

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ НАБЛЮДАТЕЛЬНЫХ СВОЙСТВ БЫСТРЫХ РАДИОВСПЛЕСКОВ НА ЧАСТОТАХ 111 И 1400 МГц

© 2021 г. В. А. Федорова^{1,*}, А. Е. Родин^{1,**}

¹ Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Пушчинская радиоастрономическая обсерватория АКЦ ФИАН,
Пушчино, Россия

*E-mail: fedorova@prao.ru

**E-mail: rodin@prao.ru

Поступила в редакцию 05.05.2021 г.

После доработки 05.06.2021 г.

Принята к публикации 14.06.2021 г.

В работе проведен сравнительный анализ наблюдательных характеристик быстрых радиовсплесков на частотах 111 и 1400 МГц. Построены распределения по мере дисперсии радиовсплесков. Показано, что на обеих частотах они описываются логнормальным распределением с параметрами $\mu = 6.2$, $\sigma = 0.7$. Также построена зависимость $\tau_{sc}(DM)$ величины рассеяния от меры дисперсии на 111 МГц и 1400 МГц. Показано, что эта зависимость принципиально отличается от зависимости для пульсаров. Сравнительный анализ взаимосвязи рассеяния импульсов от меры дисперсии на 1400 МГц и 111 МГц показал, что $\tau_{sc}(DM)$ для обеих частот имеет вид $\tau_{sc}(DM) \sim DM^k$, где $k = 0.49 \pm 0.18$ и $k = 0.43 \pm 0.15$ для частот 111 и 1400 МГц соответственно. Полученная зависимость объясняется в рамках предположения о внегалактическом возникновении быстрых радиовсплесков и практически равномерном распределении вещества в межгалактическом пространстве. Из зависимости $\tau_{sc}(DM)$ получена суммарная оценка вклада в DM вещества гало нашей и родительской галактики $DM_{\text{halo}} + \frac{DM_{\text{host}}}{1+z} \approx 60$ пк/см³. На основе зависимости $\log N - \log S$ выведен средний спектральный индекс радиовсплесков $\alpha = -0.63 \pm 0.20$ при условии, что статистические свойства этих выборок на 111 и 1400 МГц одинаковы.

Ключевые слова: быстрые радиовсплески, межзвездная среда, межгалактическая среда, модель рассеяния

DOI: 10.31857/S0004629921100091

1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из интереснейших направлений современной астрофизики является исследование быстрых радиовсплесков (БРВ) — загадочного явления, для объяснения природы которого привлекаются катастрофические космические события от слияний черных дыр и нейтронных звезд до вспышек магнетаров и испарений астероидов потоком заряженных частиц в окрестностях пульсаров [1–5]. Недавняя регистрация мощного импульса от известного магнетара SGR 1935+2154 [6] с пиковой плотностью потока порядка мегаянских значительно усилила позиции сторонников магнетаров как источников быстрых радиовсплесков. Тем не менее, на наш взгляд, это событие не отменяет полностью и другие механизмы возникновения БРВ.

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 [7], ASKAP [8]. Такого рода радиотелескоп есть и в России — это Большая синфазная антенна Пушчинской радиоастрономической обсерватории АКЦ ФИАН (БСА ФИАН).

Круглосуточный режим работы и полнота получаемых данных БСА ФИАН практически сразу же после запуска мониторингового режима в 2012 г. привели к идее попытаться зарегистрировать импульсные сигналы космического происхождения. Эта идея была реализована сначала для поиска

новых пульсаров [9], а осенью 2017 г. была начата разработка алгоритма для обнаружения одиночных импульсных сигналов. Первые результаты были опубликованы в статье Федоровой и Родина [10]. Далее работа получила развитие в поиске быстрых радиовсплесков в направлении двух ближайших галактик: М31 и М33. Было обнаружено еще девять одиночных импульсов, включая один повторяющийся. Все события не показали видимой концентрации к центрам галактик М31 и М33 [11]. Чтобы начать делать значимые достоверные выводы о свойствах новых импульсов, необходимо было увеличить их статистику до нескольких десятков, поэтому был начат поиск по всему доступному участку неба. На момент написания этой статьи на телескопе БСА ФИАН обнаружено 63 импульса. Хотя авторы с самого начала определили их для себя как быстрые радиовсплески, необходимо было исследовать их наблюдательные свойства и сравнить с аналогичными свойствами радиовсплесков, наблюдаемых на других частотах, чтобы уверенно говорить об этом. Именно это является главной целью написания данной статьи.

Далее будет проведен сравнительный анализ таких наблюдательных характеристик, как мера дисперсии, зависимость рассеяния импульсов от меры дисперсии, которая, как будет показано далее, принципиально отличается от аналогичной зависимости для пульсаров, и, наконец, зависимость $\text{Log } N - \text{Log } S$ на частотах 111 и 1400 МГц, из которой будет выведен средний спектральный индекс импульсов.

Плотность распределения по мере дисперсии обнаруженных радиовсплесков изучалась многими авторами. Так, например, в работе Кордеса и др. [12] анализируется интегральная плотность распределения радиовсплесков в сравнении с пространственным распределением свободных электронов и радиовсплесков, и делается вывод, что наблюдаемое распределение может быть объяснено моделью, включающей плотное ядро и более разреженное гало. В работе Долага и соавт. [13] делается вывод, что наблюдаемое распределение DM согласуется с космологической популяцией на красных смещениях $z = 0.6-0.9$ вне зависимости от того, как БРВ распределены по отношению к крупномасштабной структуре или свойствам родительских галактик.

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 измене-

ний интенсивности излучения пульсаров в работах [14, 15]. Галактическая среда весьма неоднородна, 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 [16–18]. Кордес и соавт. [19] впервые предложили двухкомпонентную модель турбулентности галактической среды. Под первой составляющей Кордес и соавт. понимают неоднородную среду в области до галактических высот $z < 100$ пк, которую связывают с населением Галактики I типа. Область на расстоянии ≥ 0.5 кпк является второй составляющей модели и определяет рассеяние на больших галактических высотах $|b| \geq 10^\circ$. На таких масштабах среда, по мнению Кордеса и соавт., является практически однородной. Этот результат оказался одним из важнейших, поскольку ранее считалось, что турбулентные потоки распределены равномерно.

Более подробно вопрос, связанный с механизмом рассеяния излучения, был рассмотрен Саттоном [20]. 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 Бхата и др. [21]. Ими 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 [22, 23]. 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 Лоримера и Карастергио, дает возмож-

ность наблюдать быстрые радиовсплески на более низких частотах.

В работе Чжу и соавт. [24] 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 довольно слабо, но может усиливаться неоднородным распределением газа в галактических кластерах и филаментах. В [13] Долаг и соавт. 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 $DM_{\text{halo}} \approx 30$ пк/см³.

В отличие от упомянутых выше статей [24] и [13], мы в своей работе придерживаемся минимально необходимого 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 соавт. 2007 г. [25]. В ней проводились измерения уширения импульсов выборки 100 галактических пульсаров на частоте 102 и 111 МГц. В результате анализа было установлено, что зависимость величины рассеяния от меры дисперсии описывается степенным законом

$$\tau_{\text{sc}}(DM) = 0.06 \left(\frac{DM}{100} \right)^{2.2 \pm 0.1} \text{ [с]}. \quad (1)$$

Также Кузьминым и соавт. в статье [25] показано, что на расстоянии до 3 кпк турбулентные потоки рассеивающей среды являются статистически однородными. Но этот вывод сделан для галактических областей. Наша же работа направлена 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.

В настоящей работе проводилось исследование величины рассеяния 63 быстрых радиовсплесков, зарегистрированных на частоте 111 МГц [10, 11]. Зависимость рассеяния τ_{sc} от меры дисперсии DM из статьи Кузьмина [25] построена для пульсаров с мерой дисперсии от 2.97 до 196 пк/см³. Было решено дополнить эту зависимость по данным измерений быстрых радио-

всплесков на 111 МГц, диапазон мер дисперсии которых заключен в пределах от 172 пк/см³ до 1868 пк/см³.

Интегральное распределение быстрых радиовсплесков по пиковому потоку ($\log N - \log S$) было проанализировано в работах Оппермана, Маккарта и Попова [26–28]. Для рассмотрения зависимости использовались импульсы, зарегистрированные на частотах >700 МГц. Опперман и соавт. [26] показали, что распределение импульсов по потоку согласуется с равномерным распределением источников в евклидовом пространстве. В работе [27] Маккарт и Экерс продемонстрировали, что распределение быстрых радиовсплесков в пространстве не только соответствует закону $S^{-3/2}$, но может иметь и более крутую зависимость. В работе [28] 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 данной работы, может объясняться либо малой статистикой, либо эффектом селекции.

В последующих разделах приводятся технические характеристики радиотелескопа БСА ФИАН, описывается методика измерения ширины импульсов быстрых радиовсплесков и обсуждаются полученные результаты.

2. АППАРАТУРА

Наблюдения проводились на Большой синфазной антенне (БСА ФИАН). Это инструмент меридианного типа, в поле зрения которого попадает участок неба от +42.13 до –8.20 градусов по склонению. Антенна имеет большое поле зрения, которое составляет ~50 кв. гр. Эффективная площадь БСА ФИАН составляет 47000 м² и имеет максимальное значение в зените. Эта величина уменьшается к горизонту пропорционально $\cos z$, где z – зенитное расстояние. Диаграмма направленности (ДН) БСА ФИАН представляет особый интерес. Она включает в себя управляемую по склонению ДН (ДН-1) и стационарную ДН (ДН-3). Для наблюдения и исследования пульсаров используется ДН-1. Круглосуточный мониторинг различных источников ведется на ДН-3.

Радиотелескоп принимает излучение в диапазоне частот 111 МГц \pm 1.25 МГц. Запись ведется в двух режимах с помощью многоканального цифрового приемника. Первый режим включает в себя наблюдения с низким частотным разрешением в шести частотных каналах 415 кГц каждый. При этом временное разрешение составляет 0.1 с. При втором режиме запись ведется в 32 частотных каналах, каждый из которых 78 кГц, а временное

разрешение 12.5 мс. Оба режима записи получают преобразованием сигнала на процессоре БПФ на 512 каналов [29].

Флуктуационная чувствительность радиотелескопа в режиме низкого разрешения составляет 140 мЯн, что делает инструмент одним из лучших в мире. Температура собственных шумов в системе находится в пределах от 550 до 3500 К и зависит от фона неба.

В ходе наблюдений на БСА ФИАН за период с 2012 г. по настоящее время накоплен колоссальный объем данных. В результате тщательной обработки данных, полученных за восемь лет в результате ежесуточных наблюдений нескольких участков неба общей площадью в 310 квадратных градусов, обнаружено более шестидесяти новых радиовсплесков. В настоящее время поиск продолжается по всему доступному для наблюдений участку неба.

3. КАТАЛОГ “PRAO FRBs at 111 MHz”

В работе Федоровой и Родина [11] было показано, что средний темп регистрации вспышек радиотелескопом БСА ФИАН на частоте 111 МГц ~ 2000 импульсов/год. На момент начала 2021 г. произведена обработка архивных данных 2018 г. с января по июнь в участке неба $\alpha = 11^h 45^m - 12^h 45^m$ и $\delta = 21.38^\circ - 41.72^\circ$. За указанный период было обнаружено 51 новое явление, что в пересчете на все небо за год соответствует количеству 10^3 импульсов/день и соответствует оценкам, данным в различных исследованиях [31]. 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 [7].

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 $\pm 15'$.

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.

¹ <https://www.frb.su/catalogue-prao-frb>

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 [10, 11] 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). 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 [32]. Данная величина носит только оценочный характер, так как зависит от принятой величины средней плотности в межгалактической среде.

Оценка полноты каталога была проведена путем анализа отличия гистограммы распределения по DM от логнормального распределения (см. ниже рис. 7). На гистограмме видно, что имеется дефицит импульсов на $DM < 200$ и $DM > 700$. Дефицит составляет долю ~ 0.32 от общей площади распределения. Эта величина близка к доле отброшенных импульсов $\sim 43\%$, которые отбраковывались из-за жестких критериев отбора: если импульс не был виден во всех шести каналах, то он не входил в каталог, хотя с большой вероятностью это был реальный импульс. Таким образом, по нашим оценкам каталог радиовсплесков на 111 МГц полон на $\sim 60-70\%$.

Ниже для каждого импульса приведены 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.

4. ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Метод выделения одиночных импульсных сигналов подробно описан в предыдущих статьях Федоровой и Родина [10, 11], поэтому остановимся на нем вкратце. Так как антенной БСА принимается рассеянный на неоднородностях космической плазмы сигнал, и сигнал при приеме в частотной полосе испытывает дополнительное уширение, то для его выделения используется свертка с шаблоном согласованной формы (экспоненциально затухающий импульс). В радиофи-

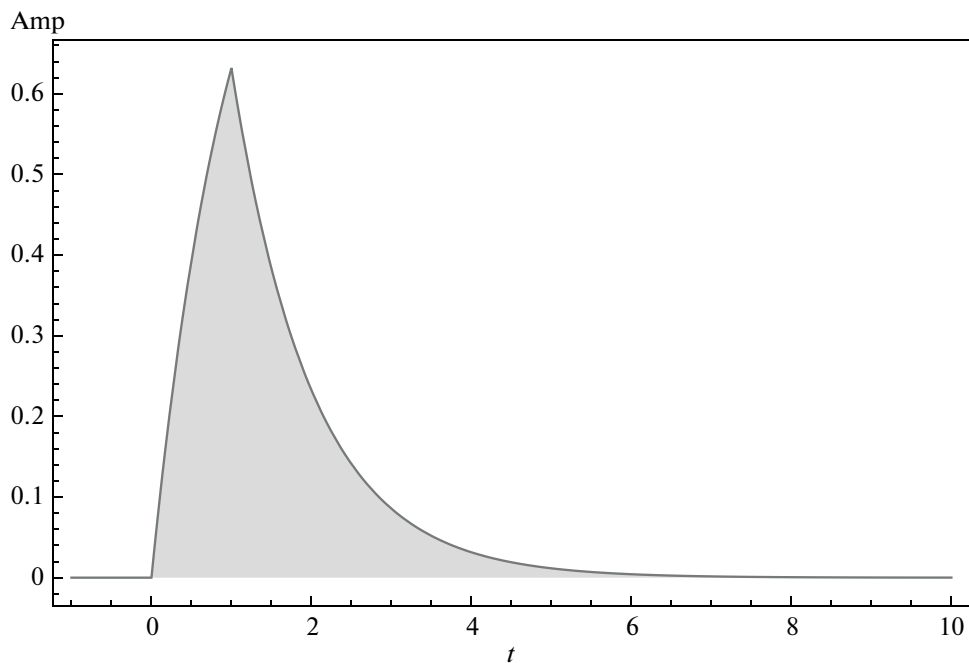


Рис. 1. Шаблон, аналогичный форме принимаемого импульса. Amp – амплитуда сигнала, t – время, с.

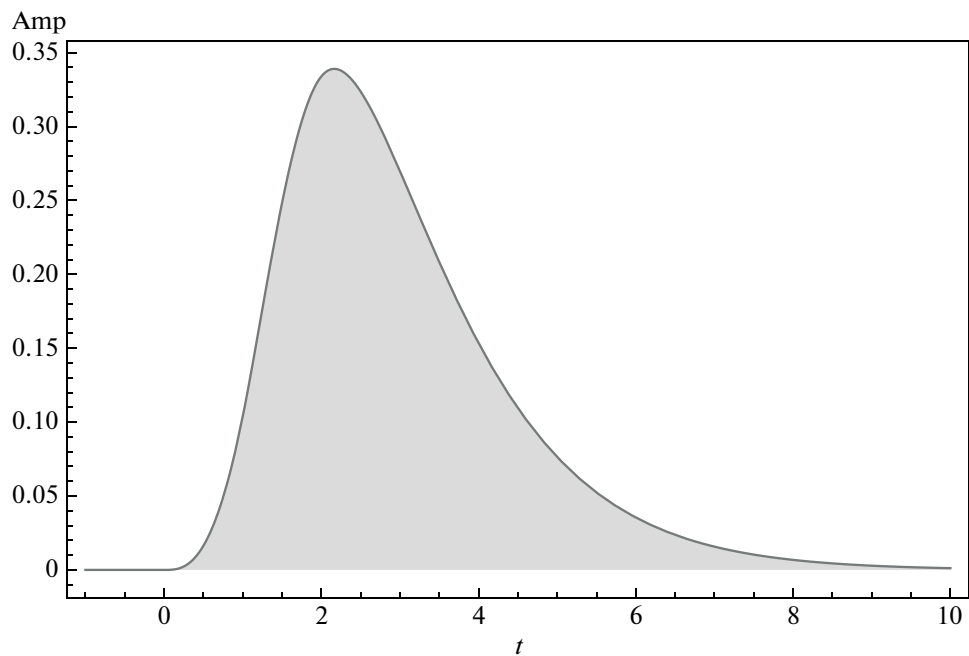


Рис. 2. Сигнальная функция $f(t)$ – результат свертки зашумленного сигнала $s(t)$ и шаблона $p(t)$. Amp – амплитуда сигнала, t – время, с.

зике такой подход называется корреляционным приемником, а результат свертки сигнала с шаблоном – сигнальной функцией. Так как типичные значения мер дисперсий обнаруженных

быстрых радиовсплесков составляют величину несколько сотен пк/см³, то было решено использовать шаблон с характерной шириной $t_s = 1$ с, что по формуле (1) соответствует мере дисперсии

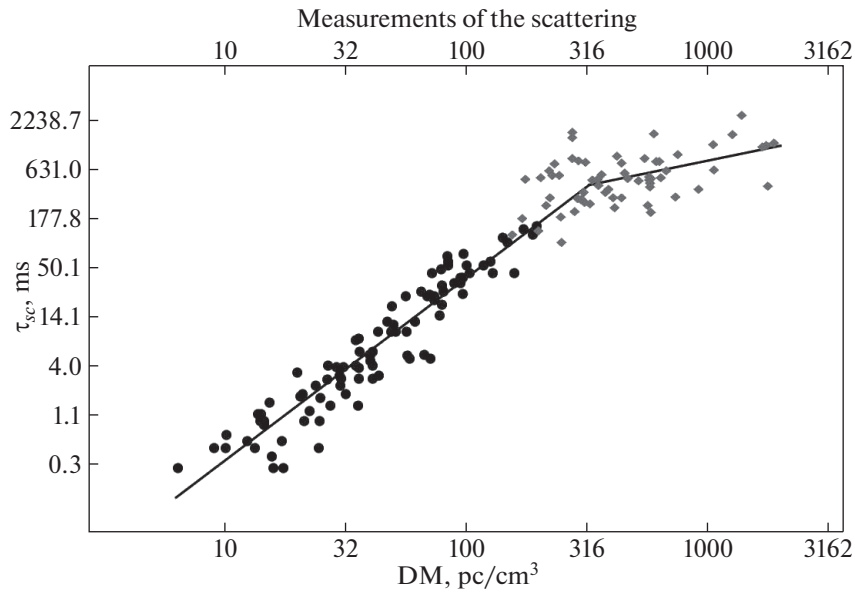


Рис. 3. Зависимость уширения импульсов пульсаров и радиовсплесков из-за рассеяния от меры дисперсии $\tau_{sc}(DM)$. Черными кругами показаны измерения на 111 МГц для пульсаров. Серыми ромбами показаны измерения на 111 МГц для быстрых радиовсплесков.

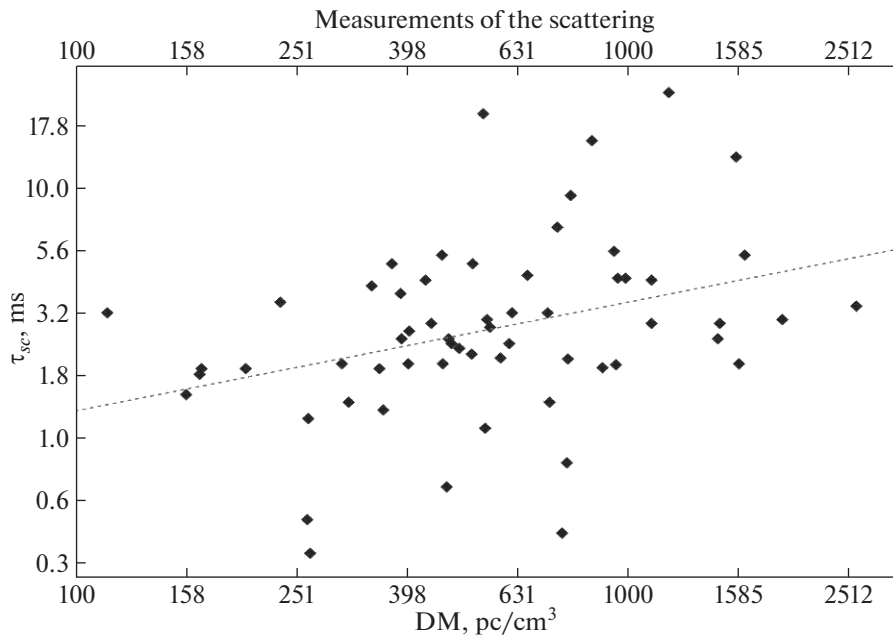


Рис. 4. Зависимость уширения импульсов радиовсплесков из-за рассеяния от меры дисперсии $\tau_{sc}(DM)$ на 1.4 ГГц по данным каталога FRB.

$DM = 360$ пк/см³. Как было показано в работе Федоровой и Родина [10], такой корреляционный подход позволяет значительно улучшить отношение сигнал/шум обнаруживаемого сигнала, а также улучшить уровень флуктуационной чувстви-

тельности до 44 мЯн. В статье [11] показан пример записи до и после применения свертки с шаблоном, где хорошо видно, что без применения корреляционного приемника импульсный сигнал выделить не представляется возможным.

Таблица 1. Параметры быстрых радиовсплесков, зарегистрированных на частоте 111 МГц

FRB	Координаты, α, δ	DM , пк/см ³	Величина рассеяния, мс	Fluence, Ян мс	С/Ш
FRB121029	00:12:00 +42.06	732	321	442	4.3
FRB141216	00:14:00 +41.64	545	869	752	3.6
FRB131030	00:25:00 +39.98	207	526	494	6.9
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	05:34:00 +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
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

Таблица 1. Окончание

FRB	Координаты, α, δ	DM , пк/см ³	Величина рассеяния, мс	Fluence, Ян мс	С/Ш
FRB180628	12:08:20 +22.71	300	302	414	6.4
FRB180609	12:08:56 +29.19	324	269	357	6.9
FRB180616.J1210+2722	12:10:50 +27.37	560	642	654	6.6
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
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	4.3
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
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

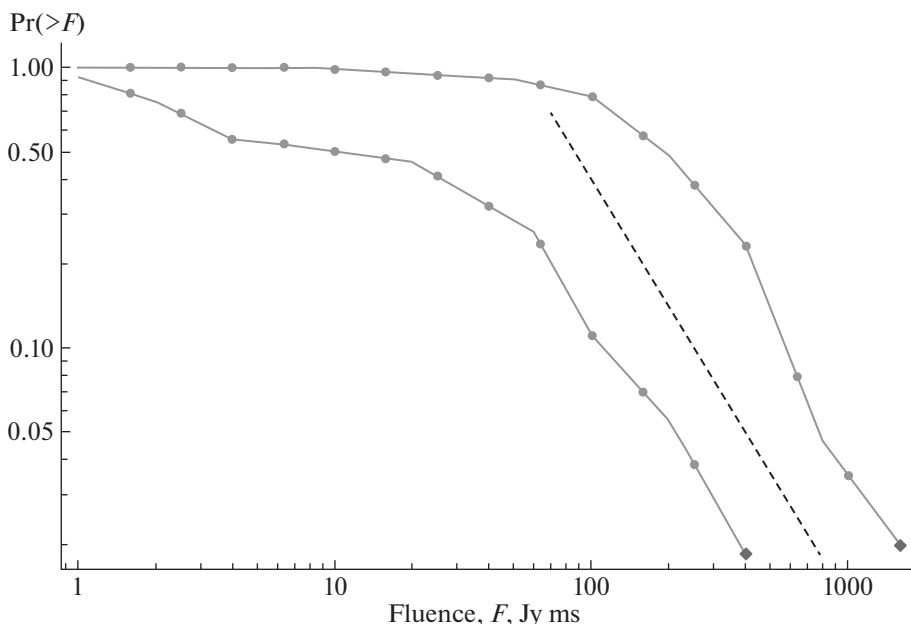


Рис. 5. График зависимости $\log N - \log S$ для быстрых радиовсплесков на частотах 111 МГц и 1.4 ГГц. Нижняя кривая соответствует импульсам, зарегистрированным на 1.4 ГГц, верхняя кривая – импульсам на 111 МГц. Пунктирная линия между кривыми соответствует наклону $-3/2$.

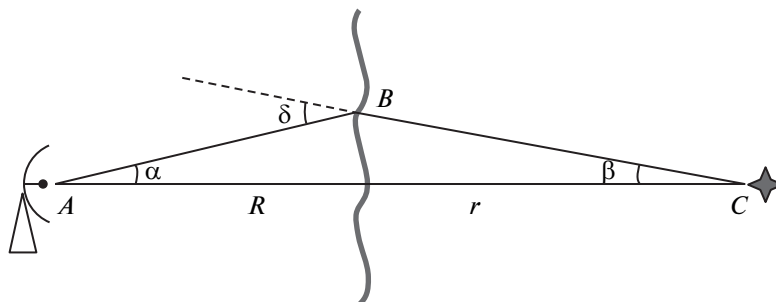


Рис. 6. Схема распространения сигнала от источника к наблюдателю. Точка A – наблюдатель, точка C – место возникновения импульса, B – рассеивающий экран, R и r – расстояние от наблюдателя до экрана и от экрана до места возникновения быстрого радиовсплеска, δ – угол отклонения импульса.

В данной статье мы рассматриваем уширение импульса из-за рассеяния, поэтому далее опишем процедуру измерения ширины радиовсплеска. Аналитически форма шаблона $p(t)$ и рассеянного импульса $s(t)$ записывается в виде

$$(p(t), s(t)) = (a, b) \begin{cases} 1 - \exp(-t/t_s), & 0 \leq t \leq \tau, \\ \exp(-t/t_s)(\exp(-t/t_s) - 1), & 0 \leq \tau \leq t, \end{cases} \quad (2)$$

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. Вид шаблона и импульса показаны на рис. 1.

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

$$f(t) = \int_{-\infty}^\infty p(t)s(t - t_1) dt_1. \quad (3)$$

Ее график показан на рис. 2.

Так как форма сигнальной функции сильно искажена влиянием шумов, то при практическом

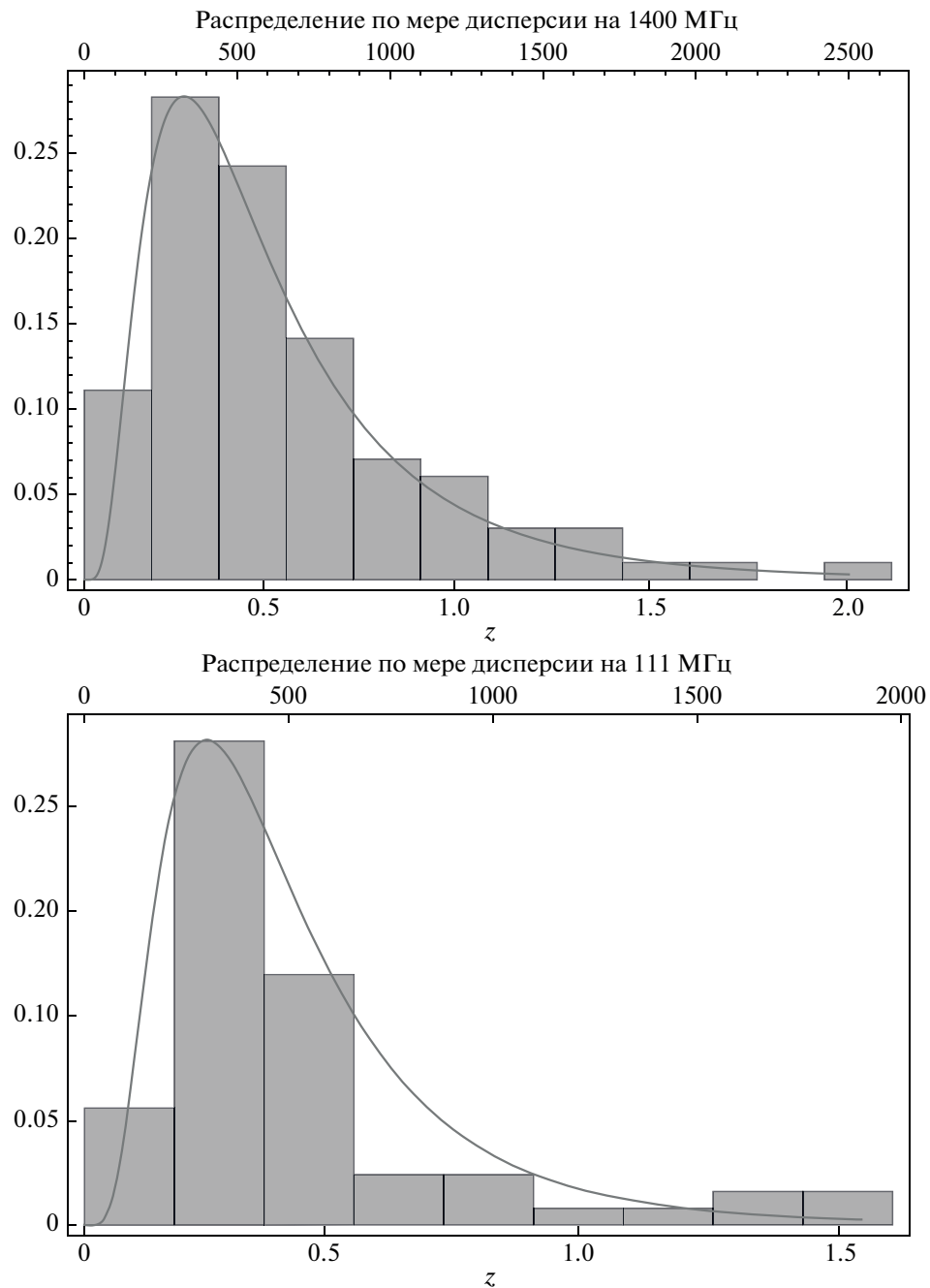


Рис. 7. Гистограмма распределения DM быстрых радиовсплесков.

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 антен-

ной, вычислялось по формуле $\tau_{sc} = 2\sqrt{2}\sigma - \tau - t_s$, где τ — уширение в одном частотном канале, а $t_s = 1$ с — характерная ширина применяемого для сглаживания шаблона.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты измерений величины рассеяния 63 импульсов, а также некоторые параметры быстрых радиовсплесков из каталога “PRAO

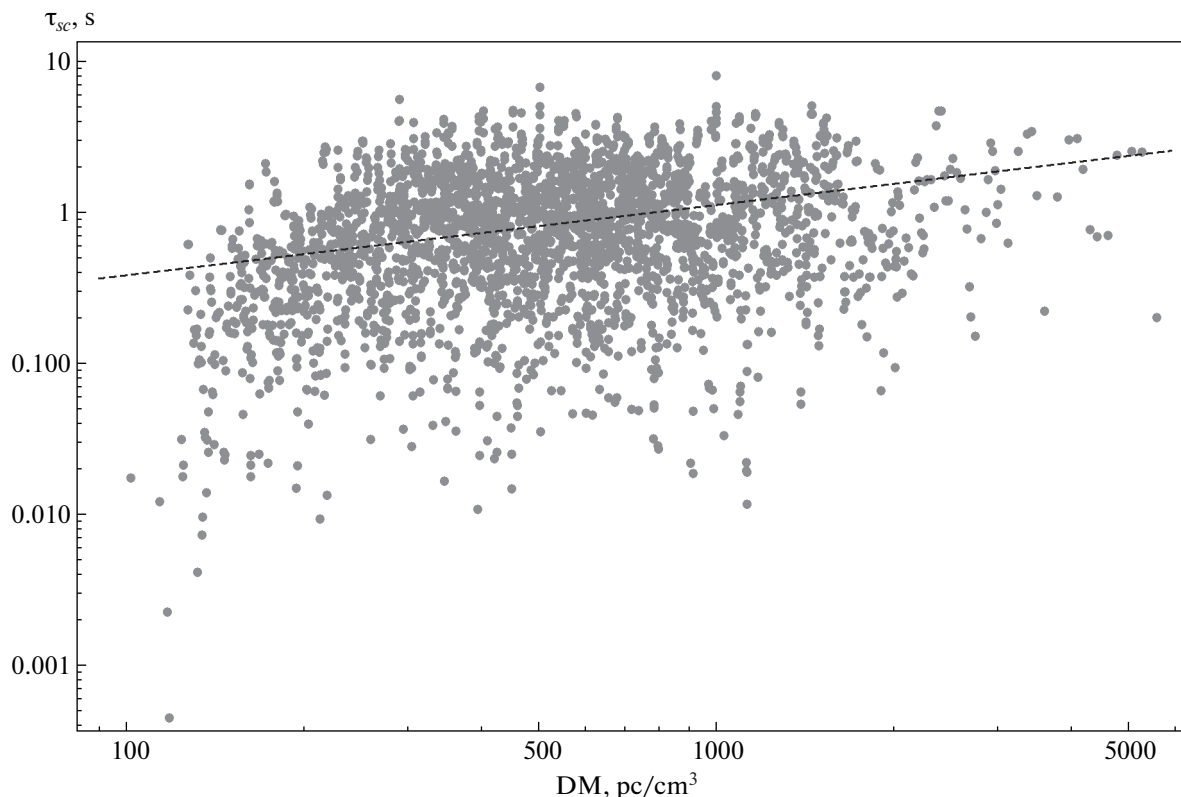


Рис. 8. Результат моделирования рассеяния импульсов от меры дисперсии. Положение экрана вдоль луча зрения относительно наблюдателя и области возникновения быстрого радиовсплеска подбирались так, чтобы показатель степени k совпадал с экспериментальным. Величина τ_{sc} приведена в секундах.

FRBs at 111 MHz” представлены в табл. 1. В ней приводятся названия двенадцати ранее обнаруженных импульсов [10, 11] и 51 новый. 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 табл. 1. В третьей колонке записана мера дисперсии радиовсплесков, измеренная с точностью ± 5 пк см $^{-3}$. В последней колонке таблицы находится величина рассеяния импульсов τ_{sc} .

Сравнение двух распределений DM на 111 и 1400 МГц показало, что оба они описываются логнормальным распределением

$$P(x) = \frac{e^{-\frac{(\mu + \ln x)^2}{2\sigma^2}}}{x\sqrt{2\pi\sigma}} \quad (4)$$

с параметрами $\mu = 6.1-6.2$, $\sigma = 0.7$ и, таким образом, на статистически значимом уровне совпадают и соответствуют диапазону характерных величин $DM = 252-954$ пк см $^{-3}$. 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, ее исключение вносит дополнительную погрешность в распределение.

На основе данных табл. 1 был построен график зависимости величины рассеяния τ_{sc} от меры дисперсии DM вместе с зависимостью для пульсаров, приведенной в статье [25]. Данный график приведен на рис. 3.

Для быстрых радиовсплесков степенная зависимость является более слабой в сравнении с зависимостью для пульсаров: если для пульсаров, наблюдаемых на частоте 111 МГц, Кузьмин и соавт. [25] определяют коэффициент наклона

Таблица 2. Частота излома f_1 при различных спектральных индексах α

α	f_1 , МГц
-1	130
-1.3	230
-1.7	350

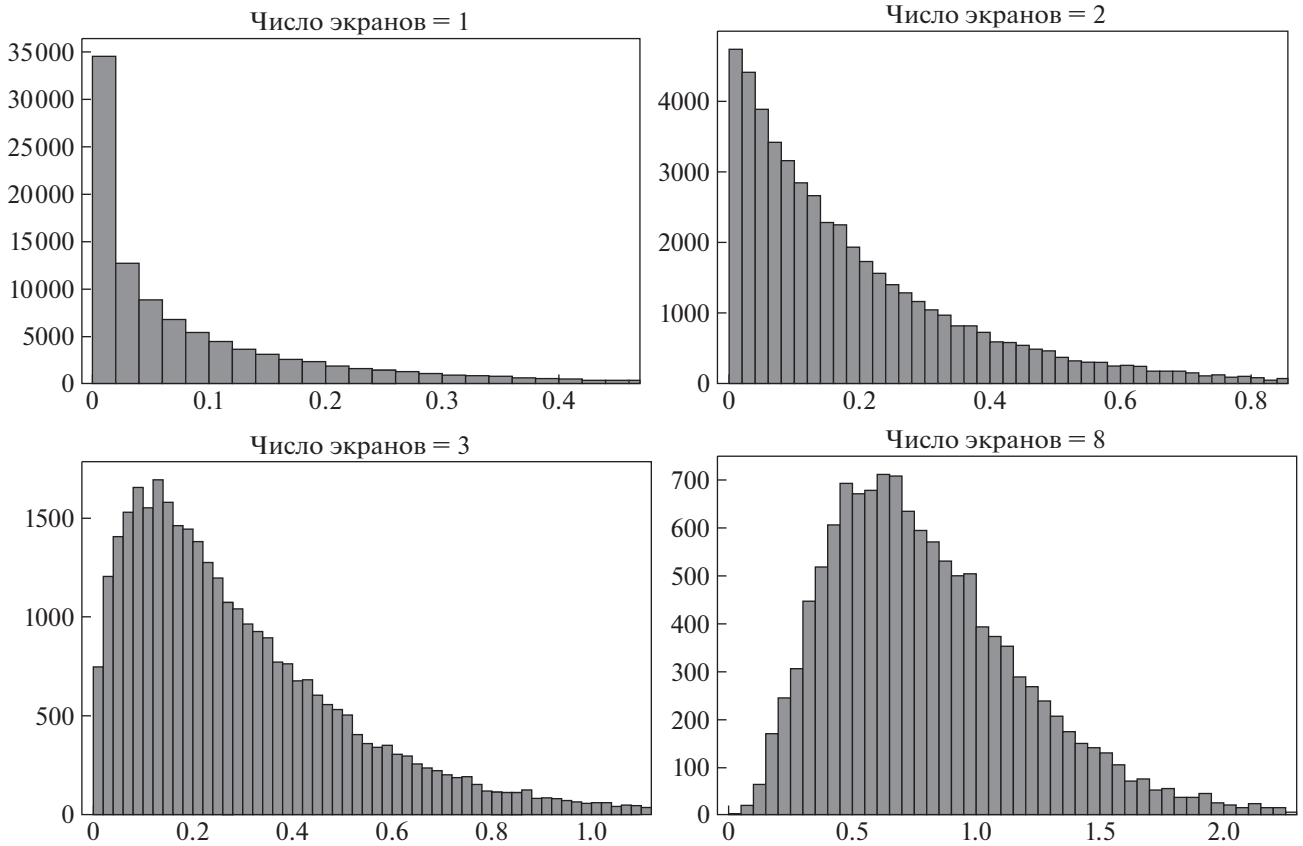


Рис. 9. Зависимость формы импульса быстрого радиовсплеска от количества рассеивающих экранов на луче зрения.

$k = 2.2 \pm 0.1$ (формула (1)), то для быстрых радиовсплесков, зарегистрированных также на частоте 111 МГц, мы даем формулу $\tau_{sc}(DM) = 20.2DM^{0.49 \pm 0.18}$ мс.

Зависимость $\tau_{sc}(DM)$ была построена и для быстрых радиовсплесков на частоте 1.4 ГГц из каталога FRB [30]. График этой зависимости приве-

ден на рис. 4. Для построения зависимости использовалось 59 импульсов с величиной рассеяния от 0.34 до 24.3 мс и мерой дисперсии от 114 до 2596 пк см⁻³. В данном случае зависимость рассеяния от DM описывается формулой $\tau_{sc} = 0.176DM^{0.43 \pm 0.15}$ мс. Коэффициент наклона $k = 0.43 \pm 0.15$ в пределах погрешности согласо-

Таблица 3. Наблюдательные параметры проведенных обзоров и специальных наблюдений быстрых радиовсплесков

Телескоп	Частота набл., МГц	Полоса, МГц	Интервал выборки τ , с	$T_{набл}$, ч поиска,	Площадь кв. град.	S_{fl} , Ян	Статья	Примечание
MWA	170–200	1.28×24	0.5	?	450	0.84, 4.57, 6.64	Sokolowski, 2018 [36]	Чувствит. для разных источников
MWA	139–170	1.28×24	2	10.5	400	0.35	Tingay, 2015 [37]	
LOFAR (UK)	145	6	0.005	1445	4193	62	Karastergiou, 2015 [23]	
LOFAR	110–190	80	0.05	2×0.67	—	2	Chawla, 2020 [38]	
LOFAR	110–188	78	0.004	18.3	0.007	10	Houben, 2019 [39]	
БСА	111	2.5	1	49910	310	0.044	Fedorova, Rodin, 2019 [10, 11]	

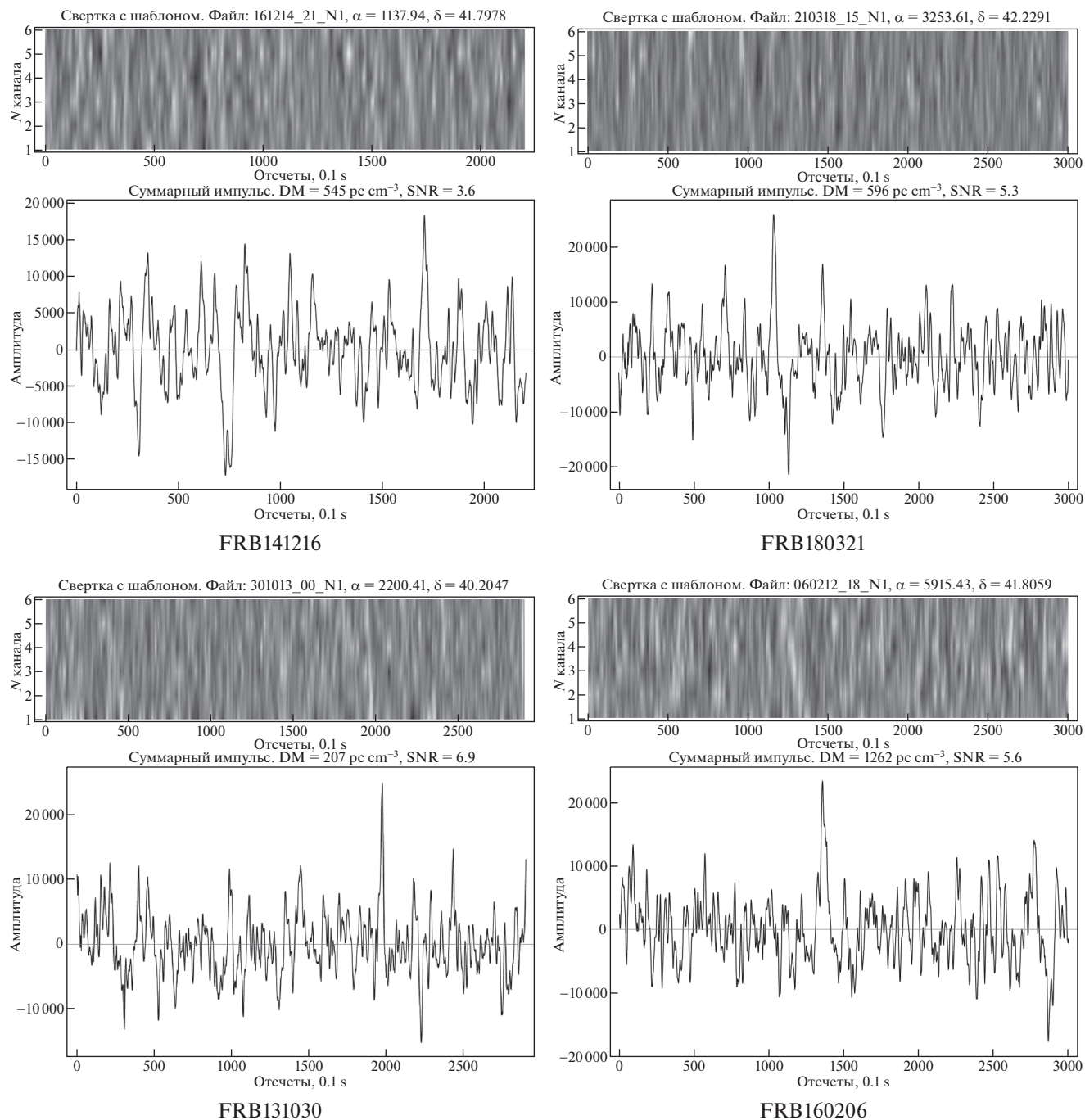


Рис. 10. Динамические спектры и профили импульсов.

ется с результатом, полученным для радиовсплесков на 111 МГц.

На рис. 5 приведен график зависимости $\log N - \log S$, построенный на разных частотах. Если предположить, что наблюдаемые выборки обладают одинаковыми свойствами, то по взаимному сдвигу графиков можно вывести средний спектральный индекс радиовсплесков $\alpha = -0.63 \pm 0.20$.

Так как есть предположение, что по аналогии с пульсарами в спектрах радиовсплесков 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 табл. 2.

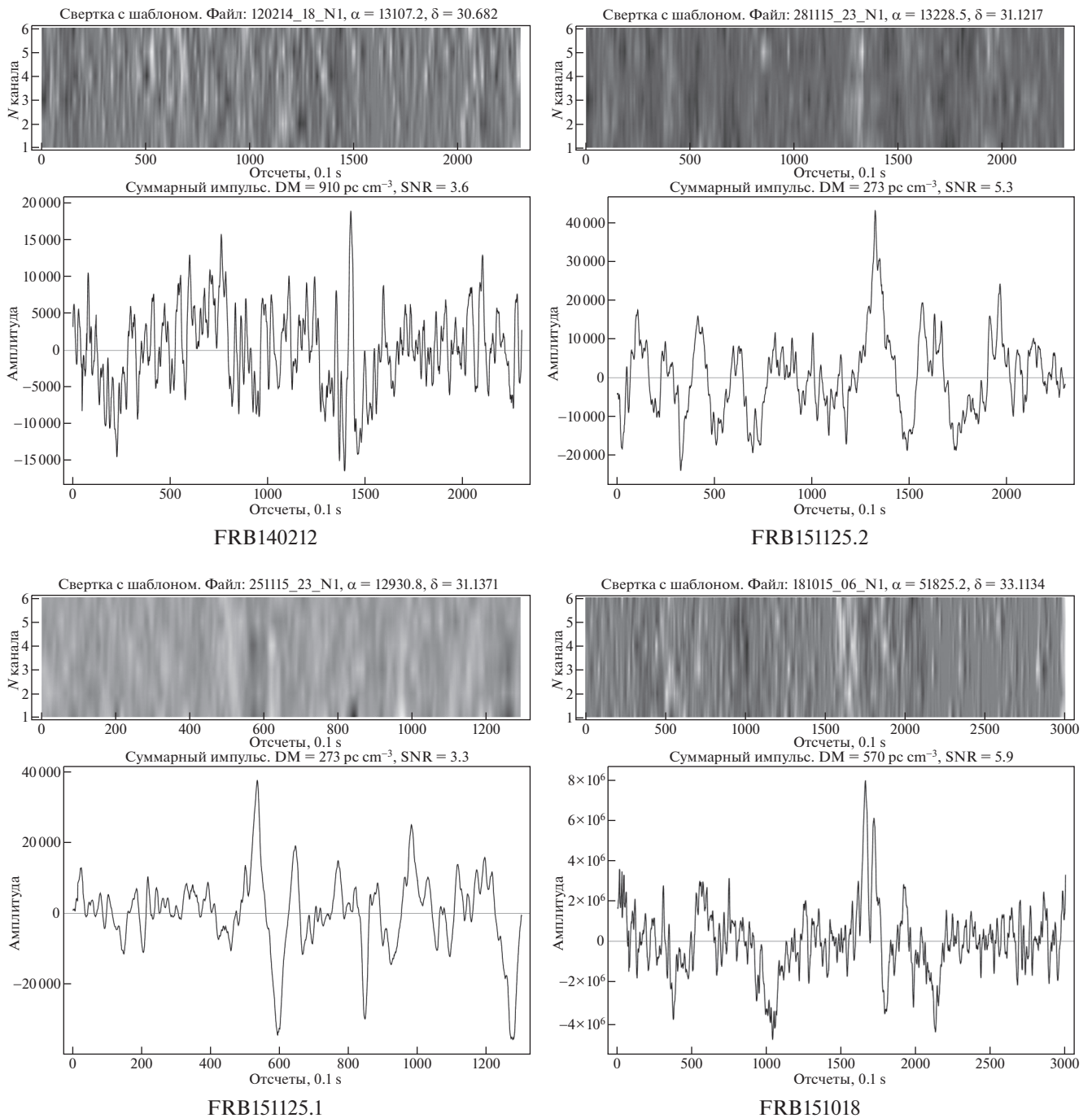


Рис. 11. Динамические спектры и профили импульсов.

6. ОБСУЖДЕНИЕ

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 [30].

Рассеяние быстрых радиовсплесков на неоднородностях межгалактической плазмы уже рассматривалось другими авторами. Для примера можно привести работу Чжу и соавт. [33], где ав-

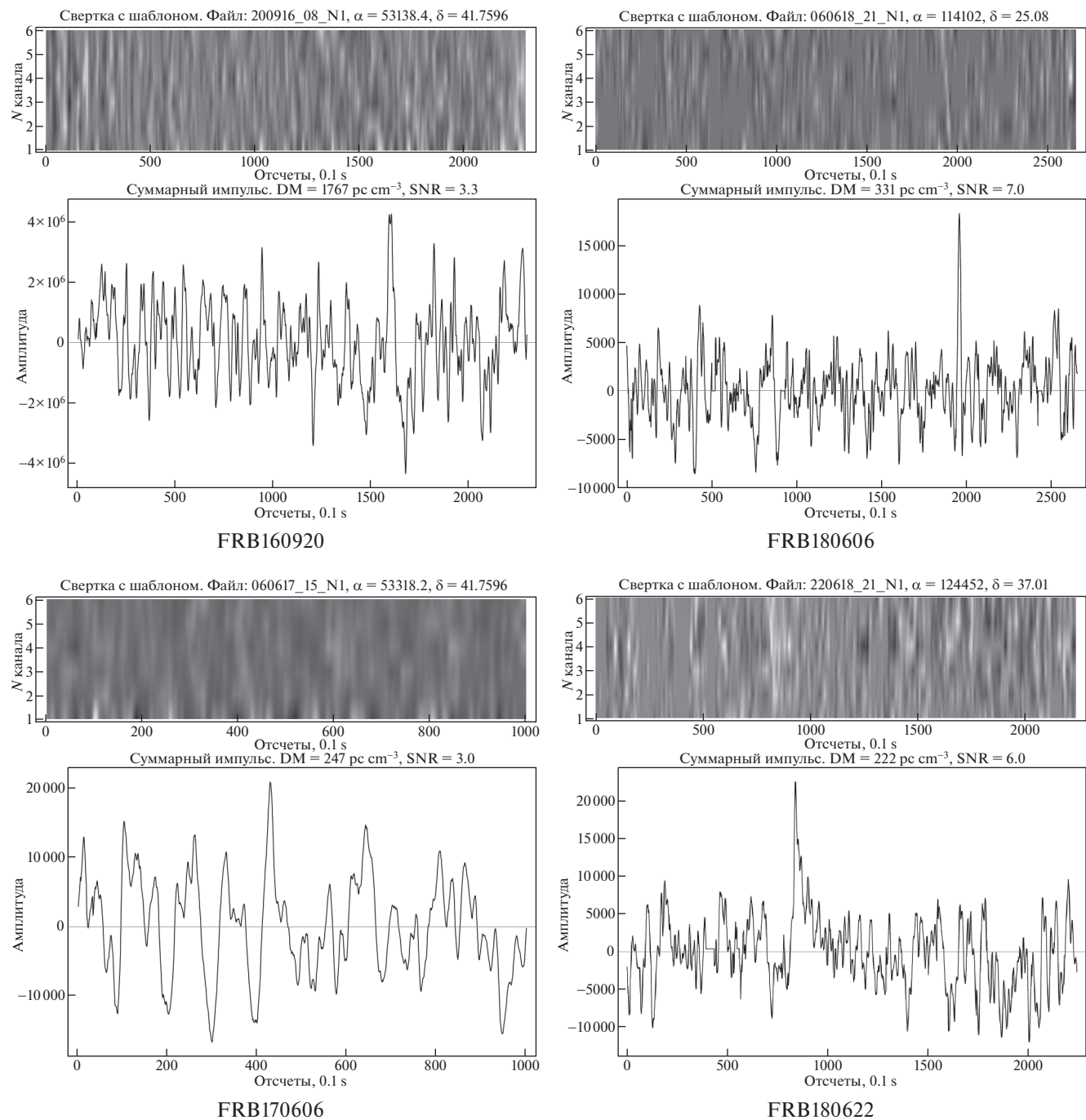


Рис. 12. Динамические спектры и профили импульсов.

торы моделировали рассеяние, задавая разный размер неоднородностей вдоль луча зрения. Они получили зависимость $\tau_{IGM} \sim DM_{IGM}^{1.6-2.1}$, которая не объясняет экспериментальный степенной закон $\tau \sim DM^{0.5}$, хотя и укладывается в разброс данных на графике $\tau-DM$.

В нашей работе полученную взаимосвязь мы объясняем 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 доминирующего влияния на величину рассе-

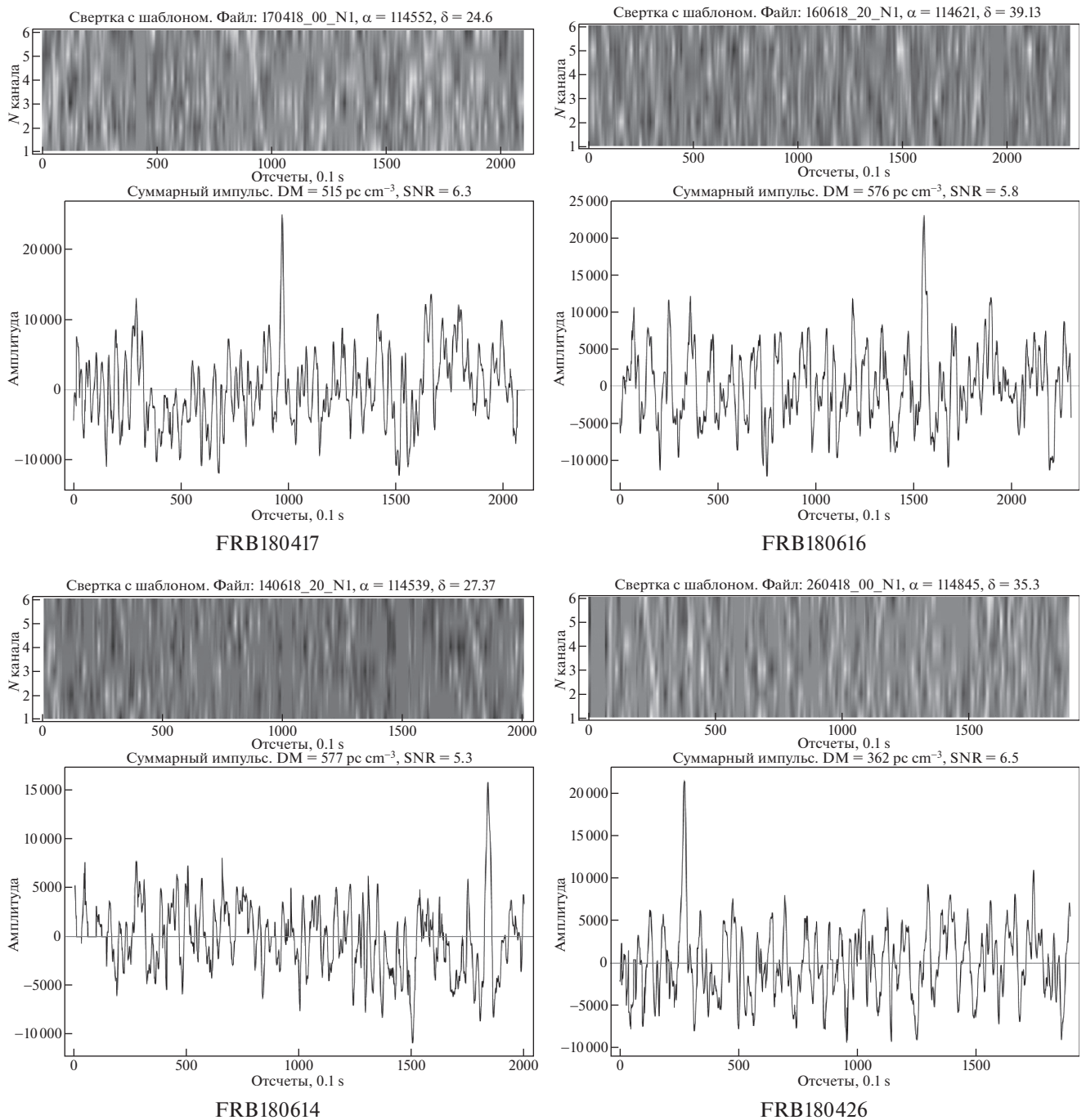


Рис. 13. Динамические спектры и профили импульсов.

ния импульсов несмотря на большие величины DM . Еще раз подчеркнем, что рассеяние в межгалактической среде мы не отменяем, а пренебрегаем им. Величина показателя степени k в экспериментальной зависимости $\tau_{sc}(DM)$ определяется положением рассеивающего экрана вдоль линии “источник–наблюдатель”. Положение рассеивающего экрана мы ассоциируем 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 статье Шоера [14]. 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 концентра-

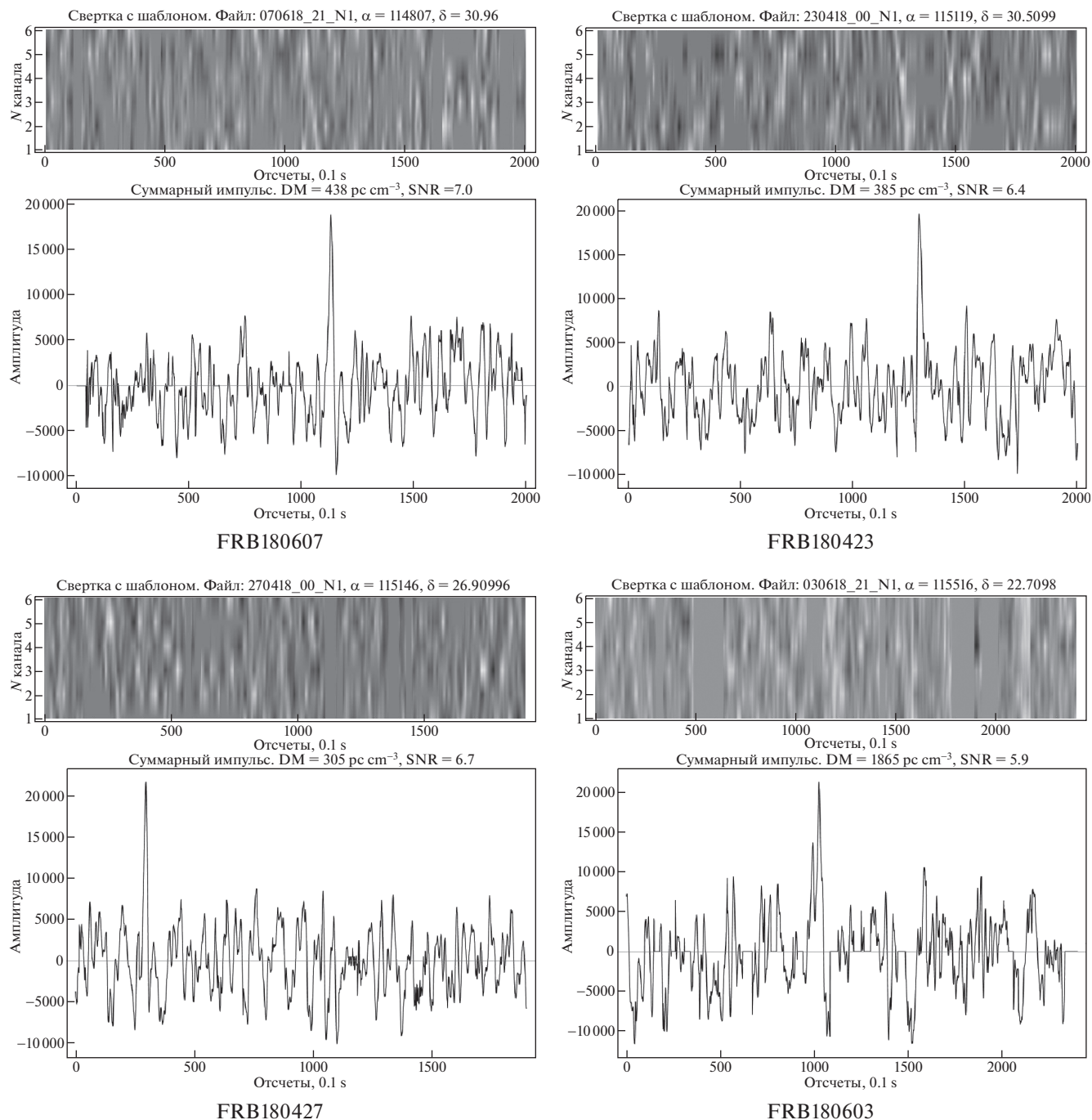


Рис. 14. Динамические спектры и профили импульсов.

ция вещества n_e в галактической и межгалактической среде существенно различается, то зависимость $DM(L)$ не будет линейной.

Мы разделяем измеренную меру дисперсии радиовсплеска DM на следующие компоненты:

$$DM = DM_{\text{MW}} + DM_{\text{halo}} + DM_{\text{EG}} + \frac{DM_{\text{host}}}{1+z}, \quad (5)$$

где DM_{MW} — вклад вещества Галактики, который моделируется на основании наблюдений пульсаров. Оставшаяся сумма $DM_{\text{halo}} + DM_{\text{EG}} + \frac{DM_{\text{host}}}{1+z}$ — это вклад вещества гало DM_{halo} нашей Галактики, DM_{EG} — вклад внегалактического вещества, $\frac{DM_{\text{host}}}{1+z}$ — вклад вещества родительской галактики.

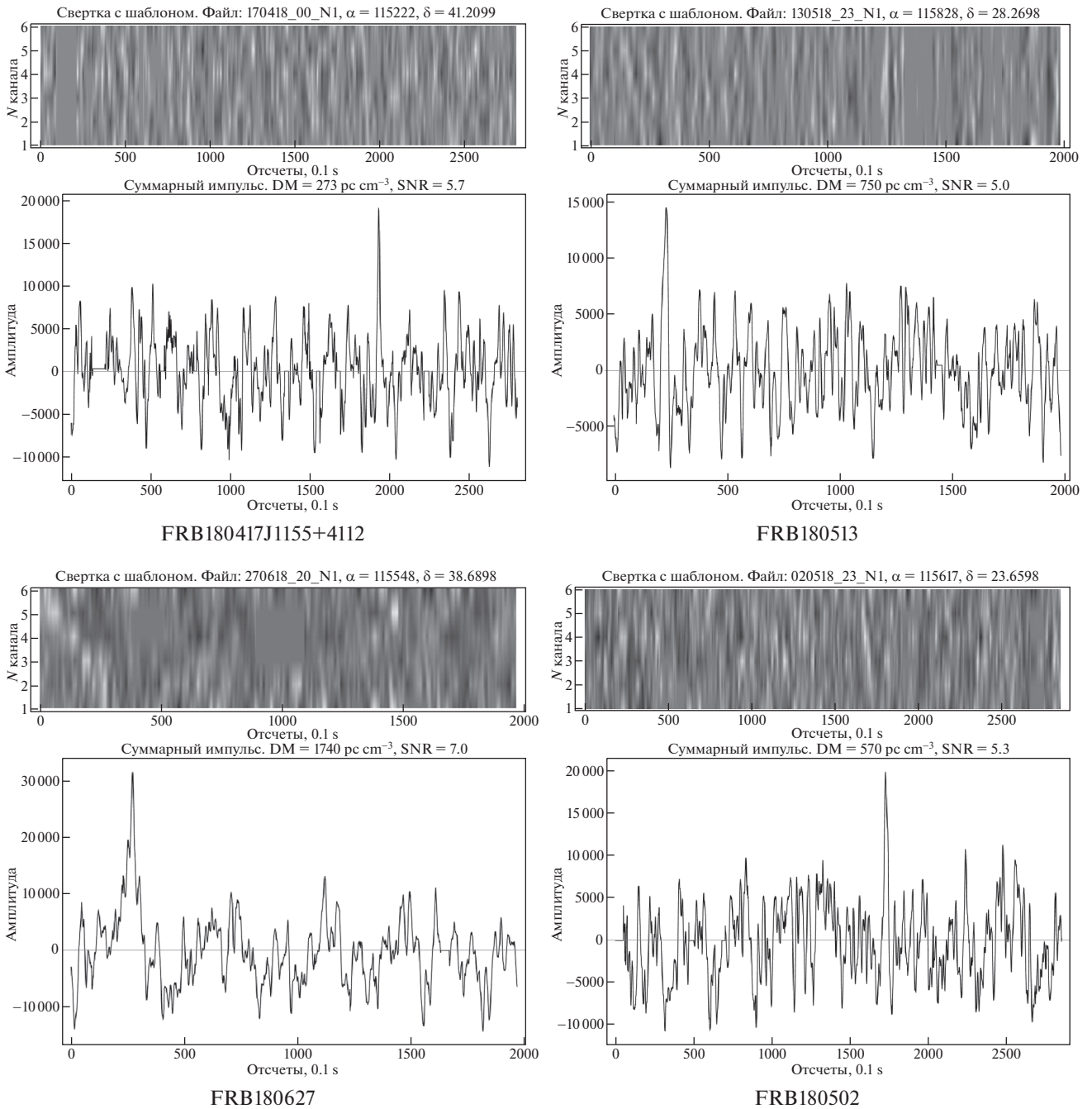


Рис. 15. Динамические спектры и профили импульсов.

ки, z — ее красное смещение. Из всех этих величин хорошо известны только DM и DM_{MW} . Для гало, как уже упоминалось ранее, известна оценка $DM_{halo} \approx 30$ пк см⁻³.

На рис. 6 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 фа-

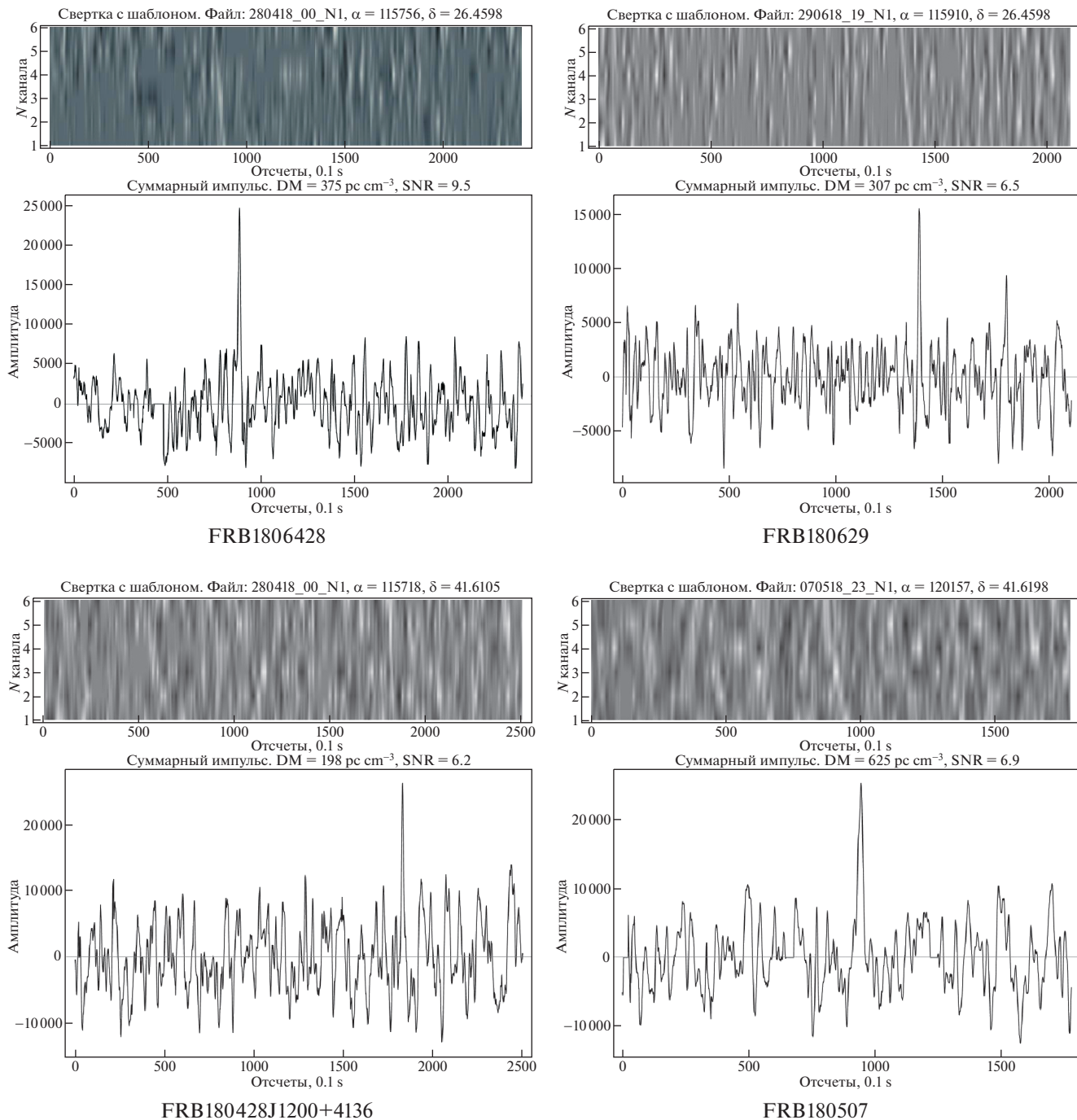


Рис. 16. Динамические спектры и профили импульсов.

зы Δ , который мы связываем с рассеянием τ_{sc} и формой импульса, определяется как

$$\Delta = AB + BC - AC = K \frac{\delta^2}{2} R \left(1 + \frac{R}{r + R}\right), \quad (6)$$

где $\delta = \alpha + \beta$. В соответствии с использованием величин DM в качестве характеристики рассто-

яния в формуле (5) 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.

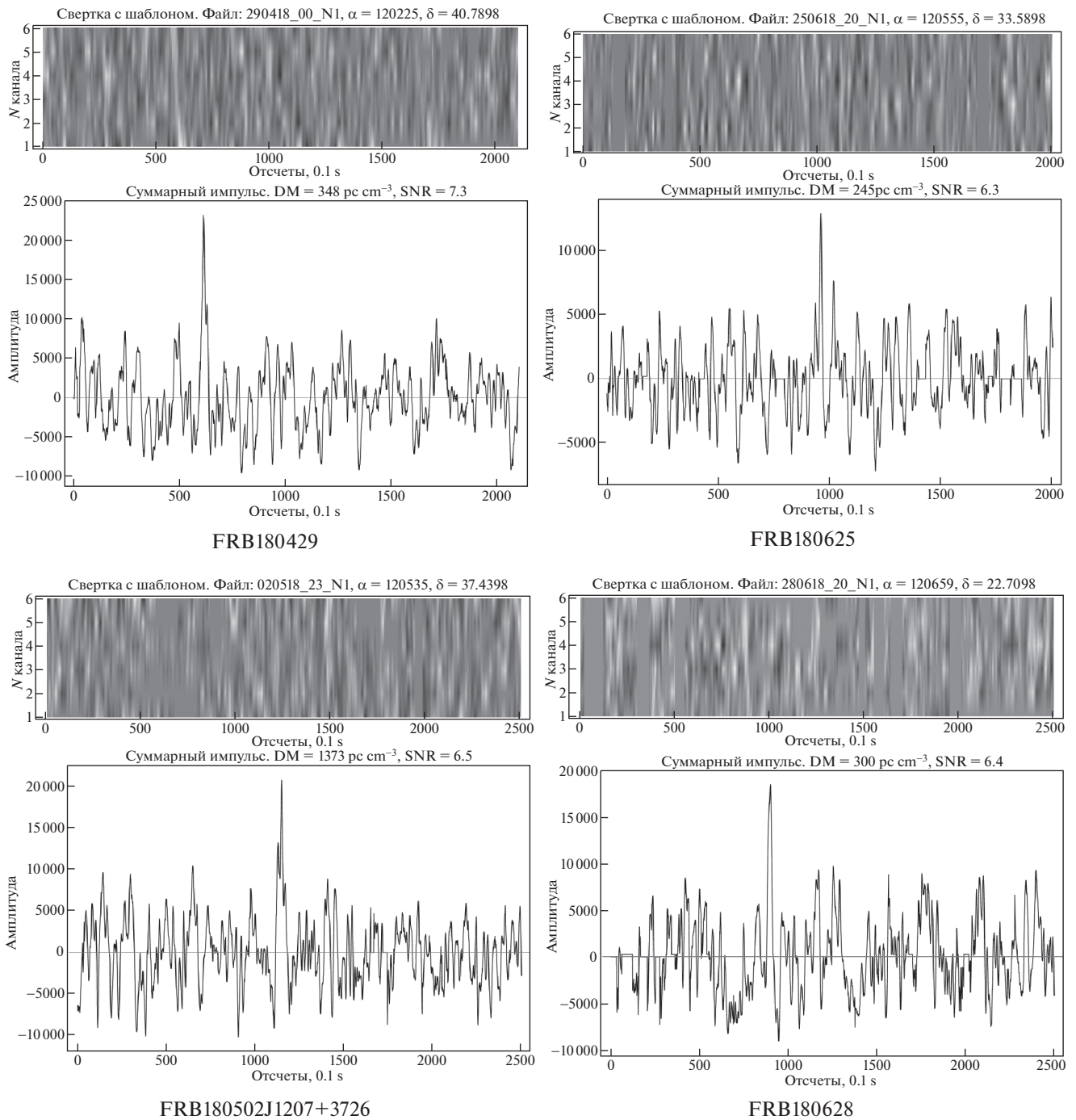


Рис. 17. Динамические спектры и профили импульсов.

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 рис. 7.

Угол отклонения δ задавался как нормально распределенная величина со средним 0 и $\sigma = 10^{-9}$ рад, что по порядку соответствует наблюдательным данным рассеяния пульсаров. Величина K подбиралась экспериментально, чтобы величина рассеяния τ_{sc} при заданных DM и δ соответ-

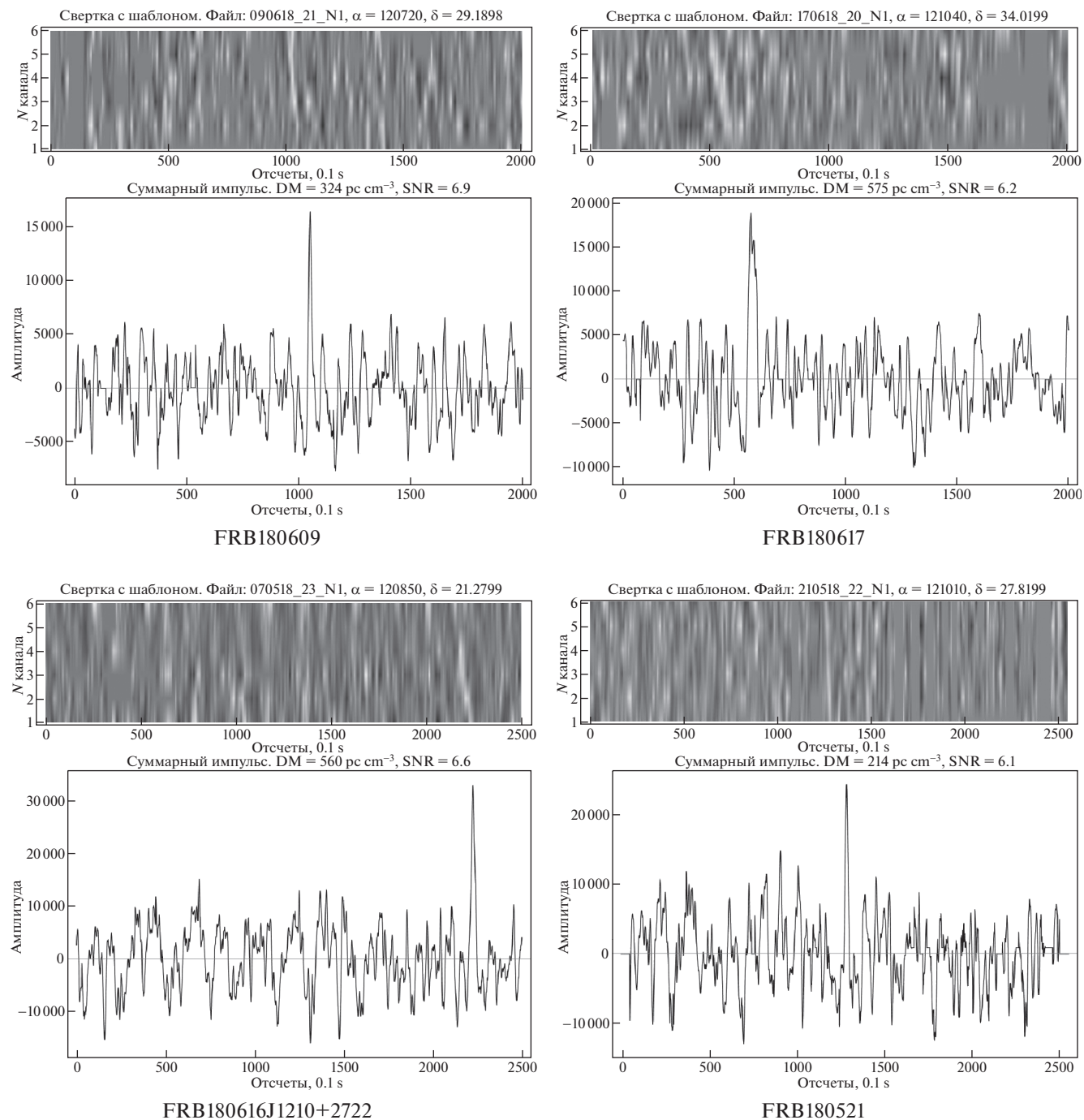


Рис. 18. Динамические спектры и профили импульсов.

ствовала наблюдаемой. Расстояние R задавалось логнормальным распределением с параметрами $\mu = 2.7$ и $\sigma = 0.3$, соответствующими модельному распределению DM_{MW} в нашей Галактике [32, 34], взятой из каталога FRB. Результаты моделирования приведены на рис. 8. Экспериментальный коэффициент $k \sim 0.5$ зависимости $\tau_{sc} \sim DM^k$ со-

ответствует вкладу в DM родительской и нашей галактики на уровне $DM_{MW} + DM_{halo} + \frac{DM_{host}}{1+z} = 105 \text{ пк см}^{-3}$. Для характерной величины $DM_{MW} \sim 45 \text{ пк см}^{-3}$, соответствующей максимуму логнормального распределения, получаем, что суммарный вклад вещества родительской и гало-

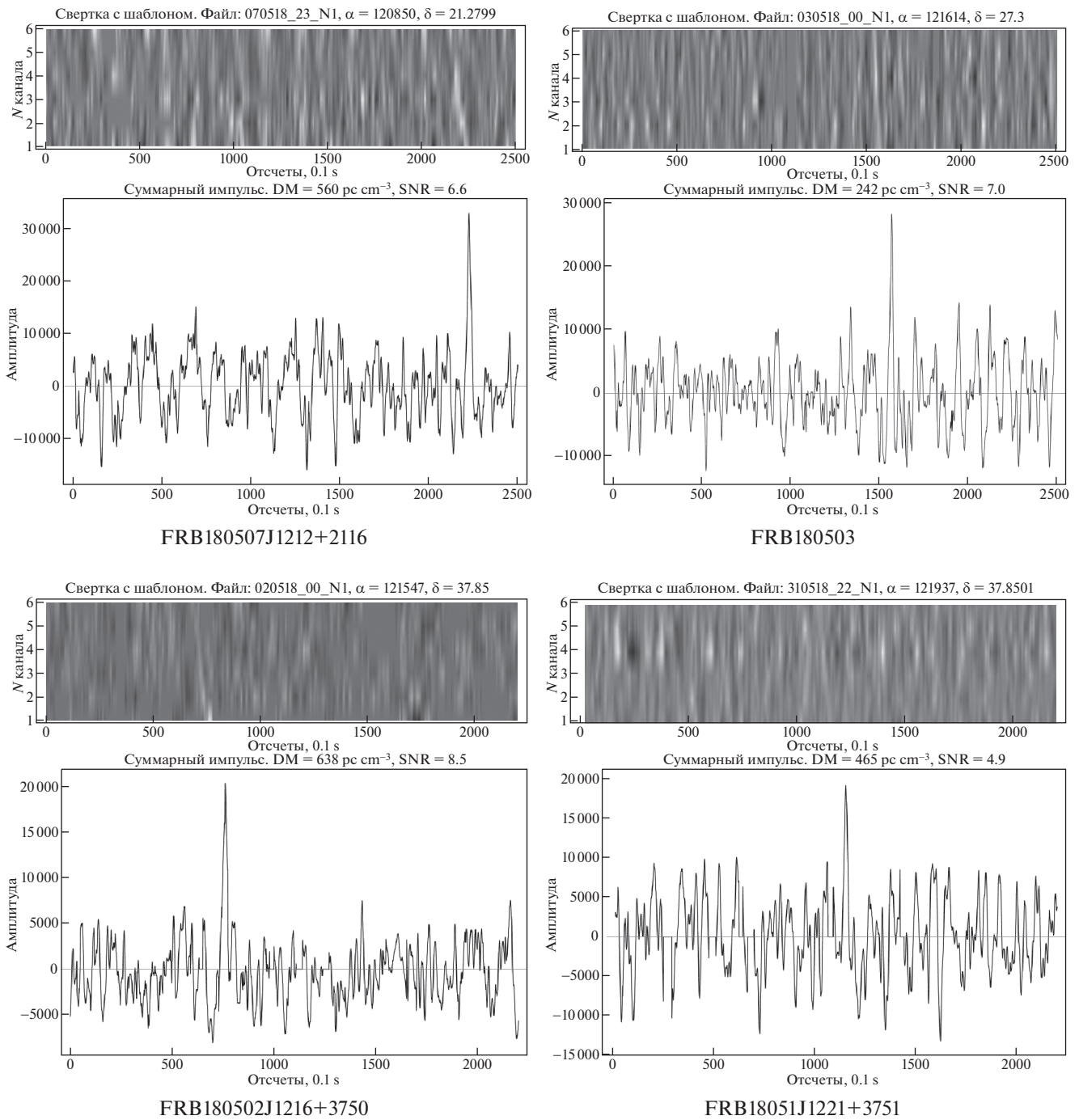


Рис. 19. Динамические спектры и профили импульсов.

нашей Галактики в меру дисперсии составляет величину $DM_{\text{halo}} + \frac{DM_{\text{host}}}{1+z} \sim 60 \text{ пк см}^{-3}$, что соответствует принятой в настоящее время величине $DM_{\text{halo}} \sim 30 \text{ пк см}^{-3}$ [13] при условии равенства вклада вещества гало нашей и вещества родительской галактики.

Специально отметим, что на факт малого числа рассеивающих экранов ≤ 3 по пути распространения быстрых радиовсплесков независимо указывает форма импульсов, наблюдаемых на частоте 1.4 ГГц, которая для подавляющего числа радиовсплесков близка к затухающей экспоненте. Специально проведенное математическое

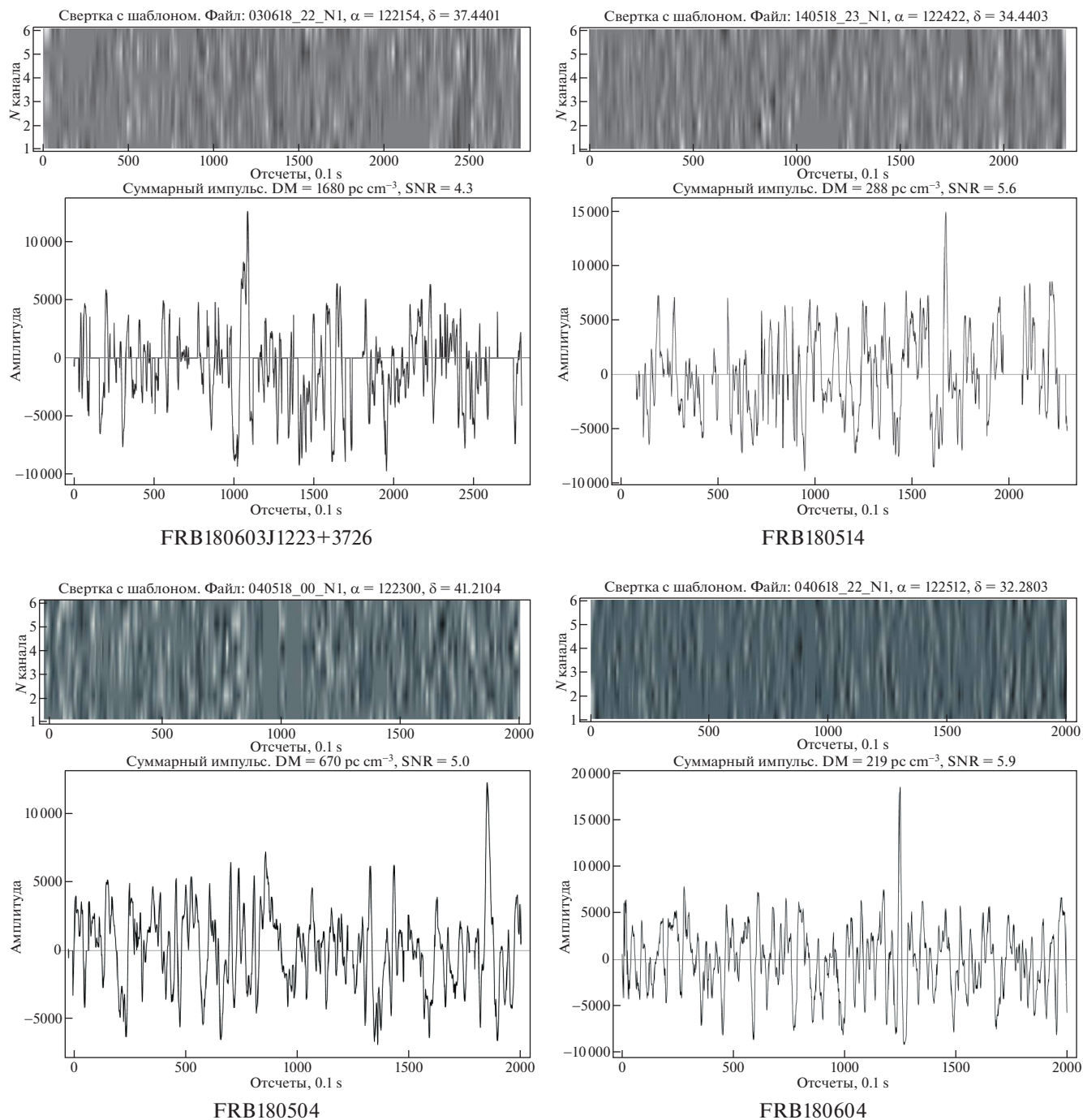


Рис. 20. Динамические спектры и профили импульсов.

моделирование ясно показывает, как меняется форма импульса при прохождении все большего количества рассеивающих экранов. В полном соответствии с центральной предельной теоремой форма импульса при увеличении числа экранов стремится к гауссиане, что показано на рис. 9.

Анализ зависимостей $\log N - \log S$ на двух частотах показывает, что в целом эти зависимости соответствуют друг другу и ни одна из них не следует в точности закону $S^{-3/2}$. Если предположить, что наблюдаемые выборки импульсов статистически эквивалентны, то можно вывести их сред-

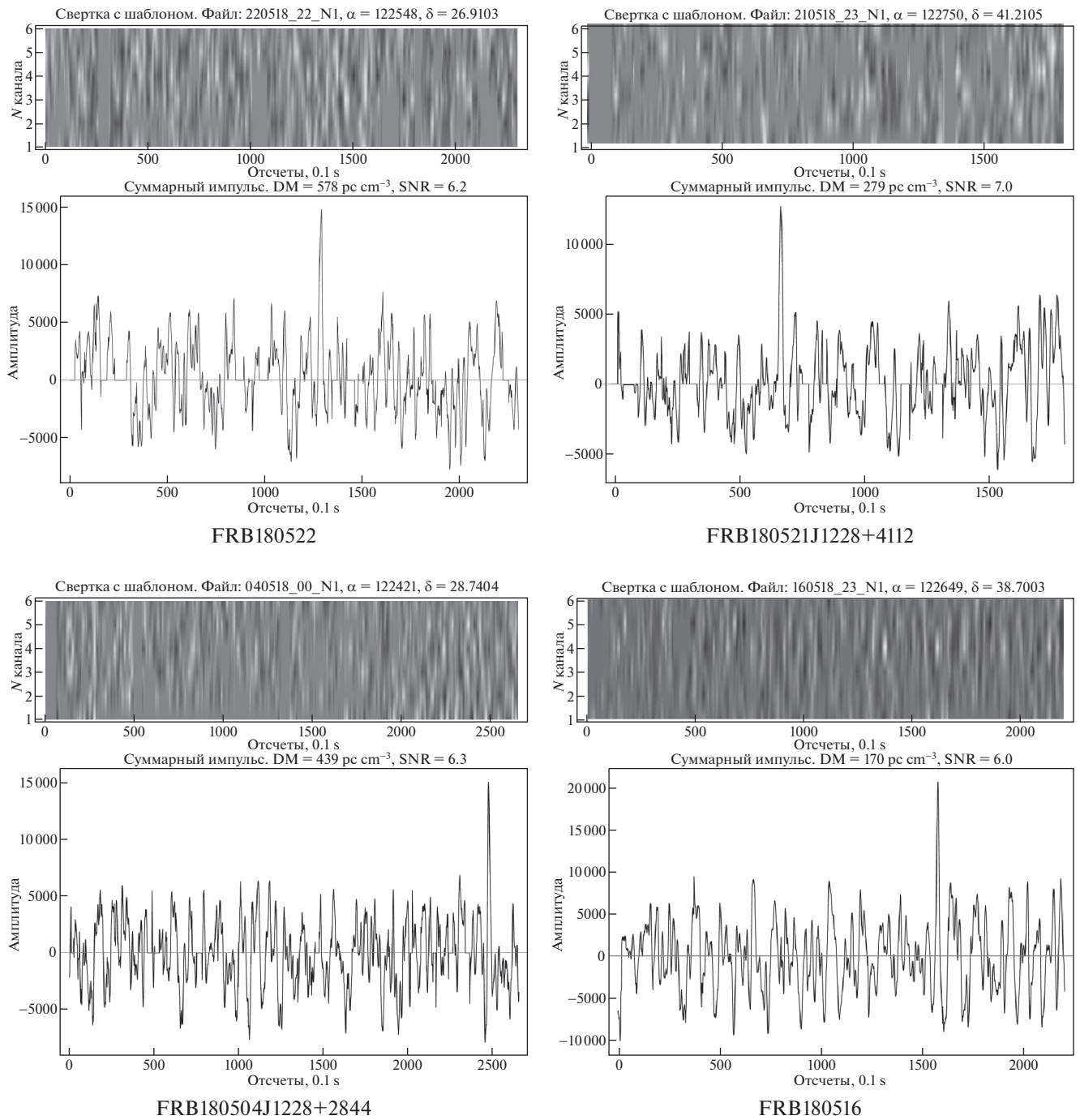


Рис. 21. Динамические спектры и профили импульсов.

нестатистический 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 $\alpha = -1.8 \div -1.5$.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Попытки обнаружить радиовсплески на низких частотах предпринимались неоднократно многими исследователями за рубежом. Эти наблюдения можно кратко охарактеризовать как

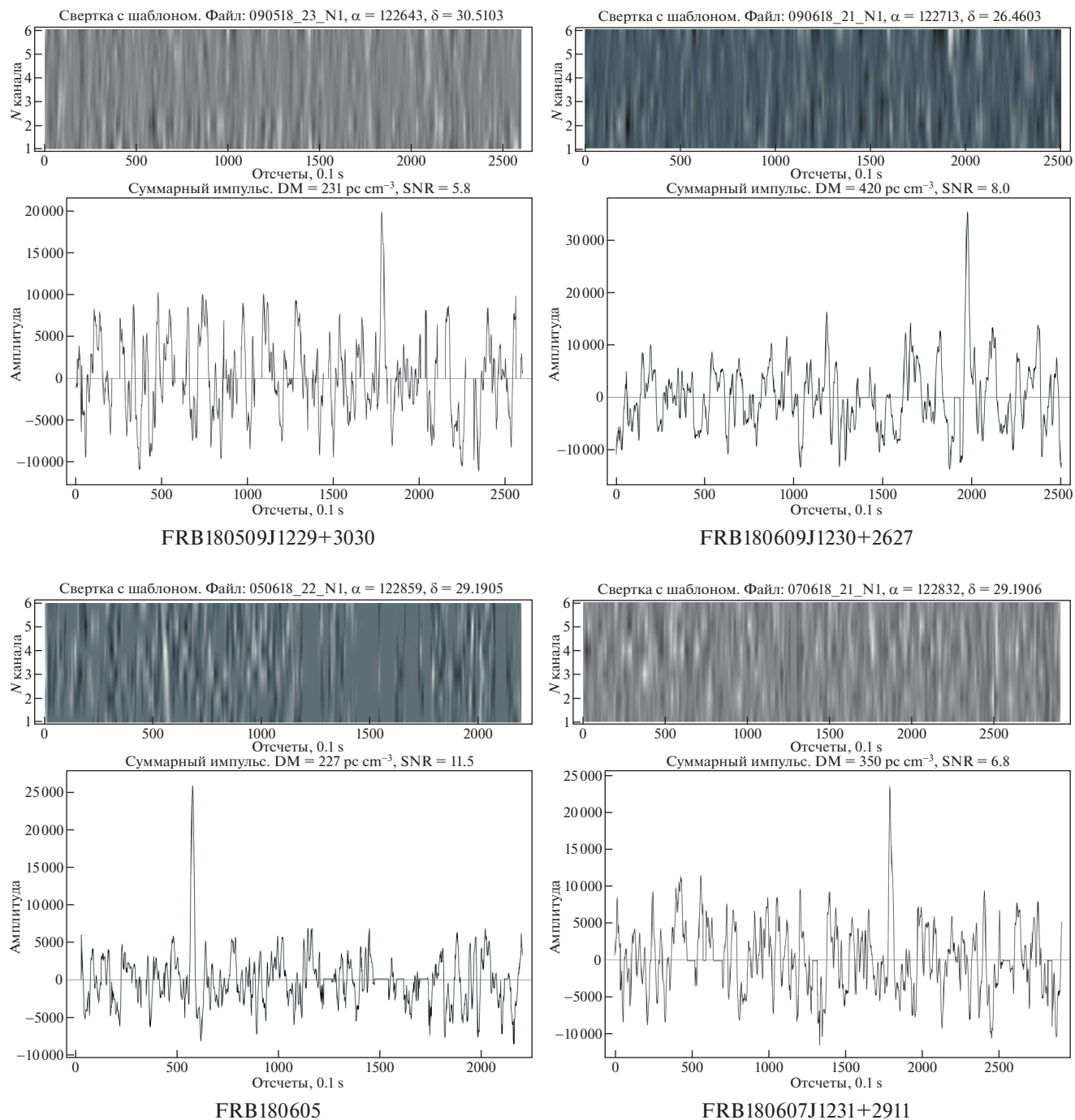


Рис. 22. Динамические спектры и профили импульсов.

безуспешные, так как на частотах ниже 300 МГц никаких радиовсплесков обнаружено не было. Это является для Пипия с соавт. [35] поводом прокомментировать результаты, представленные в работах [10, 11]. В связи с этим пришлось провести специальное расследование и тщательно проанализировать зарубежные наблюдения, посвя-

щенные поиску быстрых радиовсплесков, чтобы понять причину их необнаружения.

Была составлена табл. 3, в которой сведены наблюдательные параметры проведенных обзоров и специальных наблюдений. В ней приведена наблюдательная частота (МГц), полоса приема

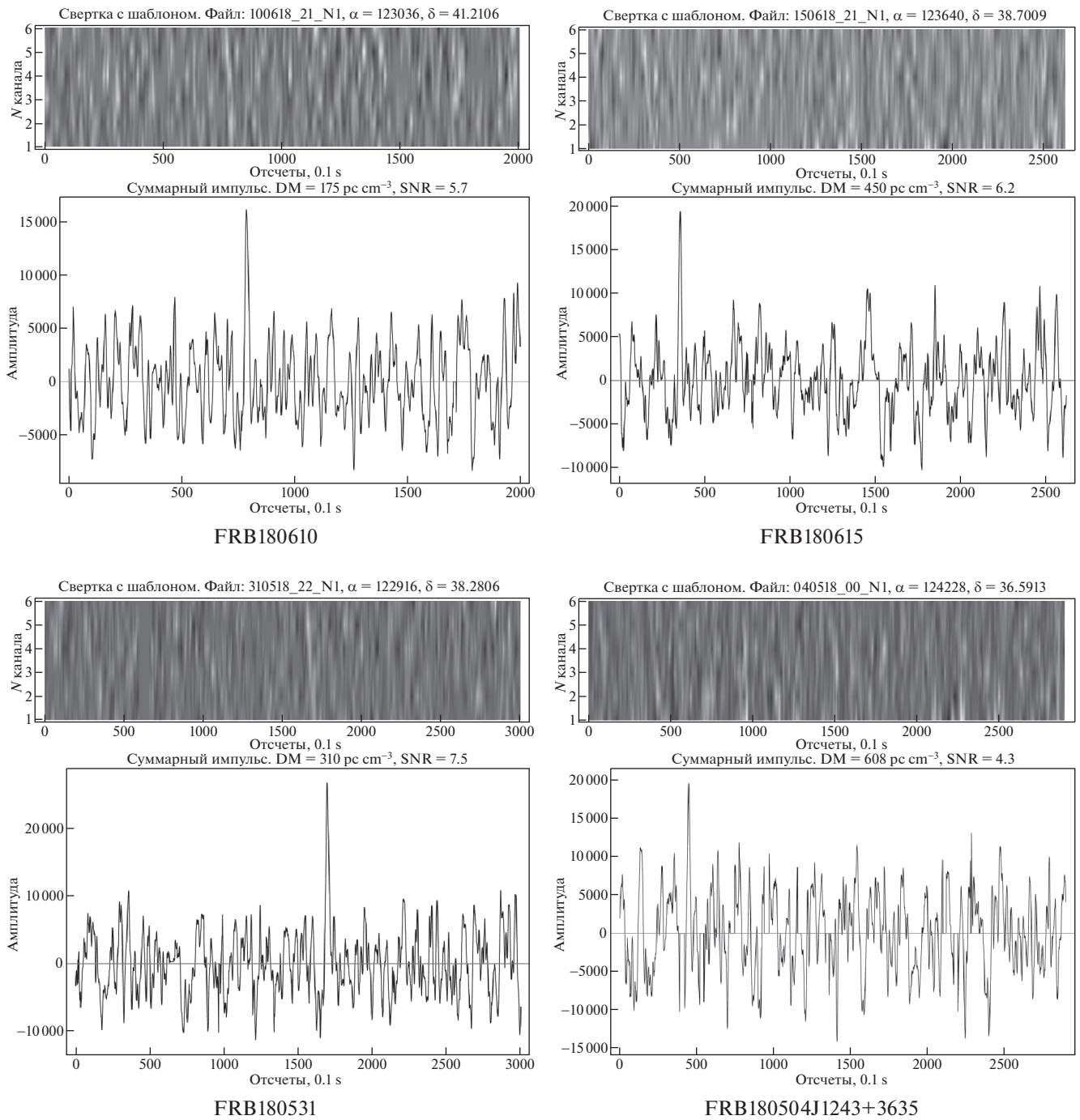


Рис. 23. Динамические спектры и профили импульсов.

(МГц), интервал выборки (с), 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 ~50 000 ч на порядки превышает

все проводимые ранее наблюдения (было проанализировано порядка 6×10^5 отдельных сканов). Из этого параметра и общего количества обнаруженных на БСА импульсов легко можно оценить, что на нашей антенне для обнаружения одного импульса требуется порядка 10^3 часов или 10^4 ска-

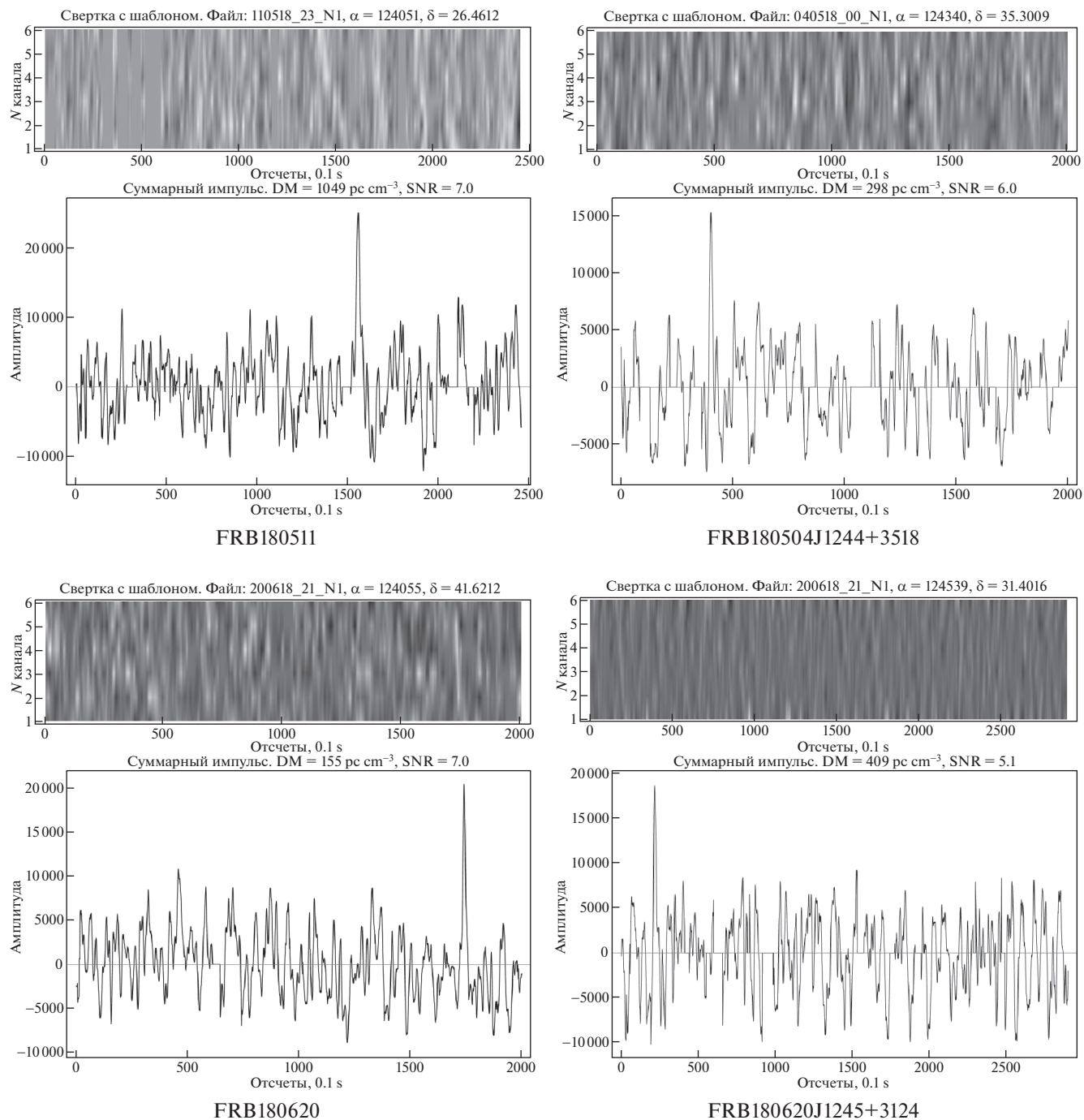


Рис. 24. Динамические спектры и профили импульсов.

нов. Другой параметр, который сильно отличает радиотелескоп БСА от других инструментов, — пороговая чувствительность радиотелескопа (Ян). Во многих работах приводится предельный флюэнс (Ян мс). Он пересчитывался в пороговую чувствительность, исходя из задаваемого времени выборки или длительности импульса. Чувстви-

тельность радиотелескопов зарубежных коллег на порядки хуже чувствительности БСА.

Дополнительно заметим, что если не удастся обнаружить импульсы хорошо опробованными средствами, то это значит, что пришло время применить нестандартные методы, как, например, применяемый авторами данной работы кор-

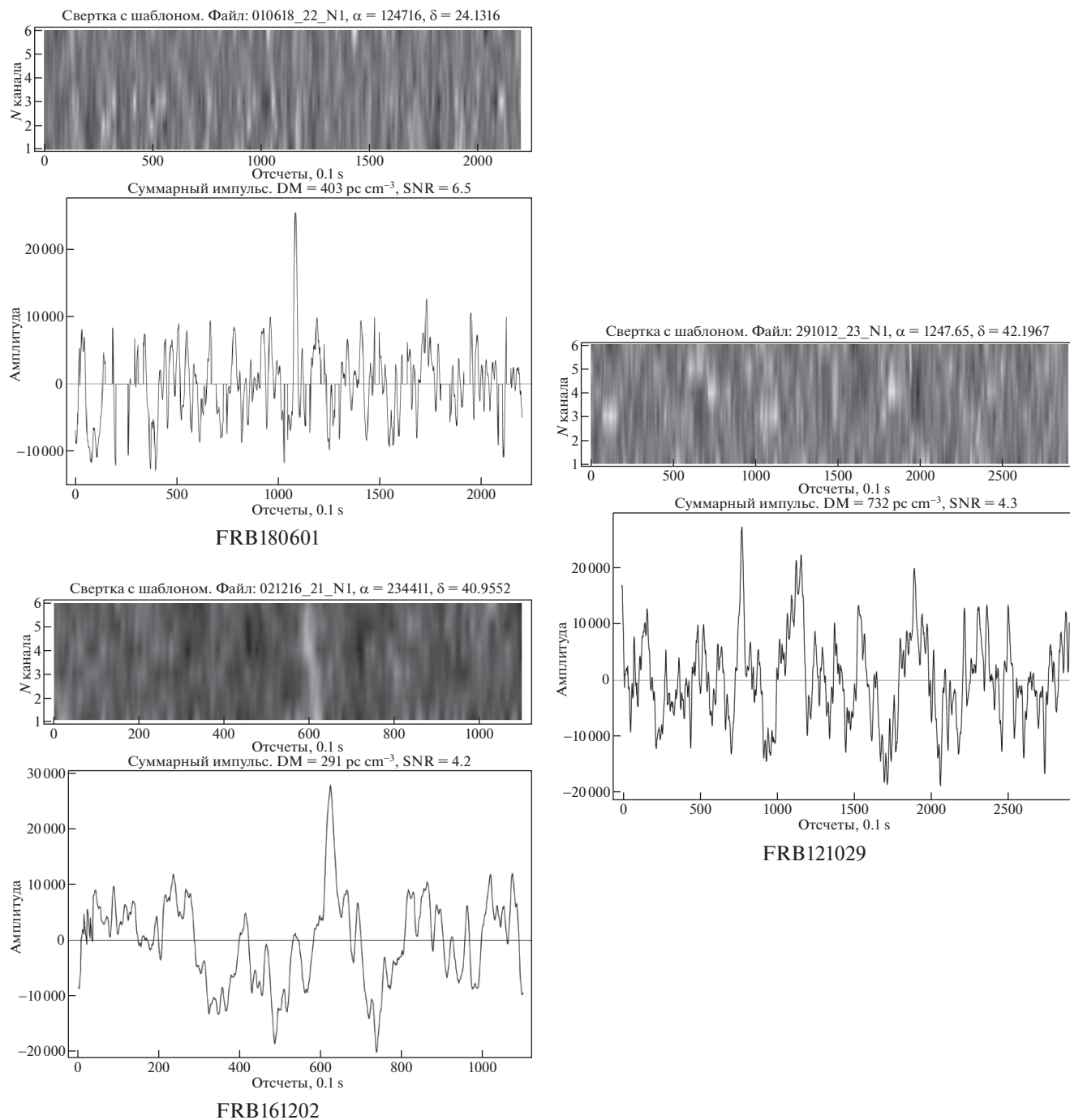


Рис. 25. Динамические спектры и профили импульсов.

реляционный прием, позволяющий повысить сигнал/шум еще в несколько раз (хотя отметим, что корреляционный прием является также стандартным методом в радиолокации). Уверены, что когда чувствительность и продолжительность наблюдений зарубежных низкочастотных радиотелескопов достигнут уровня БСА, то быстрые ра-

диовсплески будут обнаружены и на этих инструментах.

Основные результаты данной работы:

1. Форма распределения DM , построенная для обнаруженных импульсных сигналов на 111 МГц и быстрых радиовсплесков на 1400 МГц, в пределах погрешности совпадает и описывается фор-

мулой для логнормального распределения с параметрами $\mu = 6.2$, $\sigma = 0.7$.

2. Построена зависимость рассеяния 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 более слаба 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. Величина рассеяния на 111 и 1400 МГц описывается законом $\tau_{sc}(f) \sim f^{-1.9 \pm 0.7}$ и, таким образом, отличается от зависимости f^{-4} , выведенной для пульсаров.

5. Сделана оценка суммарной составляющей $DM_{\text{halo}} + \frac{DM_{\text{host}}}{1+z} \sim 60$ пк см⁻³, 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.

6. По зависимостям $\log N - \log S$, построенным для обнаруженных импульсов на 111 и быстрых радиовсплесков на 1400 МГц, в предположении равенства статистических свойств этих выборок выведен средний спектральный индекс $\alpha = -0.63 \pm 0.20$.

7. Анализ формы зависимостей $\log N - \log S$ на двух частотах показывает, что при $F_{111 \text{ МГц}} > 200$ Ян · мс и $F_{1.4 \text{ ГГц}} > 50$ Ян · мс обе они следуют закону $S^{-3/2}$.

8. 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 $S^{-3/2}$ кривых $\log N - \log S$ 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *J. Fuller, Ch. D. Ott*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **450**, 71 (2015).
2. *J. I. Katz*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. Lett. **471**, 95 (2017).
3. *Z. G. Dai, J. S. Wang, X. F. Wu, Y. F. Huang*, Astrophys. J. **829**, id. 27 (2016).
4. *B. Margalit, E. Berger, B. D. Metzger*, Astrophys. J. **886**, id. 110 (2019).
5. *Ya. N. Istomin*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **478**, 4348 (2018).
6. *P. Scholz*, CHIME/FRB Collaboration, The Astronomer's Telegram, No. 13681 (2020).
7. CHIME/FRB Collaboration, *M. Amiri, K. Bandura et al.*, Nature **566**, 230 (2018).
8. *K. W. Bannister, R. M. Shannon, J. P. Macquart et al.*, Astrophys. J. Lett. **841**, L12 (2017).
9. *A. E. Rodin, V. V. Oreshko, V. A. Samodurov*, Astronomy Reports **61**, 30 (2017).
10. *B. A. Федорова, А. Е. Родин*, Астрон. журн. **96**, 41 (2019).
11. *B. A. Федорова, А. Е. Родин*, Астрон. журн. **96**, 883 (2019).
12. *J. M. Cordes, R. S. Wharton, L. G. Spitler et al.*, arXiv:1605.05890v1 (2016).
13. *K. Dolag, B. M. Gaensler, A. M. Beck, V. C. Beck*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **451**, 4277 (2015).
14. *P. A. G. Scheuer*, Nature **218**, 920 (1968).
15. *B. J. Rickett*, Nature **221**, 158 (1969).
16. *A. Hewish, S. J. Bell, J. D. H. Pilkington, P. F. Scott, R. A. Collins*, Nature **217**, 709 (1968).
17. *B. J. Robinson, B. F. C. Cooper, F. F. Gardiner, R. Wielebinski, T. L. Landecker*, Nature **218**, 1143 (1968).
18. *Yu. I. Alekseev, V. V. Vitkevich, V. F. Zhuravlev, Yu. P. Shitov*, Doklady Akademiia Nauk SSSR, Ser. Mat. Fiz. **187**, 1019 (1969).
19. *J. M. Cordes, J. M. Weisberg, V. Boriakoff*, Astrophys. J. **288**, 221 (1985).
20. *M. J. Sutton*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **155**, 51 (1971).
21. *N. D. Ramesh Bhat, James M. Cordes, F. Camilo et al.*, Astrophys. J. **605**, 759 (2004).
22. *D. R. Lorimer, A. Karastegiou, M. A. MacLaughlin, S. Jonson*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **436**, L5 (2013).
23. *A. Karastegiou, J. Chennamangalam, W. Armour, et al.*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **452**, 1254 (2015).
24. *W. Zhu, L.-L. Feng, F. Zhang*, Astrophys. J. **865**, 147 (2018).
25. *А. Д. Кузьмин, Б. Я. Лосовский, К. А. Ланаев*, Астрон. журн. **84**, 685 (2007).
26. *N. Oppermann, L. D. Connor, U.-L. Pen*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **461**, 984 (2016).
27. *J. P. Macquart, R. D. Ekers*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **474**, 1900 (2018).

28. *С. Б. Попов, К. А. Постнов, М. С. Пиширков*, УФН **188**, 1063 (2018).
29. *В. В. Орешко, Г. А. Латышев, И. А. Алексеев и др.*, Труды ИПА **24**, 80 (2012).
30. *E. Petroff, L. Houben, K. Bannister, et al.*, Publ. Astron. Soc. Austral. **33**, 7 (2016).
31. *E. Petroff, J. W. T. Hessels, D. R. Lorimer*, Astron. and Astrophys. Rev. **27**, 4 (2019).
32. *J. M. Yao, R. N. Manchester, N. Wang*, Astrophys. J. **835**, 32 (2017).
33. *W. Zhu, L.-L. Feng*, Astrophys. J. **906**, 957 (2021).
34. *J. M. Cordes, T. J. W. Lazio*, arXiv:astro-ph/0301598 (2003).
35. *M. Pilia, M. Burgay, A. Possenti, et al.*, Astrophys. J. Lett. **896**, L40 (2020).
36. *M. Sokolowski, N. D. Bhat, J. P. Macquart, et al.*, Astrophys. J. Lett. **867**, L12 (2018).
37. *S. J. Tingay, C. M. Trott, R. B. Wayth, et al.*, Astron. J. **150**, 199 (2015).
38. *P. Chawla, B. C. Andersen, M. Bhardwaj, et al.*, Astrophys. J. Lett. **896**, L41 (2020).
39. *L. J. M. Houben, L. G. Spitler, S. ter Veen, et al.*, Astron. and Astrophys. **623**, A42 (2019).