

## ПОИСК В ГАЛАКТИКЕ М31 МАГНИТАРОВ КАК ПЕРИОДИЧЕСКИХ РЕНТГЕНОВСКИХ ИСТОЧНИКОВ ПО ДАННЫМ ХММ-NEWTON

© 2021 г. М. С. Пширков<sup>1,2,3\*</sup>, С. Б. Попов<sup>1</sup>, И. Ю. Золотухин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга  
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Пушчинская радиоастрономическая  
обсерватория АКЦ ФИАН, Пушкино, Россия

Поступила в редакцию 19.11.2020 г.

После доработки 26.11.2020 г.; принята к публикации 26.11.2020 г.

Несколько лет назад серия мощных миллисекундных радиоимпульсов с близкими мерами дисперсии была зарегистрирована в направлении на галактику М31. Отталкиваясь от гипотезы о возможной связи этих радиовсплесков с магнитаром в М31, мы провели поиск источников периодического рентгеновского сигнала, используя данные рентгеновского телескопа ХММ-Newton. В результате проведенного анализа данных был выделен сигнал от уже известного периодического рентгеновского источника 3ХММJ004301.4+413017 — аккрецирующего пульсара в составе двойной системы. Однако нам не удалось обнаружить новых кандидатов. В частности, не выявлен объект, который можно было бы связать с гипотетическим магнитаром, ответственным за наблюдавшиеся радиовсплески, который мог бы иметь светимость  $L_X > 10^{36}$  эрг  $s^{-1}$ .

*Ключевые слова:* магнитары, быстрые радиовсплески, рентгеновская астрономия.

DOI: 10.31857/S0320010821010071

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Быстрые радиовсплески (БРВ) — это класс внегалактических миллисекундных радиотранзиентов. Первый представитель нового класса был представлен в работе Лоример и др. (2007), однако только после выхода статьи Торнтон и др. (2013) проблема происхождения этих событий стала рассматриваться как одна из самых “горячих” проблем астрофизики. На сегодняшний день зарегистрировано более сотни БРВ (Петрофф и др., 2016), не считая многочисленных всплесков от нескольких повторных источников<sup>1</sup>. Общие свойства БРВ детально описаны в ряде недавних обзоров (Попов и др., 2018; Петрофф и др., 2019; Кордес, Чаттерджи, 2019; Чжан, 2020).

С момента обнаружения первых всплесков для объяснения природы этих событий было предложено множество гипотез, их перечисление можно найти в обзоре Платтс и др. (2019) Большинство из предложенных моделей было отвергнуто по мере накопления наблюдательных данных, например, из-за невозможности объяснить высокий темп

всплесков (несколько тысяч в день на всем небе), трудностей с объяснением повторных всплесков, а также из-за отсутствия наблюдаемых вспышек в других частотных диапазонах и в результате анализа выборки материнских галактик всплесков. На данный момент наиболее разработан сценарий, где источником БРВ служит активность магнитаров — нейтронных звезд (НЗ) с очень сильным магнитным полем (см. обзор Туролла и др., 2015).

Модель, где магнитары выступают в качестве источников БРВ, была предложена одной из первых (Попов и Постнов, 2007). Эти объекты иногда становятся источниками коротких, но очень мощных,  $L \sim 10^{38} - 10^{47}$  эрг  $s^{-1}$ , вспышек, наблюдающихся в мягком гамма-диапазоне. Достаточно всего  $\sim 10^{-6} - 10^{-5}$  доли от полной энергии гипервспышки, аналогичной наблюдавшейся от магнитара SGR 1806-20 в 2004 г. и имевшей полную энергию  $\sim (2-4) \times 10^{46}$  эрг  $s^{-1}$  (Харли и др., 2005; Фредерикс и др., 2007b), чтобы объяснить радиосветимости даже наиболее мощных БРВ. Количество таких вспышек, оцененное по данным наблюдений галактических объектов, позволяет объяснить наблюдаемую частоту возникновения БРВ. Не менее важно, что для вспышек

\* Электронный адрес: pshirkov@sai.msu.ru

<sup>1</sup> См. онлайн-каталоги frbcat.org и chime-frb.ca/repeaters.

на расстояниях  $\gtrsim 100$  Мпк не ожидается регистрации всплесков в, собственно, гамма-диапазоне, так как даже гипервспышки на таких расстояниях не могут быть задетектированы существующими мониторами  $\gamma$ -лучей (Лаццати и др., 2005; Попов и Штерн, 2006). Эти стороны магнитарной модели привели к разработке многих различных вариантов данного сценария (Любарский, 2014; Муразе и др., 2016; Белобородов, 2017; Метцгер и др., 2017; Лу и Кумар, 2018; Белобородов, 2019; Лютиков, 2020). Однако вплоть до настоящего времени не было прямых аргументов в пользу данной модели. Гипервспышка SGR 1806-20 не породила никакого сигнала в радиодиапазоне, похожего на БРВ, что также рассматривалось как один из основных недостатков магнитарного сценария (Тендулкар и др., 2016).

Очевидно, что детектирование короткого радиовсплеска от магнитара в нашей Галактике, находящегося в стадии вспышечной активности, значительно усилило бы позиции магнитарной модели. Такое детектирование совсем недавно действительно произошло: 28 апреля 2020 г. установки CHIME и STARE2 зарегистрировали двойной БРВ (Коллаборация CHIME/FRBa, 2020; Боченек и др., 2020). В область локализации всплеска, полученной на CHIME, попал уже известный галактический магнитар SGR 1935+2154. Одновременно несколько инструментов зарегистрировали вспышку в рентгеновском и гамма-диапазонах (Мерегетти и др., 2020; Ридная и др., 2020; Ли и др., 2020; Тавани и др., 2020). Многие восприняли это открытие как окончательное подтверждение магнитарной гипотезы происхождения БРВ. Важно, однако, заметить, что светимость радиовсплеска SGR 1935+215 была значительно ниже, чем светимость известных БРВ. В любом случае область поиска связей между магнитарами и БРВ стала еще более популярной<sup>2</sup>.

Для проверки магнитарной модели могут использоваться и наблюдения магнитаров в других галактиках. Гигантские вспышки магнитаров в соседних галактиках теоретически являются обнаружимыми на существующем уровне чувствительности детекторов, более того, уже имеется несколько таких кандидатов (Фредерикс и др., 2007а; Мазец и др., 2008; Янг и др., 2020). Кроме того, проводились целенаправленные поиски магнитара, предположительно связанного с GRB 070201 (Офек и др., 2008).

Если магнитарные вспышки иногда сопровождаются короткими радиовсплесками (причем теперь мы знаем, что более слабые вспышки магнитаров в жестком диапазоне могут производить БРВ, пусть и менее мощные), то такие события могут также быть зарегистрированы. Туманность Андромеды, М31, является одним из лучших мест для поиска подобных событий.

Обзор М31 в радиодиапазоне был проведен на телескопе в Вестерборке (Westerbork Synthesis Radio Telescope, WSRT) на частоте  $\sim 330$  МГц с целью поиска радиопульсаров или быстрых радиотранзиентов (например, так называемых вращающихся радиотранзиентов, обозначаемых RRATs от англ. rotating radio transients). В ходе обзора было обнаружено несколько слабых коротких радиовсплесков из этой области. Во многих отношениях эти всплески выглядят как более слабые аналоги БРВ. Результаты поиска Рубио-Эррера и др. (2013) кратко описаны в следующем разделе.

Также поиск радиовспышек в М31 осуществлялся на телескопе LOFAR на частотах  $\sim 150$  МГц (Ван Лёвен и др., 2020). Одной из основных задач, которые ставили перед собой авторы, была попытка зарегистрировать всплески от источников, ответственных за события, представленные в работе Рубио-Эррера и др. (2013). Однако в ходе наблюдений на LOFAR не было обнаружено никаких радиотранзиентов.

Если какие-то из радиовсплесков из Рубио-Эррера и др. (2013) связаны с магнитарами, то кроме поиска вспышек на высоких энергиях можно искать периодический сигнал, связанный с рентгеновским излучением этих нейтронных звезд. Рентгеновский телескоп XMM-Newton многократно наблюдал галактику М31 (Штиле и др., 2011), и полученные данные уже использовались для поиска периодических источников<sup>3</sup>. В результате поисков был обнаружен интересный объект — аккрецирующий рентгеновский пульсар в составе двойной системы (Эспозито и др., 2016; Золотухин и др., 2017), однако не было зарегистрировано ни одного кандидата в магнитары.

В настоящей работе мы провели более детальный поиск гипотетического магнитара в М31, который мог бы быть источником шести радиовсплесков с мерой дисперсии  $DM \approx 55 \text{ см}^{-3}$  пк, обнаруженных в работе Рубио-Эррера и др. (2013). Поскольку в этом исследовании были представлены некоторые указания на существование периода  $\sim 0.2\text{--}0.3$  с, а также даны приблизительные

<sup>2</sup> Чуть ранее были зарегистрированы более слабые вспышки от другого галактического магнитара — XTE1810-197 (Маан и др., 2019; Перлман и др., 2020). Однако, судя по всему, эти события никак не связаны с БРВ.

<sup>3</sup> Список статей, в которых представлены результаты такого анализа, доступен он-лайн по адресу <http://www.extras-fp7.eu/index.php/scientific-community/publications/all-papers>.

координаты всплесков, то у нас появляется возможность увеличить чувствительность по сравнению со слепым поиском периодичности. Также мы использовали практически в полтора раза больше наблюдательных сеансов и применяемый нами для поиска периодического сигнала метод,  $H$ -тест, отличается от теста Рэлея, использованного в проекте EXTraS. В отличие от последнего, он позволяет использовать для поиска дополнительные гармоники и, как показано Де Ягер (1989), обладает большей силой, особенно, если импульс занимает небольшую часть периода. Также  $H$ -тест обладает значительно большей силой, если импульс имеет сложную форму и состоит из нескольких пиков.

В следующем разделе мы делаем оценки для ожидаемого сигнала. Затем мы описываем использованные в работе методы и наблюдательные данные. После этого мы представляем наши результаты. Заключительный раздел содержит обсуждение полученных результатов и основные выводы.

## 2. ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТАРА

В начале этого раздела кратко перечислим основные результаты, полученные в работе Рубио-Эррера и др. (2013), что поможет нам сделать некоторые оценки для ожидаемых параметров гипотетического магнитара, являющегося источником миллисекундных радиоимпульсов. Рубио-Эррера и др. (2013) произвели поиск транзиентов в галактике M31 и некоторых ее спутниках в радиодиапазоне. Было зарегистрировано  $\sim 30$  сильных (отношение сигнала к шуму,  $S/N > 7$ ) одиночных всплесков с мерой дисперсии  $DM > 45 \text{ см}^{-3} \text{ пк}$ . Также была зарегистрирована группа из шести более слабых ( $5 < S/N < 6$ ) всплесков с одинаковым значением меры дисперсии  $DM \approx 55 \text{ см}^{-3} \text{ пк}$ . Отметим, что нижняя оценка меры дисперсии для M31 составляет как раз примерно  $55 \pm 10 \text{ см}^{-3} \text{ пк}$  (Рубио-Эррера и др., 2013). Дальнейший анализ времен прихода этих шести импульсов позволил говорить о возможном существовании периода  $\sim 0.3 \text{ с}$ , если все эти импульсы порождены одним источником. Далее мы будем обсуждать гипотетический источник этих шести событий, предполагая, что это мог быть молодой магнитар, а наблюдаемая периодичность могла быть связана с вращением НЗ.

Типичные потоки зарегистрированных радио-всплесков составляли порядка нескольких Ян (Рубио-Эррера и др., 2013), что на расстоянии до M31 (778 кпк до центра галактики, Караченцев и др., 2004) соответствует радиосветимости  $L_R \sim 10^{36} \text{ эрг с}^{-1}$ . По наблюдениям всплесков галактического магнитара SGR 1935+215 в рентгеновском и радиодиапазонах можно оценить

отношение светимостей:  $L_R/L_X \approx 10^{-8} - 10^{-5}$  (см., например, Ридная и др., 2020). Таким образом, если радиовсплески в M31 возникали во время вспышек магнитаров, то их рентгеновская светимость может быть оценена, как  $L_X \sim 10^{41} - 10^{44} \text{ эрг с}^{-1}$ . При использовании оценок плотности потока в радиовсплеске SGR 1935+2154 из наблюдений STARE2 (Боченек и др., 2020) рентгеновская светимость будет ближе к нижней границе нашей оценки.

Одиночная вспышка с полной энергией  $\sim 10^{40}$  эрг и светимостью  $L_X \sim 10^{41} \text{ эрг с}^{-1}$  (как в случае SGR 1935+2154, Ридная и др., 2020) может быть обнаружена в галактике M31, если ее спектр в области высоких энергий ( $\sim 1-250 \text{ кэВ}$ ) не слишком жесткий (иначе количество зарегистрированных фотонов будет просто недостаточным для статистически значимого детектирования). Для фотонного индекса  $\Gamma = 1$  соответствующий флюэнс составит величину лишь  $\sim 2 \times 10^{-3} \text{ см}^{-2}$ . Типичный монитор всего неба в  $\gamma$ -лучах обладает небольшой эффективной площадью в несколько сотен кв. см (Konus-WIND — 100  $\text{см}^2$ , Fermi-GBM — 300  $\text{см}^2$ ). Лишь инструменты с меньшим полем зрения имеют большие площади (Swift — 1000  $\text{см}^2$ , Fermi-LAT — 5000  $\text{см}^2$ , причем в последнем случае эффективное детектирование начинается с высоких энергий  $> 100 \text{ МэВ}$ ). Для более мягкого фотонного индекса  $\Gamma = 3$  положение более благоприятное и флюэнс может достигать величин порядка 0.1  $\text{см}^{-2}$ , так что всплеск может быть зарегистрирован существующими мониторами всего неба.

Периодичность излучения, указания на которую были обнаружены в работе Рубио-Эррера и др. (2013), может позволить несколько ограничить параметры источника, если это НЗ. Для описания можно использовать модифицированную формулу для излучения магнитного диполя:

$$I\Omega\dot{\Omega} = \frac{2\mu^2\Omega^4}{3c^3}, \quad (1)$$

где  $I$  — это момент инерции НЗ,  $\Omega = 2\pi/P$  — угловая частота вращения,  $\mu = BR^3$  — магнитный момент, а  $c$  — скорость света.

Для экспоненциально затухающего поля  $\mu = \mu_0 \times \exp(-t/\tau)$  можно получить выражения для эволюции периода:

$$P^2 - P_0^2 = \frac{2}{3}(2\pi)^2 \frac{\mu_0^2 \tau}{Ic^3} \left(1 - e^{-2T/\tau}\right), \quad (2)$$

где  $T$  — это возраст НЗ.

При очень быстром начальном вращении ( $P \ll 0.3 \text{ с}$ ) и экспоненциально затухающем на временном масштабе  $\tau$  поле, замедление до вращения с периодом  $P = 0.3 \text{ с}$  происходит за  $t \approx \tau$  для

магнитного момента  $\mu_0 \approx 10^{32}$  Гс см<sup>3</sup>, т.е. для  $B_0 \approx 10^{14}$  Гс. При таком магнитном поле временной масштаб  $\tau$  составит величину порядка нескольких сотен лет, что позволяет оценить возраст гипотетического магнитара, который может быть источником шести коротких радиовсплесков в М31. Для  $T \gg \tau$  периоды НЗ с настолько сильными полями становятся очень длинными. Теоретически возможна ситуация, когда  $T \ll \tau$ , если  $P \approx P_0$ , но в этом случае магнитар был бы очень молодым и, скорее всего, в недавнем прошлом должен был бы наблюдаться взрыв сверхновой — прародительницы НЗ.

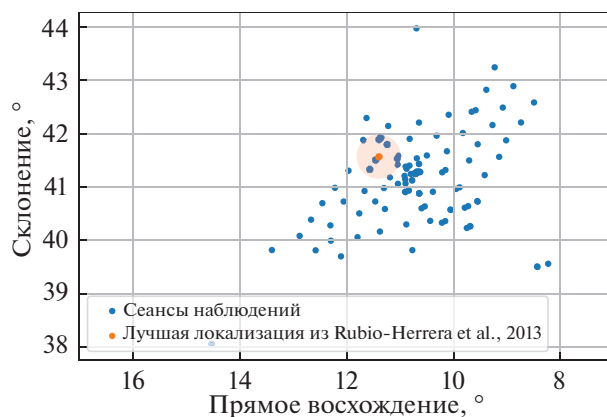
Ожидается, что молодые магнитары с возрастом в несколько сотен лет являются более активными (Перна, Понс, 2011) и время ожидания между периодами вспышек составляет несколько месяцев. Таким образом, вероятность найти магнитар в активной фазе, в которой рентгеновская светимость увеличена, достаточно высока. С другой стороны, наблюдения галактических источников позволяют утверждать, что радиовсплески очень редки даже в периоды повышенной активности и, более того, они могут объединяться в группы, подобно всплескам от повторного источника FRB121102 (возможно, что такое поведение уже наблюдалось у SGR 1935+2154 Кирстен и др., 2020). В связи с этим мы сконцентрируемся на поиске периодического сигнала в рентгеновском диапазоне.

### 3. МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ПОИСКА МАГНИТАРОВ В М31

Поиск периодического сигнала от магнитара в М31, сходного с уже известными галактическими объектами, затруднен тем, что типичная светимость магнитаров в фазе активности (вне вспышек)  $\lesssim 10^{36}$  эрг с<sup>-1</sup> (см. каталог активности магнитаров Коти Дзелати и др., 2018; онлайн-версия: <http://magnetars.ice.csic.es/#/outbursts>).

В обзоре М31, проведенном XMM-Newton (Штиле и др., 2011), ограничения снизу на поток были  $\sim 10^{-15}$  эрг см<sup>-2</sup> с<sup>-1</sup>, что соответствует ограничениям на светимость  $\sim 10^{35}$  эрг с<sup>-1</sup>. Столь малые потоки требуют экспозиции длиной  $\sim \mathcal{O}(10^4)$  с<sup>4</sup> только для детектирования. Таким образом, слабые источники могут быть зарегистрированы, но число фотонов будет недостаточным для поиска периодичности.

Однако, если мы ищем магнитар с периодом вращения  $\sim 0.3$  с, то он может быть очень молодым с возрастом порядка нескольких сотен лет (см. выше), что значительно меньше, чем все известные



**Рис. 1.** Распределение сеансов наблюдений, которые использовались в работе. Кругом с центром в (11:40, 41:57) и радиусом 0.4° показана наиболее вероятная область локализации всплесков по данным работы (Рубио-Эррера и др., 2013).

магнитары в Галактике. Ожидается, что более молодые магнитары чаще находятся в активной фазе и светимость во время этой фазы у них может быть несколько выше, чем у более старых собратьев (Перна, Понс, 2011), поэтому характерная светимость гипотетического магнитара составляет  $L_X \gtrsim 10^{36}$  эрг с<sup>-1</sup>.

Всплески, которые наблюдались на радиотелескопе в Вестерборке, не были точно локализованы, поэтому мы решили искать пульсации в полной популяции источников в М31. Для этого из каталога 4XMM-DR9 (Уэбб и др., 2020), который охватывает период наблюдений в интервале с 3 февраля 2000 г. по 26 февраля 2019 г., были выбраны сеансы наблюдений детектора EPIC rp в режимах “Full Frame” с центрами полей, лежащими на расстоянии не более пяти градусов до центра Туманности Андромеды ( $\alpha = 10^{\circ}685$ ,  $\delta = +41^{\circ}269$ ). Всего было отобрано 138 сеансов (см. Приложение) и исследовано 5339 источников в 15 016 индивидуальных детектированиях (рис. 1).

Анализ проводился средствами стандартного пакета Science Analysis System (SAS) XMM-Newton. Сначала для каждого источника, детектированного в данном сеансе, отбирались все события, находящиеся в кругах радиусом 30" и 15". Два различных радиуса были использованы для того, чтобы найти баланс между максимальным учетом событий от источника и минимальным вкладом фоновых событий. После этого с помощью утилиты *barycen* времена прихода фотонов на детектор приводились в барицентр Солнечной системы для того, чтобы избавиться от неравномерности, связанной с орбитальным движением спутника. Поиск периодических сигналов проводился в два

<sup>4</sup> [https://xmm-tools.cosmos.esa.int/external/xmm\\_user\\_support/documentation/uhb/epicsens.html](https://xmm-tools.cosmos.esa.int/external/xmm_user_support/documentation/uhb/epicsens.html)

этапа: на первом этапе с использованием метода быстрого преобразования Фурье (БПФ) строился частотный спектр сигнала и определялась частота, соответствующая максимальной амплитуде спектра. На втором этапе значимость этого пика оценивалась с помощью  $H$ -теста (Де Ягер, 1989, 2010) — стандартного метода поиска слабых периодических сигналов в рентгеновской и гамма-астрономии. Из-за использования для поиска периодичности нескольких гармоник основной частоты он обладает более высокой мощностью и позволяет искать сигналы с узким импульсом, которые трудно обнаружить с помощью обычного фурье-анализа. Очевидным достоинством  $H$ -теста является то, что он позволяет легко получить тест-статистику и оценить статистическую значимость обнаруженного сигнала, которая описывается простой формулой:

$$P(>H) = e^{-0.4H}. \quad (3)$$

Формула (3) позволяет получить локальную значимость периодического сигнала  $P_{\text{loc}}$  для каждого источника в данном сеансе. Для того чтобы получить глобальную значимость сигнала, необходимо ввести поправки на количество вариантов, испробованных при переборе:

$$P_{\text{glob}} = N_{\text{freq}} N_{\text{det}} P_{\text{loc}}, \quad (4)$$

где  $N_{\text{freq}}$  — число частот, использованных для поиска пика методом БПФ,  $N_{\text{det}}$  — общее число детектирований во всех сеансах с учетом того, что выборка событий проводилась в кругах двух различных радиусов.

В анализе БПФ использовалось частотное разрешение  $\delta f = 1/(10 T)$ , где  $T$  — общая продолжительность наблюдений источника в сеансе, для большинства сеансов лежащая в диапазоне  $10^4$  —  $10^5$  с. Максимальная частота  $f_{\text{max}} = 6.8$  Гц задавалась временным разрешением телескопа, равным 73.4 мс, таким образом,  $N_{\text{freq}} = 10^6 - 10^7$ . Все вместе это позволяет оценить пороговое значение для  $P_{\text{loc}}$ :

$$P_{\text{thr}} = 10^{-10}. \quad (5)$$

Ложные сигналы, которые могли возникать из-за сравнительно низкого порога, были максимально отсеяны введением дополнительных условий:

- сигнал должен наблюдаться в обеих выборках, соответствующих радиусам  $15''$  и  $30''$ , причем со сравнимой значимостью;
- сигнал не должен был наблюдаться на частотах, очень близких к целым единицам Гц, и его период не должен быть близок к целым секундам. Как подозрительные отбрасывались сигналы, где относительная разница была на уровне  $10^{-3}$ ;

- количество фотонов должно было превышать 10. Последние два условия позволили уменьшить вклад инструментальных артефактов.

Приведенные оценки для порога локальной значимости справедливы в случае детектирования сигнала в одном сеансе. Очевидно, что детектирование сигнала на близких частотах в двух различных сеансах значительно усиливает уверенность в реальном существовании лежащей за ним периодичности. Для оценки величины порогового значения  $P_0$  в этом случае можно рассмотреть симметричный случай — пусть сигнал с одинаковой значимостью, соответствующей вероятности  $P_0$ , был зарегистрирован в двух сеансах на близких частотах. Для упрощения мы считаем, что каждый источник детектировался ровно по два раза. Общая вероятность такого события определяется формулой

$$P_{\text{comb}} = 1/2 P_0^2 N_{\text{det}} N_{\text{freq}} N_{\Delta\text{freq}}. \quad (6)$$

Количество вариантов перебора задается произведением  $1/2 N_{\text{freq}} N_{\text{det}} N_{\Delta\text{freq}}$ . Первые два члена дают количество вариантов для первого наблюдения какого-то источника, третий же,  $N_{\Delta\text{freq}}$ , зависит от количества вариантов, перебираемых для второго наблюдения этого источника. В последнем случае перебор теперь ведется не по всем частотам в спектре БПФ, а только по частотам в близкой окрестности сигнала, обнаруженного в первом сеансе, поэтому  $N_{\text{freq}}$  заменяется на  $N_{\Delta\text{freq}}$ . Окрестность считается близкой, если разность частот сигналов  $\Delta f \leq \eta f$ ,  $\eta = 10^{-3}$ . Такое отличие в частоте может возникать в тесных массивных двойных системах из-за эффекта Доплера, вызванного орбитальным движением со скоростью  $v \sim \eta c$ . Соответствующее число частот  $N_{\Delta\text{freq}} \leq 2\eta f_{\text{max}}/\delta f = 2\eta N_{\text{freq}}$ . В итоге из условия  $P_{\text{comb}} < 1$  можно получить оценку порога значимости

$$P_0 < 1/\sqrt{\eta N_{\text{det}} N_{\text{freq}}^2}. \quad (7)$$

Для характерных величин параметров  $P_0 \sim 10^{-7}$ , но для целей первоначального поиска сигналов мы, учитывая несимметричность, использовали порог  $P_0 < 10^{-6}$ , т.е. для одного и того же источника сигнал должен был быть зарегистрирован в двух разных сеансах на близких частотах, причем локальная вероятность в каждом сеансе должна была быть менее  $10^{-6}$ .

Аналогично был проведен поиск периодического сигнала в окрестности частот, соответствующих возможным периодам вращения магнитара, которые были найдены в (Рубио-Эррера и др., 2013):

**Таблица 1.** Свойства периодического сигнала от аккрецирующего пульсара ЗХММ J004301.4+413017

<i>ObsID</i>	$p_{30''}$	$p_{15''}$	$f$ , Гц
0112570101	$4.8 \times 10^{-7}$	$5.5 \times 10^{-6}$	0.8308
0505720301	$1.6 \times 10^{-9}$	$1.3 \times 10^{-8}$	0.8309
0650560301	$1.1 \times 10^{-14}$	$1.0 \times 10^{-9}$	0.8307
0690600401	$1.1 \times 10^{-7}$	$1.0 \times 10^{-7}$	0.8309
0700380601	$8.8 \times 10^{-9}$	$5.1 \times 10^{-9}$	0.8307
0744350301	$2.8 \times 10^{-8}$	$5.0 \times 10^{-8}$	0.8307

**Примечание.** В первом столбце показаны идентификаторы сеансов наблюдений *ObsID*, во втором и третьем — локальные  $p$ -значения, соответствующие радиусам выборки 30'' и 15'', в четвертом — частоты обнаруженного сигнала.

$P_1 = 0.23294$  с и  $P_2 = 0.29578$  с. Поиск проводился в окрестностях соответствующих частот  $f_1 = 1/P_1 = 4.29295$  Гц и  $f_2 = 1/P_2 = 3.38089$  Гц в интервалах частот  $\Delta f_{1,2} = \eta f_{1,2}$ . Пороги чувствительности в случае такого поиска естественно образом понижаются, так как везде перебор идет не по всему набору частот, а по частотам в узком интервале  $N_{\text{freq}} \rightarrow N_{\Delta \text{freq}} \approx \eta N_{\text{freq}}$ . Для одиночного сигнала пороговая значимость была оценена как  $P_{\text{thr},f} = P_{\text{thr}}/\eta \sim 10^{-7}$ , для детектирования в двух сеансах  $P_{0,f} = P_0/\sqrt{\eta} \sim 10^{-5}$ .

Сформулированные выше критерии были применены для поиска сигналов. В результате, кроме уже известного ЗХММ J004301.4+413017 (Золотухин и др., 2017), не было найдено ни одного источника, удовлетворяющего этим критериям, как в слепом поиске, так и в поиске в окрестности частот, соответствующих возможным частотам вращения магнитара. Периодический сигнал от источника ЗХММ J004301.4+413017 был зарегистрирован в шести сеансах, свойства обнаруженного сигнала представлены в табл. 1.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Магнитары не являются высокостабильными источниками — поток излучения от них может значительно меняться, усиливаясь во время нерегулярных периодов повышенной активности (Коти Дзелати и др., 2018). Поэтому достаточно естественно, что источник, обнаруженный в какую-то эпоху, не может быть детектирован через несколько лет. Это может объяснить отсутствие детектирования радиовсплесков в ходе наблюдений LOFAR.

Также отсутствие детектирования может объясняться возможным завалом спектра на низких частотах, так как наблюдения LOFAR проводились на 150 МГц, а первоначальное обнаружение произошло на частоте 330 МГц.

Спектр рентгеновских вспышек SGR1935+2134 был достаточно жестким с фотонным индексом  $\lesssim 1$  (Ридная и др., 2020). Поэтому нет ничего странного в том, что, если бы радиовсплески Рубио-Эррера и др. (2013) сопровождалась рентгеновскими вспышками, то последние не были бы зарегистрированы. С другой стороны, поведение активного молодого магнитара является очень нестабильным и можно было бы ожидать, что он будет источником большого количества рентгеновских и  $\gamma$ -всплесков с различными интенсивностями и фотонными индексами, в том числе и сравнительно мягкими. Некоторые из таких вспышек могли бы быть зарегистрированы существующими инструментами, отсутствие этих детектирований является аргументом против гипотезы источника-магнитара.

Темп звездообразования в М31 примерно в два раза ниже, чем в нашей Галактике (Вилльямс, 2003), поэтому в Туманности Андромеды должно существовать несколько активных магнитаров. Но если доля магнитаров в общей популяции образовавшихся НЗ составляет порядка 10% (Попов и др., 2010), и ожидаемый возраст нашего гипотетического источника всего лишь сотни лет, то есть большая вероятность, что в этой галактике не существует объектов с необходимыми свойствами. К сожалению, имеющиеся рентгеновские данные по М31 не позволяют сделать существенные ограничения на полную популяцию магнитаров, аналогично тому, что было сделано для нашей Галактики в работе Муно и др. (2008). Вероятно, будущие достаточно продолжительные наблюдения М31 на спутнике Спектр-РГ в режиме наведения дадут возможность обнаружить магнитары в этой галактике.

В заключение мы можем сказать, что скорее всего шесть радиовсплесков с мерой дисперсии  $DM=55 \text{ см}^{-3}$  пк, обнаруженные в Рубио-Эррера и др. (2013), в направлении на М31 не являются следствием активности молодого магнитара в этой галактике.

Работа поддержана Минобрнауки РФ в рамках программы финансирования крупных научных проектов национального проекта “Наука” (грант 075-15-2020-778). М.С. Пширков благодарит за поддержку Фонд развития теоретической физики и математики “БАЗИС”.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

Для анализа мы использовали сеансы с  $ObsID =$

0065770101,	0109270301,	0109270401,
0109270701,	0112570101,	0112570201,
0112570401,	0112570601,	0112570301,
0151581101,	0151581201,	0151580101,
0151581301,	0151581301,	0151580401,
0202230301,	0202230401,	0202230201,
0202230501,	0202230501,	0204790401,
0300910201,	0402560101,	0402560201,
0402560301,	0402560401,	0402560501,
0402560601,	0402560601,	0402560701,
0402560801,	0402560901,	0402561001,
0402561101,	0402561201,	0402561301,
0402561401,	0402561501,	0402561601,
0404060201,	0405320501,	0405320601,
0405320701,	0405320801,	0405320901,
0410582001,	0505720201,	0505720301,
0505720401,	0505720501,	0505720601,
0505720701,	0505720801,	0505720901,
0505721001,	0505721101,	0505721201,
0505721301,	0505721401,	0505721501,
0505721601,	0505721701,	0505721801,
0505721901,	0505722001,	0505722101,
0505722201,	0505722301,	0505722401,
0505722501,	0505722601,	0505722701,
0505722801,	0505722901,	0505723001,
0505723101,	0505723201,	0505723301,
0505723401,	0505723501,	0505723601,
0505723701,	0505723801,	0505723901,
0505724001,	0505724101,	0505724201,
0505724301,	0505724401,	0505724501,
0505724601,	0505724701,	0505724801,
0505724901,	0505725001,	0505725101,
0505725201,	0505725301,	0505725401,
0505725501,	0505725601,	0505725701,
0505725801,	0505725901,	0505726001,
0505726101,	0505726201,	0505726301,
0505726401,	0505726501,	0505726601,
0505726701,	0505726801,	0505726901,
0505727001,	0505727101,	0505727201,
0505727301,	0505727401,	0505727501,
0505727601,	0505727701,	0505727801,
0505727901,	0505728001,	0505728101,
0505728201,	0505728301,	0505728401,
0505728501,	0505728601,	0505728701,
0505728801,	0505728901,	0505729001,
0505729101,	0505729201,	0505729301,
0505729401,	0505729501,	0505729601,
0505729701,	0505729801,	0505729901,
0505730001,	0505730101,	0505730201,
0505730301,	0505730401,	0505730501,
0505730601,	0505730701,	0505730801,
0505730901,	0505731001,	0505731101,
0505731201,	0505731301,	0505731401,
0505731501,	0505731601,	0505731701,
0505731801,	0505731901,	0505732001,
0505732101,	0505732201,	0505732301,
0505732401,	0505732501,	0505732601,
0505732701,	0505732801,	0505732901,
0505733001,	0505733101,	0505733201,
0505733301,	0505733401,	0505733501,
0505733601,	0505733701,	0505733801,
0505733901,	0505734001,	0505734101,
0505734201,	0505734301,	0505734401,
0505734501,	0505734601,	0505734701,
0505734801,	0505734901,	0505735001,
0505735101,	0505735201,	0505735301,
0505735401,	0505735501,	0505735601,
0505735701,	0505735801,	0505735901,
0505736001,	0505736101,	0505736201,
0505736301,	0505736401,	0505736501,
0505736601,	0505736701,	0505736801,
0505736901,	0505737001,	0505737101,
0505737201,	0505737301,	0505737401,
0505737501,	0505737601,	0505737701,
0505737801,	0505737901,	0505738001,
0505738101,	0505738201,	0505738301,
0505738401,	0505738501,	0505738601,
0505738701,	0505738801,	0505738901,
0505739001,	0505739101,	0505739201,
0505739301,	0505739401,	0505739501,
0505739601,	0505739701,	0505739801,
0505739901,	0505740001,	0505740101,
0505740201,	0505740301,	0505740401,
0505740501,	0505740601,	0505740701,
0505740801,	0505740901,	0505741001,
0505741101,	0505741201,	0505741301,
0505741401,	0505741501,	0505741601,
0505741701,	0505741801,	0505741901,
0505742001,	0505742101,	0505742201,
0505742301,	0505742401,	0505742501,
0505742601,	0505742701,	0505742801,
0505742901,	0505743001,	0505743101,
0505743201,	0505743301,	0505743401,
0505743501,	0505743601,	0505743701,
0505743801,	0505743901,	0505744001,
0505744101,	0505744201,	0505744301,
0505744401,	0505744501,	0505744601,
0505744701,	0505744801,	0505744901,
0505745001,	0505745101,	0505745201,
0505745301,	0505745401,	0505745501,
0505745601,	0505745701,	0505745801,
0505745901,	0505746001,	0505746101,
0505746201,	0505746301,	0505746401,
0505746501,	0505746601,	0505746701,
0505746801,	0505746901,	0505747001,
0505747101,	0505747201,	0505747301,
0505747401,	0505747501,	0505747601,
0505747701,	0505747801,	0505747901,
0505748001,	0505748101,	0505748201,
0505748301,	0505748401,	0505748501,
0505748601,	0505748701,	0505748801,
0505748901,	0505749001,	0505749101,
0505749201,	0505749301,	0505749401,
0505749501,	0505749601,	0505749701,
0505749801,	0505749901,	0505750001,

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белобородов (А.М. Beloborodov), *Astrophys. J. Lett.* **843** (2), L26 (2017).
2. Белобородов (А.М. Beloborodov), arXiv e-prints, p. arXiv:1908.07743 (2019).
3. Боченек и др. (С. D. Bochenek, V. Ravi, K. V. Belov, G. Hallinan, J. Kocz, S. R. Kulkarni, et al.), arXiv e-prints, p. arXiv:2005.10828 (2020).
4. Ван Лёвен и др. (J. van Leeuwen, K. Mikhailov, E. Keane, T. Coenen, L. Connor, V. Kondratiev, et al.), *Astron. Astrophys.* **634**, A3 (2020).
5. Вилльямс (В.Ф. Williams), *The Astronomical Journal* **126** (3), 1312 (2003).
6. Де Ягер (О.С. de Jager, В.С. Raubenheimer, and J.W.H. Swanepoel), *Astron. Astrophys.* **221**, 180 (1989).
7. Де Ягер (О.С. de Jager and I. Büsching), *Astron. Astrophys.* **517**, L9 (2010).
8. Золотухин и др. (I.Y. Zolotukhin, M. Bachetti, N. Sartore, I.V. Chilingarian, and N.A. Webb), *Astrophys. J.* **839** (2), 125 (2017).
9. Караченцев и др. (I.D. Karachentsev, V.E. Karachentseva, W.K. Huchtmeier, and D.I. Makarov), *Astron. J.* **127** (4), 2031 (2004).
10. Кирстен и др. (F. Kirsten, M. Snelders, M. Jenkins, K. Nimmo, J. van den Eijnden, J. Hessels, et al.), arXiv e-prints, p. arXiv:2007.05101 (2020).
11. Коллаборация CHIME/FRBa (The CHIME/FRB Collaboration, В.С. Andersen, К.М. Bandura, М. Bhardwaj, А. Bij, et al.), arXiv e-prints, p. arXiv:2005.10324 (2020).
12. Кордес, Чаттерджи (J.M. Cordes and S. Chatterjee), *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **57**, 417 (2019).
13. Коти Дзелати и др. (F. Coti Zelati, N. Rea, J.A. Pons, S. Samprana, and P. Esposito), *MNRAS* **474** (1), 961 (2018).
14. Лаццати и др. (D. Lazzati, G. Ghirlanda, and G. Ghisellini), *MNRAS* **362** (1), L8 (2005).
15. Ли и др. (С.К. Li, L. Lin, S.L. Xiong, М.У. Ge, Х.В. Li, Т.Р. Li, et al.), arXiv e-prints, p. arXiv:2005.11071 (2020).
16. Лоример и др. (D.R. Lorimer, M. Bailes, М.А. McLaughlin, D.J. Narkevic, and F. Crawford), *Science* **318**, 777 (2007).
17. Лу, Кумар (W. Lu and P. Kumar), *MNRAS* **477** (2), 2470 (2018).
18. Любарский (Y. Lyubarsky), *MNRAS* **442**, L9 (2014).
19. Лютиков (M. Lyutikov), arXiv e-prints, p. arXiv:2006.16029 (2020).
20. Маан и др. (Y. Maan, В.С. Joshi, М.Р. Surnis, М. Bagchi, and P.K. Manoharan), *Astrophys. J. Lett.* **882** (1), L9 (2019).
21. Мазец и др. (Е.Р. Mazets, R.L. Aptekar, T.L. Cline, D.D. Frederiks, J.O. Goldsten, S.V. Golenetskii, et al.), *Astrophys. J.* **680** (1), 545 (2008).
22. Мерегетти и др. (S. Mereghetti, V. Savchenko, С. Ferrigno, D. Götz, M. Rigoselli, A. Tiengo, et al.), arXiv e-prints, p. arXiv:2005.06335 (2020).
23. Метцгер и др. (B.D. Metzger, E. Berger, and B. Margalit), *Astrophys. J.* **841**, 14 (2017).
24. Муно и др. (M.P. Muno, В.М. Gaensler, A. Nechita, J.M. Miller, and P.O. Slane), *Astrophys. J.* **680** (1), 639 (2008).
25. Муразе и др. (K. Murase, K. Kashiyama, and P. Mészáros), *MNRAS* **461**, 1498 (2016).
26. Офек и др. (Е.О. Ofek, M. Muno, R. Quimby, S.R. Kulkarni, H. Stiele, W. Pietsch, et al.), *Astrophys. J.* **681** (2), 1464 (2008).
27. Перлман и др. (А.В. Pearlman, W.A. Majid, Т.А. Prince, P.S. Ray, J. Kocz, S. Horiuchi, et al.), arXiv e-prints, p. arXiv:2005.08410 (2020).
28. Перна, Понс (R. Perna and J.A. Pons), *Astrophys. J. Lett.* **727** (2), L51 (2011).
29. Петрофф и др. (Е. Petroff, E.D. Barr, A. Jameson, E.F. Keane, M. Bailes, M. Kramer, et al.), *Publ. Astron. Soc. Australia* **33**, e045 (2016).
30. Петрофф и др. (Е. Petroff, J.W.T. Hessels, and D.R. Lorimer), *Astron. Astrophys. Rev.* **27** (1), 4 (2019).
31. Платтс и др. (E. Platts, A. Weltman, A. Walters, S.P. Tendulkar, J.E.B. Gordin, and S. Kandhai), *Phys. Rep.* **821**, 1 (2019).

32. Попов, Постнов (S.B. Popov and K.A. Postnov), arXiv e-prints, p. arXiv:0710.2006 (2007).
33. Попов, Штерн (S.B. Popov and B.E. Stern), MNRAS **365** (3), 885 (2006).
34. Попов и др. (S.B. Popov, J.A. Pons, J.A. Miralles, P.A. Boldin, and B. Posselt), MNRAS **401** (4), 2675 (2010).
35. Попов и др. (S.B. Popov, K.A. Postnov, and M.S. Pshirkov), Physics Uspekhi **61** (10), 965 (2018).
36. Ридная и др. (A. Ridnaia, D. Svinkin, D. Frederiks, A. Вukov, S. Popov, R. Aptekar, et al.), arXiv e-prints, p. arXiv:2005.111178 (2020).
37. Рубио-Эррера и др. (E. Rubio-Herrera, B.W. Stappers, J.W.T. Hessels, and R. Braun), MNRAS **428** (4), 2857 (2013).
38. Тавани и др. (M. Tavani, C. Casentini, A. Ursi, F. Verrecchia, A. Addis, L.A. Antonelli, et al.), arXiv e-prints, p. arXiv:2005.12164 (2020).
39. Тендулкар и др. (S.P. Tendulkar, V.M. Kaspi, and C. Patel), Astrophys. J. **827**, 59 (2016).
40. Торнтон и др. (D. Thornton, B. Stappers, M. Bailes, B. Barsdell, S. Bates, N.D.R. Bhat, et al.), Science **341** (6141), 53 (2013).
41. Туrolла и др. (R. Turola, S. Zane, and A.L. Watts), Rep. Progress in Phys. **78** (11), 116901 (2015).
42. Уэбб и др. (N.A. Webb, M. Coriat, I. Traulsen, J. Ballet, C. Motch, F.J. Carrera, et al.), Astron. Astrophys. **641**, A136 (2020).
43. Фредерикс и др. (D.D. Frederiks, V.D. Palshin, R.L. Aptekar, S.V. Golenetskii, T.L. Cline, and E.P. Mazets), Astronomy Letters **33** (1), 19 (2007a).
44. Фредерикс и др. (D.D. Frederiks, S.V. Golenetskii, Palshin, R.L. Aptekar, et al.), IAA **33** (1), 1 (2007b).
45. Харли и др. (K. Hurley, S.E. Boggs, D.M. Smith, R.C. Duncan, R. Lin, A. Zoglauer, et al.), Nature **434** (7037), 1098 (2005).
46. Чжан (B. Zhang), Nature **587** (7832), 45 (2020).
47. Штиле и др. (H. Stiele, W. Pietsch, F. Haberl, D. Hatzidimitriou, R. Barnard, B.F. Williams, et al.), Astron. Astrophys. **534**, A55 (2011).
48. Эспозито и др. (P. Esposito, G. L. Israel, A. Belfiore, G. Novara, L. Sidoli, G.A. Rodríguez Castillo, et al.), MNRAS **457** (1), L5 (2016).
49. Янг и др. (J. Yang, V. Chand, B.-B. Zhang, Y.-H. Yang, J.-H. Zou, Y.-S. Yang, et al.), Astrophys. J. **899** (2), 106 (2020).