

УДК 521.1

РАДИОИЗЛУЧЕНИЕ КОМБИНИРОВАННОГО ОСТАТКА СВЕРХНОВОЙ ЗС396 (G39.2-0.3)

© 2020 г. В. П. Иванов^{1,*}, А. В. Ипатов¹, И. А. Рахимов¹, Т. С. Андреева¹

¹ Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: ivanov_vp41@mail.ru

Поступила в редакцию 24.01.2020 г.

После доработки 02.03.2020 г.

Принята к публикации 02.03.2020 г.

Представлены измерения плотностей потоков комбинированного (композитного) остатка сверхновой (ОСН) ЗС396 (G39.2-0.3) на частотах 4840 и 8450 МГц, выполненные на радиотелескопе РТ-32 обсерватории Светлое ИПА РАН в 2017–2018 гг. Полученные данные содержат признаки переменности источника. Для определения плотностей потоков ЗС396 на временном интервале 1962–2008 гг. использовались опубликованные данные, позволяющие сравнить интенсивности ЗС396 и стандартных источников. Все данные приведены в единую систему на основе точной шкалы потоков “искусственная луна” (ИЛ). Получен уточненный спектр ОСН ЗС396, который аппроксимируется как сумма двух степенных компонентов со спектральными индексами $\alpha_1 = 0.5$ и $\alpha_2 = 0.157$. Предполагается, что компоненты спектра обусловлены излучением оболочки и плериона соответственно. Сделана оценка вклада плериона в полный поток радиоизлучения ОСН: на волне $\lambda = 21$ см он близок к 30%. Ранее оценка этого вклада была основана на данных в рентгеновском диапазоне и не превышала 4%. Несоответствие устраняется при наличии в спектре плериона излома, подобно спектрам ЗС58 и G21.5-0.9. Совокупность данных, полученных при измерениях на РТ-32 и на основе опубликованных работ, содержит признаки изменений плотностей потоков радиоизлучения источника на разных шкалах времени, от коротких временных интервалов ($t_{\min} < 0.5$ года) и более. Обсуждаются локализация и возможные причины переменности.

DOI: 10.31857/S0004629920070038

1. ВВЕДЕНИЕ

ЗС396 (G39.2-0.3) относится к числу комбинированных остатков сверхновых (ОСН), т.е. имеет расширяющуюся оболочку, внутри которой расположены туманность пульсарного ветра (плерион) и точечный рентгеновский источник, вероятно, пульсар [1, 2]. Классификация ЗС396 оставалась предметом дискуссий в течение длительного времени: приводились аргументы в пользу принадлежности его как к комбинированным остаткам, так и к оболочечным, последнее предположение преобладало. Наблюдения в радиодиапазоне с высоким угловым разрешением, позволяющим исследовать распределение радиояркости по источнику, выявили его сложную структуру. По данным наблюдений на VLA [3], радиоизображение имеет близкую к эллипсу форму с размерами осей $8' \times 6'$ [4] с максимумом в центре и уярчением к краям. Распределение радиояркости по источнику неоднородно, имеются крупномасштабное уярчение от северо-восточного края к юго-западному, а также детали в виде волокон и узлов. По совокупности собственных и опубликованных данных, приведенных к шкале

потоков BGPW [5], в [3] получен спектр ОСН ЗС396. Данные аппроксимированы степенной зависимостью плотности потока S от частоты f в виде $S(f) \propto (f)^{-\alpha}$, где α – спектральный индекс, $\alpha = 0.42 \pm 0.2$. Основываясь на радиоизображениях источника, а также величине спектрального индекса, типичной для оболочечных ОСН, авторы [3] пришли к выводу, что ЗС396 – чисто оболочечный остаток с сильно неоднородной оболочкой, а максимум излучения в центре обусловлен проекцией яркого фрагмента оболочки на эту часть источника. На радиоизображении ЗС396 [3] на волне 20 см при высоком динамическом диапазоне присутствует деталь с низкой яркостью, “шлейф” или “хвост”, протяженная струя, исходящая из северо-восточного края остатка и закрученная вдоль северного края с постепенным ослаблением. Спектральный индекс “шлейфа” оценен как 0.15 ± 0.12 , в отличие от остатка в целом.

В работе [6] по данным измерений на VLA на волнах $\lambda = 6$ см и $\lambda = 20$ см определялись пространственные вариации спектрального индекса по изображению ЗС396, обнаружены изменения порядка $\Delta\alpha \sim 0.2$. Согласно [6], спектральный ин-

Таблица 1. Параметры радиотелескопа РТ-32 обсерватории Светлое ИПА РАН

f , МГц	$T_{\text{пр}}$, К	$T_{\text{ша}}$, К	$T_{\text{сис}}$, К	Δf , МГц	КИП	HPBW, угл. мин
1550	10	38	48	450	0,6	21.9
2370	10	37	50	450	0,48	14.6
4840	10	23	33	1000	0,6	6.96
8450	12	27	39	1000	0,56	3.94

декс остатка в целом $\alpha = 0.53$, наиболее плоским оказался спектр центральной области остатка с $\alpha = 0.39$, а в северном и южном краях оболочки $\alpha = 0.55$ и 0.58 соответственно.

Классификация ЗС396 уточнена наблюдениями этого ОСН в рентгене. По данным [2], основанным на наблюдениях обсерватории “Чандра”, вблизи центра остатка видна нетепловая туманность, содержащая точечный источник. Авторы интерпретируют ее как синхротронную туманность пульсарного ветра (ТПВ), окружающую еще не обнаруженный пульсар. По данным [2], в рентгене угловые размеры плериона $55'' \times 20''$. В радиодиапазоне этой области соответствуют участок с более плоским спектром [6] и высокополяризованная область вблизи центра ОСН [3]. Основанная на данных в рентгеновском диапазоне оценка вклада ТПВ в полный поток ЗС396 на волне $\lambda = 21$ см составляет 4% [2].

Расстояние до ЗС396 по наблюдениям СО составляет ~ 6.2 кпк, а оценка возраста – около 3000 лет [7].

В разное время были проведены многочисленные радионаблюдения ОСН ЗС396, и опубликовано большое количество данных о потоках этого источника на разных частотах, по которым определялись параметры его спектра. При сравнении этих параметров очевиден разброс значений спектрального индекса: от $\alpha = 0.6$ [4] до $\alpha = 0.364$ [8] и менее, и задача уточнения спектра ЗС396 и его временной стабильности остается актуальной. В радиоспектрах молодых ОСН наблюдаются эволюционные и нестационарные изменения [9–11], анализ которых важен для изучения физической природы объектов. Для уточнения спектра ЗС396, выявления динамики его эволюции и нестационарных изменений необходимы дальнейшие измерения плотностей потоков, а также приведение опубликованных данных в единую систему на основе точной абсолютной шкалы потоков.

В настоящей работе представлены результаты измерений плотностей потоков ЗС396 на радиотелескопе РТ-32 обсерватории Светлое ИПА РАН, а также приведения опубликованных данных в единую систему на основе шкалы потоков

“искусственная луна” (ИЛ) [12] с целью уточнения спектра этого источника и исследования его динамики.

2. ИЗМЕРЕНИЯ НА РАДИОТЕЛЕСКОПЕ РТ-32 ОБСЕРВАТОРИИ СВЕТЛОЕ ИПА РАН

Измерения плотностей потоков ОСН ЗС396 относительно стандартов шкалы потоков ИЛ выполнены на радиотелескопе РТ-32 обсерватории Светлое ИПА РАН в 2017–2018 гг. Параметры полноповоротного параболического радиотелескопа РТ-32 диаметром 32 м обсерватории Светлое ИПА РАН приведены в табл. 1 ([13–15]), где использованы следующие обозначения: f – частота (МГц); $T_{\text{пр}}$ – шумовая температура входа приемника (К); $T_{\text{ша}}$ – шумовая температура антенны (К); $T_{\text{сис}}$ – шумовая температура системы (К); Δf – полоса пропускания приемника (МГц); КИП – коэффициент использования поверхности; HPBW – ширина диаграммы направленности на уровне 0.5 мощности (в угловых минутах). Поляризация всех облучателей круговая.

Плотности потоков исследуемых источников измерены относительно источников – стандартов шкалы потоков ИЛ [12]. Шкала потоков ИЛ основана на абсолютных измерениях по методу “искусственной луны”, превосходящему по точности другие методы и включает в себя более 15 стандартных источников со спектрами, перекрывающимися диапазон частот 38 МГц–200 ГГц. Существенным отличием от других шкал и преимущественным преимуществом является независимый от абсолютных измерений контроль формы спектров источников (метод относительных спектров). Шкала потоков ИЛ адаптирована на частоты до 200 ГГц на основе стандартного спектра Крабовидной туманности, подробно исследованного путем абсолютных измерений по методу “искусственной луны” [9]. Спектр Крабовидной туманности степенной, и на основе метода относительных спектров показано, что степенной закон выполняется, по крайней мере, до 200 ГГц:

$$S(f) = S_0 \left(\frac{f}{f_0} \right)^{-\alpha}, \quad (1)$$

где $S(f)$ (Ян) – плотность потока на частоте f (МГц); S_0 (Ян) – параметр, равный плотности потока на частоте f_0 (МГц); α – спектральный индекс. Среднее значение $\alpha = 0.327 \pm 0.002$ и не зависит от времени; $\frac{1}{S} \frac{dS}{dt} = (-0.159 \pm 0.024)\%/год$; $S_0 = (937 \pm 22)$ Ян на частоте $f_0 = 1$ ГГц на эпоху 1992.7.

Основным стандартом радиоизлучения в шкале потоков ИЛ является внегалактический источник ЗС295. Его характеризуют стабильное на вол-

нах длиннее 1 см радиоизлучение и малые угловые размеры: $5'' \times 1''$ [16]. В шкале потоков ИЛ спектр 3С295 в диапазоне частот 1425–8450 МГц определяется степенной функцией (1) с параметрами $\alpha = 1.007$; $S_0 = 8.249$ Ян на частоте $f_0 = 3500$ МГц.

На радиотелескопе РТ-32 можно измерять отношения плотностей потоков исследуемых источников и стандартов шкалы потоков ИЛ на четырех частотах: 1550, 2370, 4840, 8450 МГц. Абсолютные плотности потоков ОСН получены по измеренным отношениям потоков ОСН и стандартов шкалы ИЛ.

Погрешности измерений включают среднеквадратичное отклонение отношений пиковых антенных температур, которое не превышало 3%, а также погрешности поправки за частичное разрешение 3С396 диаграммой направленности антенны. Методика определения этой поправки аналогична применявшейся в работе [11], где она подробно описана. Погрешность коррекции за разрешение источника зависит от разности профилей антенной температуры скана и аппроксимирующей гауссианы. В случае 3С396 профили сканов вдоль обеих осей мало отличаются от гауссиан, и погрешность поправок, максимальная для волны $\lambda = 3.5$ см, не превысила 3%. Профили определялись путем усреднения двух противоположно направленных сканов. При наблюдениях применялась методика “on”–“off”, и направление позиционного угла источника при наведении на него антенны с круговой поляризацией и круговой симметрией луча поправок не требует. Коррекция за атмосферное поглощение вводилась в виде множителя e^γ , где $\gamma = A_\lambda/\sin h$, где h – угол места (высота) антенны. Для длин волн 18 см; 13 см; 6.2 см; 3.5 см A_λ составляет соответственно 0.01; 0.011; 0.012; 0.013.

Причиной погрешности определения плотности потока ОСН при сравнении со стандартом 3С295 может быть различие спектральных индексов (соответственно менее 0.5 и 1.007). В нашем случае погрешность не превышает 0.3% и поправки не вводились.

Измерения плотностей потоков 3С396 выполнены на частотах 4840 и 8450 МГц между декабрем 2017 г. и июнем 2018 г. На обеих частотах измерения повторялись с целью выявления изменений в излучении источника. Плотности потоков 3С396, определенные на частотах 4840 МГц и 8450 МГц между эпохами 2017.95–2018.52 в шкале потоков ИЛ, приведены в табл. 2. Поскольку измерения выполнялись на одном радиотелескопе и в одинаковых условиях, в табл. 2 приводятся только случайные погрешности. Обозначения таковы: f – частота (МГц), S_{am} – плотность потока (Ян), (am – сокращение от artificial moon), σ – слу-

Таблица 2. Плотности потоков ОСН 3С396, измеренные на радиотелескопе РТ-32

f (МГц)	S_{am} (Ян)	σ (Ян)	Source	Epoch
4840	8.85	0.22	3С295	2017.95
4840	7.54	0.21	3С295	2018.15
8450	6.33	0.19	3С295	2018.3
4840	8.41	0.14	3С295	2018.43
8450	6.75	0.2	3С295	2018.52

чайная погрешность измерения (Ян), Source – стандартный источник, Epoch – эпоха измерения.

На рис. 1 показаны плотности потоков в зависимости от частоты в соответствии с табл. 2. На рис. 2 показана зависимость плотностей потоков от времени согласно табл. 2.

В течение 0.2 года между эпохами 2017.95–2018.15 плотность потока на частоте 4840 МГц упала на 17% (5σ), а к эпохе 2018.43 вновь возросла на 12% от минимального уровня. На частоте 8450 МГц между эпохами 2018.3 и 2018.5 плотность потока возросла на 6.5%. На временном интервале 2018.1–2018.5 плотности потоков росли как на частоте 4840 МГц, так и на 8450 МГц, но разными темпами: в последнем случае относительное приращение вдвое меньше. Таким образом, в радиоизлучении 3С396 присутствует переменная составляющая, зависящая от частоты.

Для определения уточненного спектра ОСН 3С396, а также оценки его изменений во времени, в настоящей работе использовалась совокупность данных измерений на радиотелескопе РТ-32 и

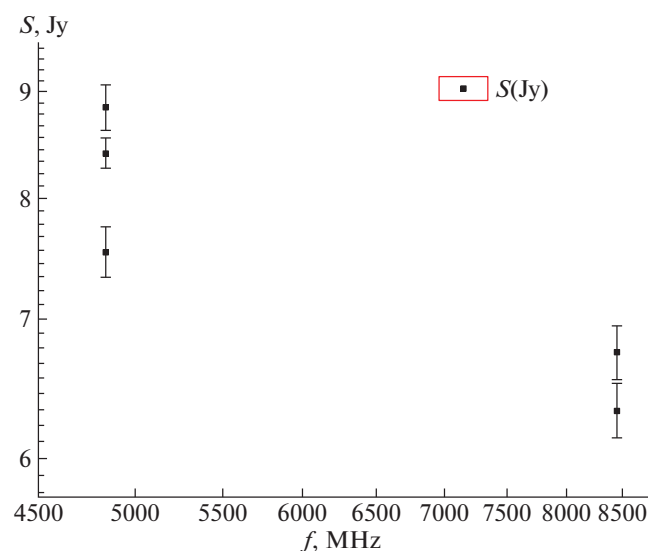


Рис. 1. Плотности потоков ОСН 3С396, измеренные на радиотелескопе РТ-32.

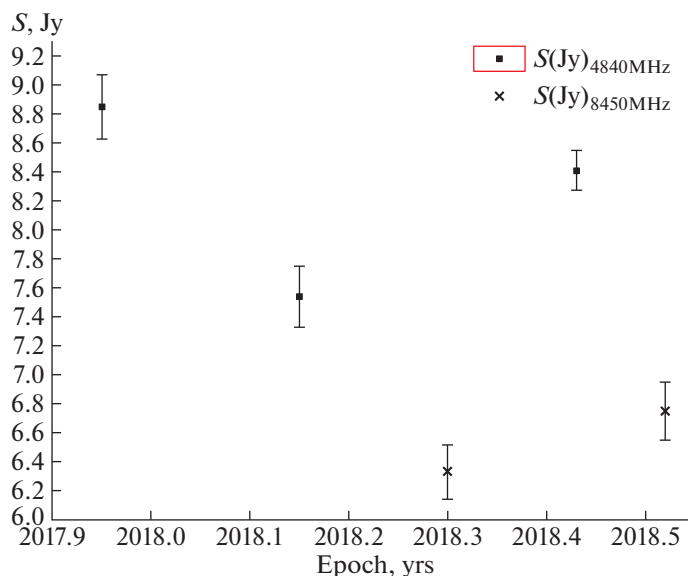


Рис. 2. Плотности потоков ОCN 3C396, измеренные на радиотелескопе РТ-32, в зависимости от времени.

опубликованных данных, приведенных к шкале потоков ИЛ.

3. СПЕКТР 3C396

В настоящее время накоплен обширный архив опубликованных данных измерений плотностей потоков ОCN 3C396. Плотности потоков определены в различных шкалах потоков, и для взаимного согласования данных необходимо привести их в единую систему, воспользовавшись общей точной шкалой потоков. В нашей работе использовалась шкала потоков “искусственная луна” (ИЛ). Ее преимущества перед широко используемой шкалой BGPW [5] обсуждались в [12]. Плотности потоков 3C396, приведенные к шкале потоков ИЛ, представлены в табл. 3. Они получены на основе опубликованных данных и измерений на радиотелескопе РТ-32. Погрешности измерений, указанные в опубликованных работах, содержат значительный вклад неопределенности абсолютной привязки. При переводе этих данных в шкалу потоков ИЛ погрешности были сохранены ввиду неопределенности вклада абсолютной привязки, хотя они должны снижаться из-за устранения этой составляющей.

В табл. 3 первый, второй, третий, четвертый и пятый столбцы содержат, соответственно, порядковый номер строки; частоту измерений f (МГц); плотность потока 3C396 в шкале потоков ИЛ, S_{am} (Ян); абсолютную погрешность S_{am} , егг (Ян); опубликованное значение плотности потока 3C396 S_p (Ян). Для измерений на радиотелескопе РТ-32 приведены полные погрешности и ссылка “н.р.”. В шестом, седьмом, восьмом и девятом

столбцах приведены, соответственно, источник — калибратор Source (если стандартных источников несколько, Sample); множители перехода к шкале ИЛ, k ; эпохи измерений, Epoch; и ссылки на первоисточник, Ref.

Спектр 3C396 по данным табл. 3 изображен на рис. 3. Данные табл. 3 аппроксимируются степенной зависимостью плотности потока от частоты

$$S_c(f) = S_0 \left(\frac{f}{f_0} \right)^{-\alpha} \quad (2)$$

с параметрами $\alpha = 0.37 \pm 0.03$, $S_0 = (14.75 \pm 3.4)$ Ян на частоте $f_0 = 1$ ГГц.

Рис. 3 содержит точки со значительными отклонениями от аппроксимирующей линии, существенно превышающими погрешности измерений. Даже предполагая недооценку погрешности части данных табл. 3, объяснить разброс данных можно только присутствием переменного компонента в радиоизлучении 3C396.

3C396 входит в число ОCN типа С (комбинированных), его спектр является суммой спектров плериона и оболочки, спектральные индексы которых должны отличаться. Одной из задач настоящей работы является разделение этих компонентов, что возможно при достаточно точном определении спектра.

Для уточнения спектра ОCN 3C396 были определены отношения измеренных потоков S_{am} к значениям $S_c(f)$, рассчитанным согласно (2). На близких частотах эти отношения отличаются только вследствие погрешностей измерений и переменности источника. Затем были получены средние значения отношений на близких частотах.

Таблица 3. Плотности потоков ОСН 3С396 по опубликованным данным, приведенным к шкале потоков ИЛ, а также измеренные на радиотелескопе РТ-32

№ п.п.	f (МГц)	S_{am} (Ян)	err (Ян)	S_p (Ян)	Source	k	Epoch	Ref
1	80	42.78	6.42	38	Sample	1.13	1970	17
2	80	44.05	7.17	43	Sample	1.02	1973	18
3	86	46.78	4.73	46.5	Sample	1.01	1962	19
4	160	37.34	6.88	38	Sample	0.98	1973	18
5	160	36.56	4.43	33.8	Sample	1.08	1974	20
6	178	25.82	2.6	23.8	Sample	1.08	1964.9	21
7	327	20.31	2.03	23.5	3C286	0.86	1983.05	3
8	330	19.96	3.99	24	3C48, 3C286	0.83	1987.87	22
9	408	25.96	2.58	31.2	Sample	0.83	1968.75	23
10	408	23.92	2.35	23.4	Sample	1.02	1971.1	24
11	750	16.14	1.66	16.5	Sample	0.98	1963.4	21
12	1400	12.44	0.62	13.4	Sample	0.93	1963.4	21
13	1400	13.0	0.65	14	Sample	0.93	1985	25
14	1410	15.15	1.52	16	3C218	0.95	1967.5	26
15	1414	14.76	1.48	16	3C348, 3C353	0.92	1967.5	27
16	1415	13.1	0.66	13.9	3C147	0.94	1975.5	28
17	1420	13.89	1.36	15.3	3C218	0.91	1970.6	29
18	1465	13.96	1.4	15.7	3C286	0.89	1983.05	3
19	1635	13.1	1.31	14.8	3C286	0.89	1983.05	3
20	1720	12.97	0.68	14.47	3C147, 3C286	0.9	1979.84	30
21	2650	11.62	1.19	12.7	3C218	0.91	1967.5	26
22	2695	11.04	0.64	12.1	Sample	0.91	1966	31
23	2695	9.61	0.96	11	3C274	0.87	1967	27
24	2695	10.08	0.97	11.4	3C286	0.88	1982	32
25	2700	8.19	0.81	9.1	3C218	0.9	1969.8	29
26	3240	10.1	0.65	10.9	3C123, 3C274	0.93	1967	33
27	4800	7.88	0.39	8.84	3C286	0.89	2008	34
28	4840	8.85	0.31	8.85	3C295	1	2017.95	н.р
29	4840	7.54	0.28	7.54	3C295	1	2018.15	н.р.
30	4840	8.41	0.25	8.41	3C295	1	2018.43	н.р.
31	4995	6.98	1.26	7.2	Sample	0.97	1965.7	31
32	5000	8.87	0.44	10.05	Sample	0.88	1967.1	21
33	5000	8.0	0.83	8.7	3C274	0.92	1967.45	35
34	5000	8.27	0.83	9	3C274	0.92	1967.7	27
35	5000	4.28	0.93	4.6	3C218	0.93	1971.1	29
36	5000	8.19	0.84	8.8	3C218	0.93	1973	36
37	6630	9.17	0.65	9.9	3C123, 3C274	0.93	1967	33
38	8350	14.44	0.72	16.4	3C286	0.88	1998.7	37
39	8450	6.33	0.27	6.33	3C295	1	2018.3	н.р.
40	8450	6.75	0.28	6.75	3C295	1	2018.52	н.р.
41	10630	7.06	0.85	7.5	3C123, 3C274	0.94	1967	33
42	10630	3.6	0.88	4.1	3C123, 3C218	0.88	1974.2	38
43	14350	13.44	0.67	12.2	DR21, NGC7027	1.1	1998.7	37
44	33000	4.55	0.26	5.2	3C144	0.87	2006.66	8

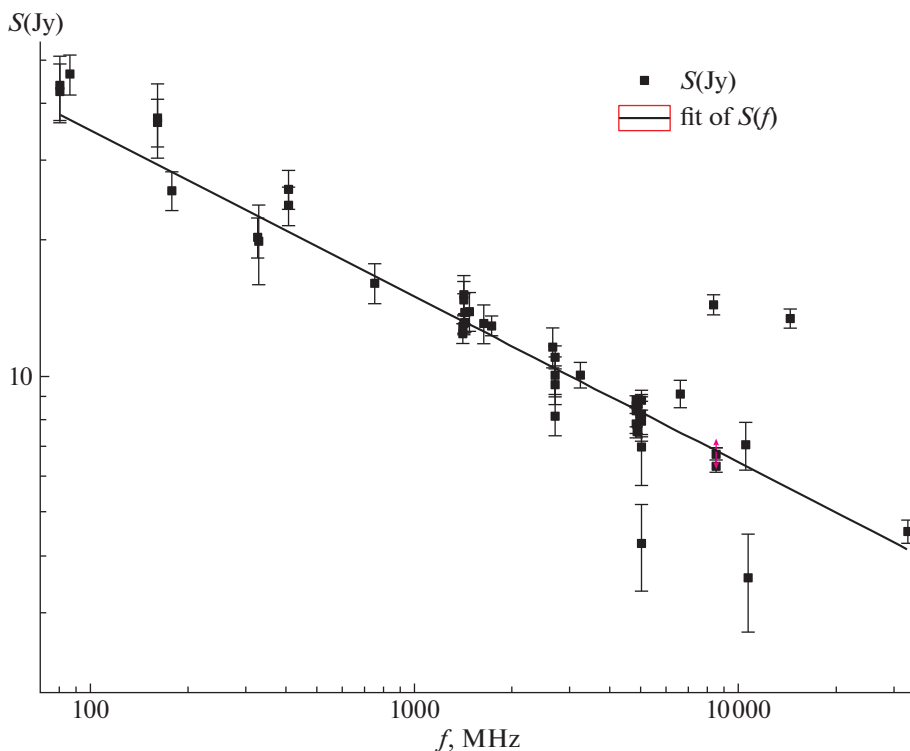


Рис. 3. Спектр 3C396 по данным табл. 3.

тах. Частота средних отношений определялась усреднением логарифмов частот измерений.

Усреднение выполнено без учета данных на частотах 5000 МГц [29], 8350 и 14350 МГц [37], 10630 МГц [38], отклонение которых от аппроксимации (2) превышает 3σ . Погрешности определения средних отношений $\langle S_{\text{am}}/S_c \rangle$ вычислены без учета весов усредняемых данных. Результат представлен в табл. 4. Данные на частотах 750 МГц [21] и 6600 МГц [33] представлены единственными значениями и потому в табл. 4 не включены, исключение сделано для частоты 33 ГГц [8] вследствие дефицита данных в этой области спектра.

Таблица 4. Средние отношения $\langle S_{\text{am}}/S_c \rangle$ измеренных и расчетных плотностей потоков

i	$\langle f \rangle_i$ (МГц)	$\langle S_{\text{am}}/S_c \rangle_i$	$\langle \text{err} \rangle$	S_c (Ян)	Строки таб. 3
1	81.95	1.182	0.042	37.67	1–3
2	165.79	1.14	0.114	29.08	4–6
3	366.1	1.042	0.09	21.73	7–10
4	1471.5	1.043	0.022	13.03	12–20
5	2772.1	0.979	0.047	10.33	21–26
6	4923.2	0.97	0.024	8.36	27–31, 33–36
7	9084.5	1.01	0.057	6.67	39–41
8	33000	1.094	0.063	4.15	44

В табл. 4 первый, второй, третий, четвертый и пятый столбцы содержат, соответственно, номер i интервала усреднения частот и плотностей потоков; среднюю в i -м интервале частоту измерений $\langle f \rangle_i$ (МГц); среднее в i -м интервале частот отношение измеренных и расчетных плотностей потоков $\langle S_{\text{am}}/S_c \rangle_i$; погрешность отношения $\langle S_{\text{am}}/S_c \rangle$, $\langle \text{err} \rangle$. В пятом и шестом столбцах приведены, соответственно, рассчитанная для средней частоты $\langle f \rangle_i$ согласно (2) плотность потока S_c (Ян). Также перечислены номера строк табл. 3, входящих в i -й интервал и содержащих информацию о частотах усредняемых данных.

В табл. 4 данные усреднены в следующих интервалах частот:

- $i = 1$, частоты 80, 80 и 86 МГц;
- $i = 2$, частоты 160, 160 и 178 МГц;
- $i = 3$, частоты 327, 330, 408 и 408 МГц;
- $i = 4$, частоты 1400, 1400, 1410, 1414, 1415, 1420, 1465, 1635, 1720 МГц;
- $i = 5$, частоты 2650, 2695, 2695, 2695, 2700, 3240 МГц;
- $i = 6$, частоты 4800, 4840, 4840, 4840, 4995, 5000, 5000, 5000, 5000 МГц;
- $i = 7$, частоты 8450, 8450, 10630 МГц;
- $i = 8$, частоты 33000 МГц.

Табл. 4 иллюстрируется рис. 4, на котором горизонтальная опорная линия определяется ра-

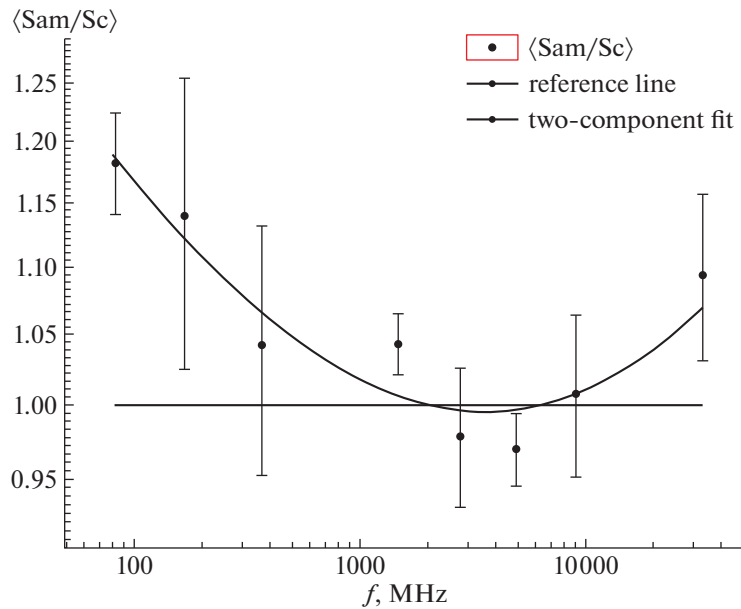


Рис. 4. Усредненные отношения измеренных и расчетных плотностей потоков $\langle S_{am}/S_c \rangle$.

венством $S_{am} = S_c$, плавная кривая соответствует аппроксимации спектра при двухкомпонентной модели (см. ниже). Отклонения от опорной линии точек, соответствующих измерениям, не выглядят случайными. Их частотное распределение соответствует модели источника в виде суммы двух степенных компонент $S_{\Sigma}(f) = S_{1c}(f) + S_{2c}(f)$ с разными спектральными индексами α_1 и α_2 (плавная кривая на рис. 4).

Оптимальные параметры, при которых среднеквадратичное отклонение значений $\langle S_{am}/S_c \rangle$ от расчетной кривой достигает минимума, определялись по следующей схеме. Параметры одной из двух составляющих спектра, α_1 и S_{01} , задаются произвольно, и расчет плотностей потоков $S_{1c}(f_i)$ на частотах f_i табл. 4 выполняется по формуле:

$$S_{1c}(f_i) = S_{01} \left(\frac{f_i}{f_0} \right)^{-\alpha_1}. \quad (2a)$$

Плотности потоков второй составляющей S_2 на частотах f_i определяются как разность $\langle S_{am} \rangle_i - S_{1c}(f_i)$, а параметры степенной зависимости $S_{2c}(f)$, α_2 и S_{02} находятся из аппроксимации выборки значений $(\langle S_{am} \rangle_i - S_{1c}(f_i))$ в виде:

$$S_{2c}(f) = S_{02} \left(\frac{f}{f_0} \right)^{-\alpha_2}. \quad (2b)$$

Среднеквадратичное отклонение σ двухкомпонентной аппроксимации определяется по совокупности сравнений $\langle S_{am} \rangle_i$ из табл. 4 и сумм $S_{\Sigma}(f_i) = S_{1c}(f_i) + S_{2c}(f_i)$, вычисленных согласно (2a) и (2b). Паре значений α_1 и S_{01} однозначно соот-

ветствуют α_2 и S_{02} , с их изменением меняется среднеквадратичная погрешность двухкомпонентной аппроксимации, достигая минимума при оптимальных значениях параметров α_1 , S_{01} , α_2 , S_{02} .

Зависимость среднеквадратичной погрешности при двухкомпонентной аппроксимации данных табл. 4 от значений α_1 и α_2 показана на рис. 5. Параметры двухкомпонентной аппроксимации, при которых среднеквадратичное отклонение данных табл. 4 минимально, имеют значения:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= 0.503 \pm 0.01; & S_{01} &= 10.8 \pm 0.45 \text{ Ян}; \\ \alpha_2 &= 0.157 \pm 0.02; & S_{02} &= 4.45 \pm 0.47 \text{ Ян}. \end{aligned} \quad (3)$$

Плавная кривая на рис. 4 показывает частотную зависимость суммы компонентов $S_1(f)$ и $S_2(f)$, нормированной на $S_c(f)$, при оптимальных значениях параметров (3).

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Данные измерений интенсивности радиоизлучения ЗС396, полученные на основе шкалы потоков ИЛ и содержащиеся в табл. 3, дают возможность существенно уточнить спектр ОСН ЗС396 и оценить его временную стабильность.

Представление спектра ЗС396 в виде суммы двух степенных компонентов с разными спектральными индексами, $S_{\Sigma}(f_i) = S_{1c}(f_i) + S_{2c}(f_i)$, отвечает физической природе комбинированного ОСН, состоящего из плериона и оболочки, а параметры двухкомпонентной аппроксимации со-

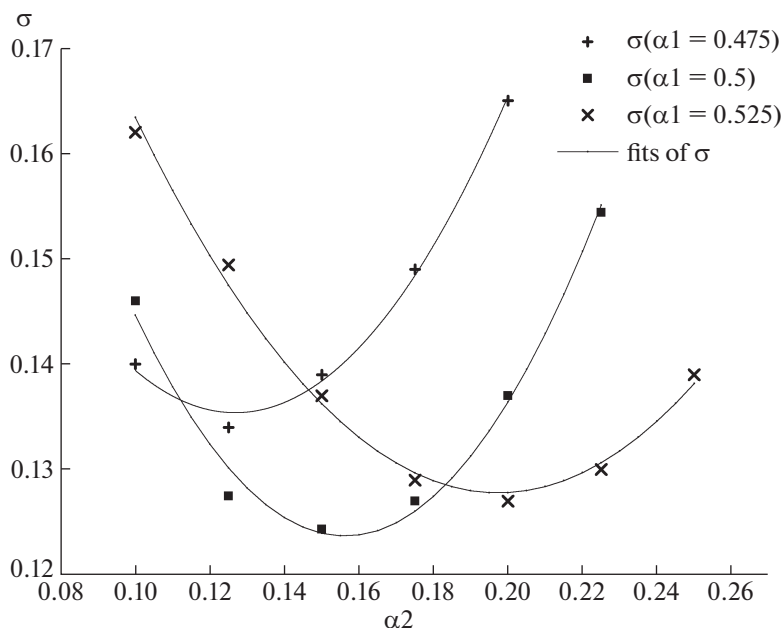


Рис. 5. Погрешность аппроксимации данных табл. 4 в зависимости от α_1 и α_2 .

гласуются с опубликованными ранее результатами.

Значение спектрального индекса $\alpha_2 = 0.157 \pm 0.02$, полученное в настоящей работе, согласуется со статистикой параметров спектров ТПВ и близко к величине спектрального индекса “хвоста” $\alpha = 0.15 \pm 0.12$ по данным [3], что дает основание считать “хвост” деталью структуры плериона.

Разность спектральных индексов оболочки и плериона равна $\alpha_1 - \alpha_2 = 0.346 \pm 0.03$. По данным [6], спектральный индекс в центре источника меньше, чем на его краю, на $\Delta\alpha \sim 0.2$, что меньше, чем $\alpha_1 - \alpha_2$. Отличие обусловлено тем, что плерион находится между двумя слоями оболочки, и его излучение принимается на их фоне.

В рентгеновском диапазоне по данным [2] вблизи центра ОСН расположена нетепловая туманность, содержащая точечный источник. Авторы интерпретируют ее как синхротронную туманность пульсарного ветра, ТПВ, окружающую еще не обнаруженный пульсар. На основании рентгеновских данных оценка вклада ТПВ в полный поток ЗС396 на волне $\lambda = 21$ см составила 4% [2].

В настоящей работе интенсивности излучения плериона и оболочки получены на основе двухкомпонентной модели источника, непосредственно по данным наблюдений в радиодиапазоне. На волне 21 см вклад ТПВ в полный поток ЗС396 составляет 32%. Различие оценок [2] и настоящей работы значительно, но результаты согласуются, если в спектре плериона имеется излом (изломы), выше частоты которого крутизна

спектра скачком возрастает. Особенности такого типа наблюдаются, в частности, в спектрах крабоподобных ОСН ЗС58 [10] и G21.5-0.9 [11]. Часть таких особенностей обусловлена потерями энергии релятивистских электронов на синхротронное излучение в течение достаточно длительного времени. Предполагаемый возраст ЗС396 составляет около 3000 лет [7], в течение которых мог сформироваться излом спектра. Существуют и альтернативные механизмы формирования изломов. Так, молодой крабоподобный ОСН G21.5-0.9 имеет спектр с изломом, не связанным с синхротронным высвечиванием [11].

Далее представлена процедура выделения переменной составляющей излучения ОСН ЗС396 на фоне погрешностей измерений и поиска локализации ее источника внутри ОСН. Данные измерений плотностей потоков имеют отклонения от среднего спектра ЗС396, обусловленные погрешностями измерений и переменностью объекта на коротких временных интервалах (рис. 3). Измерения на частотах 4840 и 8450 МГц, выполненные на радиотелескопе РТ-32 обсерватории Светлое ИПА РАН, выявили переменность радиоизлучения ЗС396 на временном интервале ≈ 0.5 года. По времени протекания процесса можно оценить протяженность активной области: $L \approx 0.15$ пк. Эту оценку можно сравнить с линейными размерами оболочки и плериона. При угловом диаметре $\approx 7'$ и расстоянии 6.2 кпк внешний диаметр оболочки ЗС396 составляет ≈ 13 пк, и значимая доля быстрой переменности в интегральном излучении оболочки представляется маловероят-

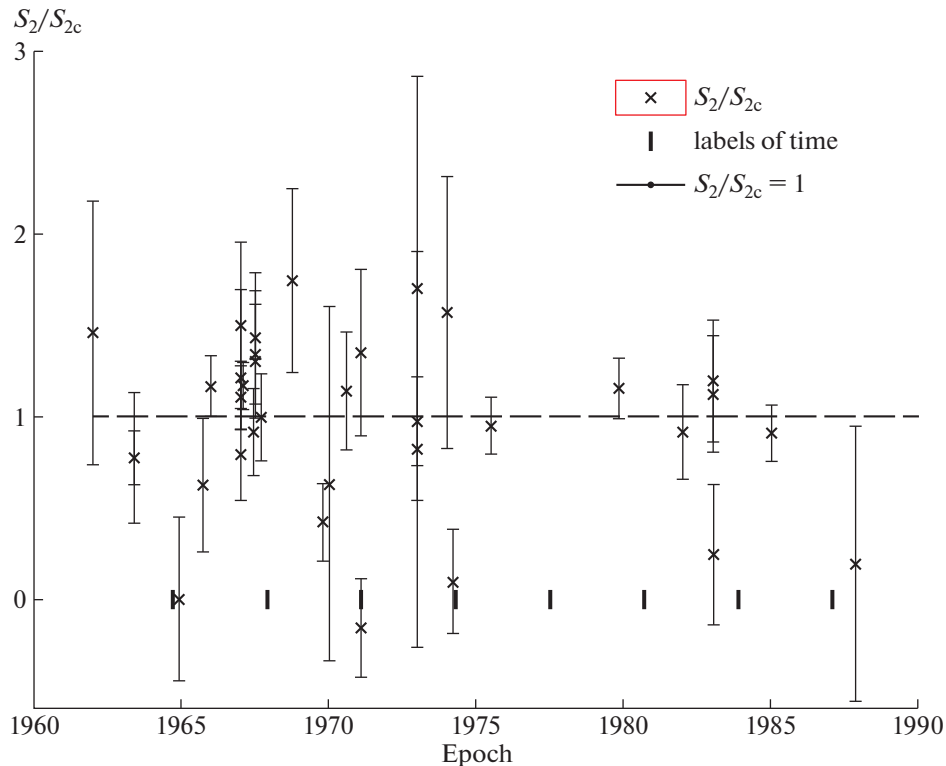


Рис. 6. Зависимость от времени отношения S_2/S_{2c} . Рисунок содержит метки времени (labels of time), повторяющиеся через 3.2 года. Они совпадают или близки по времени с пятью экстремально низкими отношениями S_2/S_{2c} , “провалами”, полученными на разных частотах и представленными в табл. 5.

ной. Линейные размеры плериона в соответствии с данными [2] составляют 1.65×0.6 пк, в центре ТПВ находится пульсар и, подобно ТПВ 3С58 и G21.5-0.9, в нем присутствуют мелкомасштабные активные области с переменными параметрами — узлы и волокна. Поэтому вероятным источником быстрой переменности излучения является плерион.

Вычитая из плотностей потоков S_{am} вклад оболочки S_{1c} , получим спектр плериона S_2 :

$$S_2 = S_{am}(f) - S_{1c}(f). \quad (4)$$

На рис. 6 представлена зависимость от времени отношения S_2/S_{2c} , т.е. спектра плериона, нормированного на его среднее значение S_{2c} ; S_{1c} и S_{2c} — аналитические выражения составляющих спектра 3С396 согласно (2a) и (2b). Нормирование позволяет рассматривать зависимость от времени объединенной совокупности данных, полученных на разных частотах. На рис. 6 интервал времени, содержащий большинство данных табл. 3, ограничен эпохами 1960.0–1990.0.

Нормированные плотности потоков S_2/S_{2c} распределены выше и ниже уровня $S_2/S_{2c} = 1$, в пяти случаях они близки к нулевым значениям. Единственное отрицательное значение меньше погрешности. Таким образом, множество значе-

ний S_{am} ограничено снизу постоянным уровнем спектра оболочки $S_{1c}(f)$, к которому добавляется переменный спектр плериона S_2 . Рис. 6 содержит метки времени, повторяющиеся через 3.2 года. С ними совпадают или близки по времени пять экстремально низких отношений S_2/S_{2c} , “провалов”, полученных на разных частотах и представленных в табл. 5. Эти отношения наблюдались через близкие к кратным 3.2 года интервалы времени, с большими отклонениями от среднего значения $S_2/S_{2c} = 1$. Вероятности таких отклонений, в двух случаях из пяти превышающих 3σ , малы, а вероятность их случайного совместного появления вследствие погрешностей измерений ничтожно мала. Повторное появление “провалов” может быть обусловлено как источником излучения, так и средой, через которую излучение распространяется к наблюдателю — участком оболочки, закрывающим плерион. Процесс может быть рекуррентным, однако для такого вывода статистика недостаточна.

Динамику процесса изменений спектра плериона во времени отражает рис. 7. На нем изображены нормированные плотности потоков S_2/S_{2c} , изменяющиеся во времени в течение короткого интервала 1969.8–1971.1, сплошными горизонтальными линиями отмечены уровни $S_2 = S_{2c}$ и

Таблица 5. Экстремально низкие нормированные плотности потоков S_2/S_{2c}

Epoch	1964.9	1971.1	1974.2	1983.05	1987.87
f (МГц)	178	5000	10630	327	330
S_2/S_{2c}	0.02	-0.16	0.1	0.25	0.2
Err (1σ)	0.45	0.27	0.29	0.38	0.75
Ref	21	29	38	3	22
$(1 - S_2/S_{2c})/\sigma$	2.2	4.3	3.1	2.0	1.1

$S_2 = 0$. На интервале 1.3 года отношение S_2/S_{2c} менялось от 0.42 до 1.35, от -60% до $+35\%$ по сравнению со средним спектром. Эти изменения не были одинаковыми по всему спектру: вклад плериона в плотность потока, измеренного на частоте 5 ГГц в эпоху 1971.1 [29], оказался равным 0. Таким образом, спектр плериона имеет отклонения от степенной зависимости, ограниченные во времени и в полосе частот.

По имеющимся данным можно оценить полосу частот кратковременных “провалов” плотностей потоков относительно среднего спектра. Измерения на частотах 1420, 2700 и 5000 МГц выполнены в процессе выполнения одной работы [29] в течение 1.3 года. На частоте 1420 МГц плотность потока в пределах погрешности превышает средний уровень, на частоте 2700 МГц $S_2/S_{2c} = 0.42$, а на 5000 МГц S_2/S_{2c} близко к 0. “Провал” потока на значимом уровне наблюдается в полосе частот (2700–5000) МГц, данных на более высоких частотах нет. Если плотность потока на частоте 2700 МГц не менялась значительно за

1.3 года до измерений на 5000 МГц, то “провал” занимает полосу частот $\Delta f \approx \pm f/2$. Однако динамика потока на частоте 2700 МГц в течение 1.3 года не известна, что снижает точность оценки.

В случае роста потока оценка полосы частот процесса имеет близкое значение. К такому выводу приводит результат измерений на частотах 4840 и 8450 МГц на радиотелескопе РТ-32: в течение интервала времени 2018.15–2018.5 отмечен относительный рост плотностей потока на частотах 4840 и 8450 МГц в соотношении 2 : 1, следовательно, явление наблюдалось в полосе частот $\Delta f \approx \pm f/2$.

На основании проведенного обсуждения можно сделать несколько выводов о характере переменности ОСН ЗС396:

- Выявлена переменность на различных временных шкалах: от ≈ 0.5 года и более. Переменная составляющая на длительных временных шкалах имеет признаки рекуррентности с характерным периодом ≈ 3.2 года. Переменность на различных временных шкалах может быть обусловлена разными причинами.

- Плотности потоков всегда превышают аналитический спектр оболочки, ограничивающий снизу “провалы” спектра: $S_{am} \geq S_{1c}$. Подобные, хотя и менее интенсивные относительные изменения потоков в ограниченной полосе частот наблюдались в спектре радиоизлучения ТПВ ЗС58 [10]. ЗС58 и плерион в ОСН ЗС396 принадлежат к одному типу объектов, физические процессы в них подобны, и проявляют себя одинаково. Общие черты переменности у ЗС396 и объектов ТПВ

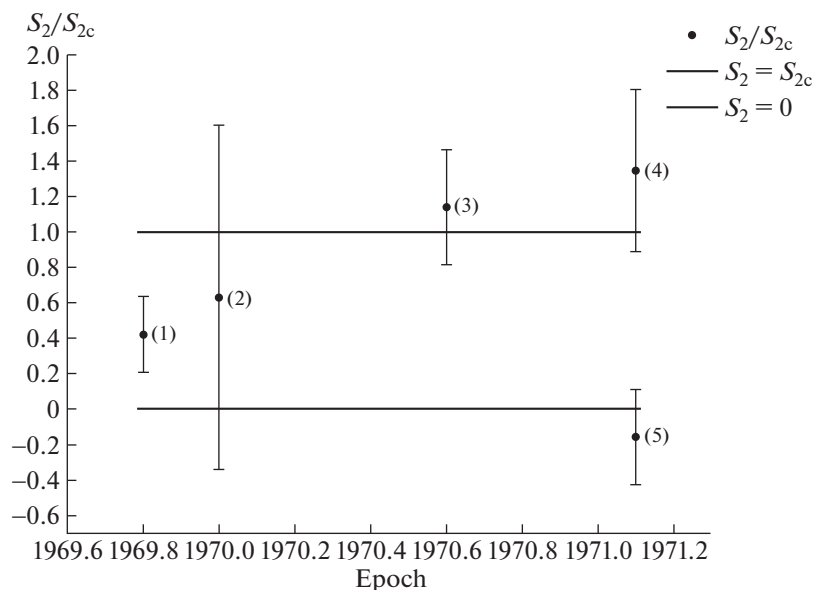


Рис. 7. Нормированные плотности потоков S_2/S_{2c} на интервале 1969.8–1971.1: (1) $f=2700$ МГц [29], (2) $f=80$ МГц [17], (3) $f=1420$ МГц [29], (4) $f=408$ МГц [24], (5) $f=5000$ МГц [29].

приводят к выводу, что изменения происходят в спектре плериона.

- Спектр плериона имеет отклонения от степенной зависимости, ограниченные во времени и в полосе частот. По очень приблизительной оценке полоса частот явления составляет $\Delta f \approx \pm f/2$.

- Несмотря на отмеченные изменения, средний спектр плериона степенной и отклонения усредненных потоков на стандартных частотах от среднего спектра малы.

Стандартными здесь названы частоты, на которых в шкалах потоков [12], [5], [16] приведены плотности потоков стандартных источников. Физическая природа переменности, в том числе кратковременных отклонений спектра плериона от степенного закона, требует отдельного исследования. Здесь ограничимся лишь некоторыми предположениями.

Выше предположение о быстрой переменности спектра плериона аргументировалось тем, что в центре ТПВ находится пульсар и присутствуют мелкомасштабные активные области с переменными параметрами — узлы и волокна. К этому можно добавить, что ТПВ имеет сложную структуру с особенностью в виде “хвоста”, сформированного имевшим место в прошлом и, возможно, продолжающимся истечением релятивистских частиц за пределы туманности. Феномен масштабный: на волне 21 см вклад “хвоста” в плотность потока ЗС396 составляет $\approx 10\%$ [3], или 30% интенсивности излучения плериона. Естественно предположить, что это лишь часть неравновесного процесса, происходящего в ТПВ, следствием которого могут быть локальные возмущения магнитного поля, плотности и энергетического распределения релятивистских электронов, создающие наблюдаемый эффект быстрой переменности.

В качестве другого возможного механизма переменности можно рассмотреть дифракцию радиоизлучения плериона на случайном фазовом экране, расположенном между ТПВ и наблюдателем. Таким экраном, формирующим направленность излучения плериона, может быть отличающаяся неоднородной структурой оболочка ОСН ЗС396. Дифракционная картина в плоскости наблюдателя зависит от частоты и может деформировать спектр, создавая “избытки” и “провалы” плотностей потоков. Если неоднородности экрана имеют собственные движения, должна наблюдаться переменность принимаемого излучения. Рассматриваемый механизм позволяет объяснить нулевые “провалы” измеренных плотностей потоков плериона на отдельных частотах тем, что в момент измерений наблюдатель находился в нулевой точке дифракционной диаграммы направленности системы плерион + экран.

Возможно совместное действие обоих механизмов переменности.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе выполнены исследования спектра и стабильности радиоизлучения ОСН ЗС396. Основной для получения единой и однородной системы данных служит шкала потоков ИЛ (“искусственная луна”) [12].

Плотности потоков на волнах $\lambda = 6.2$ см и 3.5 см измерены на радиотелескопе РТ-32 обсерватории Светлое ИПА РАН относительно стандарта шкалы потоков ИЛ ЗС295. Повторные измерения выявили переменность источника с характерным временем ≈ 0.5 года.

Для получения уточненного спектра ЗС396, а также исследования его переменности на длительном временном интервале, опубликованные данные измерений плотностей потоков ЗС396 приведены в единую систему на основе шкалы потоков ИЛ. В результате точность определения радиоспектра ОСН ЗС396 существенно повышена, что позволило уточнить его форму и обнаружить изменения во времени. Показано, что спектр аппроксимируется суммой двух степенных составляющих, параметры которых были определены. Спектральные индексы компонент оказались равными $\alpha_1 = 0.503 \pm 0.01$ и $\alpha_2 = 0.157 \pm 0.02$. Предполагается, что компоненты обусловлены спектрами оболочки и плериона, соответственно. Значение α_2 близко к величине спектрального индекса “хвоста” $\alpha = 0.15 \pm 0.12$ по данным [3], что дает основание считать “хвост” деталью структуры плериона.

Оценен вклад плериона в полный поток излучения ЗС396: на волне 21 см он составляет $\approx 32\%$. Отличие от существующей оценки вклада плериона $\approx 4\%$, основанной на рентгеновских данных [2], может быть связано с наличием в спектре плериона изломов, подобно крабоподобным остаткам ЗС58 и G21.5-0.9.

В радиоизлучении ОСН ЗС396 обнаружены значимые изменения плотностей потоков, превосходящие погрешности, в течение временных интервалов от 0.5 года. Это соответствует линейным размерам активных областей, генерирующих переменную составляющую, $L \approx 0.15$ пк. Приводятся аргументы в пользу переменности спектра плериона при стабильности излучения оболочки. В предположении, что изменения во времени относятся только к спектру плериона, получены отношения значений “избытков” и “провалов” к значениям аналитического спектра плериона S_{2c} на тех же частотах. Без учета результатов [37] на частотах 8300 и 14350 МГц, выходящих за пределы задач настоящей работы, “избытки” потока не превышают $2S_{2c}$, имеется несколько экстремаль-

ных “провалов” до значений, близких к 0. Временная локализация экстремальных “провалов” допускает действие в источнике рекуррентного процесса с периодом 3.2 г. Оценка полосы частот отклонений от среднего спектра составляет $\Delta f \approx \pm f/2$. Подобные, но с меньшей амплитудой “избытки” и “провалы” наблюдаются в спектре крабовоподобного ОСН 3C58 [10]. Обсуждаются возможные механизмы наблюдаемых явлений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *I. M. Harrus and P. O. Slane*, *Astrophys. J.* **516**, 811 (1999).
2. *C. M. Olbert, J. W. Keohane, K. A. Arnaud, K. K. Dyer, S. P. Reynolds, and S. Safi-Harb*, *Astrophys. J.* **592**, L45 (2003).
3. *A. R. Patnaik, G. C. Hunt, C. J. Salter, P. A. Shaver, and T. Velusamy*, *Astron. and Astrophys.* **232**, 467 (1990).
4. *D. A. Green*, *BASI* **37**, 45 (2009).
5. *J. W. M. Baars, R. Genzel, I. I. K. Pauliny-Toth, and A. Witzel*, *Astron. and Astrophys.* **61**, 99 (1977).
6. *M. C. Anderson and L. Rudnick*, *Astrophys. J.* **408**, 514 (1993).
7. *Y. Su, Y. Chen, J. Yang, B.-C. Koo, X. Zhou, D.-R. Lu, I.-G. Jeong, and T. DeLaney*, *Astrophys. J.* **727**, 43 (2011).
8. *A. Cruciani, E. S. Battistelli, E. Carretti, P. de Bernardis, et al.*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **459**, 4224 (2016).
9. *В. П. Иванов, К. С. Станкевич, С. П. Столяров*, *Астрон. журн.* **71**, 737 (1994).
10. *В. П. Иванов, А. В. Ипатов, И. А. Рахимов, Т. С. Андреева*, *Astrophysical Bulletin* **74**, 128 (2019).
11. *В. П. Иванов, А. В. Ипатов, И. А. Рахимов, С. А. Гренков, Т. С. Андреева*, *Астрон. журн.* **96**, 628 (2019).
12. *В. П. Иванов, А. В. Ипатов, И. А. Рахимов, С. А. Гренков, Т. С. Андреева*, *Астрон. журн.* **95**, 609 (2018).
13. *А. М. Финкельштейн*, *Наука в России* **5**, 20 (2001).
14. *A. Finkelstein, A. Ipatov, and S. Smolentsev*, in *Proc. of the Fourth APSGP WorkShop*, edited by H. Cheng, Q. Zhi-han (Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 2002), p. 47.
15. *И. А. Рахимов, Ш. Б. Ахмедов, А. А. Зборовский, Д. В. Иванов, А. В. Ипатов, С. Г. Смоленцев и А. М. Финкельштейн*, Всероссийская астрономическая конференция, Санкт-Петербург, 6–12 августа 2001. Тезисы докладов (СПб.: Изд-во ИПА РАН, 2001), с. 152.
16. *M. Ott, A. Witzel, A. Quirrenbach, T. P. Krichbaum, K. J. Standke, C. J. Schalinski, and C. A. Hummel*, *Astron. and Astrophys.* **284**, 331 (1994).
17. *O. B. Slee and C. S. Higgins*, *Australian J. Physics and Astrophys. Suppl.* **36**, 1 (1975).
18. *G. A. Dulk, O. B. Slee* *Astrophys. J.* **199**, 61 (1975).
19. *B. C. Артюх, В. В. Виткевич, Р. Д. Дагжесаманский, В. Н. Кожухов*, *Астрон. журн.* **45**, 712 (1968).
20. *O. B. Slee*, *Australian J. Physics Astrophys. Suppl.* **43**, 1 (1977).
21. *K. I. Kellermann, I. I. K. Pauliny-Toth, and P. J. S. Williams*, *Astrophys. J.* **157**, 1 (1969).
22. *N. E. Kassim*, *Astron. J.* **103**, 943 (1992).
23. *P. A. Shaver, W. M. Goss*, *Australian J. Physics Astrophys. Suppl.* **14**, 77 (1970).
24. *C. Fanti, M. Felli, A. Ficarra, C. J. Salter, G. Tofani, and P. Tomassi*, *Astron. and Astrophys. Supp. Ser.* **16**, 43 (1974).
25. *R. H. Becker, D. J. Helfand*, *Astron. J.* **94**, 1629 (1987).
26. *D. K. Milne, T. L. Wilson, F. F. Gardner, P. G. Mezger*, *Astrophys. Lett.* **4**, 121 (1969).
27. *W. J. Altenhoff, D. Downes, L. Goad, A. Maxwell, and R. Rinehart*, *Astron. and Astrophys. Supp. Ser.* **1**, 319 (1970).
28. *P. A. Shaver and K. W. Weiler*, *Astron. and Astrophys.* **53**, 237 (1976).
29. *F. F. Gardner, J. B. Whiteoak, and D. Morris*, *Australian J. Physics Astrophys. Suppl.* **35**, 1 (1975).
30. *A. J. B. Downes, T. Pauls, and C. J. Salter*, *Astron. and Astrophys.* **97**, 296 (1981).
31. *P. W. Horton, R. G. Conway, E. J. Daintree*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **143**, 245 (1969).
32. *W. Reich, E. Furst, P. Steffen, K. Reif, C. G. T. Haslam*, *Astron. and Astrophys. Supp. Ser.* **58**, 197 (1984).
33. *V. A. Hughes, R. Butler*, *Astrophys. J.* **155**, 1061 (1969).
34. *X. H. Sun, P. Reich, W. Reich, L. Xiao, X. Y. Gao, and J. L. Han*, *Astron. and Astrophys.* **536**, A83 (2011).
35. *E. C. Reifenstein, T. L. Wilson, B. F. Burke, P. G. Mezger, and W. J. Altenhoff*, *Astron. and Astrophys.* **4**, 357 (1970).
36. *D. K. Milne and J. R. Dickel*, *Australian J. Physics* **28**, 209 (1975).
37. *G. Langston, A. Minter, L. D'Addario, K. Eberhardt, K. Koski, and J. Zuber*, *Astron. J.* **119**, 2801, (2000).
38. *R. H. Becker and M. R. Kundu*, *Astron. J.* **80**, 679, (1975).