

ПЕРСПЕКТИВЫ НАБЛЮДЕНИЯ ДВОЙНЫХ СВЕРХМАССИВНЫХ ЧЕРНЫХ ДЫР НА КОСМИЧЕСКОМ РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРЕ

© 2023 г. А. М. Малиновский^{1,*}, Е. В. Михеева^{1,**}

¹ Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Астрокосмический центр, Москва, Россия

*E-mail: amalin@asc.rssi.ru

**E-mail: helen@asc.rssi.ru

Поступила в редакцию 27.03.2023 г.

После доработки 04.05.2023 г.

Принята к публикации 20.06.2023 г.

Проанализирован список кандидатов в двойные сверхмассивные черные дыры, составленный на основе имеющихся данных по переменности в оптическом диапазоне и форме спектра излучения. Для оценки потока излучения на частоте 240 ГГц построена искусственная нейронная сеть. Для тех кандидатов в двойные сверхмассивные черные дыры, для которых процедура построения сети оказалась возможной, был проверен критерий возможности наблюдения источника на космической обсерватории Миллиметрон. Результат проведенного исследования представлен в виде таблицы из 17 кандидатов в двойные сверхмассивные черные дыры. Подтверждение (или опровержение) двойственности этих объектов при наблюдениях на космическом интерферометре с параметрами, сходными с характеристиками космической обсерватории Миллиметрон, станет важной вехой в развитии теории образования галактик.

Ключевые слова: сверхмассивные черные дыры

DOI: 10.31857/S000462992307006X, **EDN:** AJABMA

1. ВВЕДЕНИЕ

Считается, что в центральной части практически любой массивной галактики ($M > 10^{12} M_{\odot}$) имеется сверхмассивная черная дыра (СМЧД)¹. Это положение является в настоящее время общепринятым, хотя однозначное наблюдательное подтверждение этого имеется только для галактики Млечный Путь [1, 2]. Для нескольких сотен других галактик имеются измеренные различными способами значения масс центральных СМЧД [3–5]. К числу наиболее надежных методов относятся те, которые основаны на изучении динамики звезд или газа, в то время как реверберационный метод (метод эхокартографирования), широко применяемый в настоящее время, содержит не вполне ясную систематическую ошибку, связанную с типом исследуемого объекта [6]. Еще одним новым способом измерения масс СМЧД является измерение тени черной дыры при помощи радиоинтерферометрии, что стало не только важным достижением наблюдательной астрономии,

но и дало независимую оценку масс СМЧД М87* [7] и SgrA* [8].

За годы исследования СМЧД в центрах галактик было обнаружено несколько корреляций, связывающих массу центральной СМЧД галактик с такими параметрами, как масса галактики, в которой она расположена, масса звездного балджа и общая масса всех шаровых скоплений (см. [9–11] и ссылки там же). Наличие таких корреляций несомненно указывает на связь величины массы СМЧД и эволюции галактик (см. [12] и ссылки там же). Характер этой связи может меняться со временем, на что указывают недавние наблюдательные данные по измерению масс СМЧД и балджей их хозяйских галактик на больших красных смещениях $z \simeq 6$ [13, 14].

До сих пор остается неясным, какой именно физический механизм приводит к образованию СМЧД. При этом, безусловно, необходимо различать возникновение “зародыша”, который может иметь массу в диапазоне $(10^2–10^5) M_{\odot}$, и рост массы черной дыры вследствие аккреции вещества из окружающего пространства и/или слияния с другими черными дырами. Согласно современным представлениям зародыш СМЧД может возникнуть в результате 1) прямого коллапса газового облака, 2) эволюции плотного звездного

¹ Сверхмассивными называются черные дыры с массой $M > 10^4 M_{\odot}$. Интенсивно исследуемые в настоящее время СМЧД имеют массы $M > 10^6 M_{\odot}$.

скопления или 3) при слиянии многих черных дыр звездных масс [15].

Согласно современным представлениям гравитационно связанное гало темной материи, составляющее основной (динамически доминирующий) компонент любой галактики, в ходе эволюции переживает многократные слияния с гало меньших масс, а также при численном моделировании можно выделить событие главного слияния, когда гало взаимодействует с другим гало близкой массы. Это означает, что в течение какого-то времени в галактиках должно наблюдаться несколько СМЧД, а значит, и двойные сверхмассивные черные дыры (ДСМЧД) [16].

После захвата СМЧД гало, содержащим другую (более массивную для определенности) черную дыру, характерный размер орбиты СМЧД начинает уменьшаться вследствие динамического трения [17]. Характерное время этого процесса составляет $\sim 10^8$ лет. В это время пара СМЧД является гравитационно несвязанной, а для ее обозначения используется термин “dual”. Когда расстояние между СМЧД уменьшается до ~ 1 – 100 пк, происходит образование гравитационно связанной пары, а систему из двух СМЧД начинают называть “binary” [18]. Именно такие пары СМЧД мы рассматриваем в данной работе и называем ДСМЧД.

Дальнейшая эволюция ДСМЧД определяется динамикой взаимодействия пары с индивидуальными звездами и газом гравитационно связанного центрального звездного скопления, в результате чего происходит потеря парой углового момента и энергии. В описании этого этапа на сегодняшний момент остается множество неопределенностей, связанных, главным образом, с темпом заполнения конуса потерь, из-за чего продолжительность этого этапа трудно оценить. Тем не менее, когда расстояние между СМЧД уменьшается до 10^{-2} – 10^{-3} пк, наиболее эффективным механизмом потери энергии системой становится излучение гравитационных волн, приводящее к слиянию ДСМЧД через $\sim 10^8$ лет. Детали эволюции двойной системы являются активной областью исследований [19–21].

Ключевой характеристикой гравитационно связанных ДСМЧД является то, что они редки [19]. Хотя частота встречаемости двойных систем остается неопределенной и зависит от неизвестной скорости эволюции на малых масштабах (проблема центрального парсека), теоретики оценивают долю активных галактических ядер на красных смещениях $z < 0.7$, содержащих доступные для обнаружения ДСМЧД, как $\sim 10^{-3}$ [22]. Близкие значения были получены с помощью различных подходов [23–25].

Простые оценки показывают, что период обращения СМЧД в двойной системе, T , размер большой полуоси, a , и общая масса ДСМЧД, $M + m$, связаны соотношением

$$(T/\text{год})^2 \simeq 5.92 \frac{(a/(0.01 \text{ пк}))^3}{(M + m)/10^9 M_\odot}.$$

Это означает, что, предполагая исследовать двойные системы, имеющие периоды не более нескольких лет, логично сосредоточиться на достаточно массивных (“гипермассивных”, как было предложено в работе [26], исходя из возможностей радиоинтерферометрических наблюдений) черных дырах, разделенных субпарсековыми расстояниями.

Наиболее известным кандидатом в ДСМЧД является объект OJ 287 [27], который согласно наиболее предпочтительной модели имеет массу главного компонента $\sim 10^{10} M_\odot$, второго компонента $\sim 10^8 M_\odot$, а период обращения в двойной системе составляет около 12 лет. Относительно большой (по сравнению с другими известными СМЧД) угловой размер более массивного компонента, ~ 0.2 мкс дуги, и полный поток порядка единиц Ян делают его хорошим кандидатом для наблюдений при помощи наземно-космического интерферометра [28].

Одним из основных направлений поиска ДСМЧД является анализ (оптической) переменности активных галактических ядер, главным образом, квазаров. Так, в [29] был проанализирован каталог Catalina Real-time Transient Survey (CRTS), содержащий 243 500 спектроскопически подтвержденных квазаров. В результате поиска было отобрано 111 объектов, демонстрирующих признаки переменности с периодами порядка года, ставших кандидатами в ДСМЧД.

Поиск кандидатов в ДСМЧД был также принят авторами работы [30] путем анализа каталога Palomar Transient Factory (PTF), содержащего 35 383 спектроскопически подтвержденных квазара. При анализе этого каталога было выявлено 50 квазаров со статистически значимой периодичностью, а при совместном анализе с каталогом CRTS список новых кандидатов в ДСМЧД дополнился 33 источниками. Вместе с OJ 287 это составляет 145 кандидатов в ДСМЧД.

Успех радиоинтерферометрии в исследовании СМЧД, расположенных в центрах галактик M87 [7] и Млечный Путь [8], позволяет надеяться, что столь же замечательные успехи могут быть достигнуты и при изучении ДСМЧД. Иными словами, при наличии радиоинтерферометра с очень высоким разрешением можно будет увидеть излучение от окрестностей обеих СМЧД двойной системы. Однако для кандидатов в СМЧД, отобран-

ных по их переменности в оптическом диапазоне, не всегда имеются данные о потоках на частоте 240 ГГц. Отчасти это связано с тем, что наблюдения в субмиллиметровом диапазоне требуют специальных условий, в первую очередь, низкой концентрации паров воды в атмосфере места наблюдения. По этой причине логично обратиться к моделированию значений потоков, основываясь на имеющихся данных.

Интерес к ДСМЧД растет с каждым годом, что вызвано важным местом этих объектов в понимании процессов образования СМЧД и хозяйских галактик [19]. До сих пор однозначные доказательства двойственности имеющихся кандидатов отсутствуют даже для такого интенсивно наблюдаемого объекта, как ОJ 287, т.е. требуются интерферометрические наблюдения с очень высоким разрешением.

В данной работе изложена методика моделирования спектров СМЧД в миллиметровом и субмиллиметровом диапазоне методами искусственного интеллекта. Найденные при помощи искусственной нейронной сети значения потоков источников на частоте 240 ГГц использованы для проверки критерия наблюдаемости источников на наземно-космическом интерферометре с параметрами, сходными с параметрами космической обсерватории Миллиметрон. Кандидаты в ДСМЧД, удовлетворяющие критерию наблюдаемости, собраны в таблицу. Поскольку имеющиеся кандидаты в ДСМЧД были отобраны по свойствам, имеющим не прямое отношение к двойственности СМЧД, т.е. могут быть обусловлены другими причинами, важно построить, насколько это возможно, полные каталоги для проведения интерферометрических наблюдений, в ходе которых двойственная природа может быть установлена однозначно.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ СПЕКТРОВ ДСМЧД

Для целей исследования из 145 известных кандидатов в ДСМЧД были отобраны те, для которых имеются данные по потокам на больших и меньших частотах относительно частоты 240 ГГц. Таких объектов оказалось 17. К этому списку из литературы было добавлено еще 7 кандидатов в ДСМЧД, найденных в других публикациях (см. табл. 1). В этой таблице перечислены название источника-кандидата в ДСМЧД, оценка массы², выраженная в единицах десятичного логарифма отношения массы черной дыры к массе Солнца, физическое расстояние между черными дырами в двойной системе D , выраженное в парсеках,

² Для большинства двойных систем предполагалось равенство масс компонентов.

предполагаемое значение орбитального периода системы P , красное смещение z и ссылка.

Для моделирования потока излучения на частоте 240 ГГц была построена искусственная нейронная сеть.

Искусственная нейронная сеть — это математическая модель, имеющая структуру, подобную структуре головного мозга, с “нейронами” — вычислительными узлами, соединенными синапсами, служащими для передачи данных между нейронами. Искусственная нейронная сеть, таким образом, позволяет найти зависимость между входными и выходными данными.

Предположим, что выходные данные y являются функцией входных данных x , $y = f(x)$.

В классическом программировании функция f известна, что предоставляет возможность определить соответствующие выходные данные для заданных входных. Для задач машинного обучения функция f , как правило, не известна. В ходе обучения модели она снабжается как входными, так и выходными данными, что позволяет установить зависимость между ними. Затем, в ходе работы уже обученной модели, для новых входных данных рассчитываются соответствующие выходные.

В рассматриваемом случае входными данными были значения частоты, а выходными — плотности потока излучения на этих частотах. Сначала проводилось обучение модели на имеющихся общедоступных данных (см. NASA/IPAC Extragalactic Database (NED)³). Затем натренированная сеть определяла плотность потока излучения на интересующих нас частотах. В качестве языка программирования использовался *Python*, а в качестве библиотеки машинного обучения — *Tensorflow* [39].

В данной работе использовался тип нейронной сети, называемый многослойным перцептроном, который является сетью прямого распространения, т.е. сигнал распространяется строго от входа сети к ее выходу. Многослойный перцептрон состоит минимум из трех слоев: слоя (набора) входных нейронов, получающих информацию, скрытого слоя (или нескольких слоев: в нашем случае сеть содержала два скрытых слоя с 50 нейронами каждый), обрабатывающих информацию, и слоя выходных нейронов, выдающих результаты вычислений. При обучении сети используется так называемое “обучение с учителем” — сеть снабжается множеством примеров, содержащих пары “известный вход—известный выход”. В начале обучения нейронной сети веса нейронов (характеризующие их вклад) активируются случайным образом. Путем сопоставления

³ <https://ned.ipac.caltech.edu>

Таблица 1. Кандидаты в двойные сверхмассивные черные дыры (ДСМЧД)

Объект	Масса, $\log(M/M_{\odot})$	D , пк	P	z	Ссылка
UM 269	8.41	0.00313	490.5 сут	0.308	[29, 30]
CSO 0402+379	8.18	7.3	150 тыс. лет	0.055	[31, 32]
FBQS J081740.1+232731	9.55	0.011	1190 сут	0.891	[29, 30]
BZQ J0842+4525	9.48	0.012	1886 сут	1.408	[29, 30]
SDSS J084716.04+373218.1	8.1	0.022	40 лет	0.454	[33, 34]
OJ 287	10.26	0.056	4380 сут	0.306	[27]
MCG +11–11–032	8	0.0036	760 сут	0.036	[19]
SBS 0924+606B	8.9	0.044	40 лет	0.295	[33, 34]
SDSS J094715.56+631716.4	9.22	0.014	1724 сут	0.487	[29, 30]
SDSS J093819.25+361858.7	9.32	0.007	1265 сут	1.677	[29, 30]
SDSS J100021.80+223318.7	9.3	0.052	35 лет	0.418	[35, 36]
SDSS J102349.38+522151.2	9.59	0.014	1785 сут	0.955	[29, 30]
SDSS J124044.49+231045.8	8.94	0.008	1428 сут	0.722	[29, 30]
BZQ J1305–1033	8.50	0.008	1694 сут	0.286	[29, 30]
SDSS J132103.41+123748.2	8.91	0.008	1538 сут	0.687	[29, 30]
SDSS J133654.44+171040.3	9.24	0.008	1408 сут	1.231	[29, 30]
SDSS J141244.09+421257.6	9.69	0.00622	433.4 сут	0.805	[29, 30]
3C 298.0	9.57	0.013	1960 сут	1.437	[29, 30]
TEX 1428+370	8.53	0.00214	288.3 сут	0.566	[29, 30]
SDSS J150243.09+111557.3	8.06	140	20 млн. лет	0.391	[37]
FBQS J150911.2+215508	8.54	0.00241	314.4 сут	0.438	[29, 30]
PG 1553+113	8	0.0038	3 года	0.360	[38]
HS 1630+2355	9.86	0.020	2040 сут	0.821	[29, 30]
PKS 2203–215	8.91	0.00408	497 сут	0.577	[29, 30]

полученного с данными весами конечного результата и известного нам “выхода” возможно рассчитать ошибку, а затем, используя метод обратного распространения ошибки (по сути являющимся методом градиентного спуска), мы можем пересчитать значения весов всех нейронов. После чего рассчитывается новый конечный результат. Число таких циклов, называемых “эпохами”, в нашей работе было равно 10 000, а коэффициент скорости обучения (мера коррекции весов в каждой эпохе) составлял 0.01. В качестве функции активации (вычисляющей выходной сигнал нейрона в зависимости от суммы входных сигналов) была взята т.н. сигмоида, $f(x) = (1 + \exp(-x))^{-1}$.

Результаты моделирования всех 24 источников из табл. 1 приведены на рис. 1–3.

3. КОСМИЧЕСКАЯ РСДБ ДСМЧД

Поскольку угловые размеры СМЧД очень малы, их интерферометрические наблюдения с кос-

мическими базами в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах приобретают особую роль, см., напр., [28]. В той же работе был сформулирован критерий отбора источников для наблюдений на космической обсерватории Миллиметрон. Этот критерий был адаптирован авторами для целей данного исследования, при этом в качестве “основной” была использована частота 240 ГГц.

В соответствии с критерием отбора моделированные значения потока, полученные с помощью искусственной нейронной сети, подставлялись в [28], Ф-ла (8):

$$F_{av} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int C(u, v) C^*(u, v) d\psi} = \frac{F_{ANN}}{\pi p R (1 - r^2)} \times \sqrt{J_1^2(x_1) + J_1^2(x_2) r^2 - 2J_1(x_1)J_1(x_2)J_0(x_3)r},$$

где F_{av} — функция видности, усредненная по азимутальному углу в (u, v) -плоскости $\psi \equiv \arcsin(v/p)$, значения p вычислялись по возможным значениям минимальной и максимальной проекции баз для выбранной орбиты космической обсервато-

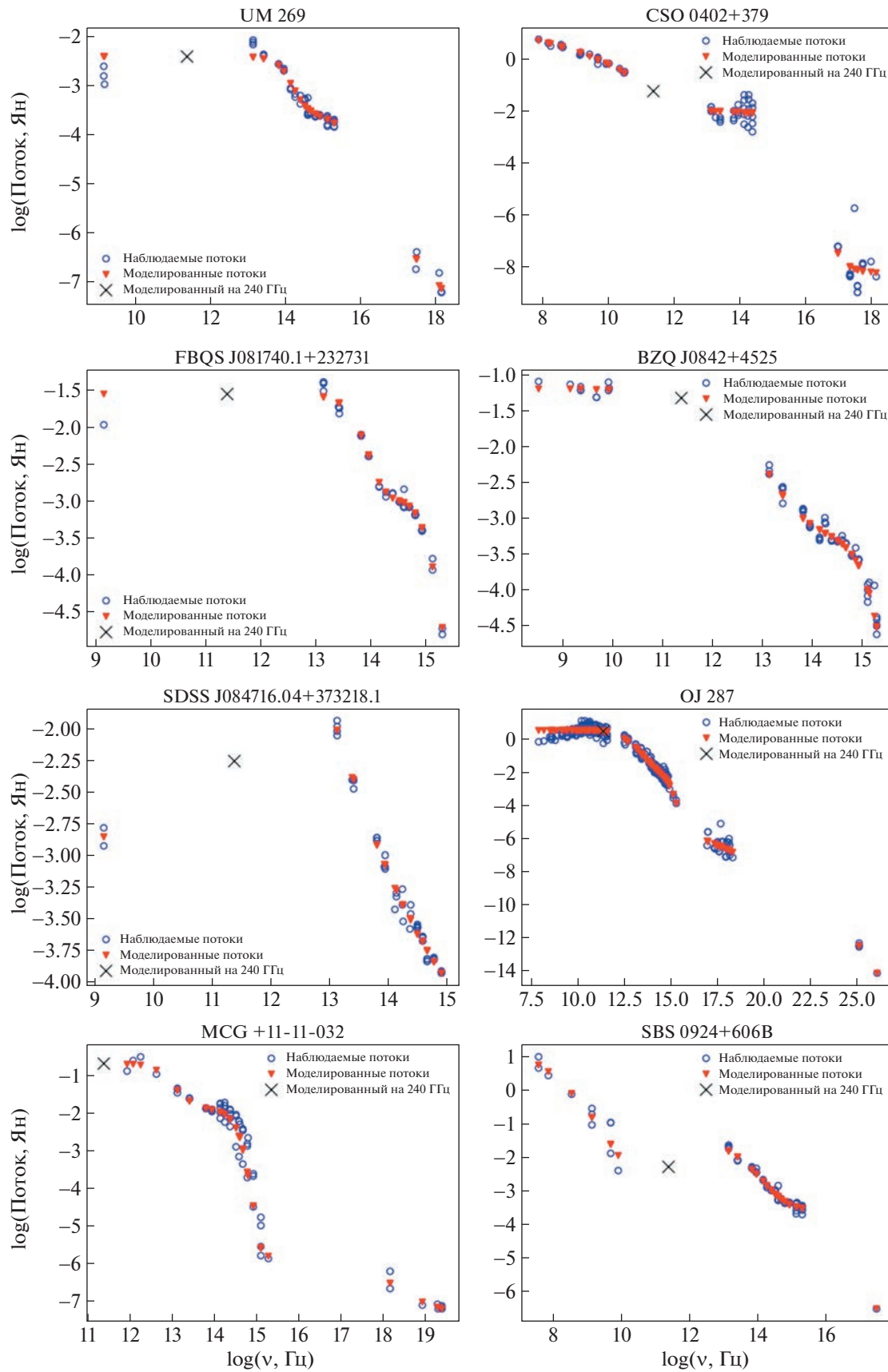


Рис. 1. Моделированные спектры источников из табл. 1. Часть 1.

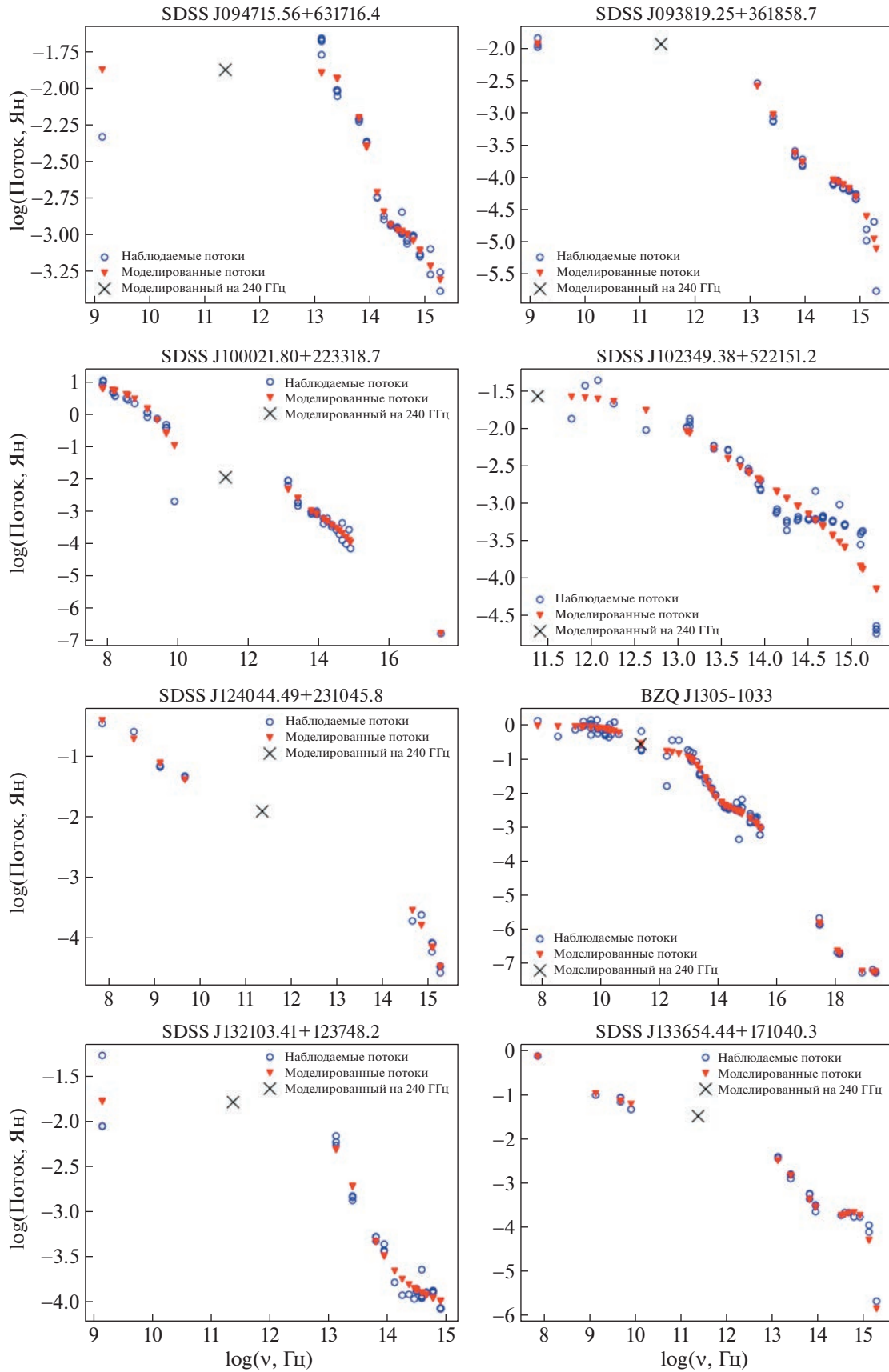


Рис. 2. Моделированные спектры источников из табл. 1. Часть 2.

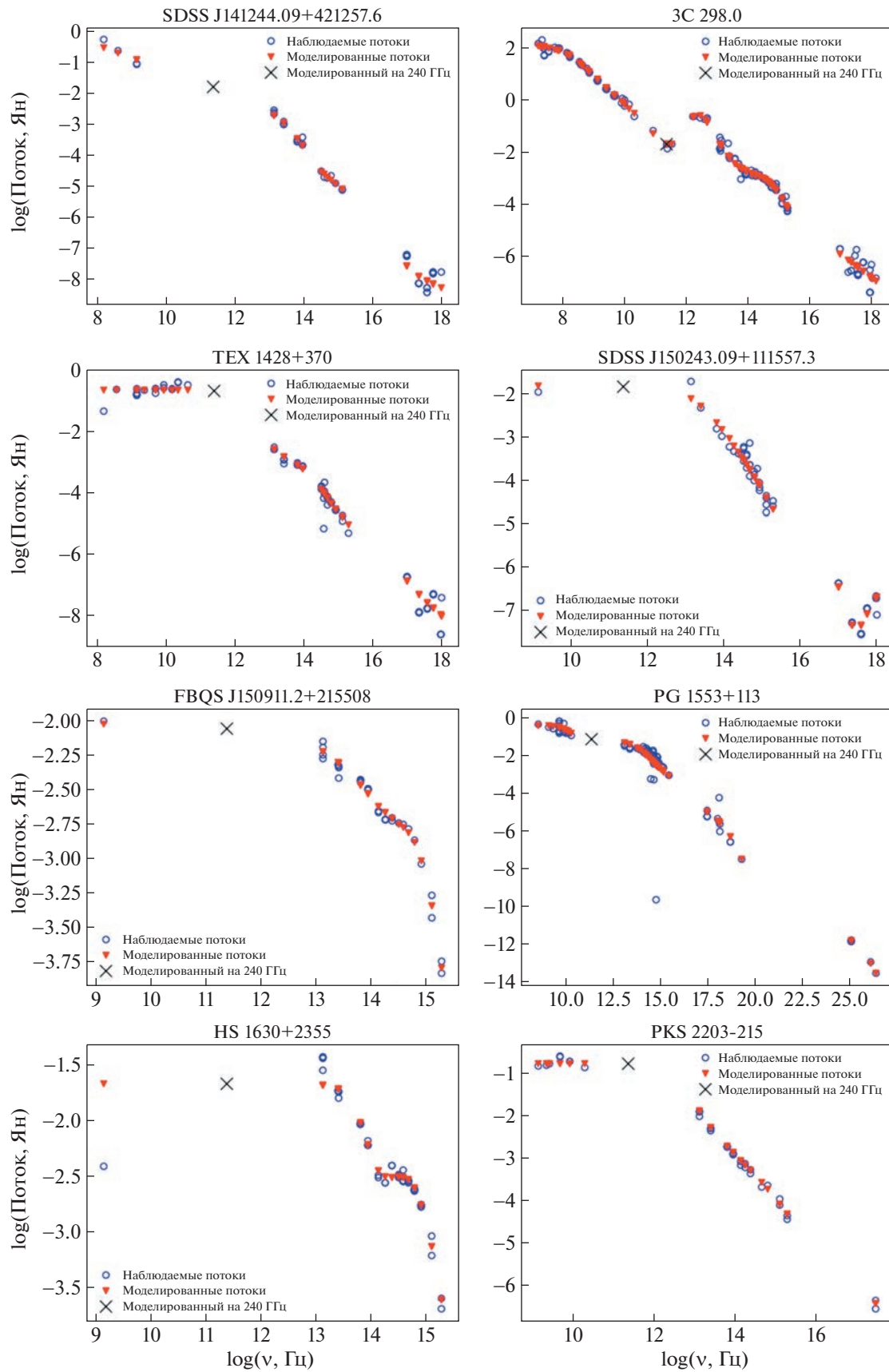


Рис. 3. Моделированные спектры источников из табл. 1. Часть 3.

Таблица 2. Кандидаты в двойные сверхмассивные черные дыры (ДСМЧД), удовлетворяющие критерию отбора

Объект	α	δ	F_{ANN} , Ян	θ , мкс	d , мкс
CSO 0402+379	04 ^h 05 ^m 09.3 ^s	+38°03′32.2″	0.043	0.068	6580
FBQS J081740.1+232731	08 17 40.2	+23 27 32.0	0.027	0.220	1.375
BZQ J0842+4525	08 42 15.3	+45 25 45.0	0.050	0.173	1.385
OJ 287	08 54 48.9	+20 06 30.6	2.72	1.935	11.96
MCG+11–11–032	08 55 12.5	+64 23 45.6	0.23	0.067	4.82
SBS 0924+606B	09 28 37.98	+60 25 21.0	0.019	0.087	9.69
SDSS J102349.38+522151.2	10 23 49.5	+52 21 51.8	0.027	0.237	1.717
SDSS J124044.49+231045.8	12 40 44.5	+23 10 46.1	0.014	0.058	1.072
BZQ J1305–1033	13 05 33.0	–10 33 19.1	0.37	0.035	1.794
SDSS J132103.41+123748.2	13 21 03.4	+12 37 48.1	0.016	0.055	1.0935
SDSS J133654.44+171040.3	13 36 54.4	+17 10 40.8	0.032	0.101	0.935
3C 298.0	14 19 08.2	+06 28 35.1	0.022	0.213	1.498
TEX 1428+370	14 30 40.6	+36 49 03.9	0.14	0.025	0.319
SDSS J150243.09+111557.3	15 02 43.1	+11 15 57.3	0.014	0.01	25 500
FBQS J150911.2+215508	15 09 11.2	+21 55 08.8	0.0094	0.029	0.411
PG 1553+113	15 55 43.0	+11 11 24.4	0.06	0.01	0.73
PKS 2203–215	22 06 41.4	–21 19 40.5	0.17	0.059	0.602

рии Миллиметрон для координат отобранных источников, $C(u, v)$ — двумерный фурье-образ модели источника, $J_v(x)$ — функция Бесселя, F_{ANN}^4 — моделированное значение потока, R и r — параметры модели источника (более детальное рассмотрение модели источника может быть найдено в [28]). Далее проверялось, существует ли диапазон проекций баз, в котором величина усредненного потока выше, чем предел детектирования, который для частоты 240 ГГц составляет 6.45 мЯн. Зависимость усредненного потока для выбранных источников от значения проекции базы, выраженной в диаметрах Земли, приведены на рис. 4–6. На всех рисунках горизонтальная пунктирная линия соответствует уровню чувствительности телескопа.

В табл. 2 подведены итоги проведенного анализа. В ней представлены источники из табл. 1, для которых существует интервал проекций базы, на котором амплитуда функции видности выше порогового значения. В табл. 2 представлены название источника, его прямое восхождение α и склонение δ на эпоху J2000, полученный при моделировании поток F_{ANN} , выраженный в Ян, угловой размер тени более массивного компонента системы ДСМЧД θ (определенный так же, как в [26]), выраженный в микросекундах дуги, и угловое расстояние между компонентами двойной

системы d , также выраженное в микросекундах дуги.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

Мы проанализировали имеющийся список кандидатов в двойные сверхмассивные черные дыры. Список был составлен на основе имеющихся данных по переменности в оптическом диапазоне или виду спектра излучения. Для оценки потока излучения на частоте 240 ГГц нами была построена искусственная нейронная сеть. Для тех кандидатов в двойные сверхмассивные черные дыры, для которых процедура построения сети оказалась возможной, был проверен критерий возможности наблюдения источника на космической обсерватории Миллиметрон.

Результат проведенного исследования представлен в табл. 2. Он представляет собой список из 17 кандидатов в двойные сверхмассивные черные дыры, двойственность которых может быть подтверждена (или опровергнута) при наблюдениях на космическом интерферометре с орбитой и чувствительностью на частоте 240 ГГц, как у планируемой космической обсерватории Миллиметрон.

Список кандидатов может быть расширен при проведении дополнительных наблюдений или исследований, поскольку основной причиной того, что список кандидатов гораздо короче исходного числа кандидатов в ДСМЧД, является недостаток наблюдательных данных вблизи частоты

⁴ ANN (Artificial Neural Network) — искусственная нейронная сеть.

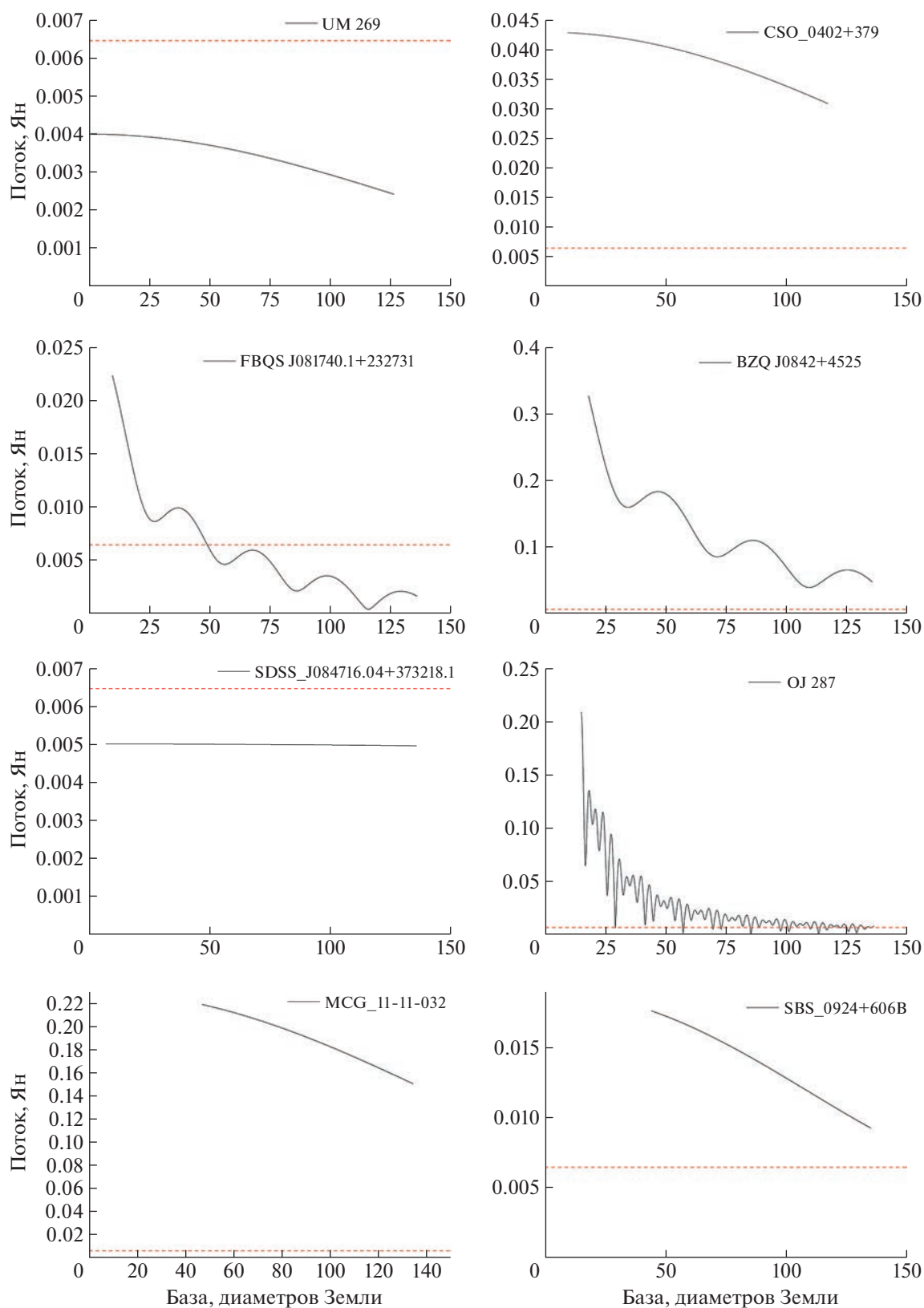


Рис. 4. Усредненная функция видности для допустимых значений проекций баз для источников из табл. 1 для орбиты космической обсерватории Миллиметрон. Часть 1.

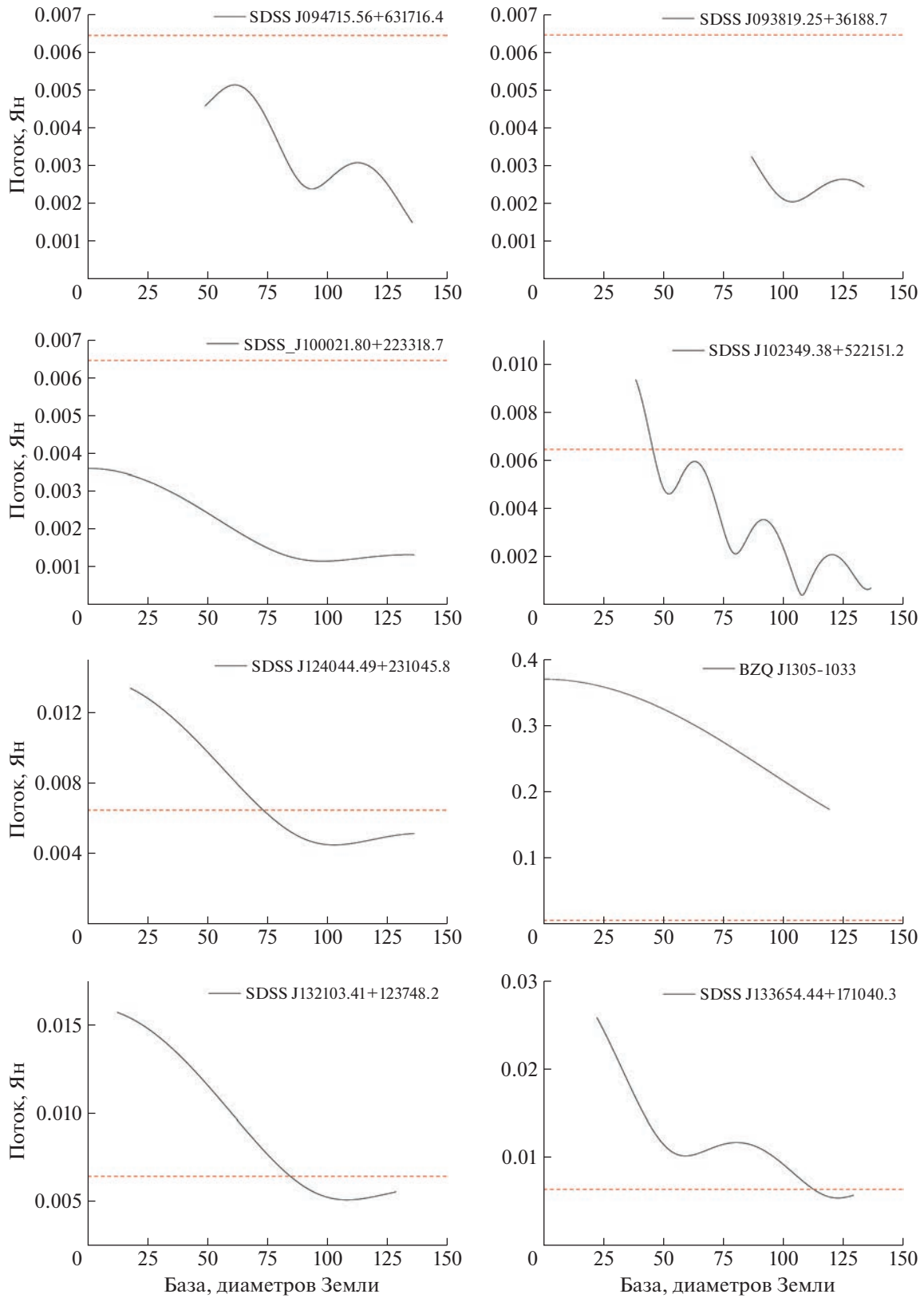


Рис. 5. Усредненная функция видности для допустимых значений проекций баз для источников из табл. 1 для орбиты космической обсерватории Миллиметрон. Часть 2.

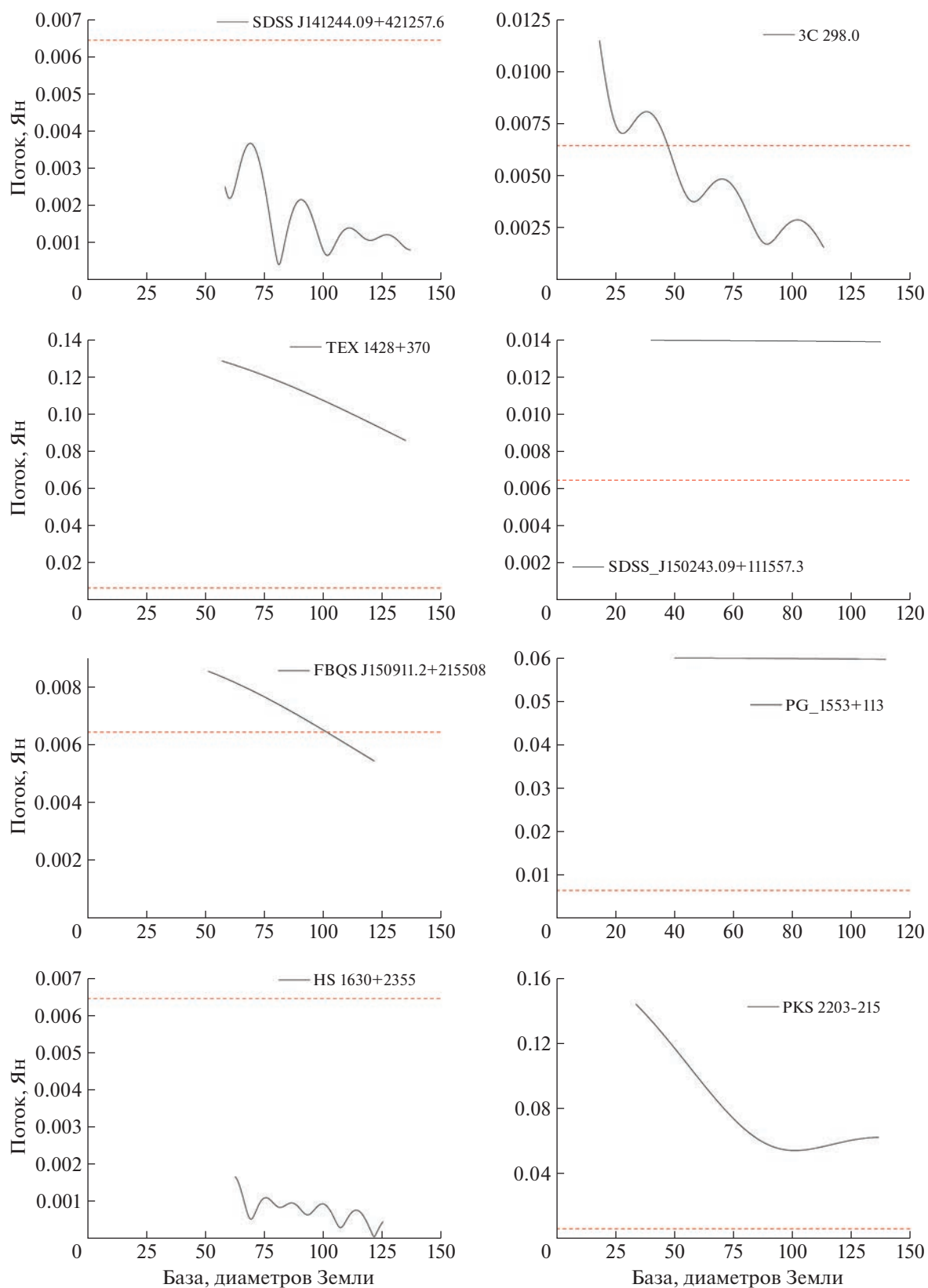


Рис. 6. Усредненная функция видности для допустимых значений проекций баз для источников из табл. 1 для орбиты космической обсерватории Миллиметрон. Часть 3.

240 ГГц (для которой проводилось моделирование), главным образом, в области меньших частот.

5. ОБСУЖДЕНИЕ

Поскольку ДСМЧД являются важным, но недостаточно изученным этапом эволюции СМЧД, их поиск и наблюдение очень актуальны. При этом большая часть существующих методов их поиска [19], нацеленных на выявление кандидатов в ДСМЧД, требует подтверждения, т.е. дополнительных исследований и непосредственных наблюдений на телескопах с высоким разрешением.

Как было упомянуто во Введении, вероятность того, что на месте СМЧД находится гравитационно связанная пара черных дыр, составляет $\sim 10^{-3}$. При анализе обзора CATALINA из четверти миллиона активных галактических ядер удалось отобрать чуть более ста кандидатов в ДСМЧД, что составляет $\sim 4 \times 10^{-4}$ и не противоречит теоретической оценке.

Растущий интерес к ДСМЧД связан также и с планируемыми космическими гравитационно-волновыми обсерваториями [40], создание которых в настоящее время широко обсуждается. Однако результатов в этом направлении можно ожидать только в отдаленном будущем. Таким образом, именно в радиоинтерферометрических наблюдениях могут быть открыты первые двойные сверхмассивные черные дыры. Это связано с тем, что кандидаты в ДСМЧД отбираются по свойствам, которые могут быть обусловлены не только двойственностью СМЧД, но и другими физическими причинами. В этом контексте становится особенно важным построить, насколько это возможно, полные каталоги для проведения интерферометрических наблюдений, в ходе которых двойственная природа может быть установлена однозначно.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны сотрудникам АКЦ ФИАН П.Б. Иванову за конструктивные замечания и А.Г. Рудницкому и М.А. Щурову за помощь в выполнении расчетов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. R. Abuter, A. Amorim, M. Bauböck, J. P. Berger, et al., *Astron. and Astrophys.* **636**, id. L5 (2020).
2. M. Ghez, S. Salim, N. N. Weinberg, J. R. Lu, et al., *Astrophys. J.* **689**, 1044 (2008).
3. K. Gültekin, D. O. Richstone, K. Gebhardt, T. R. Lauer, et al., *Astrophys. J.* **698**, 198 (2009).
4. R. P. Saglia, M. Opitsch, P. Erwin, J. Thomas, et al., *Astrophys. J.* **818**, id. 47 (2016).
5. R. C. E. van den Bosch, *Astrophys. J.* **831**, id. 134 (2016).
6. Y.-K. Huang, C. Hu, Y.-L. Zhao, Z.-X. Zhang, et al., *Astrophys. J.* **876**, id. 102 (2019).
7. K. Akiyama, A. Alberdi, W. Alef, K. Asada, et al., *Astrophys. J.* **875**, id. L4 (2019).
8. K. Akiyama, A. Alberdi, W. Alef, K. Asada, et al., *Astrophys. J.* **930**, id. 12 (2022).
9. R. Malbon, C. M. Baugh, C. S. Frenk and C. G. Lacey, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **382**, 1394 (2007).
10. J. Kormendy, R. Bender, J. Magorrian, S. Tremaine, et al., *Astrophys. J.* **482**, L139 (1997).
11. S. Tremaine, K. Gebhardt, R. Bender, G. Bower, et al., *Astrophys. J.* **574**, 740 (2002).
12. A. Lapi, S. Raimundo, R. Aversa, Z.-Y. Cai, et al., *Astrophys. J.* **783**, id. 69 (2014).
13. A. Pensabene, S. Carniani, M. Perna, G. Cresci, et al., *Astron. and Astrophys.* **637**, id. A84 (2020).
14. R. Tripodi, F. Lelli, C. Feruglio, F. Fiore, F. Fontanot, M. Bischetti, and R. Maiolino, arXiv:2301.07023 [astro-ph.GA] (2023).
15. M. Volonteri, *Astron. and Astrophys. Rev.* **18**, 279 (2010).
16. M. Volonteri, F. Haardt, and P. Madau, *Astrophys. J.* **582**, 559 (2003).
17. M. C. Begelman, R. D. Blandford, and M. J. Rees, *Nature* **287**, 307 (1980).
18. K. Rubinur, M. Das, and P. Kharb, *J. Astrophys. and Astron.* **39**, id. 8 (2018).
19. A. De Rosa, C. Vignali, T. Bogdanovic, P. R. Capelo, et al., *New Astron. Rev.* **86**, id. 101525 (2019).
20. R. Roskar, D. Fiacconi, L. Mayer, S. Kazantzidis, et al., *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **449**, 494 (2015).
21. M. Volonteri, M. Habouzit, and M. Colpi, *Nature Rev. Phys.* **3**, 732 (2021).
22. M. Volonteri, J. M. Miller, and M. Dotti, *Astrophys. J.* **703**, L86 (2009).
23. A. Sesana, C. Roedig, M. T. Reynolds, and M. Dotti, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **420**, 860 (2012).
24. L. Z. Kelley, Z. Haiman, A. Sesana, and L. Hernquist, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **485**, 1579 (2019).
25. J. H. Krolik, M. Volonteri, Y. Dubois, and J. Devriendt, *Astrophys. J.* **879**, id. 110 (2019).
26. Е. В. Михеева, В. Н. Лукаш, С. В. Репин, А. М. Малиновский, *Астрон. журн.* **96**(4), 339 (2019).
27. M. J. Valtonen, H. J. Lehto, K. Nilsson, J. Heidt, et al., *Nature* **452**, 851 (2008).
28. П. Б. Иванов, Е. В. Михеева, В. Н. Лукаш, А. М. Малиновский, С. В. Чернов, А. С. Андрианов, В. И. Костенко, С. Ф. Лихачев, *Успехи физ. наук* **189**, 449 (2019).
29. M. J. Graham, S. G. Djorgovski, D. Stern, A. J. Drake, et al., *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **453**, 1562 (2015).
30. M. Charisi, I. Bartos, Z. Haiman, A. M. Price-Whelan, et al., *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **463**, 2145 (2016).
31. H. L. Maness, G. B. Taylor, R. T. Zavala, A. B. Peck, et al., *Astrophys. J.* **602**, 123 (2004).
32. C. Rodriguez, G. B. Taylor, R. T. Zavala, A. B. Peck, et al., *Astrophys. J.* **646**, 49 (2006).

33. *X. Liu, Y. Shen, F. Bian, A. Loeb, et al.*, *Astrophys. J.* **789**, id. 140 (2014).
34. *H. Guo, X. Liu, Y. Shen, A. Loeb, et al.*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **482**, 3288 (2019).
35. *R. Decarli, M. Dotti, C. Montuori, T. Liimets, et al.*, *Astrophys. J.* **720**, L93 (2010).
36. *M. Eracleous, T. A. Boroson, J. P. Halpern, and J. Liu*, *Astrophys. J. Suppl.* **201**, id. 23 (2012).
37. *R. P. Deane, Z. Paragi, M. J. Jarvis, M. Coriat, et al.*, *Nature* **511**, 57 (2014).
38. *A. Cavaliere, M. Tavani, and V. Vittorini*, *Astrophys. J.* **836**, id. 220 (2017).
39. *M. Abadi, A. Agarwal, P. Barham, E. Brevdo, et al.*, arXiv:1603.04467 [cs.DC] (2015).
40. *C. Caprini and D. G. Figueroa*, *Classical and Quantum Gravity* **35**, id. 163001 (2018).

PROSPECTS FOR OBSERVING BINARY SUPERMASSIVE BLACK HOLES WITH THE SPACE RADIOINTERFEROMETER

A. M. Malinovsky^a and E. V. Mikheeva^a

^a *Astrospace Center of the P.N. Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

A list of candidates for binary supermassive black holes, compiled from available data on optical band variability and emission spectrum shape, has been analysed. An artificial neural network has been constructed to estimate the radiation fluxes at the frequency 240 GHz. For those candidates of binary supermassive black holes for which the network building procedure proved possible, the criterion of possibility to observe the source at the Millimetron Space Observatory was tested. The result of this study is presented as a table of 17 candidates for binary supermassive black holes. Confirmation (or refutation) of the binarity of these objects by means of observational data committed on a space interferometer with parameters similar to those of the Millimetron Space Observatory will be an important milestone in the development of the theory of galaxy formation.

Keywords: supermassive black holes