

УДК: 524.6—77

РЕЗУЛЬТАТЫ ПОИСКА СВЕРХБЫСТРОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ПЕРЕМЕННОСТИ У РАДИООБЪЕКТОВ С КОНТИНУАЛЬНЫМИ ОПТИЧЕСКИМИ СПЕКТРАМИ

В. Ф. ШВАРЦМАН, Г. М. БЕСКИН, С. А. ПУСТИЛЬНИК

Поступила 23 мая 1989

Принята к печати 26 июня 1989

В САО АН СССР с 1972 г. проводится эксперимент МАНИЯ (Многоканальный Анализ Наносекундных Изменений Яркости), целью которого является поиск и исследование релятивистских объектов в Галактике. В статье приводятся результаты поиска одиночных черных дыр звездных масс среди радиообъектов с континуальными оптическими спектрами (РОКОС). РОКОСы являются группой необычных радиосточников. Их континуум генерируется преимущественно нетепловыми механизмами, а оптические спектры лишены следов линий. Вероятно, среди РОКОСов могут оказаться черные дыры звездных масс. Критический тест для выявления таких объектов — обнаружение сверхбыстрых флуктуирующей блеска с характерными временами вплоть до 10^{-6} — 10^{-3} с. 20 РОКОСов наблюдались на 6-м телескопе с временным разрешением $3 \cdot 10^{-7}$ с. Ни для одного из них не обнаружены изменения блеска в диапазоне характерных времен $5 \cdot 10^{-7}$ —40 с с доверительной вероятностью $p > 0.99$. Типичные ограничения на относительную мощность переменного компонента для диапазона времен 10^{-5} — 10^{-2} с лежат в пределах (20—5)%. На основе этих результатов получены статистические оценки для доли гипотетических черных дыр звездных масс среди РОКОСов.

1. Введение. В САО АН СССР уже более десяти лет проводится эксперимент МАНИЯ (Многоканальный Анализ Наносекундных Изменений Яркости). Его основная задача — поиск и исследование релятивистских объектов звездных масс [1]. Работа проводится по нескольким направлениям: поиск и исследование оптического излучения нейтронных звезд, изучение процессов аккреции плазмы на компактные компоненты и поиск черных дыр (ч. д.) в тесных двойных системах и, наконец, поиск одиночных ч. д. звездных масс. Именно последнему из перечисленных направлений и посвящена данная статья*.

Как показано Шварцманом [3], одиночные ч. д. звездных масс, в результате аккреции межзвездного газа, должны быть окружены светящими-

* Часть результатов очень кратко сообщалась Бескиным и др. [2].

ся ореолами. Спектр излучения — очень широкий, с максимумом в оптическом диапазоне и обрывом на высоких частотах. Вследствие синхротронной природы излучения, оптический спектр ореолов должен быть лишен линий. Это свойство является основным для первичного выделения интересующих нас объектов среди всех звезд, занесенных в каталоги. Вероятно, значительная доля светимости таких ореолов может приходиться на радиодиапазон [4].

Необходимо отметить, что у некоторых классов астрофизических объектов свойство бесструктурности оптического спектра совпадает с ожидаемым для гипотетических ч. д. звездных масс. Так, например, ряд активных галактических ядер, относимых к объектам типа BL Lac, характеризуется мощным нетепловым континуумом (лишенным линий) и сильным радиоизлучением.

Имеется, однако, признак, позволяющий практически однозначно обнаруживать ч. д. звездных масс. Важной особенностью физических процессов, протекающих в окрестностях таких релятивистских объектов, должна быть переменность энерговыделения на очень малых временах, вплоть до 10^{-8} с. Конкретные механизмы, приводящие к таким эффектам, рассмотрены в работах [1, 3, 5].

Таким образом, поиск и обнаружение сверхкоротких флуктуаций блеска является критическим экспериментом для выявления среди возможных кандидатов (отобранных, например, по признаку отсутствия линий в оптическом спектре) реальных ч. д. звездных масс.

На сегодня известны две большие группы звездообразных объектов, оптические спектры которых лишены линий. Одна группа — это близкие объекты ($d < 10-30$ пк) со значительными собственными движениями — DC-карлики. Это слабые звезды, большинство из которых после детальных исследований оказались обычными белыми карликами разных типов. Результаты их изучения в рамках эксперимента МАНИЯ представлены в работе [6].

Другая группа — радиообъекты с континуальными оптическими спектрами (РОКОСы). Эта выборка (≈ 80 шт.) составляет около 8% от всех радиисточников, отождествленных со звездообразными оптическими объектами [7]. Список РОКОСов приведен в работах Пустильника [8, 9].

Типичные характеристики оптического континуума многих РОКОСов, такие, как высокая и переменная линейная поляризация (до 30%), степенной характер спектра ($\alpha_{\text{опт.}} = -(1.0 \div 2.5)$) и быстрая нерегулярная переменность блеска ($\tau_{\text{min-часы-дни}}$), указывают на определяющую роль в генерации их оптического излучения нетепловых механизмов.

С другой стороны, отсутствие в оптических спектрах каких-либо линий (как эмиссионных, так и абсорбционных) не позволяет решить вопрос о локализации этих объектов и, соответственно, об их массах.

Неясно заранее даже, единый ли физический тип объектов попадает в группу РОКОСов. Можно думать, что среди них могут быть как объекты звездных масс в нашей Галактике — одиночные черные дыры, так и экстремальные по наблюдательным проявлениям нетепловых процессов активные ядра галактик с массами (10^6 — 10^{10}) M_{\odot} .

Цель этой работы — поиск сверхбыстрых флуктуаций блеска на БТА у 20-ти РОКОСов и анализ итогов этих наблюдений.

На этапе выбора конкретных объектов для исследований мы использовали уже известную информацию о них, собранную в работе [8], чтобы выделить кандидаты, наиболее интересные с точки зрения поиска у них сверхбыстрой переменности, т. е. свойства которых близки к предполагаемым наблюдательным проявлениям одиночных черных дыр. Дополнительные критерии: наличие сильной и (или) быстрой переменности блеска, наличие компактного радиоисточника (в том числе и по характеру радиоспектра), необычный характер оптического континуума, низкая галактическая широта.

2. Наблюдения и обработка. Наблюдения 20-ти РОКОСов проводились на 6-м телескопе САО АН СССР с помощью аппаратурно-программного комплекса МАНИЯ [1, 10].

Комплекс состоит из одноканального электрофотометра, установленного в первичном фокусе, и специализированного преобразователя «время—код», работающего на линии с ЭВМ СМ-4 [11, 12]. В стандартном режиме наблюдений моменты регистрации отдельных фотонов кодировались, засылались в память ЭВМ и записывались на магнитную ленту. Точность измерения моментов прихода фотонов — $5 \cdot 10^{-8}$ с, временное разрешение комплекса — $3 \cdot 10^{-7}$ с, максимальный поток, регистрируемый без искажений, — 15^{10} отсчетов в секунду.

При больших интенсивностях использовался так называемый режим пересчета, в котором регистрируются моменты прихода каждого k -го фотона. При этом временное разрешение составляет k/I , где I — скорость счета.

Наблюдения в большинстве случаев проведены без фильтра. Диапазон длин волн определялся спектральной чувствительностью фотокатода S-20. Для оптимизации отношения потоков сигнала и фона наблюдения некоторых объектов проводились с одним из стандартных фильтров B , V , R или фиолетовым фильтром « f » ($\lambda_{\text{эфф}} = 4000 \text{ \AA}$, эффективная полоса $\Delta\lambda = 1000 \text{ \AA}$).

При поиске переменности проводились два последовательных цикла наблюдений объекта и звезды сравнения в одинаковых условиях. Интенсивность звезды сравнения искусственно уравнивалась с интенсивностью исследуемого объекта.

В течение 1979—1986 гг. мы провели на 6-метровом телескопе 6 сетов наблюдений РОКОСов. Журнал наблюдений приводится в табл. 1. Помимо поиска сверхбыстрой переменности у всех объектов исследовались *UBVR*-характеристики, подробно обсуждавшиеся ранее в работе [13].

Таблица 1

ЖУРНАЛ НАБЛЮДЕНИЙ РОКОСов

№	Объект	Дата наблюдений	m_V	Фильтр	Диафрагма	Объем (ман. ф/отсч.)
1	01.09+244 OC+215.7	22.12.79	15.36	<i>f</i>	11.9	1.4
		31.12.81	15.6	<i>B</i>	8.6	1.8
2	0300+47 OE+400	11.10.78	17.3	б/ф	4.3	2.3
		21.12.79	(17.5:)	б/ф	4.3	1.4
3	0346-163 OE-177.2	21.12.79	15.76	б/ф	6.9	2.7
4	0422+004 OF+038	22.12.79	15.74	б/ф	11.9	1.4
5	0716+714	24.12.82	16.02	б/ф	6.9	2.5
6	0754+100 01+C90.4	28.02.79	16.0	<i>V</i>	8.6	1.4
		25.12.82	14.76	б/ф	8.6	2.4
		25.12.82	14.76	<i>B</i>	6.9	2.4
7	C818-123 OJ-131	28.02.79	17.13	б/ф	4.3	1.8
8	0823-223 OJ-240	31.12.81	16.75	б/ф	6.9	1.8
9	0829+046 OJ+049	22.12.79	16.9	б/ф	4.3	1.4
		22.12.79	16.9	б/ф	6.9	
		24.12.82	15.83	б/ф	6.9	0.8
10	0912+297 OK+222	25.12.82	15.78	<i>B</i>	11.9	2.5
11	1057+100	02.03.79	17.68	<i>f</i>	6.9	1.5
12	1147+245 OM+280	25.12.82	16.24	<i>B</i>	8.6	2.5
13	1155+169	20.12.84	18:	б/ф	6.9	2.5
14	1215+303 ON+325	27.02.79	(16.0:)	<i>B</i>	8.6	1.7
		02.03.79	15.58	<i>R</i>	6.9	1.5
		02.03.79	(15.5)	<i>B</i>	6.9	1.6
15	1402+042	30.04.86	16.6	б/ф	8.6	2.5
16	1418+546 OQ+530	27.02.79	15.30	<i>R</i>	8.6	1.5
17	1424+240 OQ+240	25.12.82	15.92	б/ф	8.6	1.8
		23.03.83	16.09	б/ф	11.6	1.2
18	1514+197	02.03.79	(19.3:)	б/ф	6.9	1.4
19	1538+149 OR+165	28.02.79	(17.3:)	б/ф	6.9	0.6
		28.02.79	(17.3:)	б/ф	6.9	0.6
20	1749+096 OT+080	13.06.83	(18.5:)	б/ф	6.9	2.4

Обработка массивов информации для объекта и звезды сравнения проводилась идентичным образом с помощью u_2 - и d_2 -функций [1, 14]. Точность результата при оценке переменности по каждому из объектов определялась по разбросу соответствующих параметров у звезды сравнения.

Результаты поиска оптической переменности РОКОСов в диапазоне времен $5 \cdot 10^{-7}$ —40 с представлены в табл. 2. В ней приводятся ограничения сверху на относительную мощность переменного компонента излучения S^* .

Верхние пределы соответствуют вспышкам треугольной формы со скважностью 0.2. Доверительная вероятность пределов $> 99\%$ (уровень 3σ). Для других значений скважности верхние пределы для величины S следует увеличить или уменьшить обратно пропорционально корню квадратному из величины скважности.

3. *Обсуждение.* Целью наблюдений, результаты которых представлены в табл. 2, было обнаружение среди РОКОСов релятивистских объектов звездных масс по признаку сверхбыстрых изменений блеска.

Для всех 20-ти РОКОСов получены только ограничения сверху на относительную мощность переменного компонента, которые для диапазона 10^{-5} — 10^{-2} с составляют в среднем от 20 до 5%. Таким образом, результаты наших наблюдений не дают никаких свидетельств в пользу того, что среди РОКОСов имеются одиночные ч. д. звездных масс.

Следует также отметить, что анализ наблюдательных свойств РОКОСов и сравнение их со свойствами активных галактических ядер, относящихся к объектам типа BL Lac и сильнополяризованным квазарам (HPQ), показывает, что многие РОКОСы близки к ним по своим свойствам [9], т. е. с большой вероятностью большинство РОКОСов является активными внегалактическими объектами.

Интересно дать более точную оценку сверху на долю релятивистских объектов звездных масс среди РОКОСов, исходя из приведенных выше результатов наблюдений.

При этом мы будем исходить из гипотезы, что ч. д. в наших наблюдениях должны были бы показывать быстрые вариации блеска.

Прежде всего обратим внимание на тот факт, что при полном диапазоне блеска объектов в списке РОКОСов от $m = 15$ до $m = 20$, в табл. 1 большинство объектов (15 из 20-ти) представляют собой яркую часть распределения (m от 15 до 17.5), а остальные 5—слабую (m от 17.5 до 19).

* S представляет собой долю светимости объекта, которая сильно меняется в указанном диапазоне времен. Строгое определение параметра S см., например, в работе [15].

РЕЗУЛЬТАТЫ ПОИСКА ОПТИЧЕСКОЙ ПЕРЕМЕННОСТИ РОКОСов НА
ВРЕМЕНАХ 5. 10⁻⁷—40 с

№	Объект	Дата	Сигнал + фон	Объем (макс. ф/отсч.)*	Ограничения на относительную мощность переменного компонента, %					
					фон ф/отсч./с	5·10 ⁻⁷ —10 ⁻⁶ с	10 ⁻⁶ —10 ⁻⁵ с	10 ⁻⁵ —10 ⁻⁴ с	10 ⁻³ —10 ⁻² с	10 ⁻² —1 с
1	0109+224	22.12.79	7099/1599	0.7	27	23	14	4.5	2.5	2.0
		31.12.81	4418/1410	1.0	39	28	16	5.5	3.0	1.5
2	0300+47	11.10.79	3100/739	0.7	44	27	16	5.	3.0	1.5
		21.12.79	2897/820	0.7	35	30	19	6.5	3.5	1.5
3	0346—163	21.12.79	7414/2270	1.5	28	23	12	4.5	3.0	3.0
4	0422+004	22.12.79	15070/5673	0.8	29	24	13	5.0	3.0	1.5
		**								
5	0716+714	24.12.82	8477/2517	1.2	29	22	12	4.5	3.0	1.5
6	0754+100	28.02.79	2566/1208	0.4	69	46	29	10.5	7.0	3.0
		25.12.82	3220/690	1.2		***		3.5	1.0	1.0
		24.12.82	10123/2405	1.2	28	19	13	5.5	3.5	3.0
7	0818—128	29.02.79	2613/964	0.7	42	32	21	7.5	4.5	7.5
8	0823—223	31.12.81	9000/5505	1.2	67	42	26	9.0	6.0	3.0
9	0829+046	22.12.79	3665/915	0.2	47	44	21	8.0	4.0	4.5
		22.12.79	5600/2396	0.4	59	34	21	8.5	4.5	3.5
		24.12.82	8257/2581	0.6	54	30	14	5.5	3.0	1.5
10	0912+297	25.12.82	6574/1200	1.2	26	22	13	5.5	3.0	1.0
11	1057+100	02.03.79	1093,621	0.8	74	56	32	11.5	7.5	2.5
12	1147+245	25.12.82	3073/1138	1.2	39	33	21	8.0	4.5	2.0
13	1155+169	20.12.84	8715/4070	1.24	43	33	19	7.0	4.0	2.0
14	1215+303	27.02.79	2663/729	0.8	45	28	16	6.5	3.5	5.0
		02.03.79	1553/266	0.6	40	36	21	6.5	4.5	2.0
		02.03.79	2545/285	0.6	44	30	19	6.0	3.5	1.5
15	1402+042	30.04.86	9195/4136	1.12	38	27	15	8.0	4.0	5.6
16	1418+546	27.02.79	2762/566	0.5	36	30	16	6.5	4.5	2.0
17	1424+240	25.12.82	11650/3072	1.2	32	28	16	6.5	4.0	2.5
		23.03.83	9719/2771	0.6	30	21	13	5.0	3.0	8.7
18	1514+197	02.03.79	533,242	0.7	63	52	32	14.0	8.0	6.5
19	1538+149	28.02.79	3393/1492	0.4	51	42	23	13.0	12.5	8.0
		28.02.79	3500/1630	0.3	62	49	30	11.5	5.5	3.0
20	1749+096	13.06.83	6961/4061	1.8	47	37	21	8.5	5.0	3.0

* Объем информации указан для массива фотоотсчетов объекта, по которому
представлены ограничения.

** Интенсивность урезана.

*** Наблюдения в режиме пересчета ($k = 20$).

15 «ярких» РОКОСов составляют половину списочного состава, а 5 «слабых» — соответственно, лишь одну десятую часть от всех входящих в список [8]. Поэтому оценку для доли релятивистских объектов звездных масс среди РОКОСов сделаем отдельно для «яркой» и «слабой» выборок.

Статистически задача ставится следующим образом. Пусть имеется группа из N объектов, из которых M обладает заданным свойством («сверхбыстрая переменность»), а остальные $(N-M)$ не обладают этим свойством. Берется случайная безвозвратная выборка из n элементов, в которой обнаруживается m объектов с заданными свойствами. Требуется дать доверительный верхний предел для величины M , характеризующей группу в целом. В нашем случае $m = 0$.

В математической статистике (см., например, [16]) показывается, что оценка для M может быть дана как оценка параметра гипергеометрического распределения. Для $N = 30$, $n = 15$, $m = 0$, воспользовавшись таблицей 5.6 из книги Большева и Смирнова, получим, что 95% доверительный верхний предел для величины M (число быстропеременных объектов во всей группе из 30-ти «ярких» РОКОСов) есть $M_1 = 4$. Таким образом, с той же доверительной вероятностью, доля быстропеременных объектов (т. е. ч. д. звездных масс) среди «ярких» РОКОСов не превышает $4/30 = 0.13^*$.

Для «слабых» РОКОСов мы не даем здесь аналогичной численной оценки. Ясно, однако, что из-за относительно малого объема исследованной выборки оценка верхнего предела доли интересующих нас объектов для этой подгруппы будет в несколько раз более грубой, чем для «ярких» РОКОСов.

Резюмируя, заключаем, что по результатам проведенных наблюдений установлено, что среди относительно ярких РОКОСов ($m_V = 15-17.5$) доля гипотетических быстропеременных объектов весьма невелика и не может превышать $\sim 10\%$. Подавляющее большинство их является активными галактическими ядрами, близкими по своим свойствам к объектам типа VL Lac. Для «слабых» РОКОСов ($m_V > 17.5$) аналогичные ограничения на долю гипотетических релятивистских объектов звездных масс весьма грубы (их доля меньше или порядка 50%), и поиск сверхкороткой переменности имеет смысл продолжить.

Авторы считают своим приятным долгом поблагодарить здесь всех, кто на разных этапах этой работы принимал участие в наблюдениях и об-

* Как отмечено во введении, мы отбирали объекты для наблюдений не случайно, а используя дополнительную информацию об их свойствах, чтобы повысить вероятность обнаружения сверхбыстрой переменности. Поэтому реальная доля быстропеременных объектов еще меньше.

работке накопленной информации: А. В. Журавкова, С. Н. Митронову, С. И. Неизвестного, А. А. Пимонова, В. Л. Плахотниченко, Л. А. Пустильника.

Специальная астрофизическая
обсерватория АН СССР

THE RESULTS OF SEARCH FOR SUPERRAPID OPTICAL VARIABILITY OF RADIO OBJECTS WITH CONTINUOUS OPTICAL SPECTRA

V. F. SHVARTSMAN, G. M. BESKIN, S. A. PUSTIL'NIK

At the Special Astrophysical Observatory of the USSR AS an experiment MANIA (Multichannel Analysis of Nanosecond Intensity Alterations) has been carried out since 1972. The aim of the experiment is to search and study relativistic objects in the Galaxy. The results are reported for the search of alone accreting black holes of stellar masses among which Radio Objects with Continuous Optical Spectra (ROCOS). ROCOS are the group of unusual radiosources. Their optical continuum is generated mostly by nonthermal mechanisms and their optical spectra are featureless. Probably some ROCOSes may turn out to be stellar mass black holes. The critical test to find such type of objects is to detect superrapid fluctuations of brightness with characteristic times up to $10^{-6} - 10^{-3}$ s.

20 ROCOSes have been observed on the 6-m telescope with a time resolution of $3 \cdot 10^{-7}$ s. For none of them brightness alteration has been detected in the range of characteristic times of $5 \cdot 10^{-7} - 40$ s, with confidence probability $p > 0.99$. Typical upper limits on the relative power of variable component are in the range $(20 - 5)\%$ on the time-scales $10^{-5} - 10^{-2}$ s. The statistical estimates on the relative part of hypothetical black holes of stellar masses among ROCOSes are reported.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Ф. Шварцман, Сообщ. Спец. астрофиз. обсерв. АН СССР, 19, 5, 1977.
2. Г. М. Бескин, В. Л. Плахотниченко, В. Ф. Шварцман, Тезисы 5-ой советской прав. конференции, Изд-во МГУ, М., 1981, стр. 263.
3. В. Ф. Шварцман, Астрон. ж., 48, 479, 1971.
4. В. М. Малофеев, В. Ф. Шварцман, Сообщ. Спец. астрофиз. обсерв. АН СССР, 20, 39, 1977.
5. Л. А. Пустильник, В. Ф. Шварцман, Тесные двойные системы и их эволюция, Тр. Всесоюз. конференции, Изд. МГУ, М., 1974, стр. 105.

6. В. Ф. Шварцман, Г. М. Бескин, С. Н. Митронова, Письма в Астрон. ж. (в печати) 1989.
7. M. P. Veron—Cetti, P. Veron, ESO Sci. Rep. № 4, 1985.
8. С. А. Пустильник, Сообщ. Спец. астрофиз. обсерв. АН СССР, 34, 13, 1982.
9. С. А. Пустильник, Диссертация, ИКИ АН СССР, 1987.
10. G. M. Beskin, S. I. Nelvestny, A. A. Pimonov, V. L. Plakhotnichenko, V. F. Shvarzman, in „Instrumentation for Astronomy with Large Optical Telescopes“, IAU Col. № 67, ed С. М. Humphries, Reidel, Dordrecht, 1982, p. 181.
11. С. И. Неизвестный, А. А. Пимонов, Сообщ. Спец. астрофиз. обсерв. АН СССР, 23, 56, 1978.
12. А. А. Пимонов, Сообщ. Спец. астрофиз. обсерв. АН СССР, 25, 39, 1979.
13. Г. М. Бескин, В. М. Лютый, С. И. Неизвестный, С. А. Пустильник, В. Ф. Шварцман, Астрон. ж., 62, 432, 1985.
14. В. Л. Плахотниченко, Сообщ. Спец. астрофиз. обсерв. АН СССР, 38, 29, 1983.
15. Г. М. Бескин, С. И. Неизвестный, А. А. Пимонов, В. Л. Плахотниченко, В. Ф. Шварцман, Письма в Астрон. ж., 5, вып. 10, 508, 1979.
16. Л. Н. Большев, Н. В. Смирнов, Таблицы математической статистики, Наука, М., 1983, стр. 416.