

УДК 524.7-76/77; 524.7-52; 524.883

## ПАРАМЕТРЫ ПЕРЕМЕННОСТИ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ И ШИРОКОДИАПАЗОННЫХ СПЕКТРОВ ИНФРАКРАСНЫХ ГАЛАКТИК С ИСТОЧНИКАМИ ГИДРОКСИЛЬНОГО МЕГАМАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И БЕЗ НИХ

© 2022 Ю. В. Сотникова<sup>1\*</sup>, Т. В. Муфзахаров<sup>1,2,3</sup>,  
А. Г. Михайлов<sup>1</sup>, В. А. Столяров<sup>1,2,4</sup>, Ч. Ц. Ву<sup>5</sup>, М. Г. Мингалиев<sup>1,2</sup>,  
Т. А. Семенова<sup>1</sup>, А. К. Эркенов<sup>1</sup>, Н. Н. Бурсов<sup>1</sup>, Р. Ю. Удовицкий<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

<sup>2</sup> Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, 420008 Россия

<sup>3</sup> Шанхайская астрономическая обсерватория Китайской академии наук, Шанхай 200030, Китай

<sup>4</sup> Кембриджский университет, Кембридж, СВ3 0HE, Великобритания

<sup>5</sup> Колледж физики, Университет Гуйчжоу, 550025 Гуйян, Китай

Поступила в редакцию 31 мая 2022 года; после доработки 8 июля 2022 года; принята к публикации 11 июля 2022 года

В работе исследуется переменность радиоизлучения инфракрасных галактик с источниками гидроксильного мегамазерного излучения (ОНМ) и без них (контрольная выборка). Предположительно, излучение в радиоконтинууме существенным образом влияет на яркость мегамазерного излучения, поэтому такая характеристика, как переменность радиоизлучения, является важной для определения параметров подобных галактик. С использованием результатов одновременных измерений, выполненных на радиотелескопе РАТАН-600 на частотах 2.3, 4.7, 8.2 и 11.2 ГГц в 2019–2022 гг., и данных, взятых из литературных источников, переменность галактик оценена на шкале времени до 34 лет. Медианные значения индекса переменности на 4.7 ГГц для выборки 48 ОНМ-галактик находятся в интервале 0.08–0.17, а для контрольной выборки 30 галактик — 0.08–0.28. Для отдельных галактик в обеих выборках переменность спектральной плотности потока достигает значений 0.30–0.50. Такие галактики, как правило, ассоциируются с АЯГ, либо в них присутствует область активного звездообразования. Переменность радиоизлучения галактик с ОНМ-излучением и без него сопоставима по порядку величины и носит умеренный характер на длительных масштабах времени. В результате оценки параметров спектрального распределения энергии в широком диапазоне частот (от МГц до ТГц) определен спектральный индекс (на частотах до 50 ГГц) и цветовая температура излучения пылевых компонент для ОНМ-галактик и галактик контрольной выборки. На уровне  $\rho < 0.05$  не обнаружено статистически значимых различий в распределении этих параметров, равно как и статистически значимых корреляций между цветовой температурой пыли и индексом переменности и светимостью в линии ОН.

Ключевые слова: галактики: активные — квазары: общие сведения — галактики: звездообразование — галактики: инфракрасное излучение — радиоизлучение континуум: галактики

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Галактики с гидроксильным мегамазерным излучением — это источники, в которых наблюдается усиление спектральных линий, соответствующих переходам между подуровнями сверхтонкой структуры в молекуле гидроксила (ОН) на частотах 1665 и 1667 МГц (Ваан et al. 1992). Галактики классифицируются как мегамазеры (ОН megamaser galaxies — ОНМ) в случае  $L_{\text{ОН}} > 10 L_{\odot}$  (Zhang

et al. 2014). Почти все известные мегамазеры расположены в ультраярких и ярких инфракрасных галактиках (ULIRGs — UltraLuminous Infrared Galaxies) со светимостью в далеком инфракрасном диапазоне  $L_{\text{FIR}}$ , превышающей  $10^{11} L_{\odot}$ . Их излучение, предположительно, образуется вследствие сильных приливных взаимодействий при слиянии галактик, богатых молекулярным газом (Clements et al. 1996). Существует мнение, что ОН-излучение свойственно эволюционной стадии образования

\*E-mail: lacerta999@gmail.com

квazarов и массивных эллиптических галактик (Naan et al. 2011).

Доминирующим источником энергии в центральных областях ОНМ является активное звездообразование, излучение аккрецирующей сверхмассивной черной дыры в активном ядре галактики (АЯГ) или вклад этих двух процессов (Vardoulaki et al. 2015). Одно из условий возникновения мазерного излучения в галактиках — наличие затравочного излучения в радиодиапазоне. Измерения параметров радиоспектров и переменности спектральной плотности потока как можно большего числа ОНМ-галактик позволят определить радиосвойства этого класса объектов и их возможное статистическое отличие от свойств инфракрасных галактик без источников ОНМ-излучения. На сегодняшний день существует незначительное число систематических измерений таких галактик в радиоконтинууме из-за низких значений спектральных плотностей потоков (единицы и десятки мЯн) (Kandalyan 2005a; b).

В 2019–2022 гг. на радиотелескопе РАТАН-600 был проведен один из крупнейших пилотных обзоров выборки 74 ОНМ-галактик на частотах 1.2–22.3 ГГц (Sotnikova et al. 2022). Целью указанной работы было определение параметров выборки ОНМ-галактик в радиодиапазоне и сравнение их с аналогичными параметрами, рассчитанными для контрольной выборки 128 инфракрасных галактик без мегамазерного излучения (Zhang et al. 2014). В результате были получены статистические отличия радиосвойств галактик в обеих выборках. Были найдены значимые корреляции между светимостями в линии ОН и радиоконтинууме  $L_{\text{ОН}} - P_{1.4}$ , между светимостью в линии ОН и спектральным индексом  $L_{\text{ОН}} - \alpha_{4.7}$ , между светимостями в далеком инфракрасном диапазоне и в радиоконтинууме  $L_{\text{FIR}} - P_{1.4}$ . Несмотря на то, что в обеих выборках преобладали объекты с крутыми радиоспектрами: 53% — для ОНМ и 61% — для контрольной, было обнаружено, что в первой выборке галактики с плоскими спектрами встречаются почти в два раза чаще (32%), чем во второй (17%). Очевидно, что на полученные свойства исследуемой и контрольной выборки повлияла значительная доля в них АЯГ (47% и 30% соответственно).

Результаты, которые были получены в работе Sotnikova et al. (2022), могут свидетельствовать о существенном влиянии излучения в радиоконтинууме на яркость мегамазерного излучения. Целью настоящей работы являются оценка и анализ переменности нетеплового радиоизлучения ярких инфракрасных галактик обеих выборок. Переменность радиоизлучения оценивалась по многочастотным измерениям, выполненным на радиоте-

лескопе РАТАН-600 в 2019–2022 гг., и с привлечением данных из литературных источников. Для отдельных объектов проанализированы кривые блеска на временных масштабах до 34 лет.

Мы отобрали объекты с измерениями на высоких частотах (ТГц) для оценки вклада синхротронной и пылевой компонент в континуальные радиоспектры галактик. Был определен спектральный индекс низкочастотной компоненты и сделаны оценки цветовой температуры пыли, а также оценена корреляция цветовой температуры пыли с некоторыми характерными параметрами излучения мегамазеров.

## 2. ВЫБОРКА И НАБЛЮДЕНИЯ

В качестве целевой и контрольной выборок взяты выборки из работы Zhang et al. (2014). Они состоят из 74 ОНМ-галактик и 128 галактик без мегамазерного излучения с плотностью потока более 5 мЯн на частоте 1.4 ГГц. Список ОНМ-галактик являлся наиболее полным на момент исследования Zhang et al. (2014). Авторы также сформировали контрольную выборку, включающую все галактики без детектированного мегамазерного излучения из обзора Аресибо (Darling and Giovanelli 2002).

Наблюдения проведены на радиотелескопе РАТАН-600 на частотах 22.3, 11.2, 8.2, 4.7, 2.3 и 1.2 ГГц в 2019–2022 гг. Результаты измерений 2019–2021 гг. и радиосвойства галактик опубликованы в работе Sotnikova et al. (2022). На РАТАН-600 удалось детектировать 63 ОНМ и 35 галактик контрольной выборки, при этом отмечен низкий уровень детектирования (4–75% на разных радиочастотах).

## 3. ПЕРЕМЕННОСТЬ

Для оценки переменности галактик использованы результаты измерений, выполненных на РАТАН-600 в 2019–2022 гг., и данные, взятые из баз CATS<sup>1</sup> (Verkhodanov et al. 2005; 1997), NED<sup>2</sup> и Vizier<sup>3</sup>, полученные на частотах РАТАН-600 с шириной полосы 20%. Для 61 ОНМ-галактики и 56 галактик контрольной выборки имеются литературные измерения в радиоконтинууме хотя бы на одну эпоху наблюдений и на частотах, близких к частотам РАТАН-600.

Для количественной оценки переменности рассчитывался индекс переменности  $V_S$  (Aller et al. 1992):

$$V_S = \frac{(S_{\text{max}} - \sigma_{S_{\text{max}}}) - (S_{\text{min}} + \sigma_{S_{\text{min}}})}{(S_{\text{max}} - \sigma_{S_{\text{max}}}) + (S_{\text{min}} + \sigma_{S_{\text{min}}})}, \quad (1)$$

<sup>1</sup><https://www.sao.ru/cats>

<sup>2</sup><https://ned.ipac.caltech.edu/>

<sup>3</sup><https://vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR>

где  $S_{\max}$  и  $S_{\min}$  — максимальное и минимальное значения измеренной спектральной плотности потока за весь период наблюдений,  $\sigma_{S_{\max}}$  и  $\sigma_{S_{\min}}$  — ошибки их измерения. Такой подход позволяет частично исключить влияние ошибок измерений плотностей потоков, приводящее к переоцененным значениям индекса переменности. Отрицательное значение  $V_S$  соответствует случаю, когда ошибки измеряемых величин больше их разброса, что не позволяет оценить переменность объекта. Индекс переменности может быть выражен в процентах, а его погрешность мы оценивали по формуле:

$$\Delta V_S = \frac{2S_{\min}(\sigma_{S_{\min}} + \sigma_{S_{\max}})}{(S_{\min} + S_{\max})^2}. \quad (2)$$

Вторым критерием переменности является ве-

личина модуляционного индекса, определяемого как стандартное отклонение спектральной плотности потока, деленное на его среднее значение (Kraus et al. 2003):

$$M = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i)^2}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i}, \quad (3)$$

где  $S_i$  —  $i$ -е значение спектральной плотности потока,  $N$  — количество измерений.

Результаты расчетов параметров переменности на частотах 2.3, 4.7 и 8.2 ГГц для галактик обеих выборок представлены в таблицах 1 и 2.

**Таблица 1.** Индексы переменности  $V_S$  и модуляционные индексы  $M$  на частотах 2.3, 4.7 и 8.2 ГГц для выборки мегазверов (в круглых скобках указаны ошибки измерений).  $N$  — число измерений

NVSS name	$N_{2.3}$	$M_{2.3}$	$V_{S_{2.3}}$	$N_{4.7}$	$M_{4.7}$	$V_{S_{4.7}}$	$N_{8.2}$	$M_{8.2}$	$V_{S_{8.2}}$
000820+403755	0	—	—	2	0.08	-0.17 (0.25)	0	—	—
004733-251717	15	0.20	0.34 (0.02)	27	0.24	0.29 (0.03)	10	0.29	0.35 (0.05)
005334+124133	1	—	—	2	0.21	-0.13 (0.43)	0	—	—
014430+170607	0	—	—	14	0.28	0.31 (0.07)	5	0.19	0.03 (0.17)
015913-292435	0	—	—	12	0.14	0.12 (0.07)	4	0.05	-0.13 (0.18)
024240-000047	27	0.05	0.06 (0.05)	30	0.08	0.15 (0.03)	16	0.23	0.29 (0.07)
025134+431514	16	0.16	0.16 (0.11)	53	0.21	0.45 (0.02)	22	0.17	0.33 (0.02)
030830+204620	0	—	—	2	0.14	-0.05 (0.19)	0	—	—
032824-141207	0	—	—	2	0	0	0	—	—
033336-360826	7	0.24	0.31 (0.31)	4	0.17	0.19 (0.03)	2	0.38	0.18 (0.27)
035441+003704	0	—	—	2	0.20	0	1	—	—
051209-242156	0	—	—	11	0.35	0.35 (0.08)	1	—	—
052101-252145	0	—	—	3	0.46	0.33 (0.27)	2	0.47	-0.33 (0.55)
054548+584203	0	—	—	5	0.13	0.11 (0.06)	0	—	—
062222-364743	0	—	—	11	0.37	0.33 (0.08)	1	—	—
065145+220427	0	—	—	4	0.24	0.05 (0.21)	1	—	—
080947+050108	0	—	—	5	0.23	0.20 (0.07)	1	—	—
090634+045125	0	—	—	2	0.11	-0.11 (0.22)	0	—	—
093551+612112	0	—	—	17	0.18	0.20 (0.12)	4	0.10	—
100605-335317	0	—	—	4	0.18	-0.05 (0.26)	2	0	0
110353+405059	0	—	—	3	0.22	0.17 (0.06)	3	0.18	0.08 (0.13)
112832+583343	1	—	—	21	0.29	0.42 (0.02)	4	0.46	—
115311-390748	0	—	—	12	0.10	0.06 (0.09)	2	0.09	-0.20 (0.25)
121345+024840	0	—	—	3	0.08	-0.13 (0.22)	4	0.26	0.18 (0.17)
122654-005238	1	—	—	5	0.06	-0.07 (0.16)	4	0.09	-0.06 (0.18)
125614+565222	0	—	—	23	0.32	0.16 (0.06)	6	0.15	—
131226-154751	0	—	—	2	0.02	-0.13 (0.15)	1	—	—
131503+243707	1	—	—	2	0.02	-0.14 (0.16)	3	0.10	-0.09 (0.20)
134442+555313	0	—	—	18	0.26	0.39 (0.04)	3	0.08	—

Таблица 1. (Продолжение)

NVSS name	$N_{2.3}$	$M_{2.3}$	$V_{S_{2.3}}$	$N_{4.7}$	$M_{4.7}$	$V_{S_{4.7}}$	$N_{8.2}$	$M_{8.2}$	$V_{S_{8.2}}$
134733+121724	35	0.08	0.17 (0.02)	65	0.09	0.19 (0.01)	32	0.08	0.14 (0.04)
140649+061035	0	—	—	3	0.20	-0.08 (0.31)	0	—	—
150102+142001	0	—	—	3	0.09	-0.11 (0.22)	0	—	—
150916-111925	0	—	—	3	0.58	0.49 (0.06)	0	—	—
151313+071331	4	0.08	-0.15 (0.22)	17	0.14	0.13 (0.12)	6	0.08	-0.10 (0.19)
152659+355839	0	—	—	4	0.09	-0.08 (0.21)	4	0.18	0
153457+233011	8	0.19	0.10 (0.06)	19	0.06	0.06 (0.04)	12	0.04	-0.04 (0.07)
161140-014707	0	—	—	3	0.12	-0.05 (0.19)	2	0.08	-0.17 (0.25)
163221+155146	0	—	—	2	0.09	-0.09 (0.18)	0	—	—
164240-094315	0	—	—	12	0.19	0.14 (0.11)	3	0.13	-0.11 (0.20)
172321-001702	2	0.02	-0.12 (0.13)	13	0.12	0.09 (0.08)	5	0.41	-0.05 (0.11)
175429+325312	1	—	—	13	0.23	0.15 (0.23)	2	0.18	-0.05 (0.24)
205125+185804	0	—	—	3	0.10	-0.13 (0.25)	1	—	—
220436+421940	0	—	—	2	0.07	-0.13 (0.20)	2	0.07	-0.14 (0.21)
225149-175225	0	—	—	0	—	—	2	0.03	0.03 (0.01)
230735+041559	0	—	—	2	0.05	-0.16 (0.21)	0	—	—
231600+253324	1	—	—	5	0.08	-0.10 (0.21)	5	0.15	0.06 (0.20)
233511+293000	0	—	—	2	0.11	-0.11 (0.22)	0	—	—
233901+362109	2	0.04	-0.23 (0.27)	4	0.11	-0.05 (0.19)	4	0.15	0

Таблица 2. Индексы переменности  $V_S$  и модуляционные индексы  $M$  для контрольной выборки на частотах 2.3, 4.7 и 8.2 ГГц с ошибками измерений (указаны в круглых скобках).  $N$  — число измерений

NVSS name	$N_{2.3}$	$M_{2.3}$	$V_{S_{2.3}}$	$N_{4.7}$	$M_{4.7}$	$V_{S_{4.7}}$	$N_{8.2}$	$M_{8.2}$	$V_{S_{8.2}}$
002651+340122	0	—	—	3	0.07	-0.17 (0.25)	1	—	—
013741+330935	710	0.09	0.24 (0.01)	126	0.04	0.18 (0.01)	552	0.07	0.28 (0.05)
015328+260939	0	—	—	4	0.08	-0.10 (0.21)	1	—	—
015950+002338	0	—	—	4	0.05	-0.18 (0.24)	1	—	—
021008+235049	0	—	—	2	0.08	-0.23 (0.31)	0	—	—
041634+122457	0	—	—	3	0.31	0.08 (0.31)	1	—	—
063956+280956	0	—	—	2	0.29	0.08 (0.23)	1	—	—
072128+040146	0	—	—	3	0.04	-0.18 (0.23)	0	—	—
081755+312827	0	—	—	18	0.13	0.07 (0.10)	6	0.37	0.23 (0.09)
085448+200630	1573	0.32	0.68 (0.02)	776	0.37	0.81 (0.03)	2830	0.44	0.82 (0.02)
094521+173753	0	—	—	2	0.04	-0.19 (0.22)	1	—	—
111438+324133	2	0	0	8	0.06	-0.09 (0.17)	2	0.09	-0.12 (0.21)
115314+131427	0	—	—	3	0.44	0.25 (0.25)	1	—	—
121320+314053	0	—	—	5	0.26	0.24 (0.12)	3	0.09	-0.15 (0.27)
122906+020308	109	0.08	0.22 (0.02)	739	0.12	0.48 (0.07)	1424	0.19	0.57 (0.01)
131653+234047	0	—	—	2	0.22	0	2	0.29	0
133718+242302	0	—	—	3	0.09	-0.11 (0.22)	0	—	—
135646+102609	0	—	—	5	0.30	0.17 (0.22)	2	0.08	-0.17 (0.25)
142056-000429	0	—	—	2	0.22	0	1	—	—
161413+260415	0	—	—	5	0.19	0	1	—	—

Таблица 2. (Продолжение)

NVSS name	$N_{2.3}$	$M_{2.3}$	$V_{S_{2.3}}$	$N_{4.7}$	$M_{4.7}$	$V_{S_{4.7}}$	$N_{8.2}$	$M_{8.2}$	$V_{S_{8.2}}$
175105+265903	1	—	—	8	0.10	0.07 (0.06)	3	0.20	-0.03 (0.26)
181700+155449	1	—	—	2	0.07	-0.14 (0.21)	1	—	—
183336+225201	0	—	—	3	0.14	-0.09 (0.27)	0	—	—
204817+193655	1	—	—	3	0.17	0	1	—	—
214633+354835	0	—	—	2	0.27	0.09 (0.18)	1	—	—
224509+323128	0	—	—	2	0.09	-0.09 (0.18)	1	—	—
231354+033055	0	—	—	2	0.10	-0.10 (0.19)	1	—	—
231635+040518	23	0.06	0.08 (0.07)	4	0.09	0.23 (0.01)	4	0.05	-0.02 (0.09)
232549+283421	1	—	—	4	0.08	-0.13 (0.22)	4	0.14	-0.05 (0.26)
235630+233849	0	—	—	2	0.13	-0.13 (0.25)	1	—	—

Для 48 ОНМ-галактик и 30 галактик контрольной выборки имеются минимум два измерения хотя бы на одной из частот. Статистические данные для индексов переменности этих объектов приведены в таблице 3. При расчете средних и медианных значений  $V_S$  использовались только положительные значения индексов. В среднем, если взять частоту 4.7 ГГц, на которой представлено наибольшее число источников с доступными измерениями, получена переменность 15–20% для выборки мегамазеров и 10–15% для контрольной выборки галактик. При рассмотрении галактик, отождествленных с АЯГ в обеих выборках, очевидно, что их переменность выше, но она также лежит в пределах 15–20% для галактик с мегамазерным излучением, а для немногочисленных галактик контрольной выборки разброс значений немного шире и составляет 12–22% для индекса переменности (таблица 3).

Самым переменным источником контрольной выборки является J0854+2006, классифицированный в работе Abdo et al. (2010) как блазар. Индексы переменности этого объекта составляют  $V_{S_{2.3}} = 0.86 (0.02)$ ,  $V_{S_{4.7}} = 0.81 (0.03)$ ,  $V_{S_{8.2}} = 0.82 (0.02)$ , при этом у него же доступно самое большое число измерений среди всех источников выборки ( $N = 776-2830$ ).

Самыми переменными галактиками из выборки ОНМ являются отождествленная с АЯГ (Askermann et al. 2011) NGC 253 (J0047-2517 с  $V_{S_{2.3}} = 0.34 (0.04)$ ,  $V_{S_{8.2}} = 0.35 (0.05)$ ) и классифицированная как галактика типа Sy II (Véron-Cetty and Véron 2006) IRAS 15065-1107 (J1509-1119 с  $V_{S_{4.7}} = 0.49 (0.06)$ ).

Гистограммы распределений индексов переменности на частоте 4.7 ГГц для ОНМ-галактик и галактик контрольной выборки показаны на рис. 1 и рис. 2.

Статистически значимых (по уровню значимости  $p\text{-value} < 0.05$ ) корреляций между индексами

переменности и модуляционными индексами на частотах 4.7 и 8.2 ГГц и другими параметрами излучения, такими как светимость в линии гидроксила  $L_{OH}$ , светимость в далекой инфракрасной области  $L_{FIR}$ , спектральный индекс в FIR-диапазоне, радиогромкость,  $q$ -параметр (отношение плотностей потоков в далеком ИК- и радиодиапазонах), радиосветимость на 1.4 ГГц, не обнаружено для обеих выборок. Согласно тестам Колмогорова–Смирнова и критерию Манна–Уитни, распределения индексов переменности и модуляционных индексов на 4.7 и 8.2 ГГц в обеих выборках статистически не отличаются ( $\rho < 0.05$ ). Также индексы переменности и модуляционные индексы принадлежат одному распределению, согласно критерию Краскела–Уоллиса ( $\rho < 0.05$ ). Очевидно, для оценки связи между активностью ядра родительской галактики и мегамазерным излучением (или его переменностью) необходимы одновременные измерения. В настоящей работе анализируются единичные измерения интегральной плотности потока радиоизлучения, что не позволяет оценить возможную корреляцию таких событий.

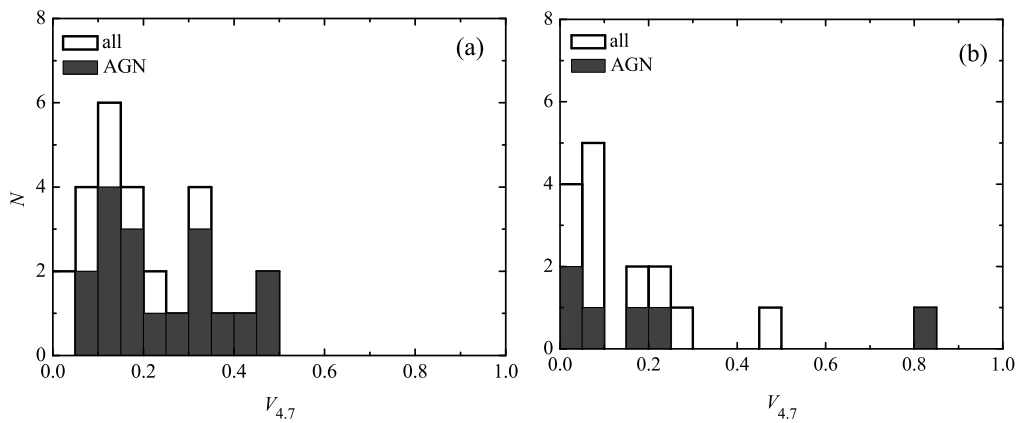
### 3.1. Кривые блеска

Для 14 ОНМ и одной галактики из контрольной выборки оценена переменность радиоизлучения на частоте вблизи 4.7 ГГц на временных масштабах от 2 до 34 лет и на частоте вблизи 11.2 ГГц на масштабах 1–9 лет с использованием литературных данных, представленных каталогами: GB6 (Gregory et al. 1996), 87GB (Gregory and Condon 1991), PMN (Griffith and Wright 1993), RGB (Laurent-Muehleisen et al. 1997), VLBIT (Taylor et al. 1996) и VLAC (Taylor Very Large Array Calibration Source List), JVAS (Wilkinson et al. 1998), AT20G (Murphy et al. 2010) и MGV<sup>4</sup>

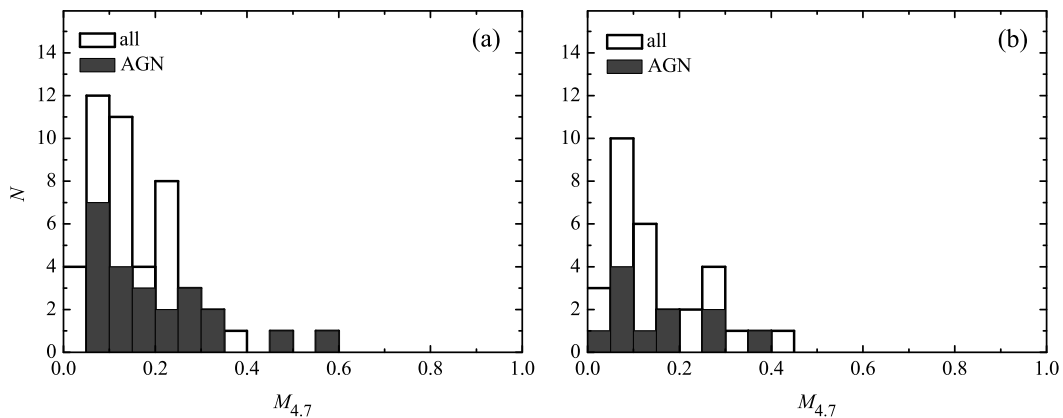
<sup>4</sup><https://www.sao.ru/cats/>

**Таблица 3.** Средние и медианные значения индексов переменности на частотах 2.3, 4.7 и 8.2 ГГц для ОНМ- и контрольной выборок галактик (в круглых скобках указано среднеквадратическое отклонение величин). В левой части таблицы представлены данные по всей выборке, в правой — для галактик, отождествленных с АЯГ

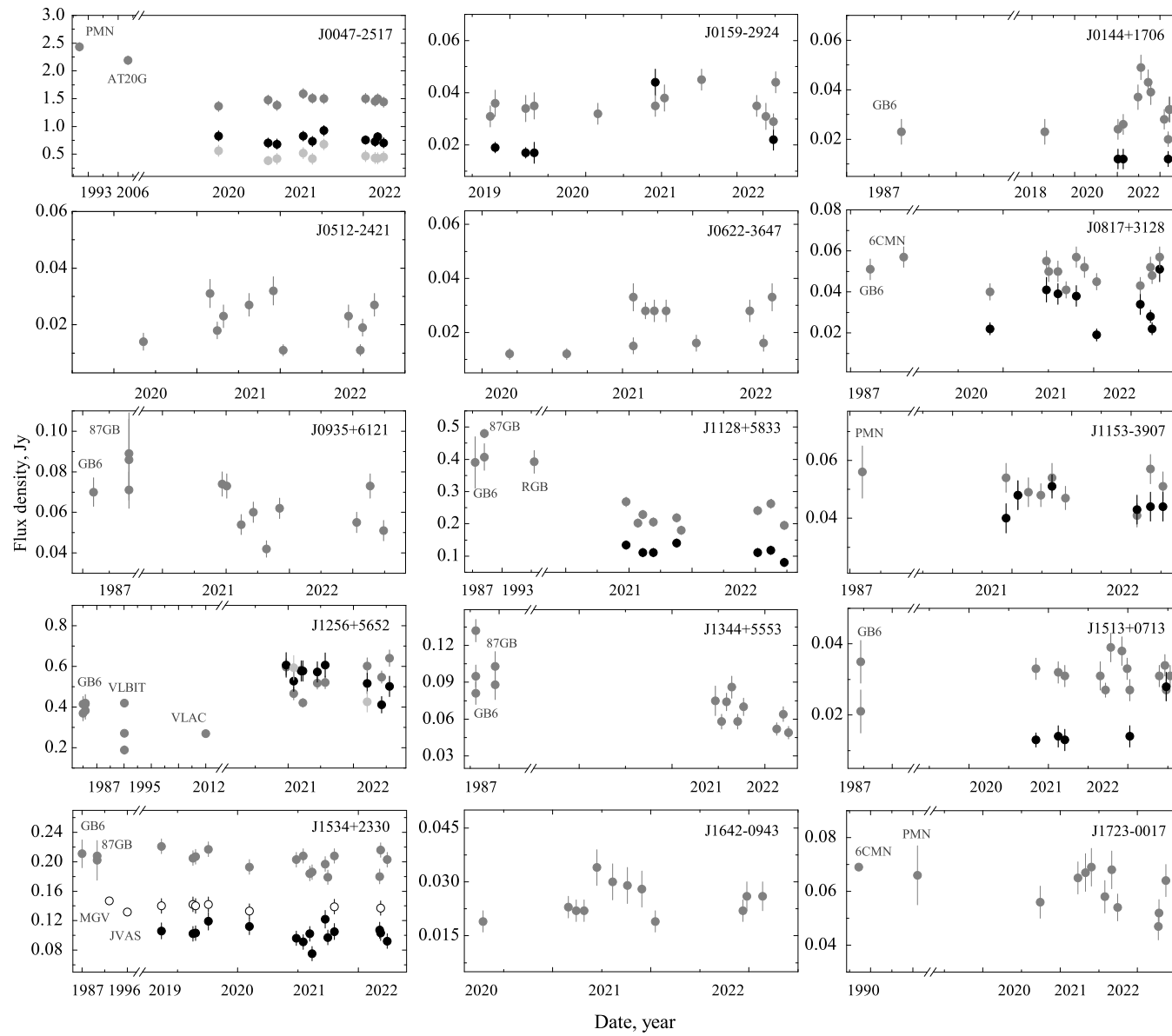
	N	Median	Mean	N	Median	Mean
ОНМ			ОНМ-AGN			
$M_{2.3}$	9	0.08	0.12 (0.08)	8	0.12	0.12 (0.08)
$V_{S_{2.3}}$	6	0.17	0.19 (0.11)	6	0.17	0.19 (0.11)
$M_{4.7}$	47	0.13	0.16 (0.12)	23	0.17	0.20 (0.13)
$V_{S_{4.7}}$	27	0.17	0.20 (0.14)	18	0.20	0.25 (0.13)
$M_{8.2}$	29	0.15	0.17 (0.13)	18	0.15	0.20 (0.14)
$V_{S_{8.2}}$	13	0.08	0.13 (0.13)	9	0.16	0.17 (0.14)
Control			Control-AGN			
$M_{2.3}$	5	0.08	0.11 (0.12)	2	0.16	0.16 (0.23)
$V_{S_{2.3}}$	5	0.22	0.24 (0.26)	2	0.34	0.34 (0.48)
$M_{4.7}$	30	0.11	0.15 (0.11)	11	0.13	0.16 (0.11)
$V_{S_{4.7}}$	16	0.08	0.17 (0.21)	6	0.12	0.22 (0.31)
$M_{8.2}$	11	0.14	0.18 (0.13)	6	0.12	0.20 (0.16)
$V_{S_{8.2}}$	5	0.28	0.38 (0.32)	2	0.53	0.53 (0.42)



**Рис. 1.** Распределение индекса переменности на частоте 4.7 ГГц для галактик-мегамазеров (а) и галактик контрольной выборки (б). АЯГ показаны темно-серым цветом.



**Рис. 2.** То же, что и на рис. 1, но для модуляционного индекса .



**Рис. 3.** Кривые блеска галактик на частотах 22.3 (светло-серые кружки), 11.2 (черные кружки), 8.2 (пустые кружки) и 4.7 ГГц (темно-серые кружки), полученные на РАТАН-600 в 2020–2022 гг. и взятые из основных обзоров.

**Таблица 4.** Индекс переменности  $V_S$  ряда исследованных галактик на частотах 4.7 и 11.2 ГГц, рассчитанный с использованием выполненных на РАТАН-600 измерений и данных из базы CATS

NVSS name	$t_{4.7}$ , yrs	$N_{4.7}$ , epochs	$V_{S_{4.7}}$	$t_{11.2}$ , yrs	$N_{11.2}$ , epochs	$V_{S_{11.2}}$	Type	Morphology	References
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
004733–251717	28	12	0.25 (0.02)	2	10	0.03 (0.004)	AGN	core+jet	[1], [2], [3]
014439+170608	29	12	0.31 (0.06)	—	—	—	AGN	diffused	[4]
015913–292435	3	12	0.12 (0.02)	—	—	—	AGN	—	[3]
051209–242156	2	11	0.35 (0.08)	—	—	—	AGN	—	[5]
062222–364742	2	11	0.33 (0.07)	—	—	—	—	—	[5], [6]
081755+312827	34	14	0.08 (0.01)	2	9	0.34 (0.07)	AGN	—	—
093551+612112	34	13	0.20 (0.05)	—	—	—	AGN	core	[3]
112832+583346	34	13	0.42 (0.02)	1	7	0.18 (0.03)	AGN	core+jet	[6], [7], [8]
115311–390748	28	10	0.07 (0.01)	1	9	0.02 (0.002)	—	—	—
125614+565223	34	18	0.49 (0.06)	1	9	0.10 (0.01)	AGN	core+double jet	[3]
134442+555313	34	14	0.39 (0.05)	—	—	—	AGN	multi-components	[9]
151313+071331	34	15	0.13 (0.04)	2	5	0.20 (0.05)	—	core	[3]
153457+233011	34	18	0.04 (0.003)	9	30	–0.04	AGN	core	[3]
164240–094315	2	12	0.14 (0.03)	—	—	—	AGN	resolved	[10]
172321–001702	32	12	0.09 (0.01)	2	4	0.31 (0.07)	AGN	diffused	[11]

[1] — Ulvestad and Antonucci (1991), [2] — Lenc and Tingay (2006), [3] — [http://astrogeo.org/vlbi\\_images/](http://astrogeo.org/vlbi_images/), [4] — Pihlström et al. (2001), [5] — Imanishi et al. (2019), [6] — Tarchi et al. (2011), [7] — Pérez-Torres et al. (2010), [8] — Romero-Cañizales et al. (2011), [9] — Bondi et al. (2005), [10] — EVN archive (<https://www.evlbi.org>), [11] — Momjian et al. (2006).

(Identifications of Radio Sources in the MG–VLA Survey). Полученные кривые блеска представлены на рис. 3.

Результаты расчетов индекса переменности  $V_S$  для 15 галактик приведены в таблице 4: в колонке (1) даны названия галактик, в колонках (2) и (5) — временной масштаб измерений  $t$  на частотах 4.7 и 11.2 ГГц, общее количество эпох измерений  $N$  на этих частотах — в колонках (3) и (6), индексы переменности с ошибкой измерения (в скобках) на указанных частотах представлены в колонках (4) и (7), классификация галактик, сведения об их радиоморфологии и соответствующие литературные ссылки указаны в колонках (8)–(10).

У восьми галактик из таблицы 4 индекс переменности вблизи частоты 4.7 ГГц достигает значений 0.20–0.49. Семь из них отождествлены с АЯГ, согласно Véron-Cetty and Véron (2006). Информация об угловой структуре имеется для нескольких объектов.

Для четырех ОНМ-галактик: J0159–2924, J0512–2421, J0622–3647 и J1642–0943 — переменность интегральной плотности потока оценена только на 4.7 ГГц по измерениям, полученным на РАТАН-600 в 2019–2022 гг. (соответствующие индексы составляют 0.12, 0.35, 0.33 и 0.14).

Индексы переменности галактик J0817+3128, J1153+3905, J1534+2330 и J1723–0017 посчитаны на длительном временном интервале с редким числом измерений и не превышают 0.04–0.09 на частоте 4.7 ГГц.

Галактика J1513+0713 с морфологией типа «core» оказалась малопеременной —  $V_{4.7} = 0.13$  (15 неравномерных измерений за 34 года).

Один из самых ярких объектов из представленных в таблице 4, J0047–2517, согласно данным VLA (Lenc and Tingay 2006), имеет комплексную радиоморфологию с несколькими десятками компактных компонентов, которые могут быть отождествлены со сверхновыми, остатками сверхновых или с областями ионизированного водорода Н II (Ulvestad and Antonucci 1991). В одном из компактных объектов была обнаружена переменность спектральной плотности потока на 4.7 ГГц порядка 6.5% ( $\pm 2.5\%$ ) на временном интервале 18 месяцев в 1989–1990 гг. Центральная область галактики по измерениям VLBI на 2.3 ГГц имеет морфологию типа ядро+джет<sup>5</sup> (угловое разрешение порядка 5 mas). Мы оценили (рис. 3) переменность интегральной плотности потока галакти-

<sup>5</sup>[http://astrogeo.org/vlbi\\_images/](http://astrogeo.org/vlbi_images/)



ки  $V_{4.7} = 0.25 (0.02)$  на временной шкале 28 лет (12 наблюдательных эпох) и незначительную переменность  $V_{11.2} = 0.03 (0.004)$  на интервале два года (10 эпох).

Галактика Aгр 299 (J1128+5833) с активным ядром является одной из самых переменных в выборке с  $V_{4.7} = 0.42 (0.02)$  на масштабе 34 года (рис. 3) и с  $V_{11.2} = 0.18 (0.03)$  на масштабе двух лет. Измерения угловой структуры VLA в 1990–2006 г. (Romero-Cañizales et al. 2011) выявили переменное радиоизлучение от одного из компактных компонентов на частоте 8.4 ГГц с индексом переменности порядка 0.22 на масштабе времени более 10 лет.

Галактика J0144+1706 (III Zw 35) имеет аналогичную многокомпонентную угловую структуру. В 1986–1998 гг. в измерениях в радиоконтинууме на VLA и MERLIN (Chapman et al. 1990, Pihlström et al. 2001) на 18 см не было обнаружено изменения спектральной плотности потока. Мы обнаружили вариации радиоизлучения  $V_{4.7} = 0.31 (0.06)$  в период 1987–2022 гг.

Наибольшую переменность,  $V_{4.7} = 0.49 (0.06)$ , демонстрирует на 2.3 ГГц галактика J1256+5652 с разрешенным ядром и двусторонним джетом.

В нашей работе переменность индивидуальных галактик оценена по измерениям, сделанным с низкой скважностью, и, скорее всего, отражает ее нижний уровень. Переменность интегральной плотности потока ОНМ-галактик является результатом суммарного вклада от переменности активного ядра и компактных областей (остатков сверхновых или областей ионизированного водорода H II) — потенциальных источников мегамазерного излучения (Pihlström et al. 2001). РСДБ-измерения компактных компонентов в галактиках показывают, что вариации радиоизлучения в них могут достигать 0.20–0.30 на масштабах в несколько лет. Спектральная плотность потока таких областей может быть на порядок меньше интегральной спектральной плотности потока родительской галактики. Очевидно, что в случае измерений, выполненных на РАТАН-600, мы наблюдаем доминирующий вклад переменного радиоизлучения ядра.

#### 4. АППРОКСИМАЦИЯ СПЕКТРАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ ИЗЛУЧЕНИЯ ГАЛАКТИК

##### 4.1. Постановка задачи

Континуальное излучение галактик, содержащих гидроксильные мегамазеры, определяется несколькими механизмами, которые доминируют в определенных частотных диапазонах. На низких частотах (до 30–50 ГГц) основной вклад дают нетепловые механизмы, в частности синхротронное

излучение. Дополнительный вклад в этой области частот обеспечивает свободно-свободное (тормозное) излучение электронов в поле положительных ионов, которое является примером теплового механизма.

На более высоких частотах, выше 100 ГГц и до порядка 10 ТГц, основной вклад дает тепловое излучение различных фракций пыли. Ранее da Cunha et al. (2008) предложили использовать модель, включающую две пылевые компоненты. Одна из них имеет температуру в диапазоне 15–60 К и дает основной вклад в излучение в дальнем ИК-диапазоне, а другая, с температурой 130–250 К, вносит основной вклад в излучение в среднем ИК-диапазоне. Поскольку такая упрощенная модель позволяет получить хорошие приближения наблюдаемых спектральных распределений энергии излучения в ИК-диапазоне, мы решили использовать ее в нашем исследовании.

Наконец, на частотах среднего ИК-диапазона в спектральном распределении энергии наблюдаются сильные эмиссионные детали между 3.3 и 12.7  $\mu m$  (от 20 до 90 ТГц). Предполагается, что это излучение относится к молекулам полиароматических углеводородов (ПАУ, (Herbst and van Dishoeck 2009)), уровни которых возбуждаются при поглощении отдельных UV-фотонов межзвездного поля радиации, в которое погружены молекулы ПАУ (da Cunha et al. 2008).

Основной вклад в излучение галактики в радиоконтинууме и в инфракрасном диапазоне дают кардинально отличающиеся по местоположению части галактики, что позволяет независимо проводить поиск параметров нетеплового и теплового излучения. В случае наблюдений с широкой (по сравнению с угловыми размерами объекта) диаграммой направленности (ДН) можно говорить лишь об усредненных по ДН спектральном индексе и цветовой температуре пыли. При этом хороший результат показывают достаточно простые мультикомпонентные модели, в которых не учитываются эффекты переноса излучения.

В общем случае представляет интерес моделирование вклада всех этих компонент в полученные спектры объектов как с использованием результатов низкочастотных наблюдений на РАТАН-600, так и литературных данных из разных каталогов. Однако в данной работе моделирование было ограничено только синхротронной и свободно-свободной компонентами на частотах ниже 50 ГГц и излучением «холодной» и «теплой» фракций пыли на более высоких частотах до десятков ТГц. Для моделирования вклада молекул ПАУ, как правило, требуется большее количество измерений на частотах выше 10 ТГц (см., например, Willett et al. (2011)).

**Таблица 5.** Список каталогов и баз данных, использованных для построения спектров ОНМ-галактик в широком диапазоне частот от мегагерцового до ИК. Для перевода фотометрических звездных величин каталога AllWISE в единицы плотности потока была использована процедура из работы Cutri et al. (2012)

Каталог или база данных	Частотный диапазон, ГГц	URL	Ссылка
CATS	< 30	<a href="http://cats.sao.ru">http://cats.sao.ru</a>	[1], [2]
IRSA	> 30	<a href="https://irsa.ipac.caltech.edu/frontpage/">https://irsa.ipac.caltech.edu/frontpage/</a>	[3]
Planck PCCS2 LFI	30, 44, 70	<a href="http://pla.esac.esa.int/pla/#catalogues">http://pla.esac.esa.int/pla/#catalogues</a>	[4]
Planck PCCS2 HFI	100, 143, 217, 545, 857	<a href="http://pla.esac.esa.int/pla/#catalogues">http://pla.esac.esa.int/pla/#catalogues</a>	[4]
Herschel HPPSC	1874, 2998, 4283	<a href="https://www.cosmos.esa.int/web/herschel/pacs-point-source-catalogue">https://www.cosmos.esa.int/web/herschel/pacs-point-source-catalogue</a>	[5]
Herschel SPSC	600, 857, 1199	<a href="https://www.cosmos.esa.int/web/herschel/spire-point-source-catalogue">https://www.cosmos.esa.int/web/herschel/spire-point-source-catalogue</a>	[6]
Akari	16655, 33310	<a href="https://irsa.ipac.caltech.edu/Missions/akari.html">https://irsa.ipac.caltech.edu/Missions/akari.html</a>	[7]
AllWISE	13636, 25000, 65217, 88235	<a href="https://irsa.ipac.caltech.edu/data/download/wise-allwise/">https://irsa.ipac.caltech.edu/data/download/wise-allwise/</a>	[8], [9]

[1] — Verkhodanov et al. (1997), [2] — Verkhodanov et al. (2005), [3] — Berriman (2008), [4] — Ade et al. (2016), [5] — Marton et al. (2017), [6] — Schulz et al. (2017), [7] — Ishihara et al. (2010), [8] — Wright et al. (2010), [9] — Cutri et al. (2012).

На частотах ниже 50 ГГц суммарный вклад синхротронной и свободно-свободной компонент аппроксимировался степенной зависимостью

$$S_\nu = A\nu^\beta, \quad (4)$$

где  $S_\nu$  — плотность потока,  $\nu$  — частота,  $\beta$  — степенной индекс, в основном определяющийся вкладом синхротрона,  $A$  — коэффициент масштабирования.

Излучение пыли на частотах 100 ГГц–10 ТГц аппроксимировалось с помощью модели, где излучают две компоненты пыли, «холодная» с температурой до 40 К, и «теплая», с температурой до 200 К (Finkbeiner et al. 1999),

$$S_\nu = w_1 C\nu^\alpha B(\nu, T_1) + w_2 C\nu^\alpha B(\nu, T_2), \quad (5)$$

где  $\alpha$  — коэффициент излучательной способности пыли (emissivity),  $T_1$  и  $T_2$  — физическая температура двух компонент пыли в градусах Кельвина,  $B(\nu, T)$  — закон чернотельного излучения Планка,  $C$  — коэффициент масштабирования,  $w_1$  и  $w_2 = 1 - w_1$  — веса компонент, нормированные на единицу. Как правило, излучательная способность пыли варьируется в диапазоне  $\alpha = 1.5$ – $2.5$ , однако для уменьшения числа свободных параметров этот коэффициент был зафиксирован со значением  $\alpha = 2$ . Нужно отметить, что такой подход является очень упрощенным описанием модели излучения ансамбля пылевых частиц, имеющих непрерывное распределение температур в некотором диапазоне, который, тем не менее, дает приемлемые результаты моделирования SED.

Главной задачей моделирования излучения в континууме являлось получения ключевых параметров моделей ( $\beta$ ,  $T_1$  и  $T_2$ ) для объектов, оценка их статистических свойств и их сравнение для случаев выборки мегамазеров и контрольной выборки. Стоит отметить, что исследуемые выборки довольно малочисленные, и эти оценки могут быть смещены.

#### 4.2. Используемые данные

Помимо собственных оценок спектральных плотностей потоков, полученных на РАТАН-600, для построения спектров в широком диапазоне от низких частот до среднего ИК-диапазона мы использовали каталоги и базы данных, перечисленные в таблице 5.

Хотя какие-то данные о потоках в ближнем и среднем ИК-диапазонах есть для всех 74 мегамазеров из исследуемого списка (в основном из каталога WISE (Wright et al. 2010)), в субмиллиметровом и дальнем ИК-диапазонах были найдены сведения только для 28 объектов (38% от списка). В контрольной выборке вклад субмиллиметрового и ИК-компонентов оказался еще меньше, и спектральное распределение энергии в этом диапазоне удалось аппроксимировать только для десяти объектов из 128 (8%).

#### 4.3. Основные результаты и статистика параметров

Моделирование спектрального распределения энергии было проведено для 28 мегамазеров и

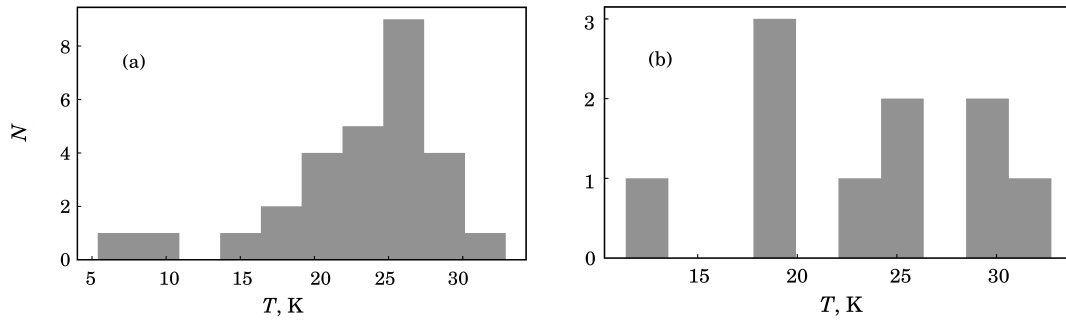


Рис. 4. Распределение значений температуры пыли  $T_1$ : (а) выборка мегамазеров, (б) контрольная выборка.

Таблица 6. Параметры модели для исследуемых мегамазеров

NVSS name	$\beta$	$T_1$ , К	$T_2$ , К	$w_2$	$T_{aver}$ , К
004733–251717	–0.45	21.48	58.23	0.010	21.84
005334+124133	–0.89	24.46	78.97	0.004	24.70
014430+170607	–0.20	26.91	54.36	0.044	28.13
024240–000047	–0.57	23.00	159.70	$2 \times 10^{-5}$	23.01
033336–360826	–0.59	17.94	62.90	0.001	18.01
052101–252145	–0.60	29.66	69.02	0.024	30.61
054548+584203	–0.62	16.52	31.18	0.054	17.31
093551+612112	–0.44	24.60	56.94	0.010	24.92
100605–335317	–0.63	8.33	39.72	0.001	8.36
102000+081335	–0.30	26.44	52.23	0.058	27.94
110353+405059	–0.48	24.72	52.76	0.016	25.17
112832+583343	–0.66	21.71	61.12	0.013	22.24
115311–390748	–0.52	24.35	53.33	0.018	24.86
121345+024840	–0.21	27.05	54.78	0.036	28.04
122654–005238	–0.40	25.93	61.34	0.034	27.12
125614+565222	–0.31	29.32	68.79	0.022	30.18
131226–154751	–0.48	21.28	57.19	0.004	21.43
131503+243707	–0.26	24.99	51.53	0.044	26.18
134442+555313	–0.43	27.83	58.10	0.035	28.89
134733+121724	–0.52	32.90	117.39	$4 \times 10^{-4}$	32.93
151313+071331	–0.48	24.15	46.66	0.035	24.93
152659+355839	–0.24	27.43	67.53	0.029	28.59
153457+233011	–0.18	24.78	51.88	0.034	25.71
164240–094315	–0.48	15.32	37.04	0.026	15.88
172321–001702	–0.33	20.06	39.58	0.124	22.47
225149–175225	–0.40	5.39	39.56	0.200	12.22
231600+253324	–0.52	24.79	62.75	0.011	25.21
233901+362109	–0.62	27.19	59.91	0.022	27.91

10 объектов из контрольного списка. За небольшими исключениями значения низкочастотного спектрального индекса  $\beta$  лежат в диапазоне от  $-1.0$

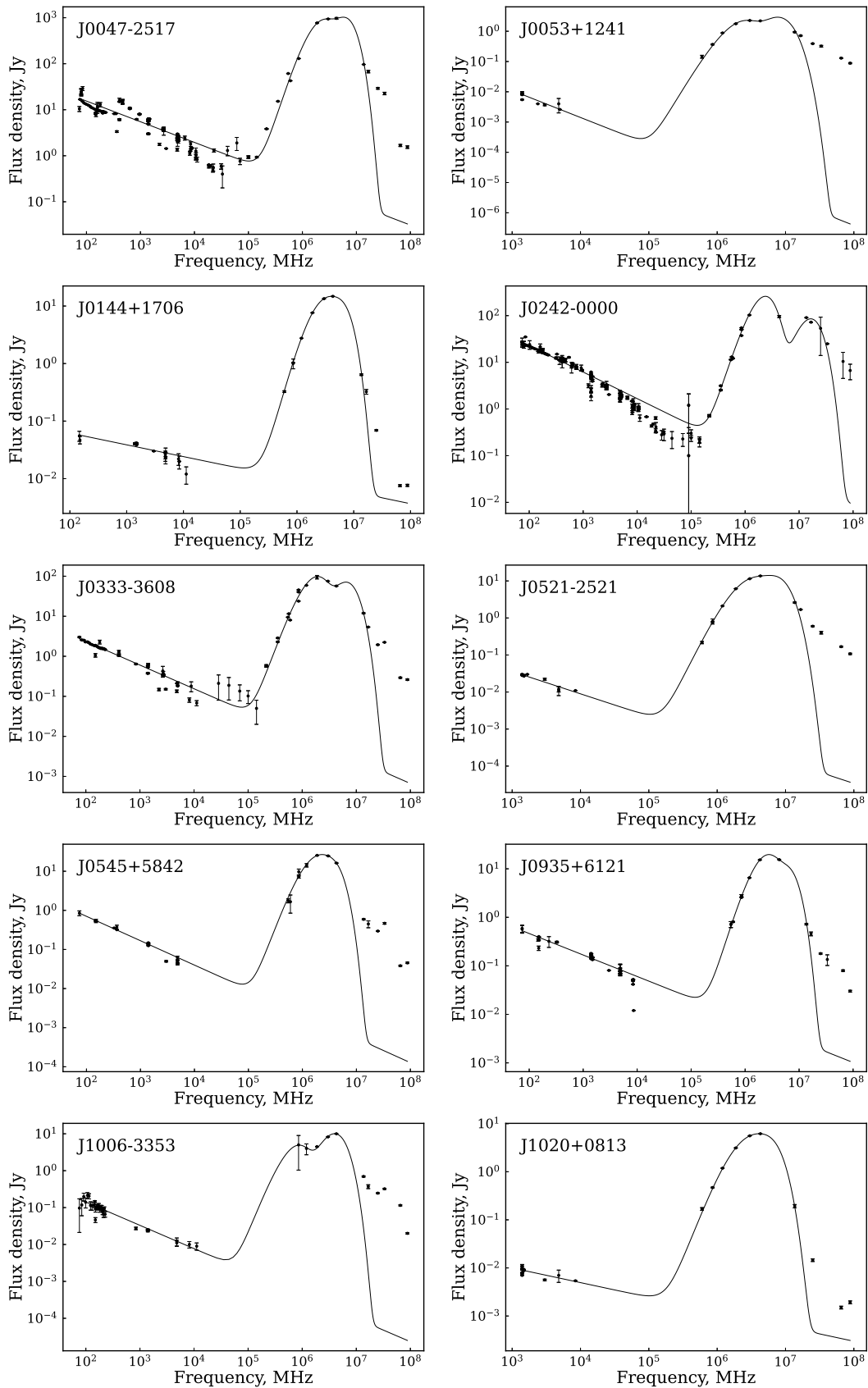
Таблица 7. Параметры модели для объектов из контрольной выборки

NVSS name	$\beta$	$T_1$ , К	$T_2$ , К	$w_2$	$T_{aver}$ , К
015950+002338	–0.70	29.75	75.13	0.0178	30.56
090734+012502	–0.27	24.37	46.29	0.0175	24.75
131653+234047	–0.50	11.39	47.27	0.079	14.23
133718+242302	–0.31	19.23	200.71	$1 \times 10^{-5}$	19.23
134015+332437	–0.96	17.89	56.34	0.124	22.68
140638+010255	–0.74	32.75	81.72	0.022	33.83
140819+290446	–0.76	29.08	72.26	0.048	31.18
142231+260203	–0.86	25.89	34.76	$1 \times 10^{-6}$	25.89
161644+031419	–1.48	22.53	79.38	0.003	22.71
232427+293541	0.01	18.49	37.20	0.148	21.28

до  $-0.2$ , что иллюстрирует варианты суперпозиции синхротронной и свободно-свободной компонент для разных случаев. Значения цветовой температуры для пылевой компоненты лежат в интервалах  $T_1 = 5\text{--}33\text{ K}$  и  $T_2 = 40\text{--}160\text{ K}$ . Отметим, что вклад «теплой» пыли, несмотря на незначительный вес  $w$ , оказывает существенное влияние на форму спектра. Значения параметров всех источников, для которых было проведено моделирование, приведены в таблицах 6 и 7. Здесь же указана средневзвешенная цветная температура  $T_{aver} = w_1 T_1 + w_2 T_2$ , где  $w_1 + w_2 = 1$ .

Распределение значений цветовой температуры «холодной» пыли  $T_1$  для выборки ОНМ и контрольной выборки приведены на рис. 4. Средние значения для двух пылевых компонент составляют  $\langle T_1 \rangle = 23.2 \pm 5.9\text{ K}$ ,  $\langle T_2 \rangle = 60.9 \pm 24.6\text{ K}$  для списка мегамазеров и  $\langle T_1 \rangle = 23.1 \pm 6.2\text{ K}$ ,  $\langle T_2 \rangle = 73.1 \pm 45.6\text{ K}$  для контрольной выборки.

Проведенные расчеты не показывают значимой корреляции между цветовой температурой пыли  $T_1$  в выборке мегамазеров и такими параметрами, как индекс переменности  $V_{S_{4.7}}$ , а также светимостью в



**Рис. 5.** Аппроксимация SED для ОНМ с имеющимися данными плотностей потоков в субмиллиметровом и ИК-диапазонах. Потоки в средней ИК-области с частотами больше 10 ТГц формируются за счет излучения молекул ПАУ и в данной работе не моделировались.

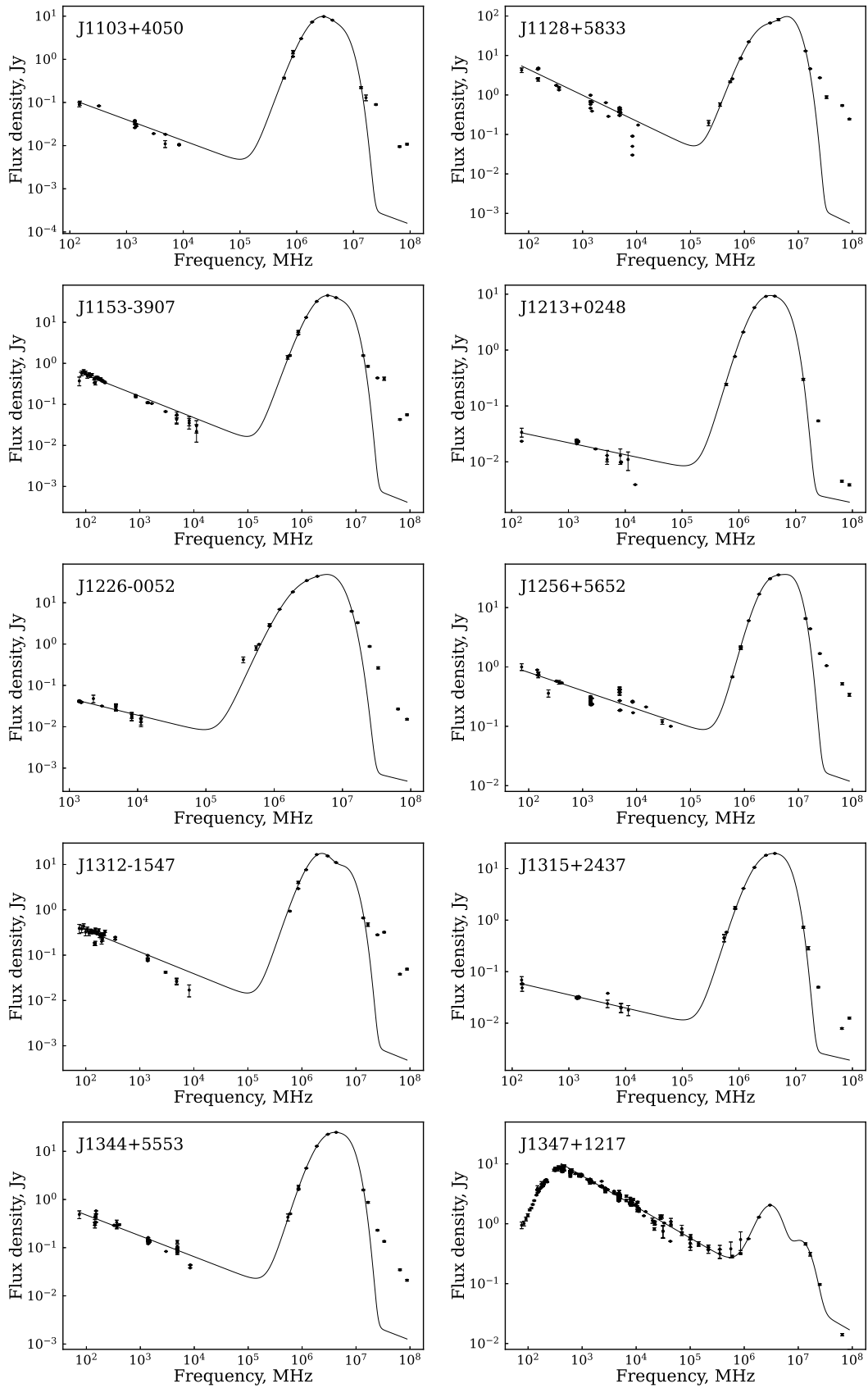


Рис. 5. Продолжение.

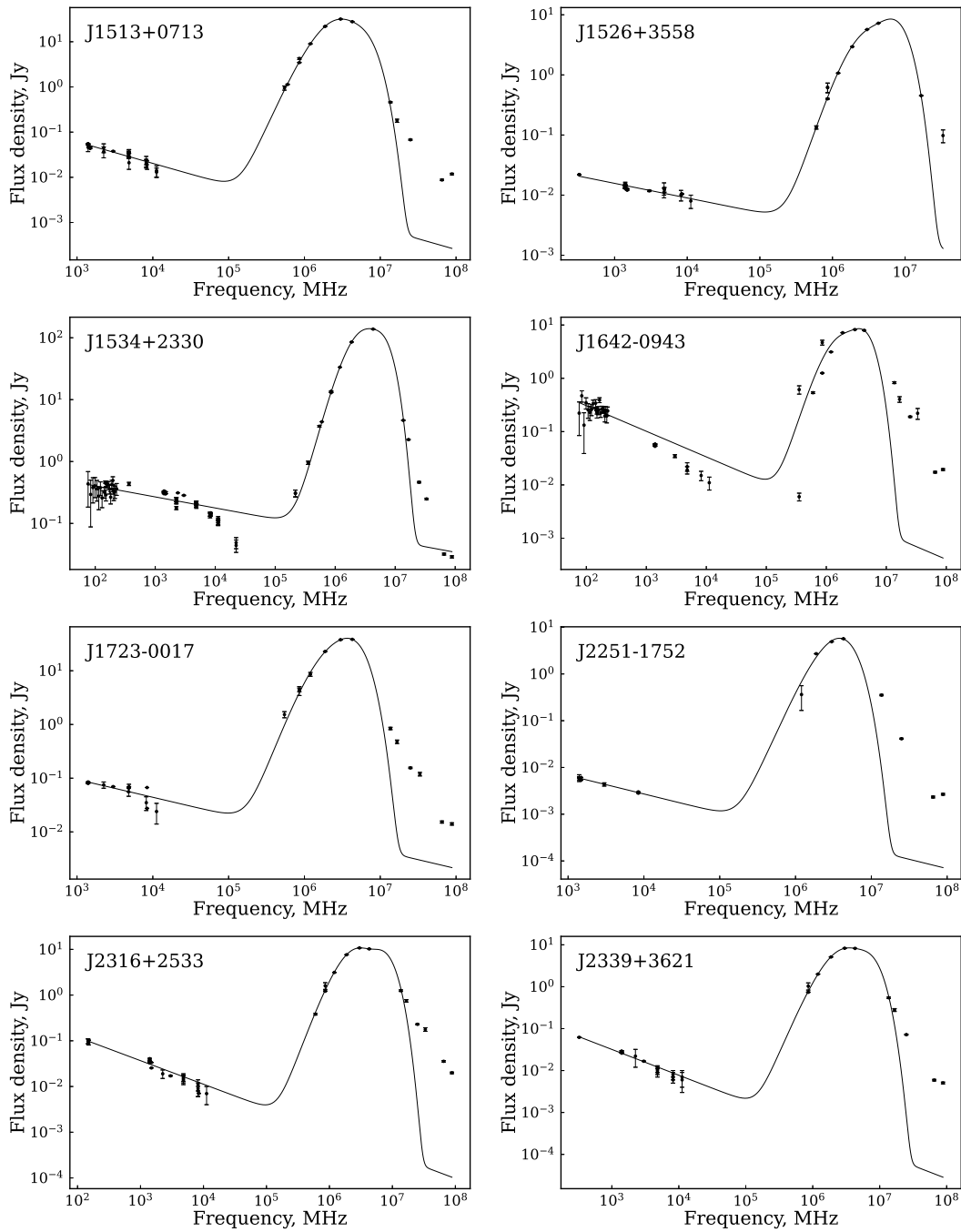


Рис. 5. Продолжение.

линии  $L_{\text{ОН}}$ . Также не обнаружена значимая корреляция между синхротронным спектральным индексом  $\beta$  и  $T_1$  (коэффициент корреляции по Пирсону  $r = 0.22$ ,  $p\text{-value} = 0.27$ ).

Коэффициент корреляции по Пирсону для выборки мегазверов между самими параметрами  $T_1$  и  $T_2$  составляет 0.4 ( $p\text{-value} = 0.03$ ), что неудивительно, так как при увеличении средней температуры ансамбля пылевых частиц цветовая температура должна повышаться для всех компонент модели.

Критерий однородности Колмогорова—Смирнова для двух выборок  $T_1$ , мегазверов и контрольной, имеет значение  $ks = 0.23$  ( $p\text{-value} = 0.75$ ), что не дает возможности говорить о статистических различиях этих двух распределений.

Результаты аппроксимации спектрального распределения энергии (SED) для объектов из списка мегазверов приведены на рис. 5, а для контрольного списка — на рис. 6. Нужно заметить, что потоки в средней и ближней ИК-областях с

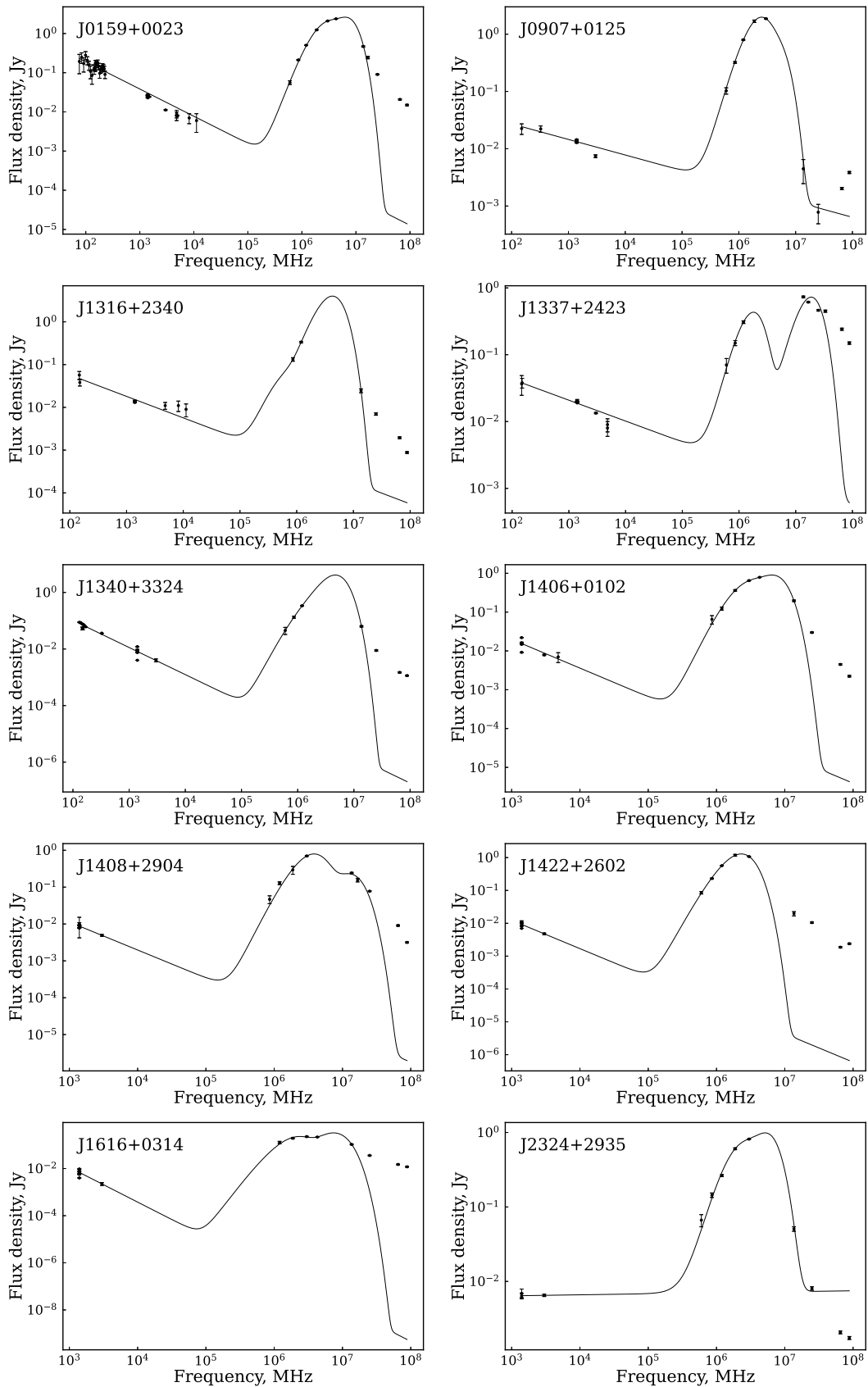


Рис. 6. Аппроксимация SED источников контрольной выборки с имеющимися данными о потоках в субмиллиметровом и ИК-диапазонах.

частотами больше 10 ТГц формируются за счет излучения молекул ПАУ и в данной работе не моделировались.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследована переменность интегральной спектральной плотности потока ярких инфракрасных галактик с источниками мегамазерного излучения (ОНМ) и контрольной выборки галактик без ОН-излучения. Для большинства ОНМ-галактик уровень переменности в радиоконтинууме не превышает 0.20, а медианные значения индекса переменности для всей выборки варьируются в пределах 0.08–0.17 на частотах 11.2, 8.2, 4.7 и 2.3 ГГц. Сравнение с контрольной выборкой инфракрасных галактик без источников мегамазерного излучения показало, что для нее уровень переменности составляет 0.10–0.15, что по порядку величины не отличается от переменности ОНМ-галактик. Отдельные яркие представители галактик с мегамазерным излучением демонстрируют переменность порядка 0.30–0.50 вблизи частоты 4.7 ГГц. Такие галактики, как правило, ассоциируются с АЯГ (например, J0047–2517) и в них наблюдается область активного звездообразования (например, J1509–1119).

Мы определили параметры спектрального распределения энергии для галактик с имеющимися литературными данными в диапазоне частот от МГц до ТГц. Были получены значения низкочастотного спектрального индекса в диапазоне менее 50 ГГц и проведена оценка параметров модели для теплового излучения пыли от 50 ГГц до 10 ТГц. Сравнение распределений цветовой температуры пылевой компоненты для двух выборок не выявило различия в их статистических свойствах. Также не обнаружены значимые корреляции между цветовой температурой пыли в ОНМ-галактиках и такими параметрами, как индекс переменности и светимость в линии ОН.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность рецензенту к.ф.-м.н. А. М. Соболеву за ценные замечания и рекомендации. Наблюдения выполнены на научном оборудовании радиотелескопа РАТАН-600 Специальной астрофизической обсерватории РАН и поддержаны Министерством науки и высшего образования РФ. Исследование выполнено с использованием системы поддержки астрофизических каталогов CATS, баз данных NASA/IPAC Extragalactic Database (NED) и VizieR.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и ГФЕН в рамках научного проекта № 21-52-53035 «Радиосвойства и структура галактик с источниками гидроксильного мегамазерного излучения». Исследование поддержано Государственным фондом естественных наук Китая (№ U1931203, № 12111530009).

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. A. Abdo, M. Ackermann, M. Ajello, et al., *Astrophys. J.* **715** (1), 429 (2010).
2. M. Ackermann, M. Ajello, A. Allafort, et al., *Astrophys. J.* **743** (2), article id. 171 (2011).
3. P. A. R. Ade et al. (Planck Collab.), *Astron. and Astrophys.* **594**, id. A26 (2016).
4. M. F. Aller, H. D. Aller, and P. A. Hughes, *Astrophys. J.* **399**, 16 (1992).
5. W. A. Baan, A. Haschick, and C. Henkel, *Astron. J.* **103**, 728 (1992).
6. G. B. Berriman, *SPIE Conf. Proc.* **7016**, article id. 701618 (2008).
7. M. Bondi, M. A. Pérez-Torres, D. Dallacasa, and T. W. B. Muxlow, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **361** (2), 748 (2005).
8. J. M. Chapman, L. Staveley-Smith, D. J. Axon, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **244**, 281 (1990).
9. D. L. Clements, W. J. Sutherland, R. G. McMahon, and W. Saunders, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **279** (2), 477 (1996).
10. R. M. Cutri, E. L. Wright, T. Conrow, et al., *Explanatory Supplement to the WISE All-Sky Data Release Products* (2012).
11. E. da Cunha, S. Charlot, and D. Elbaz, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **388** (4), 1595 (2008).
12. J. Darling and R. Giovanelli, *Astron. J.* **124** (1), 100 (2002).
13. D. P. Finkbeiner, M. Davis, and D. J. Schlegel, *Astrophys. J.* **524** (2), 867 (1999).
14. P. C. Gregory and J. J. Condon, *Astrophys. J. Suppl.* **75**, 1011 (1991).
15. P. C. Gregory, W. K. Scott, K. Douglas, and J. J. Condon, *Astrophys. J. Suppl.* **103**, 427 (1996).
16. M. R. Griffith and A. E. Wright, *Astron. J.* **105**, 1666 (1993).
17. S. Haan, J. A. Surace, L. Armus, et al., *Astron. J.* **141** (3), 100 (2011).
18. E. Herbst and E. F. van Dishoeck, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **47** (1), 427 (2009).
19. M. Imanishi, K. Nakanishi, and T. Izumi, *Astrophys. J. Suppl.* **241** (2), article id. 19 (2019).



20. D. Ishihara, T. Onaka, H. Kataza, et al., *Astron. and Astrophys.* **514**, id. A1 (2010).
21. R. A. Kandalian, *Astrophysics* **39** (3), 237 (1996).
22. R. A. Kandalyan, *Astrophysics* **48** (1), 99 (2005a).
23. R. A. Kandalyan, *Astrophysics* **48** (2), 237 (2005b).
24. A. Kraus, T. P. Krichbaum, R. Wegner, et al., *Astron. and Astrophys.* **401**, 161 (2003).
25. S. A. Laurent-Muehleisen, R. I. Kollgaard, P. J. Ryan, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **122**, 235 (1997).
26. E. Lenc and S. J. Tingay, *Astron. J.* **132** (3), 1333 (2006).
27. G. Marton, L. Calzoletti, A. M. Perez Garcia, et al., arXiv e-prints arXiv:1705.05693 (2017).
28. E. Momjian, J. D. Romney, C. L. Carilli, and T. H. Troland, *Astrophys. J.* **653** (2), 1172 (2006).
29. T. Murphy, E. M. Sadler, R. D. Ekers, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **402**, 2403 (2010).
30. M. A. Pérez-Torres, A. Alberdi, C. Romero-Cañizales, and M. Bondi, *Astron. and Astrophys.* **519**, id. L5 (2010).
31. Y. M. Pihlström, J. E. Conway, R. S. Booth, et al., *Astron. and Astrophys.* **377**, 413 (2001).
32. C. Romero-Cañizales, S. Mattila, A. Alberdi, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **415** (3), 2688 (2011).
33. B. Schulz, G. Marton, I. Valtchanov, et al., arXiv e-prints arXiv:1706.00448 (2017).
34. Y. V. Sotnikova, Z. Wu, T. V. Mufakharov, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **510** (2), 2495 (2022).
35. A. Tarchi, P. Castangia, C. Henkel, et al., *Astron. and Astrophys.* **525**, id. A91 (2011).
36. G. B. Taylor, R. C. Vermeulen, A. C. S. Readhead, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **107**, 37 (1996).
37. J. S. Ulvestad and R. R. J. Antonucci, *Astron. J.* **102**, 875 (1991).
38. E. Vardoulaki, V. Charmandaris, E. J. Murphy, et al., *Astron. and Astrophys.* **574**, id. A4 (2015).
39. O. V. Verkhodanov, S. A. Trushkin, H. Andernach, and V. N. Chernenkov, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **58**, 118 (2005).
40. O. V. Verkhodanov, S. A. Trushkin, and V. N. Chernenkov, *Baltic Astronomy* **6**, 275 (1997).
41. M.-P. Véron-Cetty and P. Véron, *Astron. and Astrophys.* **455**, 773 (2006).
42. P. N. Wilkinson, I. W. A. Browne, A. R. Patnaik, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **300**, 790 (198).
43. K. W. Willett, J. Darling, H. W. W. Spoon, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **193** (1), article id. 18 (2011).
44. E. L. Wright, P. R. M. Eisenhardt, A. K. Mainzer, et al., *Astron. J.* **140** (6), 1868 (2010).
45. J. S. Zhang, J. Z. Wang, G. X. Di, et al., *Astron. and Astrophys.* **570**, id. A110 (2014).

## Radio Variability and Broad-Band Spectra of Infrared Galaxies with and without OH Megamaser Emission

Yu. V. Sotnikova,<sup>1</sup> T. V. Mufakharov,<sup>1,2,3</sup> A. G. Mikhailov,<sup>1</sup> V. A. Stolyarov,<sup>1,2,4</sup> Z. Z. Wu,<sup>5</sup>  
M. G. Mingaliev,<sup>1,2</sup> T. A. Semenova,<sup>1</sup> A. K. Erkenov,<sup>1</sup> N. N. Bursov,<sup>1</sup> and R. Y. Udovitskiy<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Special Astrophysical Observatory of RAS, Nizhny Arkhyz 369167, Russia

<sup>2</sup>Kazan Federal University, Kazan 420008, Russia

<sup>3</sup>Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China

<sup>4</sup>Astrophysics Group, Cavendish Laboratory, University of Cambridge, Cambridge CB3 0HE, UK

<sup>5</sup>College of Physics, Guizhou University, Guiyang 550025, China

We study the radio variability of galaxies with and without sources of hydroxyl (OH) megamaser radiation based on the continuum radio measurements conducted in 2019–2022 with the radio telescope RATAN-600 at frequencies of 2.3, 4.7, 8.2, and 11.2 GHz. Presumably, radio continuum emission significantly affects the megamaser radiation brightness, therefore, such a characteristic as the variability of radio emission is important for determining the OHM galaxies parameters. With additional data from the literature, the parameters of radio variability on a time scale up to 30 years were estimated. The median values of the variability index for 48 OHM galaxies are in the range  $V_S = 0.08–0.17$ , and for 30 galaxies without OH emission they are  $V_S = 0.08–0.28$ . For some individual galaxies in both samples, flux density variations reach 30–50%. These sources either are commonly associated with AGNs or reveal active star formation. Generally, the radio variability of luminous infrared galaxies with and without OH megamaser emission is moderate and of the same order of magnitude on long time scales. From estimating the spectral energy distribution parameters in a broad frequency range (from MHz to THz), we determined the spectral index below 50 GHz and the color temperatures of dust components for megamaser and control sample galaxies. At a level of  $\rho < 0.05$ , there are no statistically significant differences in the distribution of these parameters for the two samples, as well there are no statistically significant correlations between the dust color temperatures and the variability index or luminosity in the OH line.

Keywords: *galaxies: active—quasars: general—galaxies: starburst—galaxies: infrared—radio continuum: galaxies*