

УДК 520.274; 520.274.3

ОЦЕНКА НАБЛЮДАТЕЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ОБСЕРВАТОРИИ “МИЛЛИМЕТРОН” В РЕЖИМЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОЧАСТОТНОГО СИНТЕЗА

А. Г. Рудницкий, М. А. Щуров

В работе рассматриваются возможности применения метода многочастотного синтеза для повышения качества изображений в режиме наземно-космического радиоинтерферометра со сверхдлинной базой обсерватории “Миллиметрон”. Выполнено моделирование картографических наблюдений близких окрестностей сверхмассивной черной дыры M87. Показаны преимущества метода многочастотного синтеза по сравнению с одночастотными наблюдениями. Сформулированы требования и ограничения его применимости в наземно-космической интерферометрии с обсерваторией “Миллиметрон”.

Ключевые слова: интерферометрия, РСДБ, сверхмассивные черные дыры.

Введение. Методы радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой (РСДБ) существуют с 1950-х годов [1]. Она подразумевает одновременные наблюдения источника на нескольких телескопах, разнесенных в пространстве, образуя таким образом один большой виртуальный телескоп с незаполненной апертурой. Заполнение этой апертуры (картинной плоскости или (u, v) плоскости) напрямую влияет на качество изображений, восстанавливаемых из РСДБ наблюдений. С дальнейшим развитием радиоастрономии и появлением наземно-космического РСДБ (КРСДБ), в частности, проекта “Радиоастрон” [2], в КРСДБ наблюдениях вопрос заполнения апертуры стал наиболее актуальным, поскольку на картинной плоскости между треками наземных и наземно-космических баз оставались довольно значимые промежутки. Наличие этих промежутков негативно влияет на качество получаемых изображений, ухудшает форму синтезированной диаграммы направленности (луча) интерферометра, а также вносит артефак-

Астрокосмический Центр ФИАН, 117997 Россия, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32; e-mail: arud@asc.rssi.ru.

ты в изображения. В связи с этим возникла необходимость разработать методы проведения РСДБ наблюдений, позволяющие уменьшить влияние промежутков на картинной плоскости или сократить их. Одним из таких методов является метод многочастотных наблюдений. Его суть заключается в том, что на всех телескопах, участвующих в РСДБ эксперименте, наблюдения проводятся на нескольких частотах одновременно.

В настоящее время ведутся работы над созданием обсерватории “Миллиметрон” – 10 метрового космического радиотелескопа, способного наблюдать в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах. “Миллиметрон” будет работать в двух режимах: одиночного телескопа и в качестве космического плеча КРСДБ совместно с наземными телескопами миллиметрового диапазона. В режиме КРСДБ космической обсерватории предполагается возможно проведения наблюдения одновременно на нескольких частотах. В настоящей работе рассматриваются возможности и преимущества использования одновременных многочастотных наблюдений.

Методы многочастотного синтеза. При заполнении картинной плоскости значениями функции видности, измеряемой интерферометром, длина вектора проекции базы отсчитывается от начала координат картинной плоскости в единицах длин волн измеряемого диапазона, таким образом измерения на двух частотах будут формировать два параллельных трека, соответствующих своим диапазонам. Для использования данных многочастотных наблюдений были разработаны специализированные алгоритмы, которые позволяют строить изображения радиоисточников на выбранной центральной частоте, применяя данные наблюдений нескольких частотных диапазонов сразу [3].

Многочастотный синтез с переключением внутри частотного диапазона уже ограниченно применялся в рамках проекта “Радиоастрон” [2, 4]. Однако такая реализация не дала какого-либо ощутимого улучшения (u, v) заполнения.

В концепции развития РСДБ сети next-generation Event Horizon Telescope или ngЕНТ [5, 6] наблюдения будут проводиться в миллиметровом диапазоне длин волн (частоты 230 и 345 ГГц) с поддержкой всеми входящими в сеть телескопами, режима одновременного многочастотного синтеза, т. е. режима одновременной работы нескольких приемников на каждом из телескопов. Для снижения влияния атмосферных флуктуаций на фазу принимаемого сигнала и с целью повышения времени когерентного накопления на наземных телескопах дополнительно заложена поддержка более низкой частоты 120 ГГц, на которой будут проводиться наблюдения вместе с диапазонами 230 и 345 ГГц. Это позволит реализовывать метод переноса фазы, который теоретически

сможет на порядок увеличить время когерентного накопления сигнала на частотах 230 и 345 ГГц [7].

В рамках создания обсерватории “Миллиметрон” целесообразно отталкиваться от совместимости с современными наземными телескопами. Поэтому в дальнейшем в работе рассматриваются частотные диапазоны ngЕНТ: 120, 230 и 345 ГГц. Также далее везде под многочастотным синтезом будут подразумеваться одновременные РСДБ наблюдения с задействованием нескольких частотных диапазонов, что предполагает одновременную работу нескольких приемников.

Моделирование наблюдений. Для оценки и обоснования преимуществ применения многочастотного синтеза в РСДБ наблюдениях обсерватории “Миллиметрон” выполнено моделирование наблюдений окрестностей сверхмассивной черной дыры (СМЧД) в галактике М87 с помощью программного пакета Astro Space Locator [8]. М87 или Messier 87 – гигантская эллиптическая галактика, которая находится на расстоянии около 16.4 Мпк от Земли на координатах $Ra = 12h30'49.42''$, $Dec = 12^\circ 23'28.04''$. Этот источник является одним из приоритетных объектов в программе наблюдений обсерватории “Миллиметрон”, формируемой в настоящее время. Ранее уже проводились успешные наблюдения М87 с помощью ЕНТ. Результаты этих наблюдений были опубликованы в 2019 г. и представили научному сообществу первое в истории радиоастрономии изображение окрестностей СМЧД [9].

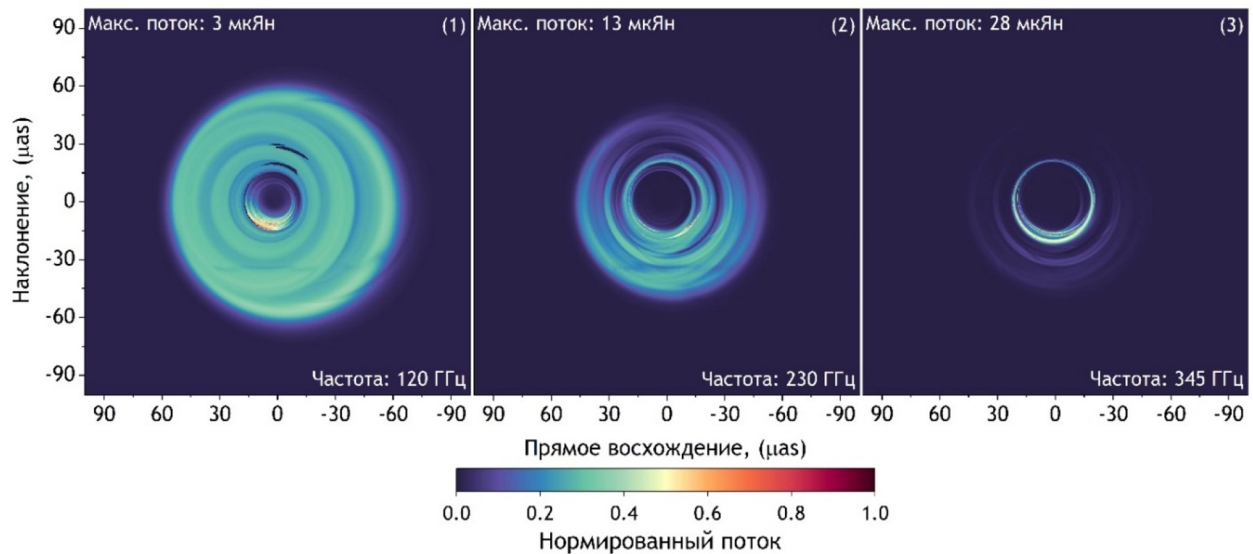


Рис. 1: Модели сверхмассивной черной дыры в галактике М87: (1) частота 120 ГГц, (2) частота 230 ГГц, (3) частота 345 ГГц.

В качестве моделей распределения радиояркости брались модели с параметрами из работы [11]. Масса СМЧД с метрикой Керра для модели источника СМЧД в М87 составляла $M = 6.5 \cdot 10^6 M_{\odot}$, где $M_{\odot}$ – масса Солнца. Интегральный поток в каждом диапазоне рассчитывался на этапе моделирования по синхротронному спектру с максимальным значением 1.20, 0.93 и 0.59 Ян на частотах 120, 230 и 345 ГГц соответственно. Модели СМЧД в М87 для каждой частоты (120, 230 и 345 ГГц, соответственно) приведены на рис. 1.

Качественная оценка получаемых изображений с использованием методов много-частотного синтеза по сравнению с одночастотными наблюдениями выполнялась с помощью вычисления меры качества изображений F (“fidelity”) – общепринятой степени качества восстановления РСДБ изображений [11]:

$$F = \frac{I_p}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (I_i - I_i^*)^2}},$$

где F – fidelity, I_p – максимальное значение интенсивности в пикселе модели источника, I_i^* – интенсивность i -го пикселя модели, I_i – интенсивность i -го пикселя в восстановленном изображении, n – количество пикселей изображения.

Использовались следующие параметры моделирования наблюдений и восстановления изображений: объем бортовой памяти – 384 Тб; шаг по времени – 10 минут; ширина полосы – 4 ГГц; длительность наблюдений (классический режим) – 48 часов; длительность наблюдений (мгновенный снимок) – 10 минут. При моделировании КРСДБ наблюдений для обсерватории “Миллиметрон” использовалась орбита из работы [12]. В качестве наземных антенн брался перечень телескопов ngEHT – это действующие и запланированные к строительству антенны¹. Моделирование выполнялось в двух режимах: классическое наблюдение длительностью 48 часов и наблюдение в режиме мгновенного снимка длительностью 10 минут. Многочастотные изображения синтезировались на центральной частоте 230 ГГц и использовали данные всего набора частот (120, 230 и 345 ГГц).

Результаты. На рис. 2 изображено (u, v) заполнение, полученное при моделировании наблюдений СМЧД в М87 на частотах 120, 230 и 345 ГГц в классическом режиме. Полученные изображения приведены на рис. 3 (1)–(3). С помощью многочастотного синтеза получено изображение с расширенным динамическим диапазоном (рис. 3 (4)).

¹ <https://www.ngeht.org/>.

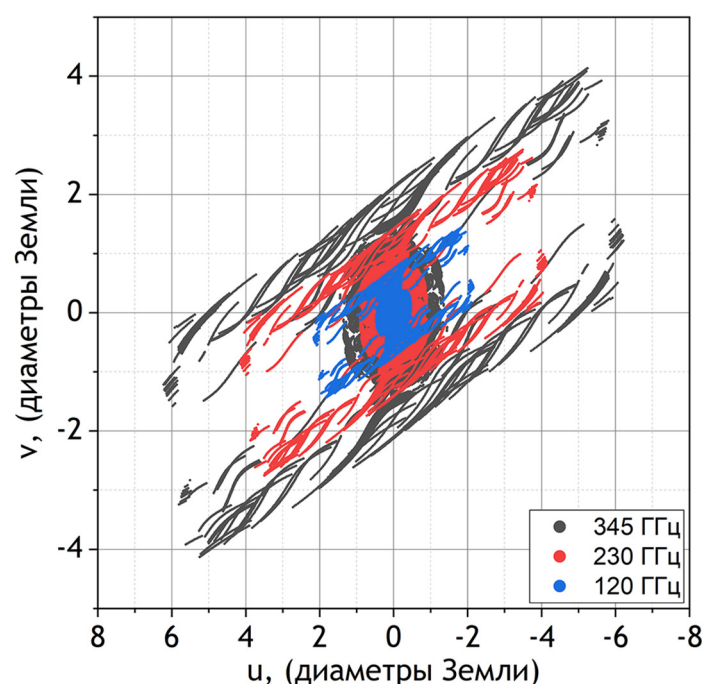


Рис. 2: Заполнение (u, v) плоскости с шагом в 10 минут для смоделированных наблюдений источника СМЧД в М87 (суммарное время накопления 2 дня). Цветами показаны разные частотные диапазоны: 120, 230 и 345 ГГц.

Затем выполнялась оценка показателя F . В табл. 1 приведены результаты расчёта этой величины для полученных изображений для каждого частотного диапазона, в том числе для многочастотного изображения для классического режима и режима мгновенного снимка, соответственно.

Т а б л и ц а 1

Рассчитанные значения степени качества восстановления РСДБ изображений

Частота, ГГц	F (классический режим)	F (режим мгновенного снимка)
120	0.113	0.212
230	0.092	0.258
345	0.267	0.281
Многочастотный синтез	0.753	0.556

Наблюдается значительное улучшение величины F для восстановленного многочастотного изображения на центральной частоте 230 ГГц ($F = 0.75$) в классическом режиме по сравнению с одночастотным изображением на частоте 230 ГГц ($F = 0.09$).

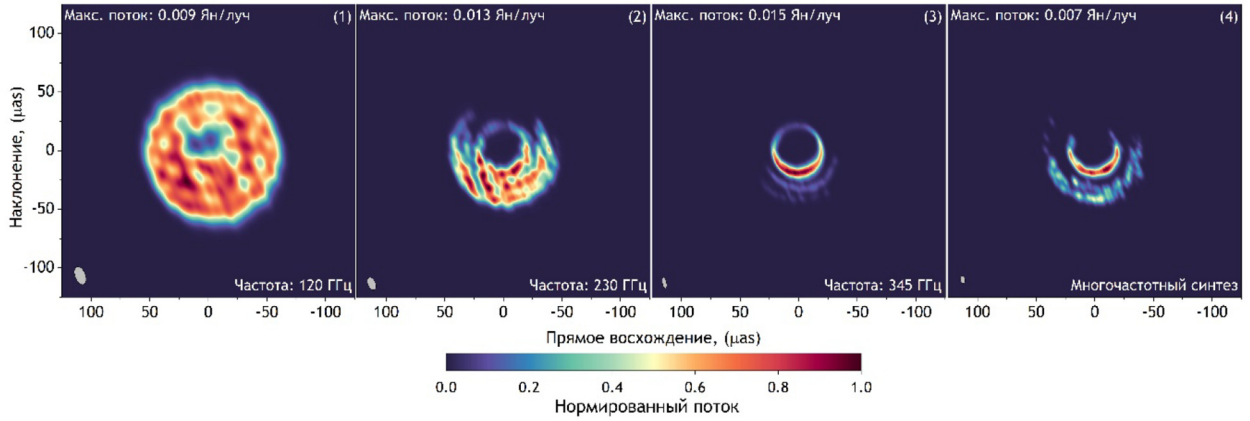


Рис. 3: Моделирование РСДБ картографирования для источника СМЧД в М87 (суммарное время накопления 2 дня): (1) синтезированное изображение на частоте 120 ГГц (угловое разрешение $16.5 \times 6.6 \mu\text{as}$), (2) синтезированное изображение на частоте 230 ГГц (угловое разрешение $8.4 \times 3.6 \mu\text{as}$), (3) синтезированное изображение на частоте 345 ГГц (угловое разрешение $5.9 \times 2.6 \mu\text{as}$), (4) синтезированное изображение в режиме многочастотного синтеза (угловое разрешение $6.6 \times 2.8 \mu\text{as}$). Цветовая шкала изображений отнормирована на их максимальные значения интенсивности.

Рассматривая результаты режима мгновенного снимка, из (u, v) покрытия, представленного на рис. 4, видно, что в этом случае покрытие на больших базах (т.е. на базах, заполняемых наблюдениями в самом высокочастотном диапазоне 345 ГГц) остаётся недостаточным вследствие медленной эволюции конфигурации интерферометра за 10 минут наблюдений. Несмотря на это, для многочастотных наблюдений в режиме мгновенного снимка качество изображения улучшается ($F = 0.258$ и $F = 0.556$, соответственно), пусть и не так значительно, как для классического режима наблюдений. Это связано как с непродолжительным временем наблюдений, которое приводит к недостаточному заполнению (u, v) плоскости, так и с тем фактом, что редкие измерения в точках на больших пространственных частотах при таком заполнении получены фактически только в одном диапазоне 345 ГГц.

Результирующие изображения в режиме мгновенного снимка приведены на рис. 5, где изображения (1)–(3) соответствуют одночастотным наблюдениям на частотах 120, 230 и 345 ГГц, а изображение (4) соответствует многочастотному синтезу на центральной частоте 230 ГГц.

При моделировании выполнена оценка ожидаемого потока данных на борт обсерватории “Миллиметрон” в случае одночастотного и многочастотного наблюдений. При

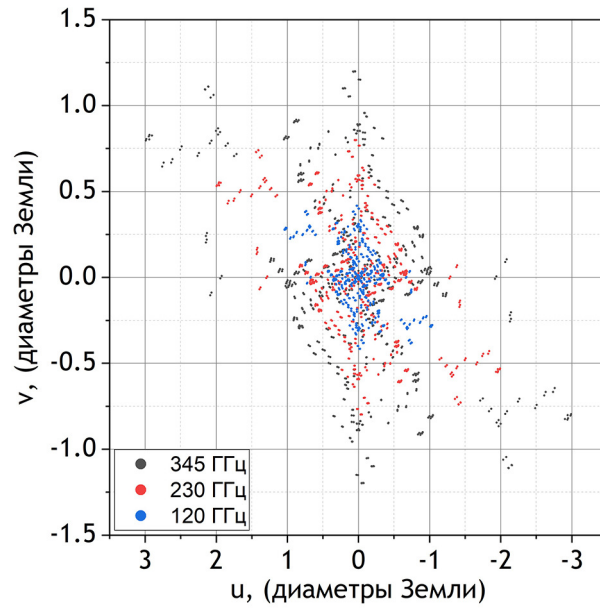


Рис. 4: Заполнение (u, v) плоскости в режиме мгновенного снимка, накопленное за 10 минут для смоделированных наблюдений источника СМЧД в М87. Цветами показаны разные частотные диапазоны: 120, 230 и 345 ГГц.

использовании двухбитного квантования для записи данных с шириной полосы 4 ГГц поток данных составит 8 Гбит/с (один поляризационный канал, одна частотная субполоса). При организации наблюдений в виде сканов длительностью 10 секунд объем данных каждого такого составит 10 Гб. При наблюдениях серией сканов длительностью 10 секунд с частотой в 10 минут в течение двух суток на одной и трех частотах одновременно объем данных составит ~ 2.9 Тб и ~ 8.8 Тб. Объем бортовой памяти в 384 Тбайт позволяет в таких наблюдениях задействовать все доступные каналы (2 поляризационных канала и 2 частотные субполосы). В этом случае объем данных за двое суток наблюдений составит на одной частоте ~ 11.6 Тб и ~ 35.2 Тб, соответственно. Также возможно увеличение частоты следования сканов в наблюдениях и/или их длительности.

Выводы и заключение. Результаты моделирования РСДБ наблюдений с использованием многочастотного синтеза продемонстрировали улучшение заполнения (u, v) плоскости для приоритетного источника СМЧД М87 в программе наблюдений проекта “Миллиметррон”. Такое улучшение приводит к повышению качества получаемых изображений в 8 раз при оценке величины F в случае классических длительных наблюдений в рамках рассмотренного случая. В режиме мгновенного снимка многочастотный синтез не дает преимуществ перед одночастотными наблюдениям в связи с тем, что продол-

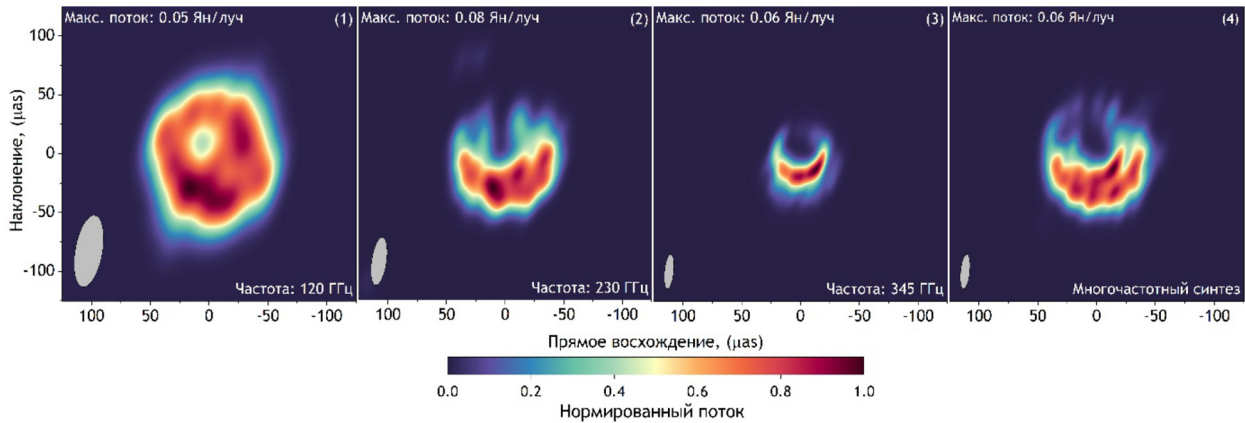


Рис. 5: Моделирование РСДБ картографирования в режиме мгновенного снимка для источника СМЧД в М87: (1) синтезированное изображение на частоте 120 ГГц (угловое разрешение $42 \times 17 \mu\text{as}$), (2) синтезированное изображение на частоте 230 ГГц (угловое разрешение $23 \times 10 \mu\text{as}$), (3) синтезированное изображение на частоте 345 ГГц (угловое разрешение $17 \times 7 \mu\text{as}$), (4) синтезированное изображение в режиме многочастотного синтеза (угловое разрешение $24 \times 11 \mu\text{as}$). Цветовая шкала изображений отнормирована на их максимальные значения интенсивности.

жительность таких наблюдений изначально формирует плохое заполнение (u, v) плоскости. Применение низких частот (120 ГГц) для увеличения динамического диапазона получаемых изображений является нецелесообразным, т. к. пространственные частоты наземно-космических баз на частоте 120 ГГц, покрывают тот же диапазон значений, что и пространственные частоты наземных баз в диапазонах 230 и 345 ГГц. Следовательно, диапазон 120 ГГц имеет смысл использовать исключительно для осуществления переноса фазы на частоты 230 и 345 ГГц для наземных баз с целью увеличения времени когерентного накопления сигнала и снижения фазовых флуктуаций, вызванных атмосферой Земли. Таким образом, для действительного повышения качества получаемых изображений в РСДБ наблюдениях обсерватории “Миллиметрон” необходимо использовать комбинацию из двух частот 230 и 345 ГГц. При этом третья, более низкая частота 120 ГГц, должна использоваться как калибровочная, и в улучшении качества получаемых заполнений (u, v) плоскости роли играть не будет.

По результатам оценок ожидаемых потоков данных можно сделать вывод, что смоделированные одновременные наблюдения на трех частотах полностью укладываются в заложенные параметры объемов бортовой памяти обсерватории “Миллиметрон”.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] L. I. Matveenko, *Astron. Nachr.* **328**(5), 411 (2007). DOI: 10.1002/asna.200710763.
- [2] Н. С. Кардашев, В. В. Хартов, В. В. Абрамов и др., *Астрономический журнал* **90**(3), 179 (2013). DOI: 10.7868/S000462991303002X.
- [3] R. Thompson, J. M. Moran, G. W. Swenson, *Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy* (Wiley, New York, 1986).
- [4] Anisa T. Bajkova, Alexander B. Pushkarev, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **417**(1), 434 (2011).
- [5] S. Likhachev, V. Ladygin, I. Girin, *ASP Conference Series* **314**, P6 (2004).
- [6] A. Rudnitskiy, M. Shchurov, T. Jung, M. Giroletti, *Journal of The Korean Astronomical Society* **56**(1), 91 (2023). DOI: 10.5303/JKAS.2023.56.1.91.
- [7] D. Palumbo, M. Johnson, S. Doeleman, et al., *American Astronomical Society Meeting Abstracts* **231**, Article id: 347.21 (2018).
- [8] A. W. Raymond, D. Palumbo, S. N. Paine, et al., *The Astrophysical Journal Supplement* **253**(1), 5 (2021). DOI: 10.3847/1538-3881/abc3c3.
- [9] M. Rioja, R. Dodson, J. Malarecki, Y. Asaki, *The Astronomical Journal* **142**(5), 157 (2011). DOI: 10.1088/0004-6256/142/5/157.
- [10] S. F. Likhachev, I. A. Girin, V. Yu. Avdeev, et al., *Astronomy and Computing* **33**, Article id: 100426 (2020). DOI: 10.1016/j.ascom.2020.100426.
- [11] Event Horizon Telescope Collaboration et al., *The Astrophysical Journal Letters* **875**(1), L1 (2019). DOI: 10.3847/2041-8213/ab0ec7.
- [12] С. В. Чернов, *Астрономический журнал* **98**(2), 132 (2021). DOI: 10.31857/S0004629921020018.
- [13] A. S. Andrianov, A. M. Baryshev, H. Falcke, et al., *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **500**(4), 4866 (2021). DOI: 10.1093/mnras/staa2709.
- [14] A. G. Rudnitskiy, P. V. Mzhelskiy, M. A. Shchurov, et al., *Acta Astronautica* **196**, 29 (2022). DOI: 10.1016/j.actaastro.2022.03.036.
- [15] Andrew Chael, Sara Issaoun, Dominic W. Pesce, et al., *The Astrophysical Journal* **945**(1), 40 (2023). DOI: 10.3847/1538-4357/acb7e4.

Поступила в редакцию 13 марта 2024 г.

После доработки 6 мая 2024 г.

Принята к публикации 7 мая 2024 г.