость является более слабой в сравнении с зависимостью для пульсаров и объясняется тем, что вещество межгалактической среды можно считать практически однородным по сравнению с веществом межзвездной среды и, таким образом, межгалактическая среда не вносит существенного вклада в рассеяние импульсов. Основной вклад в рассеяние импульсов вносит вещество родительской галактики и галактики, в которой находится наблюдатель.
4. Сделана оценка суммарной составляющей $DM_{halo} + \frac{DM_{host}}{1+z} \sim 60$ пк/см³, которая определяется вкладом вещества родительской и гало нашей Галактики в меру дисперсии радиовсплесков. Эта величина зависит от модели распределения вещества в Галактике и в будущем может быть скорректирована.
5. По зависимостям $LogN - LogF$, построенным для обнаруженных импульсов на 111 и быстрых радиовсплесков на 1400 МГц, в предположении равенства статистических свойств этих выборок выведен средний спектральный индекс $\alpha = -0.63 \pm 0.20$.
6. Анализ формы зависимостей $LogN - LogF$ на двух частотах показывает, что при $F_{111} > 200$ Ян · мс и $F_{1.4} > 50$ Ян · мс обе они следуют закону $F^{-3/2}$.
7. По совокупности обнаруженных наблюдательных признаков: равенство распределений DM , совпадающий в пределах ошибки показатель степени k в зависимости $\tau_{sc} \sim DM^k$ и следование закону $F^{-3/2}$ кривых $LogN - LogF$ на частотах 111 и 1400 МГц, обнаруженные импульсные сигналы мы ассоциируем с быстрыми радиовсплесками. Таким образом, частота 111 МГц является самой низкой частотой, на которой обнаружены радиовсплески.
8. По измеренному рассеянию сигналов на 111 МГц и 1.4 ГГц выведена зависимость ширины импульса от частоты $\tau \sim f^{-1.9 \pm 0.7}$, которая отличается от зависимости f^{-4} , выведенной для пульсаров. Такой эффект может быть объяснен отличием спектра неоднородностей от колмогоровского.

Глава. 4

Поиск импульсного излучения от магнетара SGR 1935+2154

Как было сказано ранее, магнетары являются уникальными космическими объектами. В радиодиапазоне эти источники проявляют себя крайне слабо или просто не видны. На БСА ФИАН неоднократно принимались попытки отнаблюдать те или иные магнетары. После проявления активности SGR 1935+2154 было принято решение просмотреть архивные данные радиотелескопа БСА ФИАН на предмет поиска импульсного излучения этого источника.

Впервые сообщение об открытии источника SGR 1935+2154 появилось в электронном ресурсе, посвященном исследованиям на рентгеновском инструменте «Chandra» [50]. С помощью этого телескопа исследователи впервые обнаружили импульсное излучение от объекта более 10σ с периодом $P = 3.24498$ (1). Кроме того, полученные наблюдения позволили впервые определить производную периода $\dot{P} = 2 \cdot 10^{-10}$ с/с. Позднее открытие объекта было подтверждено другой исследовательской группой [116]. В этот же период проводились наблюдения на других инструментах в радио и оптическом диапазоне, но эти наблюдения не дали положительных результатов [117, 118]. Позднее при наблюдении магнетара на радиотелескопе Ooty на частоте 326,5 МГц с полосой пропускания 16 МГц удалось получить оценку верхнего предела на уровне 8σ около 0.2 мЯн [119, 120]. Периодического излучения в момент наблюдений зарегистрировано не было.

Более подробные исследования SGR 1935+2154 были проведены аппаратом Konus-Wind. 14 апреля 2015 года появилось сообщение о яркой вспышке в γ -

диапазоне от магнетара [121]. На полученной кривой блеска был выделен мощный импульс длительностью около 1.7 с и флюэнсом ~ 200 кэВ. Большая продолжительность всплеска и измеренный флюэнс дают возможность определить зарегистрированный импульс в класс «промежуточных» всплесков SGR.

Еще одна вспышка была зарегистрирована в мае 2016 года [122]. С учетом оценки расстояния до источника всплеска, равного 9.1 кпк, и изотропного излучения полное энергосодержание $E_{tot} \sim 1.6 \cdot 10^{40}$ эрг, а пиковая светимость L_{max} составляет $\sim 1.5 \cdot 10^{41}$ эрг/с [51]. Эта вспышка оказалась намного менее энергична, чем предыдущая, но несмотря на это их пиковая светимость была сопоставима.

Вспышка 28.06.2016 продолжила серию ярких всплесков от магнетара SGR 1935+2154 [123]. На этот раз длительность импульса не превышала 0.8 с, а форма импульса отличалась резким подъемом на переднем фронте. Это событие исследователи также отнесли к «промежуточным» вспышкам.

В 2018 году впервые опубликована работа Козеса и соавторов, в которой проводилось исследование остатка сверхновой (SNR) G57.2 + 0.8 [52]. Изначально этот объект заинтересовал тем, что именно его связывали с магнетаром SGR 1935+2154. Наблюдения проводились с помощью радиотелескопа RT-100 в Эффельсберге на различных частотах. В ходе исследования было определено, что остаток, хорошо видимый в радиодиапазоне, имеет спектральный индекс $\alpha = -0.55 \pm 0.02$. Такие значения характерны для очень зрелого остатка сверхновой. Направление магнитных полей внутри объекта свидетельствует о наличии тангенциального магнитного поля в одной части SNR, имеющегося у всех старых остатков сверхновых, и радиального магнитного поля в другой. Последнее объясняется возможным наличием пульсарного ветра в туманности, исходящего от магнетара. По оценкам исследователей SNR имеет радиус около 20 пк и может достигать возраста 41 000 лет.

Таким образом, к началу 2018 года в рентгеновском и γ -диапазоне была набрана некая статистика, а также объект был отождествлен с остатком сверхновой G57.2 + 0.8.

В октябре 2019 года магнетар SGR 1935+2154 возобновил вспышечную активность. Очередная серия импульсов была вновь зарегистрирована аппаратом Konus-Wind [124]. По своим свойствам импульсы были похожи на предыдущие «промежуточные» вспышки, а оценки таких параметров, как длительность и плотность энергии, характерны для источника в периоды активной фазы. После

этих событий источник вновь перешел в спокойную фазу на несколько месяцев.

27 апреля 2020 года в «The Astronomer’s Telegram» появляется сообщение о мощной вспышке от магнетара SGR 1935+2154, зарегистрированной аппаратом Swift [54]. Излучение зарегистрировано в ходе планового наблюдения. Обнаруженный импульс был в 70 раз ярче, чем все предыдущие.

28 апреля команда канадских исследователей сообщает о том, что на радиотелескопе CHIME/FRB на частоте 400 МГц впервые в радиодиапазоне зарегистрировано излучение от магнетара SGR 1935+2154 [44]. Всплеск был зарегистрирован в нескольких лучах антенны. В результате анализа сигнала было установлено, что он имел структуру, состоящую из двух компонент шириной около 5 мс, разделенных временным интервалом в 30 мс. Кроме того впервые была оценка меры дисперсии всплесков $DM = 332.8$ пк/см⁻³. Также независимо от CHIME/FRB системой радиотелескопов STARE2 был зарегистрирован сигнал от магнетара на частоте 1.4 ГГц [56]. Оценка меры дисперсии сигнала DM в пределах погрешности совпала с ранее опубликованной – 333.2 ± 0.8 пк/см³. При этом оценка флюэнса оказалась более 1.5 МЯн · мс. Этот факт позволил сделать предположение о том, что подобная вспышка ни что иное как галактический радиовсплеск, поскольку, если удалить импульс на среднее расстояние, характерное для быстрых радиовсплесков, значение флюэнса попадает в диапазон значений FRB’s.

После этих событий были продолжены наблюдения на различных радиотелескопах в диапазоне частот от 109 МГц до 22 ГГц. Более подробная информация об этих наблюдениях содержится в Таблице 4.1.

Таблица 4.1: Список радиотелескопов, проводивших наблюдения магнетара SGR 1935+2154

Инструмент	Центральная частота наблюдений	ATel	Результат наблюдений
CHIME/FRB	600 МГц	ATel.13681 [125]	Два единичных импульса
STARE2	1.4 ГГц	ATel.13684 [56]	Обнаружен мощный единичный импульс с флюэнсом ~ 1.5 МЯн·мс
VLA	6 ГГц, 22 ГГц	ATel.13690 [126]	Сигналов выше 7.5σ не обнаружено

См. следующую страницу

Инструмент	Центральная частота наблюдений	ATel	Результат наблюдений
VLA	6 ГГц, 22 ГГц	ATel.13693 [127]	Сигналов выше 3σ не обнаружено
FAST	1.25 ГГц	ATel.13699 [128]	Обнаружен единичный импульс, измерена его поляризация
LOFAR	110 – 180 МГц	ATel.13707 [129]	Импульсов с флюэнсом более 37 Ян·мс не обнаружено
DSN	2.3 и 8.4 ГГц	ATel.13713 [130]	Сигналов выше 6σ не обнаружено
Arecibo	1.4 и 4.5 ГГц	ATel.13726 [131]	Сигналов выше 10σ не обнаружено
Northern Cross	408 МГц	ATel.13739 [132]	Сигналов выше 7σ не обнаружено
uGMRT	550 – 1450 МГц	ATel.13773 [133]	Сигналов выше 3σ не обнаружено
uGMRT	550 – 1450 МГц	ATel.13778 [134]	Сигналов выше 10σ не обнаружено
Medicina Northern Cross	408 МГц	ATel.13783 [135]	Обнаружено периодическое излучение с периодом $P=3,24760(3)$ с, $DM=316$ пк/см ³ и шириной $w=100$ мс
European VLBI Network; Effelsberg	1.66 ГГц; 156.25 МГц	ATel.13786 [136]	Импульсов миллисекундной длительности выше порога отношения $C/\Pi = 7$ не обнаружено
MWA	154.24 МГц; 184.96 МГц	ATel.13816 [137]	Сигналов выше 10σ не обнаружено
CHIME/Pulsar	400 – 600 МГц	ATel.13838 [138]	Периодическое излучение выше порога отношения $C/\Pi = 10$ не обнаружено
CHIME/FRB	400 – 600 МГц	ATel.14074 [139]	Обнаружено три миллисекундных импульса с $DM \sim 332.7$ пк/см ³

См. следующую страницу

Инструмент	Центральная частота наблюдений	ATel	Результат наблюдений
STARE2	1.28 И 1.53 ГГц	ATel.14077 [140]	Периодическое излучение выше порога отношения $C/\Pi = 7.3$ не обнаружено
GBT	820 МГц и 1.6 – 2.4 ГГц	ATel.14151 [141]	Сигналов выше 6σ не обнаружено
БСА ФИАН	109 – 111.5 МГц	ATel.14186 [142]	Обнаружен единичный импульс

На конец марта 2021 года последние сообщения об активности источника в радиодиапазоне были сделаны в октябре 2020 года. Радиотелескоп CHIME/FRB обнаружил три импульса, которые периодически между собой не были связаны [143]. Параметры импульсов в пределах погрешности согласуются с ранее полученными. Были сделаны попытки в это же время обнаружить аналогичные импульсы либо послесвечение с помощью системы радиотелескопов STARE2, но эти попытки не привели к успеху.

4.1. Наблюдения магнетара SGR 1935+2154 на частоте 111 МГц

Магнетар SGR 2135+1954 имеет координаты $\alpha_{2000} = 19:34:55.68$ и $\delta_{2000} = +21:53:48.2$. Данные значения говорят о том, что источник попадает в один из лучей диаграммы направленности радиотелескопа БСА ФИАН. Чувствительность антенны позволяет наблюдать очень слабые источники. Поэтому было принято решение провести мониторинг магнетара, а также просмотреть архивные данные БСА ФИАН. В ноябре, за несколько месяцев до вспышки 27 апреля 2020 года, как было сказано выше, объект проявил себя γ – диапазоне. Этот факт учитывался при выборе временного диапазона обработки данных. Наблюдения источника были обработаны с 1 сентября 2019 года по 12 февраля 2021 года. Из часовой записи выбирался участок, соответствующий прохождению источника через диаграмму направленности БСА. Ежедневно источник находился 3.5 мин в поле зрения радиотелескопа. Таким образом, всего было проанализировано около 32 часов наблюдений. За этот период был зарегистрирован импульс 2.09.2020 г [144, 145, 146].

Для наилучшего выделения сигнала на фоне шумов, при обработке данных к участку записи применялась методика, описанная в Главе 2. Далее проводился визуальный анализ, при котором на сглаженном динамическом спектре выделялся искомый импульс.

4.2. Результаты поиска импульсного излучения от магнетара SGR 1935+2154

Ниже на Рисунке 4.1 приведен динамический спектр и суммарный профиль импульса.

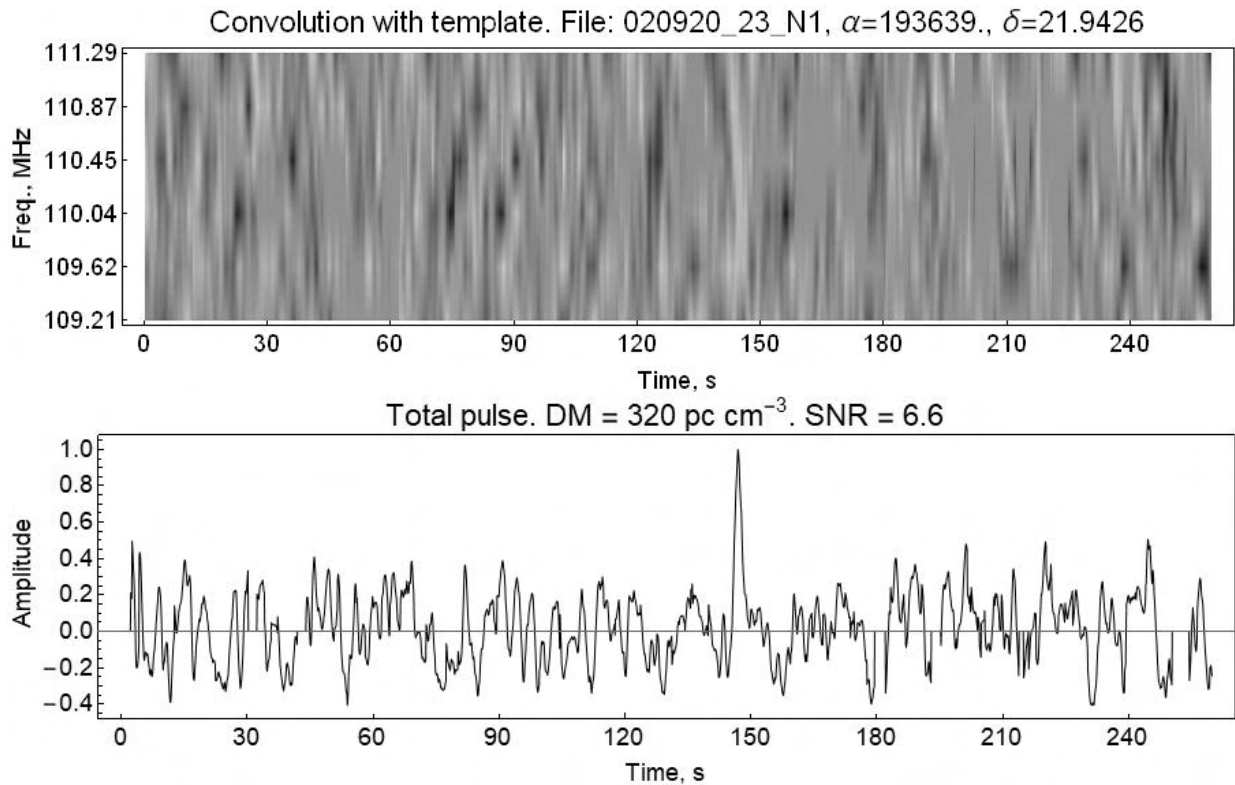


Рис. 4.1: На верхнем изображении представлен динамический спектр импульса от магнетара SGR1935+2154. Нижнее изображение демонстрирует его суммарный профиль. На динамическом спектре на оси ординат приводятся значения центральных частот шести частотных каналов, в которых наблюдался источник, на суммарном профиле импульса – амплитуда, приведенная к единичному значению. На оси абсцисс приводится время в секундах. Рисунок взят из работы диссертанта [145].

В ходе работы были также измерены параметры импульса, которые представлены в Таблице 4.2

Таблица 4.2: Параметры импульса от магнетара SGR 1935+2154

UTC	2020-09-02 18:14:59
Мера дисперсии, пк/см ³	320 ± 10
Плотность потока на 111 МГц, мЯн	140
Отношение С/Ш	6.6
Ширина импульса сек	2.2
Величина рассеяния, мс	340
Флюэнс, Ян · мс	300

Полученная мера дисперсии $DM = 320 \pm 10$ пк/см³ согласуется с ранее полученными результатами и попадает в диапазон значений измерений на других инструментах от 316 пк/см³ до 380.1 пк/см³.

Было установлено, что импульс попал на край главного лепестка диаграммы направленности радиотелескопа БСА ФИАН, поэтому в Таблице 4.2 оценка плотности потока 140 мЯн является нижним пределом. Для введения поправок за диаграмму были учтены два коэффициента: за прямое восхождение $k_\alpha = 84.56$ и склонение $k_\delta = 1.23$ ¹. После их учета и приведения импульса к максимуму диаграммы направленности значение плотности потока стало равным ~ 14.6 Ян, что также не противоречит полученным ранее результатам зарубежных коллег.

Ширина импульса, равная 2.2 с – это ширина, которая была получена при наблюдении. В данном случае большой вклад вносит уширение в каналах. После учета этого факта и вычитания из полученного импульса шаблона, с помощью которого импульс выделялся на фоне шумов, была получена величина рассеяния 340 мс. Эта величина также хорошо согласуется с другими результатами, а также с ожидаемыми значениями на низких частотах. Так, например, группа исследователей, наблюдающая на радиотелескопе LOFAR, предсказывает, что на частоте 150 МГц величина рассеяния должна быть в диапазоне 250 – 500 мс [147].

¹Орешко В. В., заместитель директора по научно-техническим вопросам, частное сообщение

4.3. О связи магнетаров и быстрых радиовсплесков

Вопрос о том, благодаря какому механизму генерируются быстрые радиовсплески, живо обсуждается уже более десяти лет. Практически с самого начала исследования этих импульсов в качестве модели их возникновения предлагались явления, протекающие в магнетарах и на их поверхности. Мощная вспышка от магнетара SGR 2135+1934 дала большой перевес в пользу этих теорий относительно других.

Так, например, в работе [148] рассматриваются квазипериодические колебания, возникающие во время мощных вспышек магнетаров. Предполагалось, что подобные явления возникают в результате возмущений связанной системы «ядро + кора источника». В радиодиапазоне такие возмущения регистрируются в виде мощных вспышек с большим соотношением сигнал/шум. Подобная модель хорошо описывает радиовсплески длительностью от 5 до 50 мс. Кроме того, модель применима как к молодым, так и к зрелым магнетарам, из которых предположительно возникают быстрые радиовсплески. Наблюдения импульсов, возникающих в результате квазипериодических колебаний, описанных в работе, имеют дальнейшие перспективы исследования. Наблюдательные характеристики таких сигналов покажут, могут ли они использоваться в качестве космологических «стандартных осцилляторов» для ограничения красного смещения или могут ли они использоваться для ограничения массы магнетаров, производящих FRB.

В работе [149] рассмотрены наблюдаемые свойства магнетара SGR 1935+2154. Самая мощная вспышка от объекта имела значение флюэнса $1.5 \pm 0.3 \text{ МЯн} \cdot \text{мс}$, что примерно в $4 \cdot 10^3$ раз больше, чем гигантские импульсы пульсара в Крабовидной туманности. Это позволяет сделать вывод о том, что если мысленно отдалить магнетар в момент вспышки на расстояние ближайшего быстрого радиовсплеска, то значение флюэнса было бы в пределах значений флюэнса FRB. Кроме того, регистрация активности SGR 1935+2154 в рентгеновском диапазоне дает право применять модели механизмов быстрых радиовсплесков, связанные с синхротронными мазерами.

В работе [150] также рассмотрены вспышки в радио и рентгеновском диапазоне от SGR 1935+2154 на примере модели «огненного шара» – мощной вспышки из полярных областей магнетара. В работе показано, что некоторые вспышки

в рентгеновском диапазоне приводят к выходу электрон-позитронного истечения в магнитосфере магнетара перед появлением быстрого радиовсплеска. Истечение электронов и позитронов непрозрачно для индуцированного комптоновского рассеяния фотонов FRB и вырывается комптоновскими всплесками. При этом излучение быстрого радиовсплеска не может вырваться из этого истечения если область возникновения FRB в несколько раз больше радиуса магнетара. Энергия выделяется вблизи поверхности НЗ, что приводит к захвату «огненного шара» и рентгеновских лучей в замкнутой силовой линии магнитного поля, а также к магнитогидродинамическим (МГД) волнам вдоль крупномасштабной силовой линии, которые рассеиваются на фотоны FRB на расстоянии более нескольких десятков радиусов магнетара. Рентгеновские лучи от захваченного огненного шара создают расширяющийся огненный шар, который сначала распространяется вдоль крупномасштабной магнитной трубки, а затем распространяется через силовую линию. Соответственно, расширяющийся огненный шар испускает рентгеновские лучи и $e^\pm$ отток. $e^\pm$ истечение является объемным из-за индуцированного комптоновского рассеяния фотонов FRB. Фотоны FRB вырываются из предшествующего $e^\pm$ истечения под действием радиационных сил. Данная модель объясняет, отсутствие мощного радиоизлучения при активности магнетаров в рентгеновском диапазоне, а также описывает возникновение FRB на низких частотах.

Егоров и Постнов в своей работе [151] предлагают механизм возникновения радиовсплесков через взаимодействие 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 рассматриваются как основной, так как не обеспечивает сопутствующих явлений в других диапазонах и не объясняет повторных радиовсплесков. Тем не менее, идея "поджига" вещества конусом излучения 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. Отсутствие периодичности, а также причина отсутствия других повторяющихся импульсов за исключением явления FRB 121102, описана Истоминым в работе [57]. По мнению автора, быстрые радиовсплески – это результат выброса потока релятивистской электрон-позитронной плазмы, создаваемая в полярной области магнитосферы.

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, нами высказываются следующие предположения. Во-первых, из всего списка радиовсплесков выделяется 23 события [41, 15, 152, 153, 154]. 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 [155]. 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 [156]. Все обнаруженные импульсы также имеют характерную ширину несколько секунд. Учет рассеяния в среде и уширения в частотных каналах позволяет уменьшить их ширину до $\sim 0.1 - 2$ с.

Здесь уместно привести мнение Р.Е. Гершберга (КрАО): «Если модулируется кривая блеска вспышки с быстрым подъёмом и более плавным спуском, то исключается мазерная природа всплеска, где кривая блеска должна быть симметрична. В таком случае событие длительностью в секунды должно быть связано со звездой, а не с протяжённой средой. Вспышки сверхновых звёзд имеют энергию порядка $10^{50} - 10^{52}$ эрг, вспышки новых и им подобных 10^{40} эрг,

вспышки М карликов — до 10^{34} , вспышки Солнца — до 10^{32} . Это оценки с точностью до двух порядков величины. Оценив энергию событий на 111 МГц, можно наметить, к каким объектам они могут предположительно относиться с учётом того, что в радио энергия на 6-8 порядков величины меньше приведенных болометрических оценок.»²

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

4.4. Заключение

Таким образом, в ходе ежедневного анализа архивных данных галактического магнетара SGR 1935+2154 на радиотелескопе БСА ФИАН за 32 часа наблюдений 2.09.2019 был обнаружен единичный импульс. На Рисунке 4.1 приведен динамический спектр и суммарный профиль сигнала. Параметры импульса приведены в Таблице 4.2. Все параметры в пределах погрешности соответствуют параметрам, полученным в ходе наблюдения источника на других инструментах в широком диапазоне частот. Полученные характеристики импульса от галактического магнетара SGR 1935+2154 хорошо вписываются в рамки теоретических моделей, рассматривающих механизмы генерации быстрых радиовсплесков.

²Частное сообщение

Заключение

Поиск быстрых радиовсплесков на низких частотах – это сложная задача. Главную роль в данном случае играют не только крайне чувствительные инструменты, но и методика выделения слабых импульсов на фоне шумов. В данной работе отражено, насколько большое преимущество имеют подобные методики относительно общепринятых прямых наблюдений. Кроме того регистрация быстрых радиовсплесков на 111 МГц в полной мере демонстрирует все возможности радиотелескопа БСА ФИАН и в очередной раз доказывает, что данная антенна является самым чувствительным инструментом в мире. Широкое поле зрения БСА позволяет проводить ежедневный мониторинг большой области неба, что сильно повышает вероятность обнаружения импульсов, не имеющих четко выделенных направлений прихода. Эти и многие другие преимущества радиотелескопа делают его незаменимым в исследованиях, связанных с поиском таких сигналов, как быстрые радиовсплески. Так же следует отметить, что частота 111 МГц – это самая низкая частота, на которой были зарегистрированы быстрые радиовсплески.

В ходе данной работы был разработан алгоритм поиска быстрых радиовсплесков в метровом диапазоне. Данная методика направлена на выделение слабых сигналов на фоне шумов. Преимущества метода в выделении коротких спорадических импульсов с большой мерой дисперсии перед общепринятыми методиками прекрасно продемонстрированы на примере пульсара B2154+40 и FRB131030, обнаруженного на БСА ФИАН. В нескольких работах по регистрации быстрых радиовсплесков приводятся различные методики, основной принцип которых так или иначе совпадает с описанным в диссертации.

Благодаря отлаженному алгоритму поиска и обработки данных радиотелескопа БСА ФИАН, а также большому объему данных, за относительно небольшой промежуток времени была накоплена хорошая статистика по быстрым радиовсплескам, обнаруженным на 111 МГц. В ходе многоэтапной работы было обнаружено 62 импульса в широком диапазоне мер дисперсии и обработано более 50 000 часов записей. Следует отметить, что одно из событий, FRB151125, представляет собой повторяющийся всплеск. Импульсы от него были обнаружены дважды с интервалом в несколько дней. Параметры обоих событий совпадают.

Благодаря полученной богатой статистике по импульсам, обнаруженным на

111 МГц, был проведен анализ и получены совершенно новые результаты. Во-первых, был проведен сравнительный анализ импульсов, зарегистрированных на 111 и 1400 МГц. Были рассмотрены два логнормальных распределения, которые в пределах погрешности совпадают между собой.

Во-вторых, была построена зависимость ширины импульсов τ_{sc} от меры дисперсии DM . Обе зависимости, на 111 и 1400 МГц, в пределах погрешности совпадают. Зависимость ширины импульсов τ_{sc} от меры дисперсии DM , полученная на 111 МГц, по сравнению с зависимостью для галактических пульсаров, является более слабой. Из этого можно сделать вывод о том, что межгалактическая среда является более однородной относительно межзвездной среды, а это свидетельствует о том, что она не вносит значимого вклада в рассеяние импульсов.

В-третьих, была получена оценка среднего спектрального индекса быстрых радиовсплесков исходя из анализа зависимостей $\text{Log}N - \text{Log}F$, построенных для обнаруженных импульсов на 111 и быстрых радиовсплесков на 1400 МГц. Кроме того, рассмотрение формы зависимостей $\text{Log}N - \text{Log}F$ на разных частотах показало, что обе они соответствуют закону $F^{-3/2}$.

В данный момент вопрос о механизме происхождения быстрых радиовсплесков так и не решен. В архивах различных журналов содержатся статьи с теоретическими выкладками на тему того, какие явления могут порождать столь мощные импульсы. События, произошедшие в апреле 2020 года позволили ученым сделать смелое предположение о том, что именно благодаря процессам, происходящим внутри магнетаров, возникают быстрые радиовсплески. Регистрация ярчайшей вспышки от источника SGR1935+2154 и дальнейшие наблюдения этого объекта позволяют с большой долей вероятности утверждать о происхождении повторяющихся быстрых радиовсплесков. Таких событий в каталог FRB's занесено всего 50 из 675. Остальные же 625 – это события, которые были зарегистрированы только однажды. Вероятнее всего механизм их возникновения отличается от механизма повторяющихся импульсов. Существует огромное количество моделей, описывающих только единичные быстрые радиовсплески. Эти модели также показывают, что радиовсплески могут быть зарегистрированы как на высоких, так и на низких частотах.

Таким образом, загадка о происхождении быстрых радиовсплесков ждет своего решения.

Благодарности

В заключении Фёдорова В.А. выражает искреннюю признательность научному руководителю к.ф.-м.н. Родину А. Е. за постановку задачи, общее руководство, поддержку и внимание к деталям. Отдельную благодарность диссертант выражает директору ФИАН Колачевскому Н.Н., заместителю директора Иванову О.В., учёному секретарю ФИАН Колобову А.В., а также другим сотрудникам ФИАН: Леонидову А.В., Нечитайло В.А., Бескину В.С. за независимую проверку и оценку полученных результатов. Глубокую искреннюю благодарность диссертант выражает Ковалёву Ю.А. (АКЦ ФИАН) за его рецензию и, главное, доброе отношение к работе, которое позволило изменить ход событий. Автор выражает благодарность уважаемым официальным оппонентам Мингалиеву М.Г. (САО РАН) и Позаненко А.С. (ИКИ РАН). Фёдорова В.А. благодарит Крымскую астрофизическую обсерваторию за согласие быть ведущей организацией. Диссертант благодарит Диссертационный совет в лице Степанова А.В. (ГАО РАН) за согласие принять работу к защите. Фёдорова В.А. выражает искреннюю благодарность сотруднику Астрокосмического центра ФИАН Согласнову В.А. за независимую рецензию на диссертацию, сотрудникам Института космических исследований РАН Бисноватому-Когану Г.С. с коллегами за ценные рекомендации по улучшению диссертационной работы. Фёдорова В.А. благодарит Гершберга Р.Е. (КрАО РАН) за ценные рекомендации и проявленный интерес к диссертационной работе.

Литература

- [1] Hewish A., Bell S. J., Pilkington J. D. H., Scott P. F., Collins R. A. Observation of rapidly pulsating radio source // Nature. – 1968. – V. 217. –Is. 5130. – pp. 709.
- [2] The ATNF Pulsar Database, URL: <https://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/psrcat/>.
- [3] Olausen S. A., Kaspi V. M. The McGill Magnetar Catalog // The Astrophysical Journal Supplement. – 2014. – V. 212. –Is. 1. – pp. 22.
- [4] McGill Online Magnetar Catalog, URL: <http://www.physics.mcgill.ca/pulsar/magnetar/main.html>.
- [5] Rodin A. E., Fedorova V. A. A Pulsar Time Scale Based on Parkes Observations in 1995-2010 // Astronomy Reports. – 2018. – V. 62. – Is. 6. – pp. 378.
- [6] Rodin A. E., Oreshko V. V., Potapov V. A., Pshirkov M. S., Sazhin M. V. Principles of Pulsar Space Navigation // Astronomy Reports. – 2020. – V. 64. – Is. 6. – pp. 499.
- [7] Barkov M. V., Lyutikov M., Khangulyan D. Fast moving pulsars as probes of interstellar medium // MNRAS. – 2020. – V. 497. – Is. 3. – pp. 2605.
- [8] Попов М. В., Смирнова Т. В. Показатель степени спектра неоднородностей межзвездной плазмы в направлении одиннадцати пульсаров // Астрономический Журнал. – 2021. – Т 98. – №. 11. – стр. 929.
- [9] Smirnova T. V., Shishov V. I., Andrianov A. S., Burgin M. S., Fadeev E. N., Popov M. V., Rudnitskii A. G., Soglasnov V. A. Abnormal scattering event in the direction to the pulsar B0834+06 // MNRAS. – 2020. – V. 496. – Is. 4. – pp. 5149.

- [10] Stairs H. Binary pulsars and tests of general relativity // Relativity in Fundamental Astronomy. – 2010. – V. 261. – pp. 218.
- [11] Бескин В. С., Желтоухов А. А. Аномальный момент сил, действующий на вращающийся намагниченный шар в вакууме // УФН. – 2014. – Т. 184. – № 8. – с. 865.
- [12] Nandi R., Char P., Chatterjee D., Bandyopadhyay D. Role of nuclear physics in oscillations of magnetars // Physical Review C. – 2016. – V. 94. – Is. 2. – id.025801.
- [13] Lorimer D. R., Bailes M., McLaughlin M. A., Narkevic D. J., Crawford F. A bright millisecond radio burst of extragalactic origin // Science. – 2007. – V. 318. – Is.5851. – p. 777.
- [14] Фёдорова В. А., Родин А. Е. Обнаружение быстрых радиовсплесков на радиотелескопе БСА ФИАН // Астрономический журнал. – 2019. – Т. 96. – № 1. – с. 41.
- [15] Фёдорова В. А., Родин А. Е. Поиск быстрых радиовсплесков в направлении галактик М31 и М33 // Астрономический журнал. – 2019. – Т. 96. – № 11. – с. 883.
- [16] Houben L. J. M., Spitler L. G., ter Veen S. et al. Constraints on the low frequency spectrum of FRB 121102 // Astronomy and Astrophysics. – 2019. – V. 623. – p. A42.
- [17] Hansen B. M. S., Lyutikov M. Radio and X-ray signatures of merging neutron stars // MNRAS. – 2001. – V. 322. – Is. 4. – p. 695.
- [18] Rees M. J. A better way of searching for black-hole explosions? // Nature. – 1977. – V. 266. – Is. 5600. – p. 333.
- [19] Burke-Spolaor S., Bailes M., Ekers R., Macquart J.-P., Crawford F. Radio bursts with extragalactic spectral characteristics show terrestrial origins // The Astrophysical Journal. – 2011. – V. 272. – Is. 1. – p. 5.
- [20] Spitler L. G., Cordes J. M., Hessels J. W. T., Lorimer D. R., McLaughlin M. A. et al. Fast radio burst discovered in the Arecibo Pulsar ALFA Survey // The Astrophysical Journal. – 2014. – V. 790. – Is. 2. – p. 9.

- [21] Scholz P., Spitler L. G., Hessels J. W. T. et al. The repeating fast radio burst FRB 121102: multi-wavelength observations and additional bursts // The Astrophysical Journal. – 2016. – V. 833. – Is. 2. – p. 17.
- [22] Totani T. Cosmological fast radio bursts from binary neutron star mergers // Publications of the Astronomical Society of Japan. – 2013. – V. 65. – Is. 5. – p. 4.
- [23] Zhang B. A possible connection between fast radio bursts and gamma-ray bursts // The Astrophysical Journal Letters. – 2014. – V. 780. – Is. 2. – p. 4.
- [24] Lorimer D., McLaughlin M. Flashes in the Night // Scientific American. – 2018. – V. 318. – Is. 4. – p. 42.
- [25] Liu T., Romero G. E., Liu M.-L., Li A. Fast radio bursts and their gamma-ray or radio afterglows as Kerr-Newman black hole binaries // The Astrophysical Journal. – 2016. – V. 826. – Is. 1. – p. 6.
- [26] FRB Theory, URL: <https://frbtheorycat.org/index.php?title>.
- [27] Platts E., Weltman A., Walters A. et al. A living theory catalogue for fast radio bursts // Physics Reports. – 2019. – V. 821. – Is. 1.
- [28] Chatterjee S., Law C. J., Wharton R. S. et al. The direct localization of a fast radio burst and its host // Nature. – 2017. – V. 541. – Is. 58.
- [29] Marcote B., Paragi Z., Hessels J. W. T. et al. The Repeating Fast Radio Burst FRB 121102 as Seen on Milliarcsecond Angular Scales // The Astrophysical Journal Letters. – 2017. – V. 834. – Is. 2. – p. 9.
- [30] Keane E. F., Johnston S., Bhandari S. et al. The host galaxy of a fast radio burst // Nature. – 2016. – V. 530. – Is. 7591. – p. 453.
- [31] The Astronomer's Telegram, URL: <https://www.astronomerstelegam.org/?read=8752>.
- [32] Osłowski S., Shannon R. M., Ravi V. et al. Commensal discovery of four fast radio bursts during Parkes Pulsar Timing Array observations // MNRAS. – 2019. – V. 488. – Is. 1. – p. 868.

- [33] The Astronomer's Telegram, URL: <https://www.astronomerstelegam.org/?read=11932>.
- [34] The Astronomer's Telegram, URL: <https://www.astronomerstelegam.org/?read=11901>
- [35] Marcote B., Nimmo K., Hessels J. W. T. et al. A repeating fast radio burst source localized to a nearby spiral galaxy // Nature. – 2020. – V. 577. – Is. 7789. – p. 190.
- [36] Bannister K. W., Deller A. T., Phillips C. et al. A single fast radio burst localized to a massive galaxy at cosmological distance // Science. – 2019. – V. 65. – Is. 6453. – p. 565.
- [37] The Astronomer's Telegram, URL: <https://www.astronomerstelegam.org/?read=13446>.
- [38] The Astronomer's Telegram, URL: <https://www.astronomerstelegam.org/?read=13492>.
- [39] The Astronomer's Telegram, URL: <https://www.astronomerstelegam.org/?read=13493>.
- [40] The Astronomer's Telegram, URL: <https://www.astronomerstelegam.org/?read=13589>.
- [41] Andersen B. C., Bandura K., Bhardwaj M. et al. CHIME/FRB Detection of Eight New Repeating Fast Radio Burst Sources // The Astrophysical Journal Letters. – 2019. – V. 885. – L24.
- [42] Fonseca E., Andersen B. C., Bhardwaj M. et al. Nine New Repeating Fast Radio Burst Sources from CHIME/FRB // The Astrophysical Journal Letters. – 2020. – V. 891. – L6.
- [43] The Astronomer's Telegram, URL: <https://www.astronomerstelegam.org/?read=12899>.
- [44] Astronomer's Telegram, URL: <http://www.astronomerstelegam.org/?read=13681>.

- [45] Duncan R. C., Thompson C. Formation of Very Strongly Magnetized Neutron Stars: Implications for Gamma-Ray Bursts // Ap.J. – 1992. – V. 392. – L9.
- [46] Paczynski B. On the Two Population Model for Gamma-Ray Bursts // Ac.Astron. – 1992. – V. 42. – pp. 1.
- [47] Cline T. L., et al. Detection of a fast, intense and unusual gamma-ray transien // Ap.J. – 1980. – V. 237. – L1.
- [48] Hurley K., et al. A giant periodic flare from the soft γ -ray repeater SGR1900+14 // Natur. – 1999. – V. 397. – Is. 6714. – pp. 41.
- [49] Kuz'min A. D., Losovskii B. Ya. Geminga as a Radio Pulsar // Astr.Let. – 1999. – V. 25. – Is. 2. – pp. 108.
- [50] Nanda R., Chandra proposal **ID 15508481** (2014).
- [51] Kozlova A. V., Israel G. L., Svinkin D. S. et al. The first observation of an intermediate flare from SGR 1935+2154 // MNRAS. – 2016. – V. 460. – Is. 2. – pp. 2008.
- [52] Kothes R., Sun X., Gaensler B., et al. A Radio Continuum and Polarization Study of SNR G57.2+0.8 Associated with Magnetar SGR 1935+2154 // Ap.J. – 2018. – V. 852. Is. 1. – pp. 1.
- [53] Ridnaia A., Golenetskii S., Aptekar R. et al. Konus-Wind observation of the recent SGR 1935+2154 activity // GRB Coordinates Network, Circular Service. – 2019. – No.26242.
- [54] GCN Circulars, URL: <https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3/27657.gcn3>
- [55] Cordes J. M., Lazio T. J. W. NE2001.I. A New Model for the Galactic Distribution of Free Electrons and its Fluctuations // arXiv, astro-ph/0207156. – 2002.
- [56] The Astronomer's Telegram, URL: <https://www.astronomerstelegam.org/?read=13684>.
- [57] Istomin Ya. N. Radiation of fast radio bursts by hot neutron stars (On the nature of fast radio bursts) // MNRAS. – 2018. – V. 478. – Is. 4. – pp. 4348.

- [58] The Astronomer's Telergam, URL: <https://www.astronomerstelegam.org/?read=13783>.
- [59] The Astronomer's Telergam, URL: <https://www.astronomerstelegam.org/?read=13699>.
- [60] Petroff E., Barr E. D., Jameson A. et al. FRBCAT: The Fast Radio Burst Catalogue // Publications of the Astronomical Society of Australia. – 2016. – V. 33. – p. 7.
- [61] Федорова В. А., Родин А. Е. Сравнительный анализ наблюдательных свойств быстрых радиовсплесков на частоте 111 и 1400 МГц // Астрономический журнал. – 2021. – V. 98. – Is. 10. – с. 804.
- [62] FRBSTATS: Catalogue, URL: <https://www.herta-experiment.org/frbstats/catalogue>.
- [63] Li L.-B., Huang Y.-F., Geng J.-J. et al. A model of fast radio bursts: collisions between episodic magnetic blobs // RAA. – 2018. – V. 18. – Is. 6. – p. 66.
- [64] Mingarelli C. M. F., Levin J., Lazio T. J. W., Fast Radio Bursts and Radio Transients from Black Hole Batteries // Astrophys. J. Let. – 2015. – V. 814. – Is. 2. – p. 5.
- [65] Кузьмин А. Д., Лосовский Б. Я., Лапаев К. А. Измерение рассеяния радиоизлучения пульсаров // Астрономический журнал. – 2007. – V. 84. – Is. 8. – с. 685.
- [66] Уилсон Л., Рольфс К., Хюттемейстер С. Инструменты и методы радиоастрономии. М.: Физматлит, 2013.
- [67] Орешко В. В., Латышев Г. А., Алексеев И. А. и др. Новая многолучевая диаграмма направленности радиотелескопа БСА ФИАН // Труды ИПА. – 2012. – V. 24. – с. 80.
- [68] Pleunis Z., Michilli D., Bassa C. G. et al. LOFAR Detection of 110-188 MHz Emission and Frequency-Dependent Activity from FRB 20180916B // Astrophysical Journal. – 2021. – V. 911. – Is. 1. – L3.

- [69] Sokolowski M., Bhat N. D., Macquart J. P., et al. No low-frequency emission from extremely bright Fast Radio Bursts // *The Astrophysical Journal Letters*. – 2018. – V. 867. – L12.
- [70] Tingay S. J., Trott C. M., Wayth R. B. et al. A search for Fast Radio Bursts at low frequencies with Murchison Widefield Array high time resolution imaging // *Astrophys. J.* – 2015. – V. 150. – p. 199.
- [71] Karastergiou A., Chennamangalam J., Armour W. et al. Limits on Fast Radio Bursts at 145 MHz with ARTEMIS, a real-time software backend // *MNRAS*. – 2015. – V. 452. – p. 1254.
- [72] Chawla P., Andersen B. C., Bhardwaj M. et al. Detection of Repeating FRB 180916.J0158+65 Down to Frequencies of 300 MHz // *The Astrophysical Journal Letters*. – 2020. – V. 896. – Is. 2. – L41.
- [73] Rodin A. E., Oreshko V. V., Samodurov V. A. Detection of sources of periodic radio emission with the Large Phased Array of the Lebedev Physical Institute // *Astronomy Reports*. – 2017. – V. 61. – Is. 1. – p. 30.
- [74] McCulloch P. M., Hamilton P. A., Ables J. G., Hunt A. J. A radio pulsar in the Large Magellanic Cloud // *Nature*. – 1983. – V. 303. – p. 307.
- [75] McLaughlin M. A., Cordes J. M. Searches for Fast Radio Transients // *ApJ*. – 2003. – V. 596. – p. 982.
- [76] Rubio - Herrera E., Stappers B. W., Hessels J. W. T., Braun R. A search for radio pulsars and fast transients in M31 using the WSRT // *MNRAS*. – 2013. – V. 428. – Is. 4. – p. 2857.
- [77] CHIME/FRB Collaboration, Amiri M., Bandura K. et al. A second source of repeating fast radio bursts // *Nature*. – 2019. – V. 566. – p. 235 (2019).
- [78] Bannister K. W., Shannon R. M., Macquart J. P. et al. The Detection of an Extremely Bright Fast Radio Burst in a Phased Array Feed Survey // *Astrophysical Journal*. – 2017. – V. 841. – L12.
- [79] Petroff E., Hessels J. W. T., Lorimer D. R. Fast radio bursts // *The Astronomy and Astrophysics Review*. – 2019. – V. 27 – p. 4.

- [80] Yao J. M., Manchester R. N., Wang N. A New Electron-density Model for Estimation of Pulsar and FRB Distances // *Astrophysical Journal*. – 2017. – V. 835. – Is. 1. – p. 32.
- [81] Cordes J. M., Wharton R. S., Spitler L. G. et al. Radio Wave Propagation and the Provenance of Fast Radio Bursts // *arXiv:1605.05890v1*. – 2016.
- [82] Dolag K., Gaensler B. M., Beck A. M., Beck V. C. Constraints on the distribution and energetics of fast radio bursts using cosmological hydrodynamic simulations // *MNRAS*. – 2015. – V. 451. – p. 4277.
- [83] Scheuer P. A. G. Amplitude variations in pulsed radio sources // *Nature*. – 1968. – V. 218. – p. 920.
- [84] Rickett B. J. Frequency structure of pulsar intensity variations // *Nature*. – 1969. – V. 221. – p. 158.
- [85] Robinson B. J., Cooper B. F. C., Gardiner F. F. et al. Measurements of the Pulsed Radio Source CP 1919 between 85 and 2,700 MHz // *Nature*. – 1968. – V. 218. – p. 1143.
- [86] Alekseev Yu. I., Vitkevich V. V., Zhuravlev V. F., Shitov Yu. P. PP 0943 – a new pulsar and the main characteristics of its radiowave emission // *Doklady Akademiiia Nauk SSSR, Ser. Mat. Fiz.* – 1969. – V. 187. – p. 1019.
- [87] Cordes J. M., Weisberg J. M., Boriakoff V. Small-scale electron density turbulence in the interstellar medium // *Astrophysical Journal*. – 1985. – V. 288. – p. 221.
- [88] Sutton M. J. Scattering of pulsar radiation in the interstellar medium // *MNRAS*. – 1971. – V. 155. – p. 51.
- [89] Bhat N.D. R., Cordes J. M., Camilo F. et al. Multifrequency Observations of Radio Pulse Broadening and Constraints on Interstellar Electron Density Microstructure // *Astrophysical Journal*. – 2004. – V. 605. – p. 759.
- [90] Lorimer D. R., Karastergiou A., McLaughlin M. A., Johnson S. On the detectability of extragalactic fast radio transients // *MNRAS*. – 2013. – V. 436. – L5.

- [91] Zhu W., Feng L.-L., Zhang F. The Scattering of FRBs by the Intergalactic Medium: Variations, Strength, and Dependence on Dispersion Measures // The Astrophysical Journal. – 2018. – V. 865. – Is. 2. – p. 147.
- [92] FRB Catalogue, URL: <http://frbcat.org/>.
- [93] Zhu W., Feng L.-L. The dispersion measure and scattering of FRBs: Contributions from the intergalactic medium, foreground halos, and hosts // arXiv:astro-ph.HE 2011.08519v1. – 2020.
- [94] Cordes J. M., Lazio T. J. W. NE2001. II. Using Radio Propagation Data to Construct a Model for the Galactic Distribution of Free Electrons // arXiv:astro-ph/0301598. – 2003.
- [95] Pleunis Z., Michilli D., Bassa C. G. et al. LOFAR Detection of 110–188MHz Emission and Frequency-dependent Activity from FRB 20180916B // The Astrophysical Journal Letters. – 2021. – V. 911. – L3.
- [96] The Astronomer’s telegram, URL: <https://www.astronomerstelegam.org/?read=15679>.
- [97] The Astronomer’s telegram, URL: <https://www.astronomerstelegam.org/?read=15691>.
- [98] The Astronomer’s telegram, URL: <https://www.astronomerstelegam.org/?read=15693>.
- [99] The Astronomer’s telegram, URL: <https://www.astronomerstelegam.org/?read=15695>.
- [100] The Astronomer’s telegram, URL: <https://www.astronomerstelegam.org/?read=15699>.
- [101] The Astronomer’s telegram, URL: <https://www.astronomerstelegam.org/?read=15716>.
- [102] The Astronomer’s telegram, URL: <https://www.astronomerstelegam.org/?read=15723>.
- [103] The Astronomer’s telegram, URL: <https://www.astronomerstelegam.org/?read=15727>.

- [104] The Astronomer's telegram, URL: <https://www.astronomerstelegam.org/?read=15733>.
- [105] The Astronomer's telegram, URL: <https://www.astronomerstelegam.org/?read=15734>.
- [106] The Astronomer's telegram, URL: <https://www.astronomerstelegam.org/?read=15713>.
- [107] The Astronomer's telegram, URL: <https://www.astronomerstelegam.org/?read=15696>.
- [108] The Astronomer's telegram, URL: <https://www.astronomerstelegam.org/?read=15735>.
- [109] The Astronomer's telegram, URL: <https://www.astronomerstelegam.org/?read=15757>.
- [110] The Astronomer's telegram, URL: <https://www.astronomerstelegam.org/?read=15758>.
- [111] The Astronomer's telegram, URL: <https://www.astronomerstelegam.org/?read=15817>.
- [112] Oppermann N., Connor L. D., Pen U.-L. The Euclidean distribution of fast radio bursts // MNRAS. – 2016. – V. 461. – p. 984.
- [113] Macquart J. P., Ekers R. D. Fast radio burst event rate counts – I. Interpreting the observations // MNRAS. – 2017. – V. 474. – p. 1900.
- [114] Попов С. Б., Постнов К. А., Пширков М. С. Быстрые радиовсплески // УФН. – 2018. – Т. 188. – № 10. – с. 1063.
- [115] Хьюиш Э. Пульсары // УФН. – 1969. – Т. 97. – № 4. – с. 715.
- [116] Lien A. Y., Barthelmy S. D., Baumgartner W. H. et al. GRB 140705A: Swift-BAT refined analysis of a possible newly discovered SGR 1935+2154 // GCN Coordinates Network. – 2014. – No. 16522.

- [117] de Ugarte Postigo A., Gorosabel J., Rodriguez-Gil P. et al. GRB 140705A / SGR 1935+2154: Optical observations from 10.4m GTC // GCN Coordinates Network. – 2014. – No. 16528.
- [118] Fong W., Berger E. GRB 140705A / SGR 1935+2154: VLA 6 GHz observations // GCN Coordinates Network. – 2014. – No. 16542.
- [119] Selvanayagam A. J., Praveenkumar A., Nandagopal D., Valusamy T. Sensitivity Boost to the Ooty Radio Telescope: A New Phased Array of 1056 Dipoles with 1056 Low Noise Amplifiers // IETE Technical Review. – 1993. – V. 10. – Is. 4. – p. 333.
- [120] The Astronomer's Telergam, URL: <https://www.astronomerstelegam.org/?read=6376>.
- [121] Golenetskii S., Aptekar R., Frederiks D. et al. Konus-Wind observation of a bright burst from SGR 1935+2154 // GCN Coordinates Network. – 2015. – No. 17703.
- [122] Kozlova A., Golenetskii S., Aptekar R. et al. Konus-Wind observation of a bright burst from SGR 1935+2154 // GCN Coordinates Network. – 2016. – No. 19438.
- [123] Frederiks D., Golenetskii S., Aptekar R. et al. Konus-Wind observation of a bright burst from SGR 1935+2154 // GCN Coordinates Network. – 2016. – 19613.
- [124] Ridnaia A., Golenetskii S., Aptekar R. et al. Konus-Wind observation of the recent SGR 1935+2154 activity // GCN Coordinates Network. – 2019. – No. 26242.
- [125] The Astronomer's Telegram, URL: <https://www.astronomerstelegam.org/?read=13681>.
- [126] The Astronomer's Telegram, URL: <https://www.astronomerstelegam.org/?read=13690>.
- [127] The Astronomer's Telegram, URL: <https://www.astronomerstelegam.org/?read=13693>.

- [128] The Astronomer's Telegram, URL: <https://www.astronomerstelegam.org/?read=13699>.
- [129] The Astronomer's Telegram, URL: <https://www.astronomerstelegam.org/?read=13707>.
- [130] The Astronomer's Telegram, URL: <https://www.astronomerstelegam.org/?read=13713>.
- [131] The Astronomer's Telegram, URL: <https://www.astronomerstelegam.org/?read=13726>.
- [132] The Astronomer's Telegram, URL: <https://www.astronomerstelegam.org/?read=13739>.
- [133] The Astronomer's Telegram, URL: <https://www.astronomerstelegam.org/?read=13773>.
- [134] The Astronomer's Telegram, URL: <https://www.astronomerstelegam.org/?read=13778>.
- [135] The Astronomer's Telegram, URL: <https://www.astronomerstelegam.org/?read=13783>.
- [136] The Astronomer's Telegram, URL: <https://www.astronomerstelegam.org/?read=13786>.
- [137] The Astronomer's Telegram, URL: <https://www.astronomerstelegam.org/?read=13816>.
- [138] The Astronomer's Telegram, URL: <https://www.astronomerstelegam.org/?read=13838>.
- [139] The Astronomer's Telegram, URL: <https://www.astronomerstelegam.org/?read=14074>.
- [140] The Astronomer's Telegram, URL: <https://www.astronomerstelegam.org/?read=14077>.
- [141] The Astronomer's Telegram, URL: <https://www.astronomerstelegam.org/?read=14151>.

- [142] The Astronomer's Telegram, URL: <https://www.astronomerstelegram.org/?read=14186>.
- [143] The Astronomer's Telegram, URL: <http://www.astronomerstelegram.org/?read=14074>.
- [144] The Astronomer's Telegram, URL: <http://www.astronomerstelegram.org/?read=1418>.
- [145] Фёдорова В. А., Родин А. Е., Поиск импульсного излучения от магнетара SGR1935+2154 // Краткие сообщения по физике. – 2021. – Т. 48. – № 10. – с. 37.
- [146] Родин А. Е., Фёдорова В. А. Обнаружение периодического излучения от магнетара SGR 1935+2154 // Астрономический журнал. – 2022. – Т. 99. – № 1. – с. 37.
- [147] The Astronomer's Telegram, URL: <https://www.astronomerstelegram.org/?read=14080>.
- [148] Wadiasingh Z., Chirenti C. Fast Radio Burst Trains from Magnetar Oscillations // The Astrophysical Journal Letters. – 2020. – V. 903. – Is. 2. – L38.
- [149] Bochenek C. D., Ravi V., Belov K. V. et al. A fast radio burst associated with a Galactic magnetar // Nature. – 2020. – V. 587. – p. 59.
- [150] Kunihiro I. Fast Radio Burst Breakouts from Magnetar Burst Fireballs // The Astrophysical Journal Letters. – 2020. – V. 904. – Is. 2. – L7.
- [151] Egorov A. E., Postnov K. A. On the possible observational manifestation of the impact of a supernova shock on the neutron star magnetosphere // Astr. Let. – 2009. – V. 35. – Is. 4. – p. 241.
- [152] The Astronomer's Telegram, URL: <https://www.astronomerstelegram.org/?read=14497>.
- [153] The Astronomer's Telegram, URL: <https://www.astronomerstelegram.org/?read=14502>.

- [154] The Astronomer's Telegram, URL: <https://www.astronomerstelegam.org/?read=14508>.
- [155] Ткачев И. И. Быстрые радиовсплески и миникластеры аксионов // Письма в ЖЭТФ. – 2015. – Т. 101. – № 3. – с. 3.
- [156] Pshirkov M. S. May axion clusters be sources of fast radio bursts? // Intern. J. Mod. Phys. D. – 2017. – V. 26. – Is. 7. – id. 1750068.