

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra22.04.284>

УДК 524.7

PACS numbers: 95.85.Sz,
98.70.Dk

В. А. САМОДУРОВ^{1,2}, А. С. ПОЗАНЕНКО³, М. О. ТОРОПОВ⁴,
А. Е. РОДИН¹, Д. Д. ЧУРАКОВ⁵, Д. В. ДУМСКИЙ^{1,2},
Е. А. ИСАЕВ^{1,2}, А. Н. КАЗАНЦЕВ²,
С. В. ЛОГВИНЕНКО², В. В. ОРЕШКО²

¹ Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики”,
ул. Мясницкая, 20, г. Москва, 101000, Россия
E-mail: vsamodurov@hse.ru, rodin@prao.ru, dumsky@prao.ru, eisaev@hse.ru

² Пушинская радиоастрономическая обсерватория АКЦ ФИАН,
г. Пушкино, Московская обл., 142290, Россия
E-mail: oreshko@prao.ru, kaz.prao@bk.ru, lsv@prao.ru

³ Институт космических исследований РАН,
ул. Профсоюзная, 84/32, г. Москва, 117997, Россия
E-mail: apozenen@iki.rssi.ru

⁴ ООО “Автоматизация Бизнеса”,
проезд Серебрякова, 14, строение 1, г. Москва, 129343, Россия
E-mail: mt1710@yandex.ru

⁵ Центральный научно-исследовательский институт машиностроения,
ул. Пионерская, 4, г. Королев, Московская обл., 141070, Россия
E-mail: dmitr22@list.ru

ПОИСК РАДИО-ОТКЛИКОВ НА ГРАВИТАЦИОННО-ВОЛНОВЫЕ СОБЫТИЯ LIGO/VIRGO В ДАННЫХ ОБЗОРА БСА ФИАН НА 110 МГц

Предмет и цель работы: Одной из наиболее интересных целей для астрономов являются мультдиапазонные наблюдения космических объектов, причем не только в различных диапазонах спектра, но и с использованием других источников информации, например, исследования объектов, испускающих гравитационные волны.

Методы и методология: Радиотелескоп БСА ФИАН имеет многолучевую диаграмму, способную круглосуточно наблюдать в 96 лучах в диапазоне склонений от -8° до $+42^\circ$ в частотном диапазоне $109 \div 111.5$ МГц. Число частотных полос – от 6 до 32, постоянная времени – от 0.1 до 0.0125 с.

Результаты: Одной из научных целей при обработке этих данных можно считать поиск откликов на внегалактические транзиентные события, которые априори должны иметь большие дисперсионные задержки (мера дисмерсии $DM \sim 100 \div 2000$ пк · см⁻³). В качестве примеров таких событий можно назвать быстрые радиовсплески (FRB – fast radio bursts), которые обнаружены пока только в радиодиапазоне, причем на частотах ~ 1 ГГц и выше, отклики на гамма-всплески (GRB – gamma-ray bursts) в гамма и рентгеновском диапазоне и, наконец, возможные отклики на гравитационные события, зафиксированные детекторами LIGO-Virgo. Последние взяты в представленной работе как основа для отработки методики выделения подобных событий в радиоданных БСА. Мы приводим оценки возможного потока излучения (верхние пределы) для нескольких временных масштабов возможных транзиентных радиоисточников, сопровождающих транзиентные гравитационно-волновые события GW150914, GW151226, LVT151012 и GW170104, зарегистрированные детекторами LIGO.

Заключение: Установлено, что ничего ярче 50000 Ян в северной полусфере неба на частоте 110 МГц в момент гравитационных событий не наблюдалось. Сделаны также оценки энерговыделения в длинноволновом радиодиапазоне: энергия низкочастотного диапазона $\leq 10^{44}$ эрг, при этом отношение энергии низкочастотного диапазона к энергии гравитационного события $< 10^{-10}$.

Ключевые слова: радионаблюдения, гравитационное событие, методика поиска

1. Введение

В 2015 г. были зарегистрированы гравитационно-волновые события GW150914, GW151226 [1] и вероятный кандидат LVT151012 [2]. В табл. 1

приведены некоторые характеристики этих событий по данным работ [1] и [3], а на рис. 1 отмечены их области локализации. Наиболее мощное событие – GW150914, GW151226 имеет близкие характеристики, а данные о кандидате LVT151012 отличаются меньшей достоверностью.

Опубликованы карты локализации и результаты поисков послесвечения в оптическом диапа-

© В. А. Самодуров, А. С. Позаненко, М. О. Торопов,
А. Е. Родин, Д. Д. Чураков, Д. В. Думский, Е. А. Исаев,
А. Н. Казанцев, С. В. Логвиненко, В. В. Орешко, 2017

Таблица 1. Время регистрации и характеристики гравитационно-волновых событий

Событие	Время UTC	Прямое восхождение (наведение БСА ФИАН)	Отношение сигнал/шум	Локализация, квадратные градусы	Расстояние, Мпк
GW150914	09:50:45 14.09.2015	11 ^h 53 ^m 31 ^s	23.7	230	420
LVT151012	09:54:43 12.10.2015	13 ^h 47 ^m 53 ^s	9.7	1600	1000
GW151226	03:38:54 26.12.2015	12 ^h 26 ^m 44 ^s	13.0	850	440
GW170104	10:11:59 04.01.2017	19 ^h 39 ^m 21 ^s	13.0	1200	880

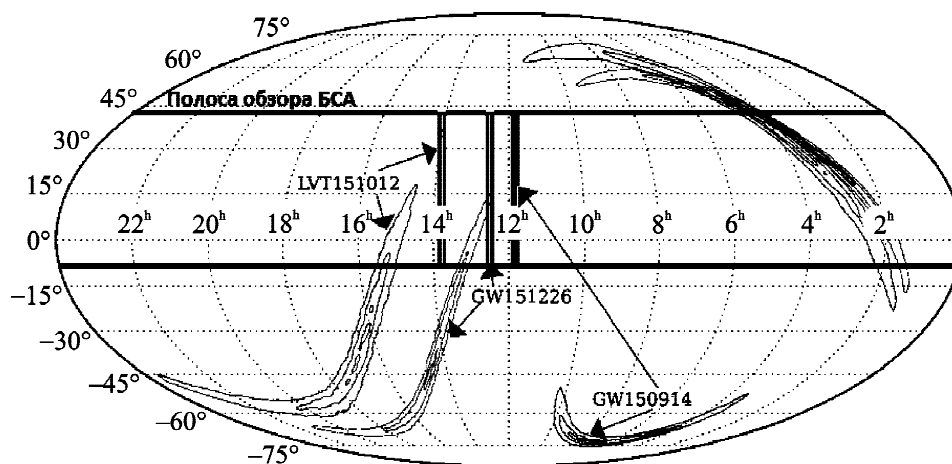


Рис. 1. Схема наблюдения областей локализации трех гравитационных всплесков антенной БСА. Узкие прямоугольники для соответствующих событий (указаны стрелками) – положения поля зрения радиотелескопа БСА ФИАН в моменты событий GW150914, GW151226 и LVT151012

зоне [4] и гамма-диапазоне [5] – поиски не дали результатов. Для GW150914 проведены также радионаблюдения с целью поиска радиосвечения в дециметровом диапазоне на радиоинтерферометре ASCAP и в метровом диапазоне на радиотелескопах LOFAR (149 МГц) и MWA (118 МГц) [6, 7]. Для радионаблюдений послесвечений в указанной работе [6] получены верхние оценки: около 10 мЯн на частотах ~ 1 ГГц (ASCAP) и ~ 150 МГц (LOFAR) и 200 мЯн на более низкой частоте ~ 100 МГц (MWA). При этом можно отметить, что указанные наблюдения компонентов гравитационно-волновых событий в электромагнитном диапазоне в режиме послесвечения, вообще говоря, могли и не захватить зону всплеска (это касается в том числе наблюдений на LOFAR).

Однако оценок яркости в радиодиапазоне в момент самого события, насколько нам известно, не производилось. В нашей работе на основании данных непрерывного мониторинга на радиотелескопе БСА ФИАН на частоте $109.0 \div 111.5$ МГц

в полосе склонений $\delta = -8^\circ \div +42^\circ$ проведена первая попытка оценить плотность потока излучения в радиодиапазоне на указанных частотах в моменты гравитационно-волновых событий GW150914, GW151226 и LVT151012, GW170104. Выше на рис. 1 показано взаимное расположение первых трех гравитационных событий и положения диаграмм направленности БСА в момент их генерации.

2. Инструмент и аппаратура

Пушинская радиоастрономическая обсерватория АКЦ ФИАН располагает одним из наиболее высокочувствительных радиотелескопов в мире – БСА (Большая сканирующая антенна), работающем в диапазоне $109 \div 111.5$ МГц. БСА ФИАН является радиотелескопом меридианного типа и представляет собой эквидистантную фазированную антенную решетку, состоящую из 16384 волновых диполей, расположенных на площадке 384×187 м (геометрическая площадь – более

70 тыс. м², эффективная – около 45 тыс. м²). В своем диапазоне БСА является самым чувствительным телескопом в мире (и одним из наиболее чувствительных в мире в метровом диапазоне волн в целом). Системная эквивалентная плотность потока (SEFD) радиотелескопа равна 34 Ян [8] в зените при минимальной температуре фона, что в несколько раз лучше, чем у радиотелескопа LOFAR [9] на частоте 120 МГц (порядка 2000 Ян).

В 2010–2011 гг. была проведена модернизация элементов приемной системы и создана новая диаграммообразующая система из 128 лучей. Начиная с 6 июля 2012 г. на радиотелескопе БСА ФИАН ведется круглосуточный мониторинг, покрывающий за сутки значительную часть небесной сферы. С 6 июля 2012 г. ежедневно наблюдалось около 2 ср в полосах склонений общей шириной 25°, а с 1 апреля 2013 г. ежедневно покрывается уже 5.08 ср или 0.4 поверхности всей сферы в полосе склонений 50°. С июня 2014 г. ведутся наблюдения одновременно в двух модах регистрации данных: “стандартной” моде наблюдений (постоянная времени 0.1 с, 6 полос по 415 кГц, 848 Гб данных в год, режим запущен в июле 2012 г.) и “быстрой” моде (постоянная времени 12.5 мс, 32 полосы по 78 кГц, 32 Тб данных в год, режим работает с июня 2014 г.). Чувствительность для одной спектральной полосы, 415 или 78 кГц соответственно, (для идеальных условий) составляет 0.16 или 1.06 Ян для постоянной времени 100 и 12.5 мс соответственно. Приведенные значения касаются мгновенной чувствительности (радиоисточники проходят через диаграмму направленности телескопа несколько минут, и для мерцающих источников уверенно выделяются объекты с плотностью потока от 0.01 Ян).

Поскольку время прохождения источника через диаграмму БСА около 5 мин (фактически оно и определяет продолжительность единичного сеанса наблюдений), вероятность попадания в произвольный момент времени источника из наблюдаемой полосы склонений в один из главных лепестков многолучевой диаграммы направленности ~ 1/300. Однако отметим факт, что возможен также захват сигнала от мощных источников боковыми лепестками диаграммы направленности в зоне наблюдений вплоть до ±40° от главного лепестка. Действительно, форма диаграммы направленности БСА описывается функцией

$$(\alpha, \delta) = (\sin x/x)^2 (\sin y/y)^2, \quad (1)$$

где $x = (\pi D_1/\lambda)(\alpha - \alpha_0)$; $y = (\pi D_2 \cos Z/\lambda)(\delta - \delta_0)$; λ – длина волны, α и δ – экваториальные координаты, (α_0, δ_0) – координаты, определяющие положение максимума диаграммы направленности радиотелескопа, Z – зенитное расстояние для координат (α, δ) ; D_1 и D_2 – размеры БСА ФИАН в направлениях с востока на запад и с севера на юг соответственно.

Нетрудно найти из (1), что в боковых лепестках диаграммы направленности на указанном расстоянии от центрального направления регистрируется около 1/10000 от мощности сигнала в главном лепестке. Однако, ввиду того, что диаграмма направленности антенной решетки имеет гораздо более сложный вид (с увеличенными боковыми лепестками), чем диаграмма направленности идеального элемента, а также ввиду влияния погоды и прочих искажающих факторов сигнал в далеких боковых лепестках увеличивается обычно на порядок и может достигать 1/1000 от мощности сигнала в главном лепестке. Зачастую есть и техническое ограничение, накладываемое на склонения. При $\delta < -10^\circ$ (иногда и при $\delta < +3^\circ$) временами возникают сильные техногенные помехи, в том числе импульсного характера (предположительно от глассадных локомотивов аэродромов Подмоскovie, работающих на частоте около 110 МГц).

Итак, радиотелескоп БСА способен регистрировать на небе в любой момент времени в секторе около 1÷2 ср ($\pm 40^\circ$) от линии юг-север и $\delta > -10^\circ$ радиоисточники с плотностью потока ~ 1÷10000 Ян, в том числе, и что особенно важно, транзиентные источники, к которым потенциально относятся гравитационные события.

3. Наблюдения и методика выделения импульсов

Прежде всего, что мы ожидаем увидеть в данных БСА? Поскольку источники далекие (находятся на расстоянии в сотни мегапарсеков), можно считать, что дисперсионное запаздывание их сигналов должно быть аналогичным быстрым радиовсплескам FRB (fast radio bursts) [10], т. е. мера дисперсии $DM \sim 1000$ пк · см⁻³. Формула задержки сигнала из-за дисперсионного запаздывания сигнала, приходящего после импульсно-

го события на наблюдаемой частоте ν , хорошо известна:

$$\Delta T = 4.15 \cdot 10^3 \cdot DM \cdot \nu^2. \quad (2)$$

Формула дисперсионных задержек для близких частот имеет вид:

$$\Delta t = 4.15 \cdot 10^3 \cdot DM \cdot (\nu_1^{-2} - \nu_2^{-2}). \quad (3)$$

Из (2) находим, что при $DM = 1000 \text{ пк} \cdot \text{см}^{-3}$ и $DM = 2000 \text{ пк} \cdot \text{см}^{-3}$ временная задержка прихода сигнала на наблюдаемой частоте равна соответственно 5.5 и 11 мин. Учитывая, что при высоких значениях DM импульс будет претерпевать дисперсионное расплывание от десятых долей секунды до нескольких секунд (см. ниже), без специальной обработки данных (которая пока систематически не проводилась) заметить расплывшийся импульс при $DM > 1000 \div 2000 \text{ пк} \cdot \text{см}^{-3}$ будет проблематично. Поэтому ограничимся при проверке отрезком времени 11 мин после события.

Вначале производилась визуальная проверка обнаружимости задержек прихода импульсов с увеличением частоты. Для примера приведем данные для известного пульсара PSR B2154+40 при $DM = 70 \text{ пк} \cdot \text{см}^{-3}$. На рис. 2 визуально хорошо видны задержки от канала к каналу согласно (3). Но есть важный фактор, который необходимо учитывать при поиске импульсов при большой DM – это уширение импульса за счет рассеяния

на пути распространения в межзвездной среде – чем больше DM, тем больше ширина импульса τ_{sc} . Строгой зависимости уширения от DM не существует, на разных частотах она различна. В работах [11] и [12] приводится эмпирическая статистическая зависимость

$$\phi_{sc}(DM) \propto DM^{2.2 \pm 0.1}. \quad (4)$$

При этом $\tau_{sc}(\nu) \propto \nu^{-\gamma}$, причем эмпирически найдено, что $\gamma = 4.1 \pm 0.3$. Однако данная зависимость касается пульсаров при больших DM, находящихся в плоскости Галактики. Между тем в работе [13] отмечается, что, например, для FRB (при высоких DM, но вне плоскости Галактики) τ_{sc} оказывается существенно меньше, чем следует из эмпирических формул. Поэтому, хотя из (4) следует, что при $DM > 1000 \text{ пк} \cdot \text{см}^{-3}$ для величины τ_{sc} определяется 10 с и более, можно надеяться, что для $DM \sim 1000 \div 2000 \text{ пк} \cdot \text{см}^{-3}$ продолжительность импульса будет порядка не более нескольких секунд. Итак, мы ищем импульсы характерного масштаба в несколько секунд при DM от нескольких сотен до $2000 \text{ пк} \cdot \text{см}^{-3}$.

Для выделения сигнала применялось также автоматическое выделение импульсов, при котором был использован перебор дисперсий и поиск максимального отклика при сложении всех частотных каналов для определенной дисперсии. На примере импульсов известных пульсаров с плотностями потоков выше 5 Ян методика дала

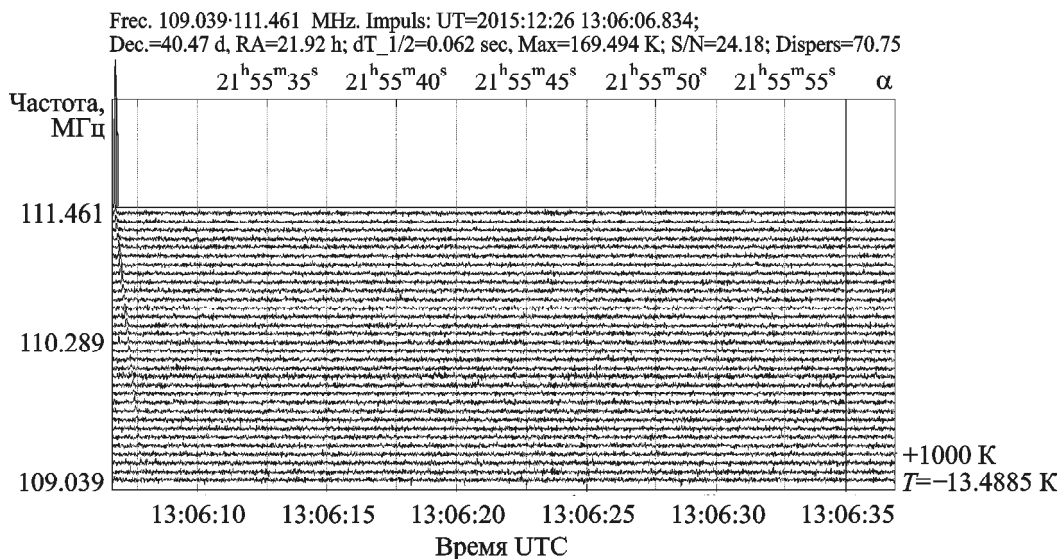


Рис. 2. Один из импульсов пульсара B2154+40 (период 1.525 с, $DM = 70.857 \text{ пк} \cdot \text{см}^{-3}$)

точность определения DM от 2 % (для плотностей потоков от 5 до 15 Ян) до 0.1 % (выше 15 Ян) (см. рис. 2).

На рис. 2 приводится развертка одного луча диаграммы БСА для 32 наблюдаемых частот (общая полоса 109.0 ÷ 111.5 МГц) с дискретизацией 12.5 мс. Смещение импульса по частотам очень заметно, видно также уменьшение потока с увеличением частоты из-за влияния фарадеевского вращения. Плотность потока самых ярких импульсов ≈ 30 Ян, шумовая дорожка для приводимого отрезка наблюдательных данных ≈ 3 Ян. Данный импульс использован как тестовый для автоматического обнаружения дисперсионного сигнала при сложении всех 32 каналов с нужной задержкой. В результате происходит усиление сигнала (в идеале в 32 раза) при нужной дисперсии. Параметры автоматически найденного импульса: мера дисперсии $70.75 \text{ пк} \cdot \text{см}^{-3}$ (увеличение импульса при этой дисперсии при сложении 32 частотных каналов произошло в 24.3 раза); полуширина импульса на уровне половины интенсивности 0.062 с; плотность потока $169.5 \text{ К} \approx 17$ Ян (среднее вдоль каналов). Для пульсара B2154+40 период 1.525 с и $DM = 70.857 \text{ пк} \cdot \text{см}^{-3}$. То есть здесь ошибка всего $\sim 0.1 \%$.

4. Рассмотрение результатов выделения импульсов

Из табл. 1 и рис. 1 можно понять, попадали ли обсуждаемые гравитационные события в поле зрения многолучевой диаграммы направленности БСА.

Событие GW150914 (14.09.2015, 09:50:45 UTC, прямое восхождение $\alpha = 11^{\text{h}}53^{\text{m}}31^{\text{s}}$) – по прямому восхождению в стороне примерно на 2^{h} в зоне $\approx 5^{\circ}$ (которую просматривал LOFAR на предмет возможного послесвечения). К сожалению, на эту зону падает малая часть области локализации. На рис. 1 видно, что, наиболее вероятно, источник гравитационно-волнового события находится в южной части небосвода со склонением $\delta \approx -70^{\circ}$. Если это так, то даже обнаружение не информативно. При визуальном поиске никаких видимых импульсов не обнаружено. Можно утверждать, что ничего более яркого (значимостью более 5σ), чем $\approx 25 \div 50$ Ян, на приведенном отрезке (вплоть до 9:55:00 UTC, т. е. $DM \approx 750 \text{ пк} \cdot \text{см}^{-3}$) в наших данных не на-

блюдается. При условии, что источник мог лежать выше $\delta = -10^{\circ}$, и тогда он попадал в боковой лепесток (составляя 1/1000 от мощности сигнала в главном лепестке), необходимо признать, что ничего ярче 50000 Ян в северной полусфере неба на частоте 110 МГц в момент гравитационного события не наблюдалось. Итак, плотность потока радиоизлучения от GW150914 для модельного сигнала составляет $S < 50000$ Ян.

Оценим предельное значение полной энергии, излучаемой в низкочастотном радиодиапазоне, по формуле:

$$E_{\text{radio}} = 4\pi R^2 S \Delta\nu \Delta t. \quad (5)$$

Здесь $R = 400 \text{ Мпк} = 1.234271 \cdot 10^{25} \text{ м}$ – расстояние до источника, $\Delta\nu \sim 100 \text{ МГц}$ – полоса частот, $\Delta t \sim 10 \text{ с}$ – продолжительность радиовсплеска (с запасом на дисперсионное “размазывание”). Тогда $E_{\text{radio}} \leq 10^{44}$ эрг. Как известно [1], в энергию гравитационного излучения E_{GW} ушло примерно 3 массы Солнца или $1.8 \cdot 10^{54}$ эрг. То есть отношение $E_{\text{radio}}/E_{\text{GW}} < 10^{-10}$. Для сравнения, эксперимент SPI-ACS космической обсерватории INTEGRAL, наблюдавшей около 95 % области локализации в момент события в диапазоне энергии $75 \text{ кэВ} \div 2 \text{ МэВ}$ [14], установил предел $E_{\text{radio}}/E_{\text{GW}} < 10^{-6}$.

Таким образом, наблюдения БСА дают значительное ограничение на радиочастотную составляющую возможного электромагнитного сигнала от события GW150914 на отдельном участке области локализации. Если событие GW150914 действительно не было обнаружено в радиодиапазоне, то по полученному выше предельному значению можно ограничить значение магнитного поля черной дыры, как это сделано в работе [15]. Необнаружение радиовсплеска с плотностью потока $\sim 10^4$ Ян также ставит под вопрос ряд экзотических моделей низкочастотного излучения от слияния черных дыр, таких как работы [16] и [17]. Указанные оценки сделаны в предположении, что источник гравитационно-волнового излучения располагался выше $\delta = -10^{\circ}$.

Аналогичная работа проделана для событий LVT151012, GW151226 и GW170104, к сожалению, примерно с аналогичными результатами (отсутствие убедительных откликов в наших данных на указанные события). Наиболее удачной была конфигурация локализации источника

GW151226 и его положения относительно диаграмм БСА. В момент события GW151226 и в течение примерно 30 мин после него антенна как раз просматривала фрагмент области локализации.

Событие GW151226 (26.12.2015, 03:38:54 UTC, $\alpha = 12^{\text{h}}26^{\text{m}}44^{\text{s}}$) – наиболее интересно для изучения. Визуальной проверкой не было обнаружено ничего подозрительного ни на 5-минутных, ни на минутных масштабах. Единственная деталь, способная вызвать интерес (импульс на масштабе 2 с в одном районе, в трех частотах из 32), показана на рис. 3. Импульс начинается в 03:44:20 UTC и виден только в двух- или трех-

частотных интервалах. На третьей частоте он сдвинут на один луч и есть также отклик на несколько лучей выше (что можно трактовать либо как помеху, либо как еще один отклик на событие, захваченный другим боковым лепестком многолучевой диаграммы БСА). Вероятнее всего, это артефакт, порожденный техногенной помехой. Принимаем, что для GW151226 мы также не обнаруживаем очевидного события с потоком $S > 30 \div 60$ Ян. Аналогично можно дать консервативную оценку, состоящую в том, что ничего ярче ~ 60000 Ян в северной полусфере неба на частоте 110 МГц в момент гравитационного события GW151226 не наблюдалось.

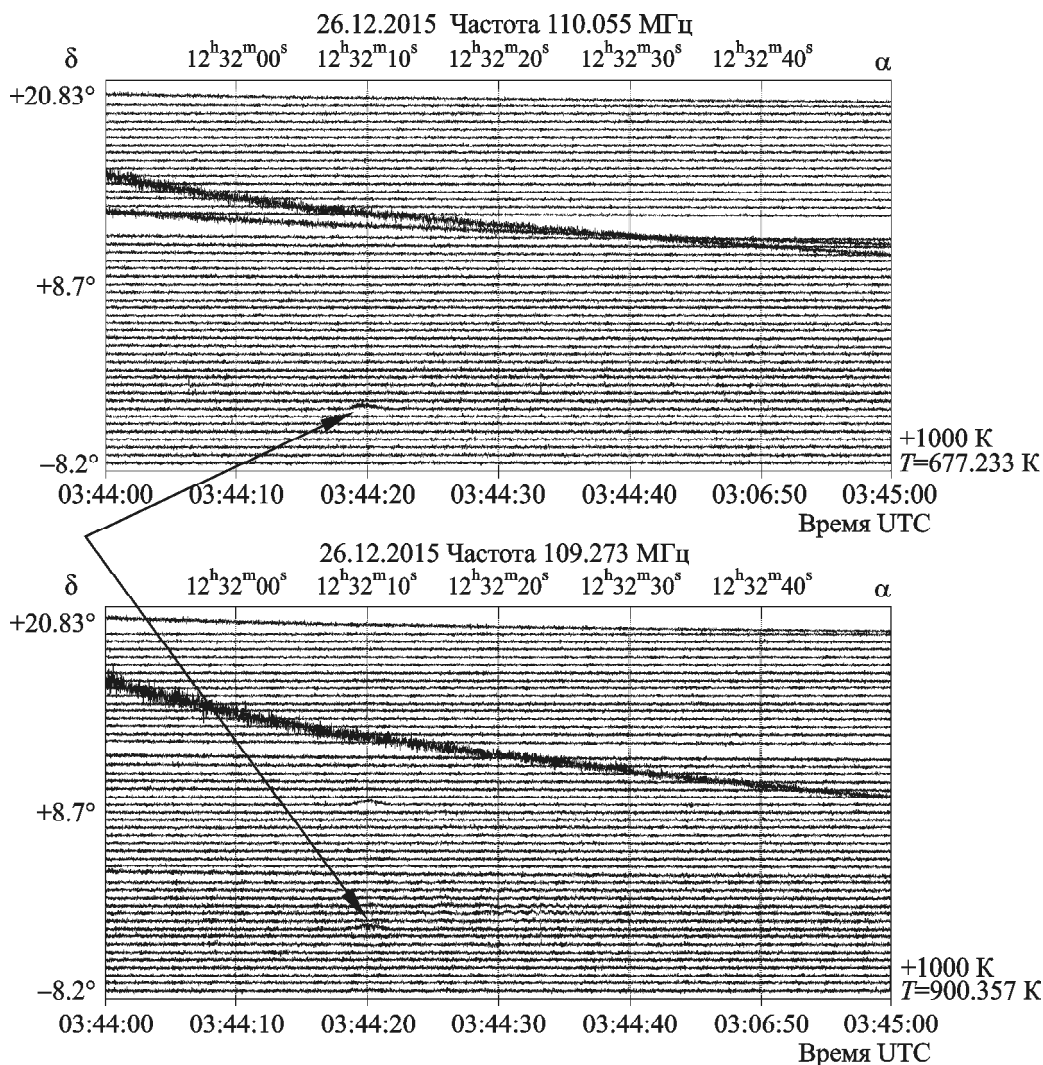


Рис. 3. Отрезок данных в 1 мин (03:44–03:45 UTC) после всплеска GW151226 для частот 110.055 МГц и более низкой 109.223 МГц. Наблюдается напоминающий искомый сигнал приблизительно в 03:44:20 UTC, ($\alpha = 12^{\text{h}}32^{\text{m}}10^{\text{s}}$, $\delta = -2.5^\circ$) продолжительностью около 2 с (указано стрелками), со сдвигом на 1 с (если это дисперсия, то $DM \sim 200$ пк · см⁻³), но на соседнем луче (при этом виден “блик” также на несколько лучей выше). Данный всплеск, вероятно, все же не является всплеском космического происхождения (правдоподобнее техногенное происхождение)

Из (5) оценим количество энергии, излученное в низкочастотном радиодиапазоне: $E_{radio} \leq 10^{44}$ эрг. Здесь в гравитационное излучение ушла примерно 1 масса Солнца или $1.8 \cdot 10^{54}$ эрг и отношение $E_{radio}/E_{GW} < 10^{-10}$.

Все вышеуказанные события: GW150914, GW151226, LVT151012 и GW170104, – были протестированы также автоматической методикой поиска, которая тоже ничего не обнаружила. При этом данная методика довольно хорошо обнаруживает объекты с дисперсиями $DM < 100$ пк · см⁻³ (в том числе и новые RRAT пульсары, о чем будет доложено в других работах). Возможно, методика еще имеет методические изъяны для обнаружения дисперсий с высокими значениями, поэтому будет дорабатываться. Мы полагаем, что методика будет применима для поиска мощных импульсных внегалактических событий на расстояниях вплоть до несколько сотен мегапарсеков. Предварительная оценка возможности поиска для класса FRB-событий уже проделана для данных БСА в работе [18].

5. Заключение

Сделаны верхние оценки плотностей потоков в радиодиапазоне на частоте 110 МГц для возможных транзиентных радиоисточников, сопровождающих гравитационно-волновые события GW150914, GW151226, LVT151012 и GW170104. Можно утверждать, что ничего более яркого (на уровне значимости более 5σ), чем ~ 50 Ян, для указанных событий, в предположении, что их координаты точно попадают в главный лепесток БСА (это могло бы выполняться только для события GW151226), не обнаружено (хотя событие GW151226 все же имеет выброс в трех полосах, который можно трактовать не только как помеху, но и как искомый сигнал).

Мы также воспользовались тем, что примерно 0.001 потока событий можно зарегистрировать в диапазоне до $\pm 40^\circ$ от главных лепестков многолучевой диаграммы (зона склонений $-8^\circ < \delta < 42^\circ$) в боковых лепестках диаграммы. Тогда, если данные источники были выше $\delta < -10^\circ$ (для некоторых из них эти условия выполняются), то источники ярче 50000 Ян в северной полусфере неба на 110 МГц в момент гравитационных событий не наблюдались. Для подобных случаев сделаны также оценки энерговыделения в длин-

новолновом радиодиапазоне: $E_{radio} \leq 10^{44}$ эрг, при этом $E_{radio}/E_{GW} < 10^{-10}$.

Необходимо накопление статистики наблюдений. Соответственно, поиск событий в апертуре БСА по результатам наблюдений LIGO имеет дальнейшие перспективы.

Работа частично поддержана грантами РФФИ 14-07-00870а и 16-07-01028а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Abbott B. P., Abbott R., Abbott T. D., Abernathy M. R., Acernese F., Ackley K., Adams C., Adams T., Addesso P., Adhikari R. X., and 969 coauthors. GW151226: Observation of Gravitational Waves from a 22-Solar-Mass Binary Black Hole Coalescence // *Phys. Rev. Lett.* – 2016. – Vol. 116, Is. 24. – id. 241103. DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.241103
2. Abbott B. P., Abbott R., Abbott T. D., Abernathy M. R., Acernese F., Ackley K., Adams C., Adams T., Addesso P., Adhikari R. X., and 965 coauthors. Binary Black Hole Mergers in the first Advanced LIGO Observing Run // *Phys. Rev. X.* – 2016. – Vol. 6, Is. 4. – id. 041015. DOI: 10.1103/PhysRevX.6.041015
3. Abbott B. P., Abbott R., Abbott T. D., Acernese F., Ackley K., Adams C., Adams T., Addesso P., Adhikari R. X., Adya V. B., and 1041 coauthors. GW170104: Observation of a 50-Solar-Mass Binary Black Hole Coalescence at Redshift 0.2 // *Phys. Rev. Lett.* – 2017. – Vol. 118, Is. 22. – id. 221101. DOI: 10.1103/PhysRevLett.118.221101
4. Smartt S. J., Chambers K. C., Smith K. W., Huber M. E., Young D. R., Chen T.-W., Inserra C., Wright D. E., Coughlin M., Denneau L., and 30 coauthors. A search for an optical counterpart to the gravitational-wave event GW151226 // *Astrophys. J. Lett.* – 2016. – Vol. 827, No. 2. – id. L40. DOI: 10.3847/2041-8205/827/2/L40
5. Racusin J. L., Burnset E., Goldstein A., Connaughton V., Wilson-Hodge C. A., Jenke P., Blackburn L., Briggs M. S., Broida J., Camp J. and 133 coauthors. Searching the Gamma-ray Sky for Counterparts to Gravitational Wave Sources: Fermi GBM and LAT Observations of LVT151012 and GW151226 // *Astrophys. J.* – 2017. – Vol. 835, No. 1. – id. 82. DOI: 10.3847/1538-4357/835/1/82
6. Abbott B. P., Abbott R., Abbott T. D., Abernathy M. R., Acernese F., Ackley K., Adams C., Adams T., Addesso P., Adhikari R. X., and 1567 coauthors. Localization and broadband follow-up of the gravitational-wave transient GW150914 // *Astrophys. J. Lett.* – 2016. – Vol. 826, No. 1. – id. L13. DOI: 10.3847/2041-8205/826/1/L13
7. Jonker P. GCN CIRCULAR 18345 (MWA), 18363, 18655 (ASKAP), 18364, 18424, 18690 (LOFAR) [online]. – 2015. Available from: <https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3/18364.gcn3>
8. Орешко В. В. Радиотелескопы ПРАО – состояние и перспективы (2014). [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.prao.ru/conf/rrc2014/docs/22092014/06_Oreshko.pdf

9. Van Haarlem M. P., Wise M. W., Gunst A. W., Heald G., McKean J. P., Hessels J. W. T., de Bruyn A. G., Nijboer R., Swinbank J., Fallows R., and 191 coauthors. LOFAR: The LOw-Frequency ARray // *Astron. Astrophys.* – 2013. – Vol. 556. – id. A2. DOI: 10.1051/0004-6361/201220873
10. Lorimer D. R., Bailes M., McLaughlin M. A., Narkevic D. J., and Crawford F. A Bright Millisecond Radio Burst of Extragalactic Origin // *Science.* – 2007. – Vol. 318, Is. 5851. – P. 777–780. DOI: 10.1126/science.1147532
11. Bhat N. D. R., Cordes J. M., Camilo F., Nice D. J., and Lorimer D. R. Multifrequency Observations of Radio Pulse Broadening and Constraints on Interstellar Electron Density Microstructure. // *Astrophys. J.* – 2004. – Vol. 605, No. 2. – P. 759–783. DOI: 10.1086/382680
12. Kuz'min A. D., Losovskii B. Ya., and Lapaev K. A. Measurements of the scattering of pulsar radio emission // *Astron. Rep.* – 2007. – Vol. 51, Is. 8. – P. 615–623. DOI: 10.1134/S1063772907080021
13. Deneva J. S., Stovall K., McLaughlin M. A., Bagchi M., Bates S. D., Freire P. C. C., Martinez J. G., Jenet F., and Garver-Daniels N. New Discoveries from the Arecibo 327 MHz Drift Pulsar Survey Radio Transient Search // *Astrophys. J.* – 2016. – Vol. 821, No. 1. – id. 10. DOI: 10.3847/0004-637X/821/1/10
14. Savchenko V., Ferrigno C., Mereghetti S., Natalucci L., Bazzano A., Bozzo E., Brandt S., Courvoisier T. J.-L., Diehl R., Hanlon L., von Kienlin A., Kuulkers E., Laurent P., Lebrun F., Roques J. P., Ubertini P., and Weidenspointner G. INTEGRAL upper limits on gamma-ray emission associated with the gravitational wave event GW150914 // *Astrophys. J. Lett.* – 2016. – Vol. 820, No. 2. – id. L36. DOI: 10.3847/2041-8205/820/2/L36
15. Lyutikov M. Fermi GBM signal contemporaneous with GW150914 - an unlikely association // arXiv:1602.07352 [astro-ph.HE] [online]. – 2016. Available from: <https://arxiv.org/abs/1602.07352>
16. Postnov K. A. and Pshirkov M. S. Radio transients from neutron stars binary mergers // arXiv:0912.5216 [astro-ph.HE] [online]. – 2009. Available from: <https://arxiv.org/abs/0912.5216>
17. Moortgat J. and Kuijpers J. Gravitational waves in magnetized relativistic plasmas // *Phys. Rev. D.* – 2004. – Vol. 70, Is. 2. – id. 023001. DOI: 10.1103/PhysRevD.70.023001
18. Федорова В. А. FRBs: поиск вариаций низкочастотного радиоизлучения из соответствующих участков неба // Всероссийская конференция “Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра”: Архив докладов (2016). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://hea.iki.rssi.ru/heaconf/hea/2016/hea/talk/63/>
- ADAMS, T., ADDESSO, P., ADHIKARI, R. X. and 965 coauthors, 2016. Binary Black Hole Mergers in the first Advanced LIGO Observing Run. *Phys. Rev. X.* vol. 6, is. 4, id. 041015. DOI: 10.1103/PhysRevX.6.041015
3. ABBOTT, B. P., ABBOTT, R., ABBOTT, T. D., ACERNESE, F., ACKLEY, K., ADAMS, C., ADAMS, T., ADDESSO, P., ADHIKARI, R. X., ADYA, V. B. and 1041 coauthors, 2017. GW170104: Observation of a 50-Solar-Mass Binary Black Hole Coalescence at Redshift 0.2. *Phys. Rev. Lett.* vol. 118, is. 22, id. 221101. DOI: 10.1103/PhysRevLett.118.221101
4. SMARTT, S. J., CHAMBERS, K. C., SMITH, K. W., HUBER, M. E., YOUNG, D. R., CHEN, T.-W., INSERRA, C., WRIGHT, D. E., COUGHLIN, M., DENNEAU, L. and 30 coauthors, 2016. A search for an optical counterpart to the gravitational-wave event GW151226. *Astrophys. J. Lett.* vol. 827, no. 2, id. L40. DOI: 10.3847/2041-8205/827/2/L40
5. RACUSIN, J. L., BURNSET, E., GOLDSTEIN, A., CONNAUGHTON, V., WILSON-HODGE, C. A., JENKE, P., BLACKBURN, L., BRIGGS, M. S., BROIDA, J., CAMP, J. and 133 coauthors, 2017. Searching the Gamma-ray Sky for Counterparts to Gravitational Wave Sources: Fermi GBM and LAT Observations of LVT151012 and GW151226. *Astrophys. J.* vol. 835, no. 1, id. 82. DOI: 10.3847/1538-4357/835/1/82
6. ABBOTT, B. P., ABBOTT, R., ABBOTT, T. D., ABERNATHY, M. R., ACERNESE, F., ACKLEY, K., ADAMS, C., ADAMS, T., ADDESSO, P., ADHIKARI, R. X. and 1567 coauthors, 2016. Localization and broadband follow-up of the gravitational-wave transient GW150914. *Astrophys. J. Lett.* vol. 826, no. 1, id. L13. DOI: 10.3847/2041-8205/826/1/L13
7. JONKER, P., 2015. *GCN CIRCULAR 18345 (MWA), 18363, 18655 (ASKAP), 18364, 18424, 18690 (LOFAR)* [online]. Available from: <https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3/18364.gcn3>
8. ORESHKO, V. V., 2014. *The state and prospects for LPI PRAO radiotelescopes* [online]. (in Russian). Available from: http://www.prao.ru/conf/rrc2014/docs/22092014/06_Oreshko.pdf
9. VAN HAARLEM, M. P., WISE, M. W., GUNST, A. W., HEALD, G., MCKEAN, J. P., HESSELS, J. W. T., DE BRUYN, A. G., NIJBOER, R., SWINBANK, J., FALLOWS, R. and 191 coauthors, 2013. LOFAR: The LOw-Frequency Array. *Astron. Astrophys.* vol. 556, id. A2. DOI: 10.1051/0004-6361/201220873
10. LORIMER, D. R., BAILES, M., MCLAUGHLIN, M. A., NARKEVIC, D. J. and CRAWFORD, F. A., 2007. Bright Millisecond Radio Burst of Extragalactic Origin. *Science.* vol. 318, is. 5851, pp. 777–780. DOI: 10.1126/science.1147532
11. BHAT, N. D. R., CORDES, J. M., CAMILO, F., NICE, D. J. and LORIMER, D. R., 2004. Multifrequency Observations of Radio Pulse Broadening and Constraints on Interstellar Electron Density Microstructure. *Astrophys. J.* vol. 605, no. 2, pp. 759–783. DOI: 10.1086/382680
12. KUZ'MIN, A. D., LOSOVSKII, B. YA. and LAPAEV, K. A., 2007. Measurements of the scattering of pulsar radio emission. *Astron. Rep.* vol. 51, is. 8, pp. 615–623. DOI: 10.1134/S1063772907080021

REFERENCES

1. ABBOTT, B. P., ABBOTT, R., ABBOTT, T. D., ABERNATHY, M. R., ACERNESE, F., ACKLEY, K., ADAMS, C., ADAMS, T., ADDESSO, P., ADHIKARI, R. X. and 969 coauthors, 2016. GW151226: Observation of Gravitational Waves from a 22-Solar-Mass Binary Black Hole Coalescence. *Phys. Rev. Lett.* vol. 116, is. 24, id. 241103. DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.241103
2. ABBOTT, B. P., ABBOTT, R., ABBOTT, T. D., ABERNATHY, M. R., ACERNESE, F., ACKLEY, K., ADAMS, C.,

13. DENEVA, J. S., STOVALL, K., MCLAUGHLIN, M. A., BAGCHI, M., BATES, S. D., FREIRE, P. C. C., MARTINEZ, J. G., JENET, F. and GARVER-DANIELS, N., 2016. New Discoveries from the Arecibo 327 MHz Drift Pulsar Survey Radio Transient Search. *Astrophys. J.* vol. 821, no. 1, id. 10. DOI: 10.3847/0004-637X/821/1/10
14. SAVCHENKO, V., FERRIGNO, C., MEREGHETTI, S., NATALUCCI, L., BAZZANO, A., BOZZO, E., BRANDT, S., COURVOISIER, T. J.-L., DIEHL, R., HANLON, L., VON KIENLIN, A., KUULKERS, E., LAURENT, P., LEBRUN, F., ROQUES, J. P., UBERTINI, P. and WEIDENSPONTNER, G., 2016. INTEGRAL upper limits on gamma-ray emission associated with the gravitational wave event GW150914. *Astrophys. J. Lett.* vol. 820, no. 2, id. L36. DOI: 10.3847/2041-8205/820/2/L36
15. LYUTIKOV, M., 2016. Fermi GBM signal contemporaneous with GW150914 - an unlikely association. *arXiv: 1602.07352 [astro-ph.HE]* [online]. Available from: <https://arxiv.org/abs/1602.07352>
16. POSTNOV, K. A. and PSIRKOV, M. S., 2009. Radio transients from neutron stars binary mergers. *arXiv: 0912.5216 [astro-ph.HE]* [online]. Available from: <https://arxiv.org/abs/0912.5216>
17. MOORTGAT, J. and KUIJPERS, J., 2004. Gravitational waves in magnetized relativistic plasmas. *Phys. Rev. D.* vol. 70, is. 2, id. 023001. DOI: 10.1103/PhysRevD.70.023001
18. FEDOROVA, V. A., 2016. FRBs: search for variations of low-frequency radio emission from the corresponding areas of the sky. In: "High Energy Astrophysics Today and Tomorrow" Conference Proceedings [online]. Moscow, Russia, December 20-23. Available from: <http://hea.iki.rssi.ru/heaconf/hea/2016/hea/talk/63/>

V. A. Samodurov^{1,2}, A. S. Pozanenko³, M. O. Toropov⁴,
A. E. Rodin¹, D. D. Churakov⁵, D. V. Dumskiy^{1,2},
E. A. Isaev^{1,2}, A. N. Kazantsev², S. V. Logvinenko²,
and V. V. Oreshko²

¹National Research University Higher School of Economics,
20, Myasnitckaya St., Moscow, 101000, Russia

²Pushchino Radio Astronomy Observatory
of the P. N. Lebedev Physical Institute Astro Space Center, RAS,
Pushchino, 142290, Russia

³Space Research Institute, RAS,
84/32, Profsoyuznaya St., Moscow, 117997, Russia

⁴ООО "Business Automation",
14, Serebryakova Lane, building 1, Moscow, 129343, Russia

⁵Central Scientific Research Institute of Machine-Building,
4, Pionerskaya St., Korolev, 141074, Russia

SEARCH FOR RADIO COUNTERPARTS OF
GRAVITATIONAL-WAVE EVENTS DETECTED
BY LIGO/VIRGO EXPERIMENTS IN THE DATA
OF DAILY SURVEY OF BSA LPI AT 110 MHz

Purpose: One of the most interesting goals for astronomers are multi-range observations of space objects – not only in different spectral ranges, but also using other sources of information, for example, studies of objects emitting gravitational waves.

Design/methodology/approach: The BSA LPI (Big Scanning Antenna of Lebedev Physical Institute) radio telescope has a multi-beam diagram and is capable of recording daily in the frequency range 109–111.5 MHz in 96 beams in the declination range from -8° to $+42^\circ$, daily logs 87.5 GB of data (32 TB per year). The number of frequency bands is within 6 to 32 for the time constant from 0.1 to 0.0125 s.

Findings: One of the scientific tasks in processing the data obtained is to search for responses to extragalactic transient events, which a priori should have large dispersion delays ($DM \sim 100 - 2000 \text{ pc} \cdot \text{cm}^{-3}$). Such events include fast radio bursts (FRB) detected so far only at frequencies of 1 GHz and higher, afterglow of nearby cosmic gamma-ray bursts (GRB), in the gamma and X-ray bands, and, finally, possible electromagnetic counterparts of gravitational-wave events recorded in the LIGO-Virgo experiments. The last ones are taken in this paper as a basis for perfection of the technique of searching the like events from the BSA radio data. We provide a brief description of the methodology for finding and estimating the upper limits of possible transient radio sources accompanying the gravitational wave events GW150914, GW151226, LVT151012, and GW170104 recorded by the LIGO detectors.

Conclusions: It is established that nothing brighter than 50000 Jy in the northern hemisphere of the sky at 110 MHz was not observed at the moment of gravitational events. The estimates of energy release in the long-wave radio range are also made: the energy of the low-frequency range is $\leq 10^{44}$ erg, while the ratio of the low-frequency range energy to the energy of the gravitational event is $< 10^{-10}$.

Key words: radio observation, gravitational event, search technique

V. A. Самодуров^{1,2}, А. С. Позаненко³, М. О. Торопов⁴,
А. Е. Родін¹, Д. Д. Чураков⁵, Д. В. Думський^{1,2},
Е. А. Ісаєв^{1,2}, А. Н. Казанцев²,
С. В. Логвіненко², В. В. Орешко²

¹Національний дослідницький університет
"Вища школа економіки",
вул. М'ясницька, 20, м. Москва, 101000, Росія

²Пушинська радіоастрономічна обсерваторія АКЦ ФІАН,
м. Пушино, Московська обл., 142290, Росія

³Інститут космічних досліджень РАН,
вул. Профсоюзна, 84/32, м. Москва, 117997, Росія

⁴ТОВ "Автоматизація Бізнесу",
проїзд Серебрякова, 14, будова 1, м. Москва, 129343, Росія

⁵Центральний науково-дослідницький інститут
машинобудування,
вул. Піонерська, 4, м. Корольов, Московська обл.,
141074, Росія

ПОШУК РАДІО-ВІДГУКІВ
НА ГРАВІТАЦІЙНО-ХВИЛЬОВІ ПОДІЇ LIGO/VIRGO
В ДАНИХ ОГЛЯДУ БСА ФІАН НА 110 МГц

Предмет та мета роботи: Однією з найцікавіших цілей для астрономів є мультидіапазонні спостереження космічних об'єктів, причому не тільки в різних діапазонах спектру, але

і з використанням інших джерел інформації, наприклад, дослідження об'єктів, що випромінюють гравітаційні хвилі.

Методи і методологія: Радіотелескоп БСА ФІАН має багатопроменеву діаграму, здатну цілодобово спостерігати в 96 променях у діапазоні схилень від -8° до $+42^\circ$ у частотному діапазоні $109 \div 111.5$ МГц. Число частотних смуг – від 6 до 32, постійна часу – від 0.1 до 0.0125 с.

Результати: Однією з наукових цілей у обробці цих даних можна вважати пошук відгуків на позагалактичні транзйентні події, які априорі повинні мати великі дисперсійні затримки ($DM \sim 100 \div 2000$ пк · см⁻³). Як приклади таких подій можна назвати швидкі радіосплески (FRB – fast radio bursts), які виявлено поки що тільки в радіодіапазоні, причому на частотах ~ 1 ГГц і вище, відгуки на гамма-сплески (GRB – gamma-ray bursts) в гамма і рентгенівському діапазонах і, нарешті, можливі відгуки на гравітаційні події, зафіксовані детекторами LIGO-Virgo. Останні взято у поданій роботі за основу для відпрацювання методики виділення подібних подій

в радіоданих БСА. Ми наводимо оцінки можливого потоку випромінювання (верхні межі) для декількох часових масштабів можливих транзйентних радіоджерел, які супроводжують транзйентні гравітаційно-хвильові події GW150914, GW151226, LVT151012 і GW170104, зареєстровані детекторами LIGO.

Висновок: Встановлено, що нічого яскравішого 50000 Ян в північній півсфері неба на частоті 110 МГц в момент гравітаційних подій не спостерігалось. Виконано також оцінки енерговиділення у довгохвильовому радіодіапазоні: енергія низькочастотного діапазону $\leq 10^{44}$ ерг, при цьому відношення енергії низькочастотного діапазону до енергії гравітаційного події $< 10^{-10}$.

Ключові слова: радіоспостереження, гравітаційна подія, методика пошуку

Статья поступила в редакцию 20.10.2017