

УДК 524.52-77:52-54

ЭВОЛЮЦИЯ НИЗКОЧАСТОТНОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ИОНИЗОВАННОГО ГАЗА ВОКРУГ МАССИВНОЙ ПРОТОЗВЕЗДЫ S255IR NIRS3 ПОСЛЕ АККРЕЦИОННОЙ ВСПЫШКИ СВЕТИМОСТИ

© 2026 П. М. Землянуха^{1*}, И. И. Зинченко¹, Е. М. Домбек¹, Д. К. Оджа²¹Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова Российской академии наук, Нижний Новгород, 603950 Россия²Институт фундаментальных исследований Тата, Мумбаи, 400005 Индия

Поступила в редакцию 10 сентября 2025 года; после доработки 21 января 2026 года; принята к публикации 26 февраля 2026 года

Представлены результаты анализа переменности источника S255IR NIRS3 в радиодиапазоне после эпизода аккреции. Источник наблюдался в двух эпохах: в январе–марте 2017 г. на частотах 0.3–10 ГГц и в марте 2019 г. на 1.32–1.42 ГГц — с помощью обсерваторий GMRT и VLA. По данным за 2017 г. спектр хорошо описывается зависимостью $F_\nu \sim \nu^{0.50 \pm 0.02}$ во всем указанном диапазоне. Такой показатель степенной зависимости обычно объясняется совместным вкладом теплового тормозного излучения ионизованного газа с оптически толстой и тонкой частями. Нетеплового излучения или излучения только оптически толстой части источника в нижней области диапазона частот не обнаруживается. По данным наблюдений 2019 г. в диапазоне 1.32–1.42 ГГц спектральный индекс составляет 1.58 ± 0.03 , что характерно для теплового излучения в основном оптически толстого ионизованного газа. Такое поведение может быть объяснено тем, что в 2017 г. доминирует излучение джета, а в 2019 г. — ультракомпактной зоны Н II. Наблюдаемый поток равен 3.93 ± 0.10 мЯн в 2017 г. (на частоте 1.42 ГГц) и 3.58 ± 0.16 мЯн в 2019 г. (1.37 ГГц). Оценка меры эмиссии в 2017 г. составляет $EM \gtrsim 3 \times 10^8$ пк см⁻⁶.

Ключевые слова: *методы: анализ данных — радиоизлучение с непрерывным спектром: звезды — звезды: протозвезды — звезды: отдельные: S255IR NIRS3*

1. ВВЕДЕНИЕ

Одной из актуальных проблем астрофизики является изучение процесса образования массивных звезд. Ключевой вопрос — является ли этот процесс масштабированной версией того, как образуются звезды малой массы или качественно отличается. У молодых звезд малой массы наблюдаются вспышки светимости, обусловленные событиями эпизодической аккреции вещества через протозвездные диски. Вспышки связаны с тем, что поток аккрецируемого вещества не равномерен из-за неоднородного диска. Несколько лет назад подобные явления были впервые зарегистрированы и у массивных протозвезд. Сводка зарегистрированных к настоящему времени событий такого рода приведена в работе Wolf et al. (2024). Имеются теоретические модели, предсказывающие подобное поведение у массивных протозвезд (Meyer et al., 2018). Часть аккрецируемого вещества выбрасывается вдоль оси диска в виде джетов и истечений.

Неравномерность аккреции приводит к формированию сгустков (узлов) в джете.

Одна из первых зарегистрированных аккреционных вспышек светимости у массивных протозвезд наблюдалась у объекта S255IR NIRS3 в 2015 году (Fujisawa et al., 2015; Stecklum et al., 2016; Caratti o Garatti et al., 2017). Это протозвезда с массой, близкой к $20 M_\odot$ (Zinchenko et al., 2015), удаленная от Солнца на расстояние $1.78_{-0.11}^{+0.12}$ кпк (Burns et al., 2016). Вспышка в инфракрасном (ИК) диапазоне сопровождалась вспышкой мазера метанола на частоте 6.7 ГГц, а также ростом светимости в радио- и субмиллиметровом диапазонах (Moscadelli et al., 2017; Cesaroni et al., 2018; Liu et al., 2018; Szymczak et al., 2018). В источнике известен вращающийся субкеплеровский псевдодиск размером порядка 400 а.е. (Zinchenko et al., 2024), с которого, вероятно, и идет аккреция. В результате эпизода аккреции в 2015 г. сформировался джет, наблюдаемый в разных диапазонах: в радио (Cesaroni et al., 2018; 2023; 2024), субмиллиметровом (Zinchenko et al., 2024) и в ИК (Fedriani

*E-mail: petez@ipfran.ru

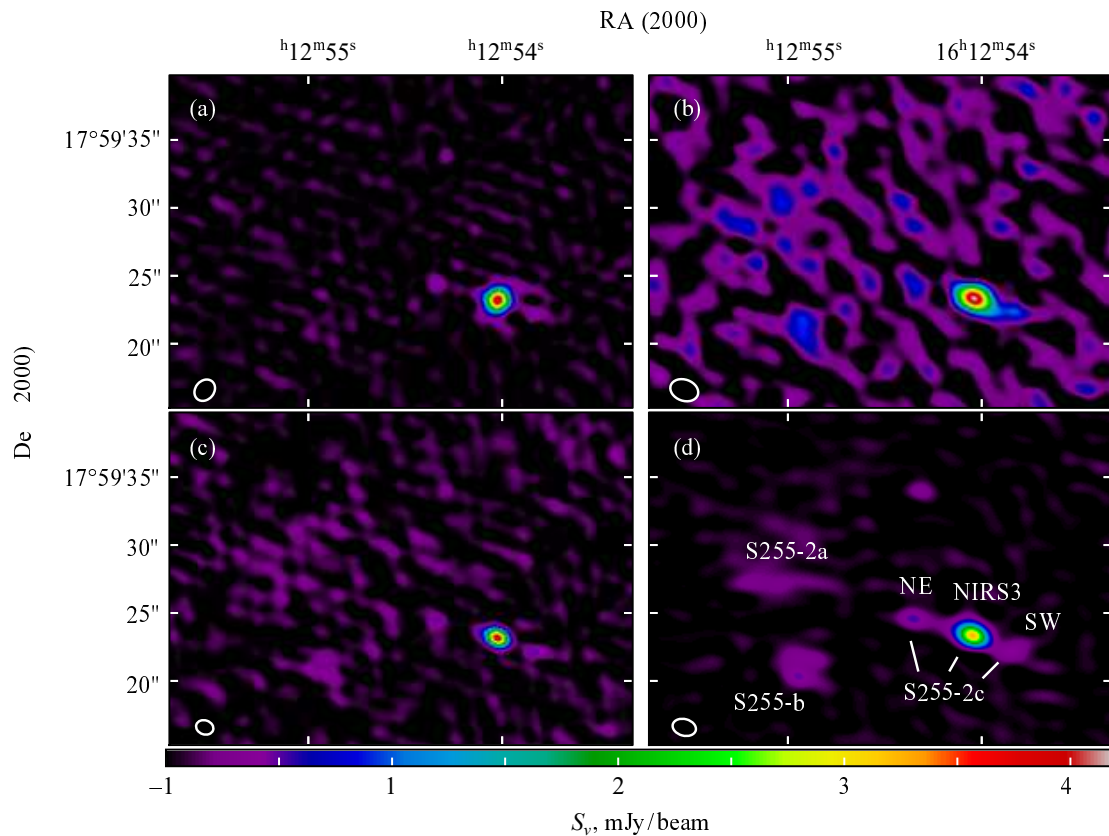


Рис. 1. Карта излучения в радиоконтинууме в направлении на источник S255IR NIRS3. Панель (а): излучение, зарегистрированное VLA в полосе L (полоса 0.2 ГГц) в 2017 г. Панель (б): излучение, зарегистрированное GMRT в 2017 г. (полоса 0.042 ГГц). Панель (с): излучение, восстановленное из данных VLA и GMRT. Панель (д): карта излучения, зарегистрированная с помощью GMRT в 2019 г. (полоса 0.1 ГГц). Указаны известные источники радиоконтинуума. Во всех четырех случаях изображение построено с помощью многочастотного синтеза, поток рассчитывался для частоты 1.42 ГГц. Синтезированный луч отображен в левом нижнем углу каждой карты. Шкала яркости для всех рисунков идентична и приведена снизу; единицы измерения — мЯн/луч.

et al., 2023). Его протяженность в 2021–2022 гг. составляла примерно $0''.3$ в северо-восточном направлении и в два раза меньше в юго-западном.

В области S255IR обнаружено несколько радиоисточников, наиболее яркие — S255-2a, S255-2b, S255-2c — описаны в работе Snell and Bally (1986). Радиоисточник S255-2c ассоциирован с ИК-источником NIRS3 (называемым также IRS1; Beichman et al., 1979), и субмиллиметровым протозвездным ядром SMA1 (Wang et al., 2011). Далее, радиоисточник в направлении на протозвезду будет называться также S255IR NIRS3. В наблюдениях на сравнительно низких частотах, обсуждаемых в настоящей работе, он не разрешается на отдельные компоненты, однако на более высоких частотах излучение в направлении на саму протозвезду и на узлы, связанные с выбросом после вспышки аккреции в 2015 году, пространственно разделено (Cesaroni et al., 2024; Zinchenko et al., 2024). Кроме того, рядом с S255IR NIRS3 обнаружены другие источники,

не имеющие отношение к событиям 2015 года (Obonyo et al., 2021). Наиболее яркие (узлы NE и SW, Cesaroni et al., 2018), вероятно, появились в результате предыдущих эпизодов аккреции и выбросов вещества 40–80 лет назад и имеют синхротронную природу излучения в радиодиапазоне (Obonyo et al., 2021). Расположение источников показано на рис. 1.

В настоящей работе приводится анализ архивных данных VLA¹⁾, дополненный наблюдениями GMRT²⁾ (Giant Metrewave Radio Telescope, Индия) на частотах 0.3–1.4 ГГц.

2. ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ И МЕТОДЫ ИХ АНАЛИЗА

2.1. GMRT

Наблюдения проводились по проектам 31_013 (22 января 2017 г.) и 35_012 (22 марта 2019 г.). Ра-

¹⁾<https://public.nrao.edu/visit/very-large-array/>

²⁾<https://www.gmrt.org/>

диотелескоп представляет собой массив из 30 антенн, размещенных в Y-образной форме, с диаметром отражающей поверхности каждой антенны 45 м. В центре интерферометра, в довольно компактной области (1×1 км), квазислучайным образом размещены 14 антенн. Оставшиеся антенны расположены в трех плечах с максимальным расстоянием 14 км. Подробное техническое описание обсерватории представлено в работе Gupta et al. (2017). Спектральное разрешение в наблюдениях по проекту 31_013 составило 8.138 кГц в полосе шириной 4166.7 кГц, центрированной на частоту 1.42 ГГц. Наблюдения по проекту 35_012 проводились в полосе 0.1 ГГц с центральной частотой в 1.375 ГГц и 16 384 каналами по 6.104 кГц каждый. Фазовым центром выбраны координаты объекта S255-2c ($06^{\text{h}}12^{\text{m}}53^{\text{s}}.8, +17.59.21.99$).

В сессию 31_013 включены источники 3C 147, 3C 138, 3C 286, 0632+103 и 0739+016. В сессию 35_012 наблюдались только 3C 147 и 0632+103. При обработке данных источник 3C 147 использовался в качестве калибратора шкалы потока. При выполнении амплитудной калибровки поток 0632+103 оценен в 2.471 ± 0.028 Ян и 2.517 ± 0.014 Ян для 35_012 и 31_013 соответственно. Калибровка полосы пропускания сессии 31_013 рассчитывалась с помощью полиномов 5-й и 6-й степени для амплитуды и фазы соответственно, по всем источникам совместно. Спектр включал линию водорода на длине волны 21 см, которая была исключена при калибровке. В сессии 35_012 присутствовала систематическая ошибка для части центральных баз. Ошибка была учтена калибровкой отдельных баз дополнительно к антенным калибровкам. При расчете калибровок не использовались базы короче $1 \text{ k}\lambda$, для того чтобы исключить эту ошибку и минимизировать помехи, наиболее заметные на коротких базах. В остальном процедура калибровки выполнялась стандартным образом.

Синтез куба данных проводился с равномерной (uniform) схемой взвешивания видностей. Благодаря этому все пространственные масштабы имели одинаковый вес. Большая часть исследованных нами объектов — точечные или компактные, пространственный спектр которых близок к плоскому, что позволило повысить чувствительность к таким структурам и уменьшить влияние боковых лепестков от протяженных источников. Для увеличения динамического диапазона была реализована процедура фазовой самокалибровки по источникам S255N SMA1, NVSS 061259+180945, NVSS 061142+175043, NVSS 061331+180114 и NVSS 061300+181915. В обеих сессиях при самокалибровке использовалось одинаковое модельное изображение. При вычислении калибровочных

коэффициентов также были взяты данные баз длиннее $1 \text{ k}\lambda$.

Края полосы и каналы, содержащие излучение в линии 21 см, были исключены из анализа. Рассматриваемый диапазон частот и другие параметры восстановленных изображений и кубов данных приведены в Таблице 1.

2.2. Архивные данные

2.2.1. VLA

В работе использованы данные проекта по мониторингу переменности источника S255IR NIRS3 на VLA (16B-427), полученные 26 января 2017 г. Данные обрабатывались стандартными процедурами casa (Bean et al., 2022) версии 6.6.1-17-pipeline-2024.1.0.8. Чувствительность была ограничена значительным (около 30%) числом отброшенных данных и оставшимися помехами. Наблюдения проводились в полосе 1–48 ГГц, разбитой на шесть спектральных окон (см. таблицу 1). Ширина каждого канала при построении куба данных составляла в 64 МГц (кроме диапазона 1–2 ГГц, где она равнялась 32 МГц). Изображение было рассчитано со схемой взвешивания uniform в силу указанных ранее причин. Извлечение и анализ спектра проводились по всем доступным кубам данных одновременно с учетом различных диаграмм направленности на разных частотах.

2.2.2. GMRT

Для изучения особенностей низкочастотного излучения были использованы данные наблюдений GMRT от 12 марта 2017 г. проекта ddtB264. Наблюдения проводились в частотном диапазоне 0.3–0.5 ГГц с шириной канала 0.1 МГц. Данные были обработаны стандартными процедурами калибровки casa. Источник 3C 286 использовался в качестве калибратора полосы пропускания и шкалы потока, источник 3C 138 — в качестве калибратора фазы. Калибровка проводилась по базам длиной больше $3 \text{ k}\lambda$. Суммарное время накопления в направлении на S255IR NIRS3 равнялось 4.4 часа. Наблюдения осложнялись сильным влиянием помех, из-за которых около 35% данных было отброшено. Обработка включала процедуру фазовой самокалибровки по источникам NVSS 061259+180945 и NVSS 061142+175043. При этом была обнаружена зависимость размера источника NVSS 061142+175043 от частоты. Для оценки величины потока и оценки спектрального индекса на этих частотах построены изображение в континууме и куб данных с равномерным взвешиванием видностей. Параметры синтезированного луча и среднеквадратичное отклонение (СКО) в

Таблица 1. Чувствительность и размер синтезированной диаграммы направленности для выходных данных. СКО для данных VLA приведено среднее по отдельным каналам, в остальных случаях (отмечено *) — для континуума

Инструмент	Диапазон, ГГц	СКО, мкЯн/луч	Размеры синтезированного луча, малая ось \times большая ось : PA
VLA	1–2	≥ 400	$1''08 \times 1''15 : 66^\circ$
	2–4	200	$0''50 \times 0''54 : 64^\circ$
	4–8	300	$0''25 \times 0''27 : 30^\circ$
	8–12	400	$0''14 \times 0''17 : 56^\circ$
	18–26	400	$0''07 \times 0''09 : 72^\circ$
	40–48	600	$0''04 \times 0''19 : 45^\circ$
GMRT+VLA, 2017	1.392–1.423	90*	$1''03 \times 1''29 : 71^\circ$
GMRT	0.3–0.5	140*	$3''98 \times 5''04 : 75^\circ$
GMRT, 2019	1.337–1.416	9*	$1''22 \times 1''74 : 74^\circ$

Таблица 2. Поток от источников S255 NIRS3, NE и SW. Для NIRS3 данные приводятся за две эпохи

Источник	Частота, ГГц	S_ν , мЯн	RA (J2000), hh:mm:ss.ss	Dec (J2000), dd:mm:ss.ss
NIRS3, 2017	0.4	2.5 ± 0.5	06:12:53.99 ± 0.03	17:59:24.9 ± 0.2
	1.42	3.93 ± 0.10	06:12:54.031 ± 0.001	17:59:23.16 ± 0.01
	2019	1.37	3.58 ± 0.16	06:12:54.05 ± 0.002
NE	1.42	0.55 ± 0.13	06:12:54.0311 ± 0.001	17:59:23.15 ± 0.01
	3	0.55 ± 0.09	06:12:54.34 ± 0.001	17:59:24.383 ± 0.016
	6	0.5 ± 0.06	06:12:54.3409 ± 0.0008	17:59:24.482 ± 0.008
SW	1.42	0.54 ± 0.15	06:12:53.837 ± 0.009	17:59:22.09 ± 0.07
	3	0.55 ± 0.08	06:12:53.841 ± 0.001	17:59:21.92 ± 0.02
	6	0.29 ± 0.05	06:12:53.8436 ± 0.0005	17:59:21.91 ± 0.01

полученном изображении приведены в таблице 1. В выходных изображениях присутствует ошибка позиционирования около $0''7$, которая была скорректирована относительно фоновых источников, вероятно радиогалактик, по всей доступной области.

2.2.3. GMRT + VLA

Наблюдения на VLA в январе 2017 г., результаты которых были опубликованы в Cesaroni et al. (2018), проводились спустя 4 дня после наблюдений на GMRT по проекту 31_013. Предполагая, что за эти четыре дня не произошло значительных изменений в переменности источника, мы построили одно общее изображение в перекрывающемся диапазоне частот, далее называемое GMRT + VLA (из данных VLA была взята полоса (1.392–1.423 ГГц), перекрывающая диапазон частот GMRT). Важным фактором в данном случае является не только увеличение общего времени накопления, но и большее число баз при синтезе

изображения, что уменьшает величину боковых лепестков синтезированной диаграммы направленности. Карты континуума для отдельных сессий с разных инструментов и комбинированное изображение представлены на рис. 1. Параметры изображения приведены в таблице 1.

2.3. Методы

Потоки оценивались стандартными процедурами с помощью вписывания двумерной гауссианы, свернутой с диаграммой направленности в изображение континуума. Для оценки спектрального индекса источника восстанавливался куб данных, в который вписывалась функция $T(\alpha, \delta, \nu) = [(T(\alpha, \delta) \times \nu^\gamma) * F(\alpha, \delta, \nu)]$, где $F(\alpha, \delta, \nu)$ — синтезированная диаграмма направленности на частоте ν ; $T(\alpha, \delta)$ — двумерная эллиптическая гауссиана; γ — спектральный индекс, варьируемый параметр; * — операция свертки. Также варьируемыми параметрами являлись координаты

центра двумерной гауссианы, ширины полуосей и позиционного угла. Подход позволяет учесть зависимость размера диаграммы направленности от частоты при оценке спектрального индекса. Процедура применялась для анализа данных GMRT за 2019 г. и архивных данных VLA за 2017 г. В данных GMRT + VLA (2017 г.) соотношение ширины полосы и чувствительности не позволило воспользоваться приведенной методикой. Чтобы следовать одному подходу, мы приводим оценки потока, используя `imfit casa` из изображения в континууме. Оценка спектрального индекса по GMRT + VLA не проводилась.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Мы сравнили потоки источников, попавших в поле наблюдений 2017 и 2019 г., как компактных (S255N SMA1, NVSS 061259+180945, NVSS 061142+175043), так и протяженных (S255, S256, S258). Разброс между потоками от компактных источников на частоте около 1.4 ГГц (радиогалактики на фоне) составляет не более 7%. Оценки потоков от S255IR NIRS3 (центральная часть), а также от соседствующих источников (узлы NE и SW в джете) представлены в таблице 2. Оценка потока в 2017 г. с учетом погрешностей согласуется с приведенной в Cesaroni et al. (2023). Восстановление кубов данных в диапазоне частот 1–10 ГГц и изображения в континууме на частоте 0.4 ГГц по методу из раздела 2.3 показало, что спектр источника хорошо описывается зависимостью $S_\nu = 3.3 \times \nu^{0.50 \pm 0.02}$ (здесь плотность потока S_ν в мЯн, частота ν в ГГц; см. рис. 2).

Наблюдения в 2019 г. проводились в полосе 0.1 ГГц, что позволило оценить спектральный индекс источника вблизи этой частоты: $\gamma = 1.58 \pm 0.03$, величина которого может объясняться оптически толстым тормозным излучением тепловой природы. Спектр излучения приведен на рис. 2.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Спектр в диапазоне 0.3–10 ГГц (см. рис. 2), полученный по данным GMRT и VLA за 2017 г., соответствует тепловому характеру излучения. В отличие от Cesaroni et al. (2018, 2023), мы смогли удовлетворительно описать его степенной зависимостью с индексом 0.50 ± 0.02 , что близко к ожидаемой величине спектрального индекса (около 0.6) для случаев, когда излучение формируется за счет теплового тормозного механизма как оптически тонкой, так и оптически толстой частью ионизованного газа в определенных областях ионизованных джетов (Reynolds, 1986). Данные 2017 г. свидетельствуют об отсутствии заметного вклада

синхротронного излучения на наблюдавшихся частотах.

Нельзя не отметить значительную зашумленность данных VLA в диапазоне 1–2 ГГц (см. рис. 2, с маскированием выбросов). Оценки спектрального индекса в этом диапазоне и за его пределами фактически не различаются. Оценка потока по данным GMRT + VLA весьма близка к его экстраполяции по данным VLA за 2017 г. на более высоких частотах (см. рис. 2). Однако в работе Cesaroni et al. (2018) предполагалось, что на частоте около 6 ГГц существует перегиб и на меньших частотах спектр следует зависимости ν^2 . Частота перегиба должна определять внутренний радиус джета. Нами не было обнаружено указанной особенности на частотах вплоть до 0.3 ГГц. Позднее перегиб появляется в спектре за 2019 г., чье поведение, близкое к ν^2 , может быть обусловлено доминирующим вкладом оптически толстых областей. Сопоставление с данными Cesaroni et al. (2023) за 2018 г. (рис. 2) показывает, что область спектра, в которой индекс меняется с 2 до 0.6, находится между 1.4 и 3 ГГц в 2019 г.

В работе Obonyo et al. (2021) была показана эволюция спектрального индекса в диапазоне частот 6.7–22.2 ГГц, в ходе которой он понизился с $\gamma \approx 0.75$ на момент вспышки до $\gamma \approx 0.6$ на декабрь 2016 г. Авторы допустили, что и в дальнейшем он будет убывать линейно, пока излучение не станет оптически тонким со степенным индексом -0.1 . Наша оценка спектрального индекса за 2017 г. вполне согласуется с этим трендом: спектр близок к $\nu^{0.5}$ на частотах 0.3–10 ГГц. Однако по данным 2019 г. он увеличивается до $\gamma \approx 1.6$ на частоте 1.39 ГГц, что позволяет предположить оптически толстый тепловой характер излучения. Узлы NE и SW имеют отрицательный спектральный индекс, что также согласуется с результатами Obonyo et al. (2021). Эти узлы (сгустки) были выброшены из центральной области в результате предыдущего события аккреции, по имеющимся оценкам, 40–80 лет назад (Obonyo et al., 2021; Wang et al., 2011). Излучение джета, связанное с эпизодом аккреции 2015 г., возможно, спустя десятки лет будет иметь аналогичные характеристики. Но на данный момент в наблюдениях на сравнительно низких частотах радиодиапазона не получается отделить это излучение от излучения ультракомпактной Н II-области, не связанной с джетом.

В целом получается следующая картина эволюции спектра данного источника на сравнительно низких частотах ($\nu \lesssim 1.4$ ГГц). По наблюдениям на GMRT в 2009 г. плотность потока на частоте 1.28 ГГц составляла примерно 1.1 мЯн, а спектральный индекс в диапазоне частот 0.61–1.28 ГГц был $\gamma \gtrsim 1.4$ (Zinchenko et al., 2012), если исходить

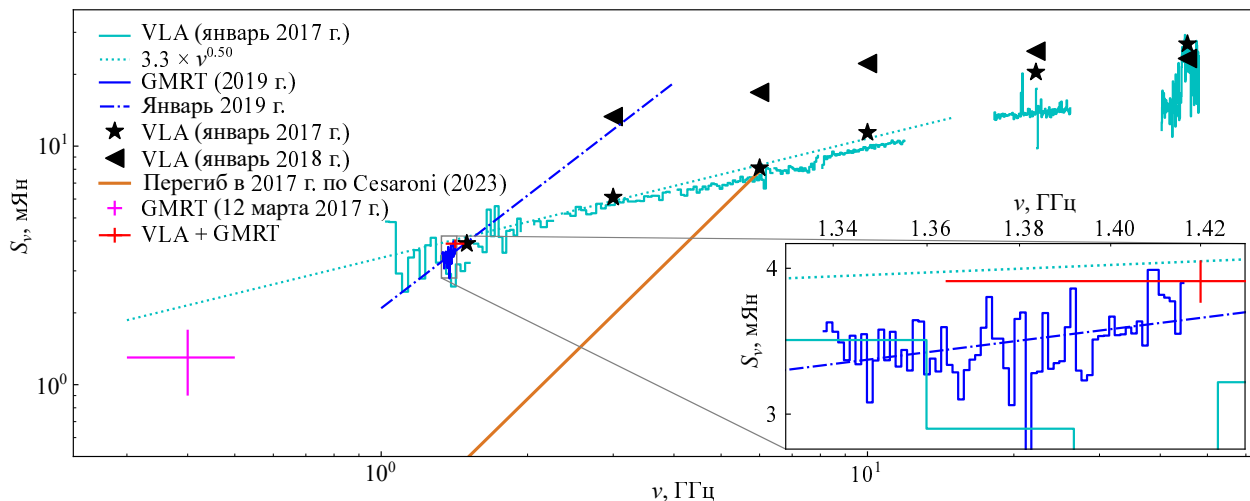


Рис. 2. Спектр источника S255 NIRS3 в 2017, 2018 и 2019 гг. Черными звездочками и треугольниками отмечены данные Cesaroni et al. (2023), голубыми линиями — сплошной и пунктирной — обозначены соответственно данные за 2017 год и вписанная в них степенная зависимость. Справа в увеличенном масштабе представлена выделенная область графика, занятая данными 2019 год (синие линии). Поток показан как наблюдаемый (шагами) с учетом различной диаграммы направленности на разных частотах (в каждом канале отдельно). Каналы на спектре за 2019 г. усреднены до 3 МГц для иллюстративных целей. Крестиками отмечены данные, для которых оценивалась только интегральная интенсивность, без восстановления кубов данных: данные на 0.4 ГГц (GMRT, 2017) и данные на 1.42 ГГц (GMRT + VLA, 2017). Неопределенности оценки потока показаны вертикальными штрихами, диапазон частот — горизонтальными. Оранжевой линией приведена часть спектра для смешанного оптически толстого и тонкого режима теплового излучения из работы Cesaroni et al. (2023).

из полученной тогда оценки верхнего предела плотности потока на частоте 0.61 ГГц. После вспышки светимости в 2015 г. и формирования джета плотность потока на близкой частоте (1.42 ГГц) составила примерно 3.93 мЯн (2017 г.) при спектральной зависимости, хорошо описываемой комбинированным тепловым излучением из оптически толстых и тонких областей (Reynolds, 1986) в диапазоне частот 0.3–10 ГГц. В 2019 году измеренная плотность потока на частоте 1.37 ГГц составила примерно 3.58 мЯн, а спектральный индекс на этой частоте был примерно 1.6, что соответствует доминирующему вкладу излучения оптически толстой области. Можно предположить, что до последнего эпизода аккреции и вспышки светимости в 2015 г. на $\nu \sim 1$ ГГц мы видели излучение оптически толстой на данных частотах ионизированной области вокруг протозвезды. В 2017 г., через два года после вспышки, преобладает, вероятно, излучение конической области джета со спектральным индексом $\gamma = \nu^{0.50 \pm 0.02}$, что близко к ожидаемому (Reynolds, 1986). В 2019 г. снова начинает доминировать излучение оптически толстых областей вокруг протозвезды и, возможно, в джете.

Данные 2017 г. указывают на то, что частота перегиба в спектре (на которой смешанный режим переходит в оптически тонкий) $\nu \gtrsim 10$ ГГц, это соответствует результатам Cesaroni et al. (2023). Принимая электронную температуру T_e в области Н II равной 8000 К, с использованием известной

формулы для тормозного излучения ионизованного газа (Wilson et al., 2013):

$$\tau_\nu = 8.235 \times 10^{-2} \left(\frac{T_e}{\text{K}} \right)^{-1.35} \left(\frac{\nu}{\text{GHz}} \right)^{-2.1} \times \left(\frac{EM}{\text{pc cm}^{-6}} \right) \alpha(\nu, T), \quad (1)$$

получаем меру эмиссии $EM \gtrsim 3 \times 10^8$ пк см⁻⁶. Здесь τ_ν — оптическая толщина, коэффициент $\alpha(\nu, T)$ обычно близок к единице, и в нашем случае он принят равным единице.

Обсуждаемые в настоящей работе данные дают информацию о спектре источника по наблюдениям 2019 г. только на частотах $\nu \sim 1.4$ ГГц. Они указывают на уменьшение плотности потока и на более крутой наклон спектра на этих частотах по сравнению с 2017 г. Вероятно, это означает, что и на более низких частотах плотность потока значительно уменьшилась. Эволюция спектра источника на более высоких частотах анализировалась в работах Obonyo et al. (2021) и Cesaroni et al. (2023, 2024). Эти данные, как отмечалось выше, указывают на уменьшение со временем спектрального индекса, а следовательно, оптической толщины и меры эмиссии. После вспышки плотность потока увеличивалась до середины 2017 г., а затем начала уменьшаться. Наши данные соответствуют этим тенденциям.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены данные наблюдений с высоким угловым разрешением источника S255IR NIRS3. Потоки в радиоконтинууме от 23 января 2017 г. и 23 марта 2019 г. равны 3.93 ± 0.10 мЯн и 3.58 ± 0.16 мЯн на частотах 1.42 ГГц и 1.37 ГГц соответственно.

Анализ данных GMRT и VLA в диапазоне частот 0.3–12 ГГц показывает отсутствие признаков синхротронного излучения. Данные GMRT и VLA 2017 г. не обнаруживают диапазона частот, излучение в котором можно идентифицировать как оптически толстое, в отличие от данных за 2019 г. Спектр в 2017 г. хорошо описывается зависимостью $S_\nu \sim \nu^{0.50 \pm 0.02}$ на частотах от 0.3 до 10 ГГц. В данных за 2019 г. на частоте 1.4 ГГц зависимость близка к $\nu^{1.58 \pm 0.03}$. Характер изменений наблюдаемого излучения можно объяснить тем, что в 2017 г. доминировало излучение джета, а в 2019 г. — ионизованной области около протозвезды.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны персоналу обсерватории GMRT (<https://www.gmrt.org/>) с помощью которого были проведены наблюдения.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 4-12-00153 «Исследование процессов звездообразования на различных масштабах».

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. B. Bean et al. (CASA Team), *Publ. Astron. Soc. Pacific* **134** (1041), id. 114501 (2022). DOI:10.1088/1538-3873/ac9642
2. C. A. Beichman, E. E. Becklin, and C. G. Wynn-Williams, *Astrophys. J.* **232**, L47 (1979). DOI:10.1086/183034
3. R. A. Burns, T. Handa, T. Nagayama, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **460**, 283 (2016). DOI:10.1093/mnras/stw958
4. A. Caratti O Garatti, B. Stecklum, R. Garcia Lopez, et al., *Nature Physics* **13**, 276 (2017). DOI:10.1038/nphys3942
5. R. Cesaroni, L. Moscadelli, A. Caratti o Garatti, et al., *Astron. and Astrophys.* **680**, id. A110 (2023). DOI:10.1051/0004-6361/202347468
6. R. Cesaroni, L. Moscadelli, A. Caratti o Garatti, et al., *Astron. and Astrophys.* **683**, id. L15 (2024). DOI:10.1051/0004-6361/202449288
7. R. Cesaroni, L. Moscadelli, R. Neri, et al., *Astron. and Astrophys.* **612**, id. A103 (2018). DOI:10.1051/0004-6361/201732238
8. J. N. Douglas, F. N. Bash, F. A. Bozyan, et al., *VizieR On-line Data Catalog: VIII/42* (1996).
9. R. Fedriani, A. Caratti o Garatti, R. Cesaroni, et al., *Astron. and Astrophys.* **676**, id. A107 (2023). DOI:10.1051/0004-6361/202346736
10. K. Fujisawa, Y. Yonekura, K. Sugiyama, et al., *Astronomer's Telegram* **8286** (2015).
11. Y. Gupta, B. Ajithkumar, H. S. Kale, et al., *Current Science* **113** (4), 707 (2017). DOI:10.18520/cs/v113/i04/707-714
12. S.-Y. Liu, Y.-N. Su, I. Zinchenko, et al., *Astrophys. J.* **863** (1), article id. L12 (2018). DOI:10.3847/2041-8213/aad63a
13. D. M. A. Meyer, R. Kuiper, W. Kley, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **473** (3), 3615 (2018). DOI:10.1093/mnras/stx2551
14. L. Moscadelli, A. Sanna, C. Goddi, et al., *Astron. and Astrophys.* **600**, id. L8 (2017). DOI:10.1051/0004-6361/201730659
15. W. O. Obonyo, S. L. Lumsden, M. G. Hoare, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **501** (4), 5197 (2021). DOI:10.1093/mnras/staa3999
16. S. P. Reynolds, *Astrophys. J.* **304**, 713 (1986). DOI:10.1086/164209
17. R. L. Snell and J. Bally, *Astrophys. J.* **303**, 683 (1986). DOI:10.1086/164117
18. B. Stecklum, A. Caratti o Garatti, M. C. Cardenas, et al., *Astronomer's Telegram* **8732**, 1 (2016).
19. M. Szymczak, M. Olech, P. Wolak, et al., *Astron. and Astrophys.* **617**, id. A80 (2018). DOI:10.1051/0004-6361/201833443
20. Y. Wang, H. Beuther, A. Bik, et al., *Astron. and Astrophys.* **527**, id. A32 (2011). DOI:10.1051/0004-6361/201015543
21. T. L. Wilson, K. Rohlfs, and S. Hüttemeister, *Tools of Radio Astronomy* (Springer, Berlin, 2013).
22. V. Wolf, B. Stecklum, A. Caratti o Garatti, et al., *Astron. and Astrophys.* **688**, id. A8 (2024). DOI:10.1051/0004-6361/202449891
23. I. Zinchenko, S. Y. Liu, Y. N. Su, et al., *Astrophys. J.* **755** (2), article id. 177 (2012). DOI:10.1088/0004-637X/755/2/177
24. I. Zinchenko, S.-Y. Liu, Y.-N. Su, et al., *Astrophys. J.* **810**, article id. 10 (2015). DOI:10.1088/0004-637X/810/1/10
25. I. I. Zinchenko, S. Y. Liu, and Y. N. Su, *Astron. and Astrophys.* **692**, id. A181 (2024). DOI:10.1051/0004-6361/202452458

Evolution of Low-Frequency Radio Emission of the Ionised Gas around S255IR NIRS3 after the Accretion Luminosity Burst

P. M. Zemlyanukha¹, I. I. Zinchenko¹, E. M. Dombek¹, and D. K. Ojha²

¹A. V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences, Nizhnii Novgorod, 603950 Russia

²Tata Institute of Fundamental Research, Mumbai, 400005 India

We present the results of analyzing the radio variability of the source S255IR NIRS3 following an accretion event. The source was observed at two epochs: in January–March 2017 at frequencies of 0.3–10 GHz and in March 2019 at 1.32–1.42 GHz using the GMRT and VLA observatories. The 2017 data show that the spectrum is well described by a power-law dependence, $F_\nu \sim \nu^{0.50 \pm 0.02}$, over the entire frequency range. Such a spectral index is typically attributed to a combination of thermal bremsstrahlung emission from the ionized gas with both optically thick and optically thin components. No evidence for nonthermal emission or emission solely from an optically thick component is found at the low-frequency end of the spectrum. In contrast, the 2019 observations in the range of 1.32–1.42 GHz yield a spectral index of 1.58 ± 0.03 , which is characteristic of predominantly optically thick thermal emission from the ionized gas. This change in behavior may be explained by a transition from jet-dominated emission in 2017 to emission dominated by an ultracompact H II region in 2019. The observed flux density is 3.93 ± 0.10 mJy in 2017 (at 1.42 GHz) and 3.58 ± 0.16 mJy in 2019 (1.37 GHz). The emission measured in 2017 is $EM \gtrsim 3 \times 10^8$ pc cm⁻⁶.

Keywords: *methods: data analysis; radio continuum: stars; stars: protostars; stars: individual: S255IR NIRS3*