

УДК 52-13(083.8); 524.7-44; 524.883-77

МНОГОЧАСТОТНЫЙ КАТАЛОГ ИЗМЕРЕНИЙ БЛАЗАРОВ НА РАТАН-600 — VLcat

© 2022 Ю. В. Сотникова^{1*}, Т. В. Муфахаров^{1,2}, М. Г. Мингалиев^{1,2,3}, Р. Ю. Удовицкий¹,
Т. А. Семенова¹, А. К. Эркенов¹, Н. Н. Бурсов¹, А. Г. Михайлов¹, Ю. В. Черепкова¹

¹Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

²Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, 420008 Россия

³Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург, 191187 Россия

Поступила в редакцию 17 августа 2022 года; после доработки 7 сентября 2022 года;
принята к публикации 9 сентября 2022 года

В работе представлен новый каталог многочастотных измерений блазаров на РАТАН-600 — обновленная версия каталога лацертид VLcat. В каталог включены квазары с плоским спектром (FSRQ — flat-spectrum radio quasars), благодаря чему число объектов в VLcat возросло почти в шесть раз и составляет более 1700 блазаров разных типов. Главной особенностью каталога является сбор и систематизация измерений спектральных плотностей потоков блазаров, полученных на радиотелескопе РАТАН-600 на шести частотах: 1.2, 2.3, 4.7, 7.7/8.2, 11.2 и 21.7/22.3 ГГц. Для анализа широкодиапазонных радиоспектров в каталоге реализована возможность подключения радиоизмерений из внешних баз данных и расчетов параметров радиоизлучения объектов. Приводится краткое описание радиосвойств различных типов блазаров каталога, таких как спектральная классификация, спектральные индексы, переменность радиоизлучения и радиосветимость.

Ключевые слова: *каталоги — галактики: активные ядра галактик, лацертиды, квазары — радиоизлучение континуум: галактики*

1. ВВЕДЕНИЕ

Блазары — активные ядра галактик (АЯГ) с релятивистскими джетами, направленными близко к лучу зрения наблюдателя (Padovani et al. 2017, Urry and Padovani 1995). Они представляют интерес как объекты с экстремальными физическими условиями, быстрой и сильной переменностью электромагнитного излучения на разных временных масштабах и примечательны также тем, что являются наиболее распространенными источниками γ -излучения на небе (Ajello et al. 2020). А недавно блазары стали рассматриваться как возможные внегалактические источники нейтрино сверхвысоких (ТэВ–ПэВ) энергий (Aartsen et al. 2018). Для всестороннего изучения природы блазаров и связи между ними и событиями нейтрино важно проведение регулярных долговременных и многодиапазонных наблюдений (Novatta et al. 2021, Kovalev et al. 2020, Plavin et al. 2020). Всемирный телескоп измерений блазаров (The Whole Earth Blazar Telescope, WEBT, Villata et al. 2002) представляет собой коллаборацию, которая организует кампании по мониторингу блазаров от радиодиапазона до

γ -лучей. В радиодиапазоне наибольший вклад осуществляется несколькими обсерваториями: долговременный регулярный мониторинг ярчайших АЯГ на 37 ГГц обсерватории Метсахови (Niépola et al. 2009, Salonen et al. 1987), программа мониторинга блазаров на 15 ГГц обсерватории в Оуэнс Вэлли (Richards et al. 2011), трехчастотный (4.8–14.5 ГГц) мониторинг обсерватории университета Мичигана (Aller et al. 1985), обзор неба на 1.4 ГГц Национальной радиоастрономической обсерватории США (NVSS, Condon et al. 1998), наблюдения на Very Large Array (VLA, Healey et al. 2007) на 8.4 ГГц и обзор в диапазоне 2–4 ГГц (VLASS, Lacy et al. 2020). Однако, как правило, долговременные кривые блеска измеряются редко, и большинство блазаров наблюдаются главным образом в рамках целевых кампаний во время вспышечной активности (Novatta and Lindfors 2019). Так, для более чем 20% объектов каталога блазаров Roma-BZCAT (Massaro et al. 2015) имеется менее 20 радиоизмерений за весь исторический период их исследований (рис. 1).

Радиотелескоп РАТАН-600 отличается способностью измерять радиоспектры космических объектов на нескольких частотах (1.2, 2.3, 4.7, 8.2, 11.2

*E-mail: lacerta999@gmail.com

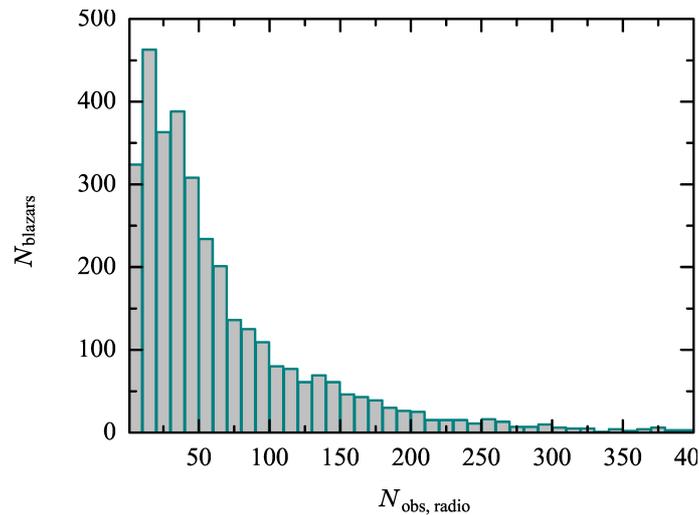


Рис. 1. Число литературных радиоданных для блазаров каталога Roma-BZCAT (3561 объект). Около 200 блазаров с более чем 400 измерениями не показаны на гистограмме для ясного представления.

и 22.3 ГГц) одновременно (Korolkov and Pariiskii 1979, Pariiskij 1993). Регулярный мониторинг блазаров проводится на телескопе с 2005 г., полученные измерения легли в основу первой версии VLcat¹ (Mingaliev et al. 2014), многочастотного каталога измерений объектов типа BL Lacertae (лацертид) на РАТАН-600. Первая версия включала более 300 лацертид и кандидатов. В настоящей работе представлен каталог многочастотных данных РАТАН-600 для блазаров, являющийся обновлением VLcat. В новой версии 1.3 VLcat (сентябрь 2021 г.) представлен ряд существенных изменений по сравнению с предыдущей версией: во-первых, в каталог включены новые типы блазаров, а именно: блазары неопределенного типа (Blazars of uncertain type) и квазары с плоским спектром (FSRQ), в результате каталог содержит более 1700 блазаров; во-вторых, включены новые измерения РАТАН-600 для лацертид первой версии каталога; в-третьих, предоставлен доступ к измерениям блазаров в радиодиапазоне, заимствованным из внешних баз данных и каталогов. Статья организована следующим образом. Свойства выборки представлены в разделе 2; описание наблюдений на РАТАН-600 и характеристики антенны и приемников приведены в разделе 3.1; в разделе 3.2 описаны данные из внешних источников, добавленные в каталог; его общая структура и доступные инструменты представлены в разделе 4. В разделе 5 описаны радиосвойства типов блазаров из каталога. Выводы работы представлены в разделе 6.

¹<https://www.sao.ru/blcat/>

Таблица 1. Подклассы блазаров, представленные в каталоге VLcat в первой и текущей версиях. N — их число, в скобках указан процент от общего числа объектов каталога

Класс	N (%)	
	2014	2022
FSRQ	7 (2.3)	1097 (62.2)
BL Lac	220 (71.9)	416 (23.6)
BL Lac candidates	43 (14.1)	32 (1.8)
BL Lac galaxy-dominated	—	92 (5.2)
Blazars of uncertain type	36 (11.8)	128 (7.2)
Всего:	306	1765

2. ВЫБОРКА

Список блазаров VLcat заимствован из каталога Roma-BZCAT Massaro et al. (2009), который является самым большим списком блазаров, отобранных из разных обзоров. Его пятое издание содержит 3561 объект, для всех из них имеются данные в радиодиапазоне из обзоров NVSS (Condon et al. 1998), FIRST (White et al. 1997) или SUMMS (Mauch et al. 2003). Классификация блазаров каталога BZCAT основана на спектральном распределении энергии (spectral energy distribution, SED), демонстрирующем сильное нетепловое излучение по всему электромагнитному спектру и наличие свидетельств релятивистского уярчения. Также, при наличии, приведены данные из микроволнового, мягкого и жесткого рентгеновского, γ -диапазонов и звездные величины в R -фильтре оптического диапазона.

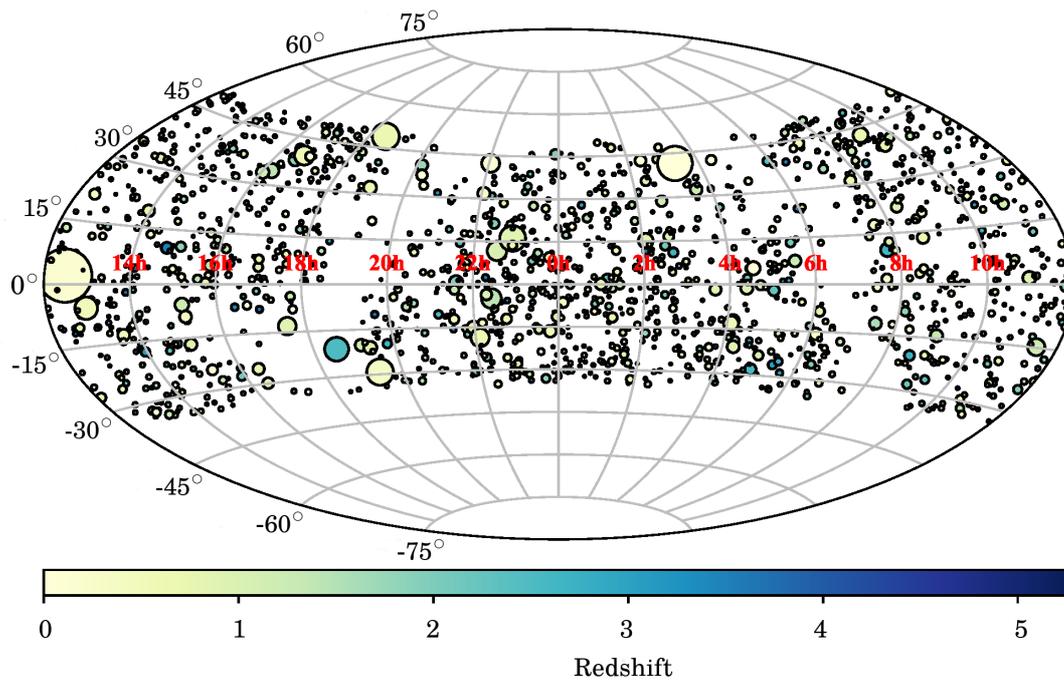


Рис. 2. Распределение блазаров каталога VLcat на небесной сфере в проекции Хаммера–Аитова в экваториальных координатах. Размер значков соответствует величине спектральной плотности потока на частоте 1.4 ГГц, а цветом отмечены величины красного смещения.

Изначально каталог VLcat состоял из 306 лацертид из списка мониторинга обсерватории Метсахови (Nierrola et al. 2006) и содержал измерения ПАТАН-600 в 2005–2014 гг. (Mingaliev et al. 2017a; 2014). Впоследствии мы включили в каталог блазары всех типов из Roma-BZCAT в диапазоне склонений от -34° до $+49^\circ$ с пределом по спектральной плотности потока в каталоге NVSS $S_{1.4} \geq 100$ мЯн. По сравнению с первой версией каталога (Mingaliev et al. 2014), текущее издание содержит почти в шесть раз больше блазаров, список главным образом расширен за счет квазаров с плоскими спектрами — FSRQ (таблица 1).

Одна из задач каталога VLcat — представление долговременных и многочастотных измерений блазаров на ПАТАН-600. В настоящее время каталог содержит более 1700 блазаров, что составляет почти половину всех источников из Roma-BZCAT, откуда заимствованы классификация, красные смещения и звездные величины в R -фильтре. Лацертиды разделяются на объекты типа BL Lacertae, кандидаты в объекты типа BL Lacertae и лацертиды с доминирующей родительской галактикой (BL Lac–galaxy dominated). На рис. 2 показано распределение объектов VLcat на небе, красные смещения обозначены цветом, а размер значков пропорционален спектральным плотностям потоков на 1.4 ГГц.

На рис. 3 приведено распределение типов блазаров VLcat по красному смещению z . Медианное значение красного смещения составляет 1.34 для FSRQ, 0.58 для блазаров неопределенного типа и 0.27 для лацертид. FSRQ демонстрируют больший разброс z , от 0.09 до 5.29.

3. СОДЕРЖАНИЕ КАТАЛОГА

3.1. Данные ПАТАН-600

Наблюдения блазаров на ПАТАН-600 проводятся с 2005 г. и часть измерений представлена в электронных каталогах Mingaliev et al. (2008; 2015; 2017b; 2012b), Mufakharov et al. (2015a; b), Sotnikova et al. (2019b). Континуальные радиоспектры измерены на нескольких частотах одновременно, в течение 3–5 минут (Kogol'kov and Pariiskii 1979, Pariiskij 1993). В наблюдениях использовались два радиометрических комплекса: на трех (4.7, 11.2, 21.7/22.3 ГГц) и шести (1.2, 2.3, 4.7, 7.7/8.2, 11.2, 21.7/22.3 ГГц) частотах (Tsybulev 2011, Tsybulev et al. 2018). Параметры радиометров и антенной системы ПАТАН-600 приведены в таблице 2. Измерения обработаны с помощью автоматизированной системы (Udovitskiy et al. 2016), основанной на стандартном программном обеспечении пакета FADPS для обработки континуальных данных ПАТАН-600 Verkhodanov (1997).

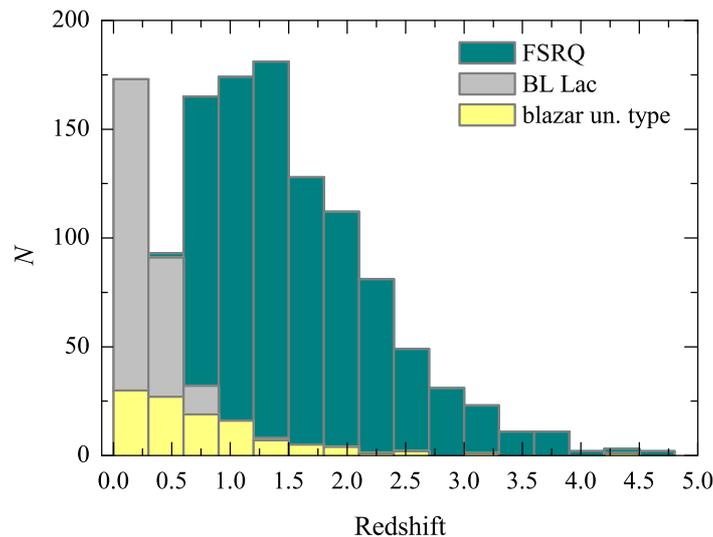


Рис. 3. Распределение блазаров каталога VLcat по красным смещениям. Блазары типа FSRQ отмечены зеленым цветом, лацериды BL Lac — серым, а блазары неопределенного типа — желтым.

Таблица 2. Параметры радиометров континуума РАТАН-600: центральная частота f_0 , ширина полосы Δf_0 , чувствительность радиометра на единицу углового разрешения ΔF . $FWHM_{RA \times Dec}$ — ширина диаграммы по уровню половины мощности по прямому восхождению (RA) и склонению (Dec) для Dec = 0°.

f_0 , ГГц	Δf_0 , ГГц	ΔF , мЯн/beam	$FWHM_{RA \times Dec}$
21.7/22.3	2.5	50	0'17 × 1'8
11.2	1.4	15	0'34 × 3'9
7.7/8.2	1.0	10	0'47 × 5'2
4.7	0.6	8	0'85 × 9'5
2.25	0.08	40	1'64 × 19'2
1.25	0.08	200	3'0 × 32'4

Использовались следующие вторичные калибраторы по спектральной плотности потока: 3C48, 3C138, 3C147, 3C161, 3C286, 3C295, 3C309.1 и NGC 7027. Шкала спектральной плотности потока основана на измерениях Baars et al. (1977) и Perley and Butler (2013; 2017), которые хорошо согласуются друг с другом в пределах ошибок измерений. Также были использованы традиционные для РАТАН-600 калибраторы: J0240–23, J1154–35, J1347+12 и J0521+16 (Udovitskiy et al. 2016). Измерения калибровочных источников были скорректированы на угловой размер и линейную поляризацию согласно данным Ott et al. (1994) и Tabara and Inoue (1980).

Стандартная ошибка измерения спектральной

плотности потока включает погрешность калибровочной кривой РАТАН-600 (около 2–10%) и погрешность определения антенной температуры. Ошибка шкалы абсолютной плотности потока, равная 3–10% на разных частотах (Baars et al. 1977), исключена из общей ошибки. Медианные значения стандартных ошибок равны 3–10% на 11.2, 8.2, 4.7 ГГц и 7–20% на 2.3, 1.2, 22.3 ГГц.

В настоящее время получены неравномерные временные ряды измерений блазаров на РАТАН-600. Число наблюдений варьируется от одного до более чем ста эпох со средним значением 17. Для большинства блазаров (около 65%) насчитывается порядка пяти эпох наблюдений. Для 10% блазаров имеются 15–45 эпох измерений, для 22% — 45–70, для 4% — 70–115 эпох.

3.2. Данные из внешних источников

В новом издании VLcat собраны измерения в радиоконтинууме из баз данных CATS², the Astrophysical CAtalogs support System database (Verkhodanov et al. 2005; 2009; 1997), доступной на сайте Специальной астрофизической обсерватории; из NED³, the NASA/IPAC Extragalactic Database и из VizieR Information System⁴ (Ochsenbein et al. 2000). Литературные данные охватывают диапазон частот от десятков МГц до

²<https://www.sao.ru/cats/>

³<http://ned.ipac.caltech.edu>

⁴<https://vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR>

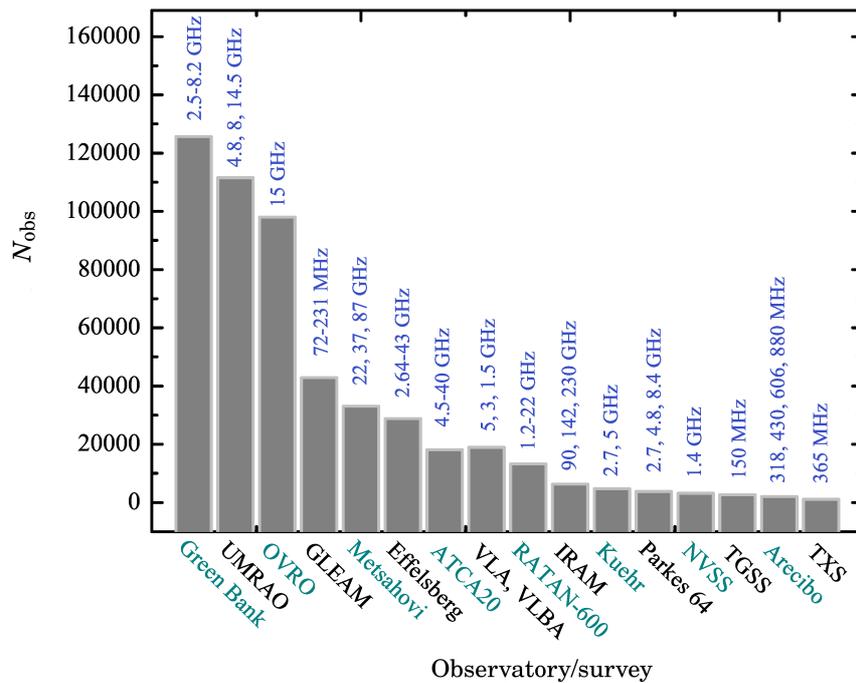


Рис. 4. Обзоры и телескопы, массово представленные в каталоге VLcat.

сотен ГГц, период времени 30–40 лет и используются для построения широкодиапазонных радиоспектров. На рис. 4 представлены основные обзоры и программы мониторинга блазаров, включенные в каталог. Их список с указанием обсерваторий (телескопов), частот наблюдений и литературных ссылок представлен в таблице 3.

Измерения, полученные на разных инструментах, неоднородны. Интерферометрические наблюдения имеют большее угловое разрешение чем РАТАН-600, что приводит к систематически заниженным значениям спектральных плотностей потоков по сравнению с измерениями в режиме одиночной антенны. Частичное разрешение близких источников при наблюдениях на антеннах с меньшим, чем на РАТАН-600 угловым разрешением, приводит к переоценке спектральных плотностей потоков. С учетом этого измерения, полученные интерферометрами и одиночными антеннами, разделены на общем спектре: они отмечены разными цветами и их можно показать или скрыть при необходимости.

4. СТРУКТУРА КАТАЛОГА

Каталог опубликован в виде интерактивного онлайн-инструмента для просмотра данных и доступа к ним по адресу <https://www.sao.ru/blcat/>. Основная таблица содержит список блазаров и их параметры: число эпох наблюдений на РАТАН-600, имя (по возможности в формате

VZCAT5), экваториальные координаты на эпоху J2000, красное смещение, звездная величина в R -фильтре, среднее значение спектральной плотности потока и радиосветимости на 4.7 ГГц, тип блазара (согласно пятому изданию Romo-VZCAT). Пример основной страницы каталога показан в таблице 4. По столбцам таблицы осуществляется сортировка и доступна статистика по колонкам, содержащим число эпох наблюдений, красное смещение, звездную величину в фильтре R , спектральную плотность потока, радиосветимость и тип блазара. Измерения для любого объекта доступны при нажатии меню «Data explorer». При этом загружается окно с измерениями РАТАН-600 в виде таблицы дат, плотностей потоков и их ошибок, измеренных на 3–6 частотах квази-одновременно, радиоспектров и кривых блеска (примеры показаны на рис. 5 и 6). Радиоспектр можно дополнить измерениями из внешних источников («Show external data»), которые доступны для экспорта («Export external data») в текстовом формате, где указаны имя блазара, частота измерений, величина спектральной плотности потока с ошибкой, название каталога или его аббревиатура для идентификации литературного источника.

В каталоге автоматически вычисляются спектральные индексы и индексы переменности в различных частотных интервалах. Спектральный индекс α рассчитывается согласно степенному закону $S \sim \nu^\alpha$, где S_ν — спектральная плотность потока на

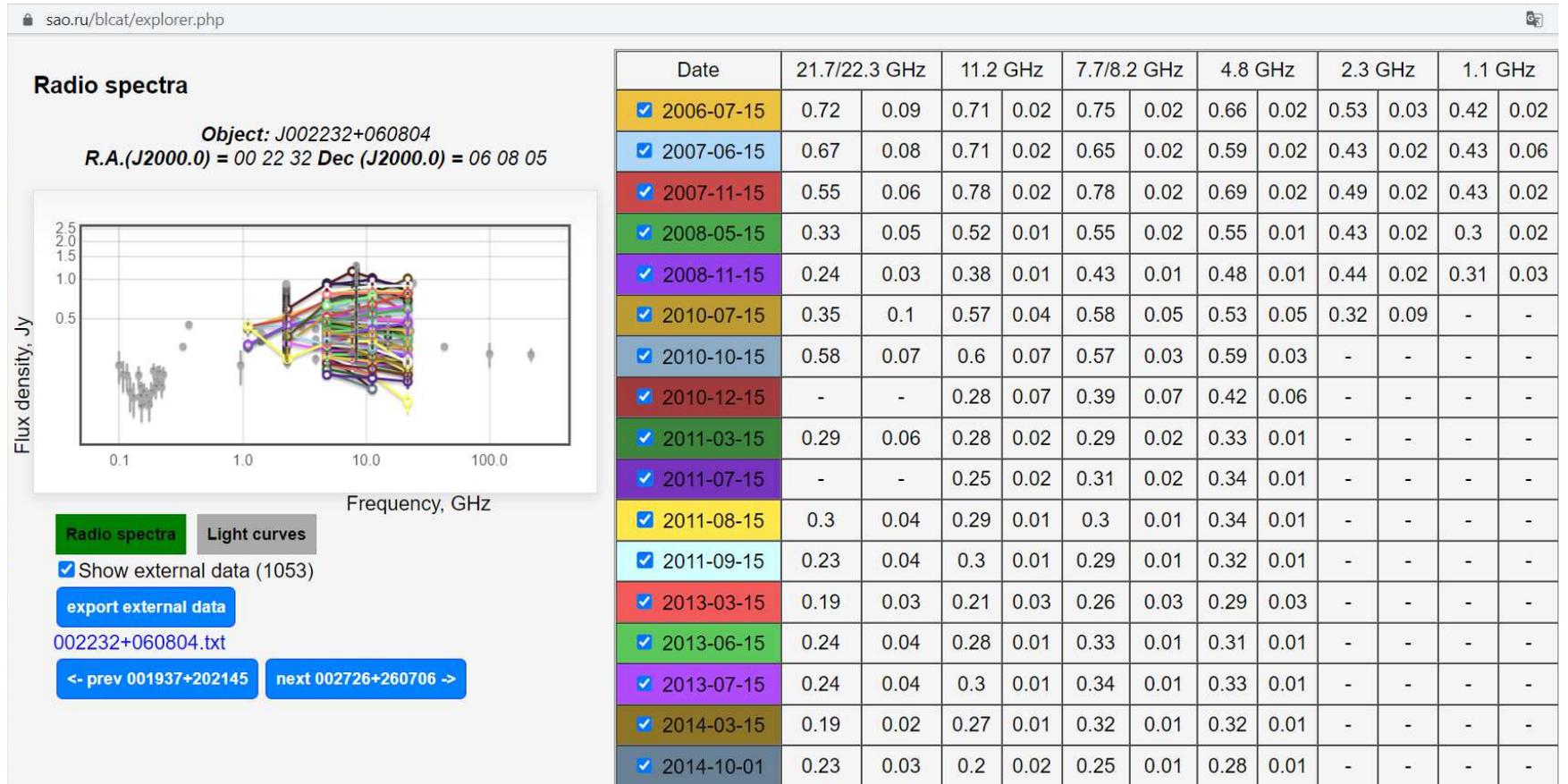


Рис. 5. Многочастотные радиоспектры лацертиды J0022+06, представленные в каталоге. Измерения РАТАН-600 (72 эпохи наблюдений с 2006.07 по 2021.01) показаны разными цветами, данные внешних каталогов показаны серым цветом.

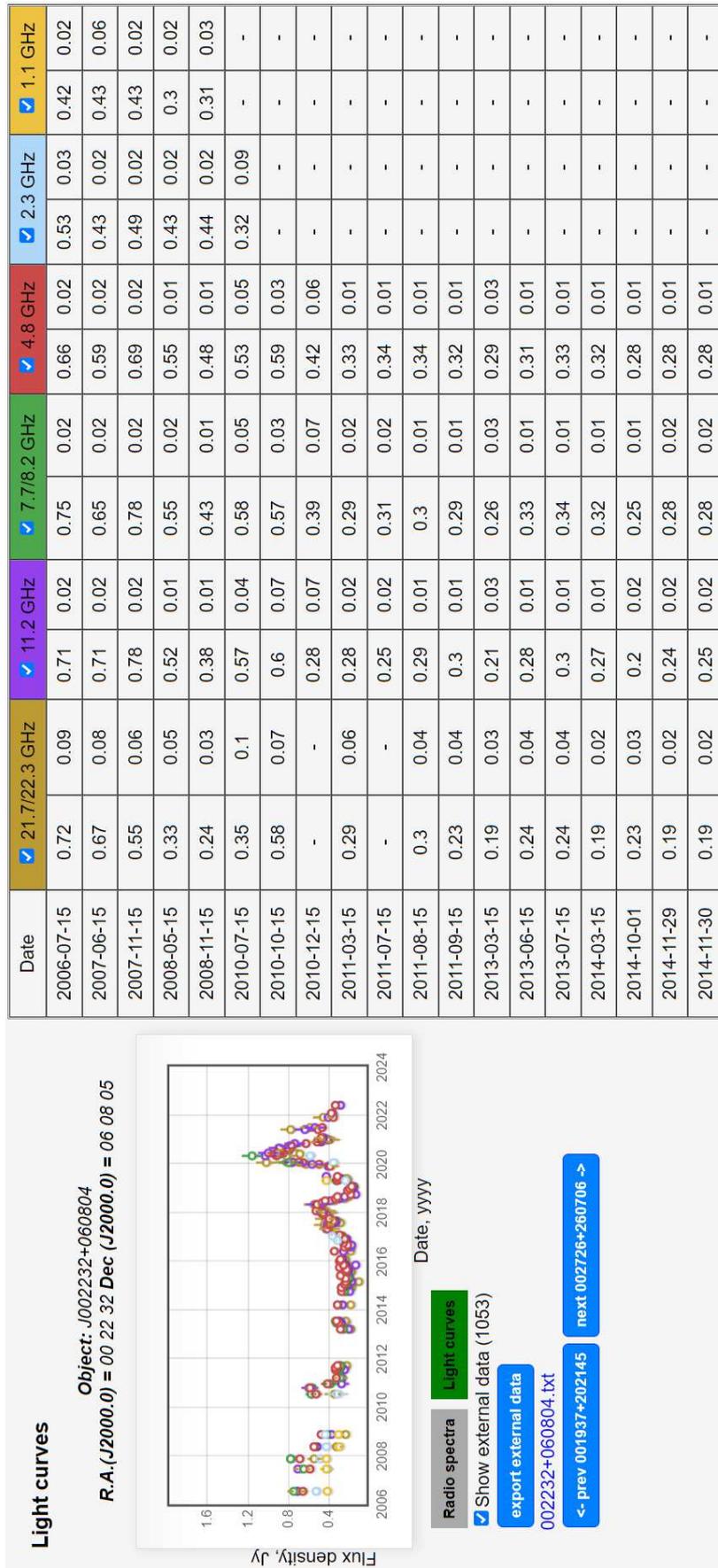


Рис. 6. Многочастотные кривые блеска лацертиды J0022+06, представленные в каталоге.

Таблица 3. Основные источники внешних данных в каталоге VLcat последней версии

Каталог/обзор	Обсерватория/телескоп	Частотный диапазон, ГГц	Ссылки
87GB, GB6	GBT	2.5, 4.85, 8.2	[1, 2, 3, 4]
	UMRAO	4.8, 8, 14.5	[5]
F-GAMMA	OVRO	10.8, 15	[6, 7]
GLEAM	MWA	0.072–0.231	[8]
F-GAMMA	Effelsberg	2.64–43	[9]
AT20G, PACO	ATCA	20, 4.5–40	[10, 11]
	Metsähovi	22, 37, 87	[12, 13, 14]
VLASS	VLA	3	[15]
	VLBA	1.4, 5	[16]
	RATAN-600	1–22	[17, 18, 19, 20]
	IRAM	90, 142, 230	[21]
	GBT, Parkes	2.7, 5	[22]
NVSS	VLA	1.4	[23]
TGSS	GMRT	0.15	[24]
PMN	Parkes	4.85, 8.4	[25, 26]
	Arecibo, GBT	0.32, 0.43, 0.61, 0.88, 1.4	[27]
TXS	UTRAO	0.365	[28]

Ссылки: [1, 2, 3, 4] — Altschuler (1986), Lazio et al. (2001), Becker et al. (1991), Gregory and Condon (1991); [5] — Aller et al. (1985); [6, 7] — Richards et al. (2011), Seielstad et al. (1983); [8] — Hurley-Walker et al. (2017); [9] — Angelakis et al. (2019); [10, 11] — Massardi et al. (2011; 2008); [12, 13, 14] — Terasranta et al. (1998), Teräsraanta et al. (2004), Terasranta et al. (1992); [15, 16] — Gordon et al. (2020), Taylor et al. (1996); [17, 18, 19, 20] — Kiikov et al. (2002), Kovalev et al. (1999), Mingaliev et al. (2017a; 2012a); [21] — Reuter et al. (1997); [22] — Kuehr et al. (1981); [23] — Condon et al. (1998); [24] — Intema et al. (2017); [25, 26] — Wright et al. (1996; 1990); [27] — Mitchell et al. (1994); [28] — Douglas et al. (1996).

частоте ν , а α — наклон спектра:

$$\alpha = \frac{\log S_2 - \log S_1}{\log \nu_2 - \log \nu_1}, \quad (1)$$

где S_1 и S_2 — спектральные плотности потоков на частотах ν_1 и ν_2 соответственно. Спектральный индекс вычисляется и для мгновенных радиоспектров РАТАН-600, и средний — для всего исторического периода наблюдений.

Индекс переменности определяется по формуле из Aller et al. (1992):

$$V_S = \frac{(S_i - \sigma_i)_{\max} - (S_i + \sigma_i)_{\min}}{(S_i - \sigma_i)_{\max} + (S_i + \sigma_i)_{\min}}, \quad (2)$$

где S_{\max} и S_{\min} — максимальное и минимальное значения спектральной плотности потока за все

эпохи наблюдений, а $\sigma_{S_{\max}}$ и $\sigma_{S_{\min}}$ — их средне-квадратичные ошибки.

Оценки монохроматической радиосветимости на 4.7 ГГц рассчитываются в каталоге автоматически согласно:

$$P_{4.7} = 4\pi D_L^2 S_{4.7} (1+z)^{-\alpha-1}, \quad (3)$$

где $S_{4.7}$ — измеренная спектральная плотность потока на 4.7 ГГц, z — красное смещение, α — средний спектральный индекс на 4.7 ГГц и D_L — фотометрическое расстояние.

Для вычисления фотометрических расстояний использовалась Λ CDM-космология с $H_0 = 67.74 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$, $\Omega_m = 0.3089$ и $\Omega_\Lambda = 0.6911$ (Ade et al. 2016).

Неопределенности величин α , V_S , $P_{4.7}$ вычисляются как корень квадратный суммы квадратов

Таблица 4. Главная таблица каталога VLcat версии 1.3 (сентябрь 2021). Для примера показаны первые десять строк

N	Epochs	Source name	RA	Dec	Redshift	R , mag	Flux density at 4.7 GHz, Jy	Radio luminosity at 4.7 GHz, $W Hz^{-1}$	Blazar type
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
1	2	5BZQJ0001–1551	00:01:05	–15:51:06	2.044	18.1	0.20	3.23×10^{27}	FSRQ
2	6	5BZQJ0001+1914	00:01:08	+19:14:34	3.1	21.6	0.13	3.04×10^{27}	FSRQ
3	3	5BZBJ0001–0746	00:01:18	–07:46:26	–	17.9	0.18	–	BL Lac
4	6	5BZBJ0001–0011	00:01:21	–00:11:39	0.462	19.6	0.05	3.26×10^{25}	BL Lac
5	46	5BZBJ0002–0024	00:02:57	–00:24:47	0.523	19.7	0.09	8.55×10^{25}	BL Lac
6	1	5BZBJ0004–1148	00:04:04	–11:48:57	–	18.8	0.78	–	BL Lac
7	2	5BZQJ0004+4615	00:04:16	+46:15:18	1.81	20.4	0.24	2.35×10^{27}	FSRQ
8	2	5BZQJ0005–1648	00:05:17	–16:48:04	0.78	18.4	0.15	3.01×10^{26}	FSRQ
9	1	5BZQJ0005+0524	00:05:20	+05:24:10	1.9	16.2	0.14	1.39×10^{27}	FSRQ
10	66	5BZQJ0005+3820	00:05:57	+38:20:15	0.229	17.6	0.5	6.35×10^{25}	FSRQ

Описание колонок: (1) — номер, (2) — количество эпох наблюдений на ПАТАН-600, (3) — имя источника, (4) — прямое восхождение (J2000.0, hh:mm:ss), (5) — склонение (J2000.0, dd:mm:ss), (6) — красное смещение, (7) — звездная величина в R -фильтре из USNO-B1, (8) и (9) — средние значения спектральной плотности потока и радиосветимости на частоте 4.7 ГГц, по данным ПАТАН-600, (10) — тип блазара согласно каталогу Roma-BZCAT: лацертида (BL Lac), кандидат в лацертиды (BL Lac cand.), лацертида с доминирующей галактикой (BL Lac.g.dom.), квазар с плоским спектром (FSRQ) и блазар неопределенного типа (Blaz.un.t.).

Таблица 5. Медианные и средние значения красного смещения z , спектральной плотности потока $S_{4.7}$ и радиосветимости $P_{4.7}$ на 4.7 ГГц. N — число объектов; стандартное отклонение для средних значений указано в скобках

Тип блазара	z			$S_{4.7}$, Ян			$P_{4.7}$, Вт Гц $^{-1}$		
	N	среднее	медиана	N	среднее	медиана	N	среднее	медиана
FSRQ	1097	1.47 (0.79)	1.34	1097	0.59 (1.29)	0.32	1065	$5.0 (11.2) \times 10^{29}$	1.9×10^{29}
BL Lac	324	0.38 (0.35)	0.27	539	0.27 (0.42)	0.11	252	$3.2 (9.7) \times 10^{28}$	1.9×10^{27}
Blaz.un.t.	113	0.77 (0.71)	0.58	128	0.79 (2.33)	0.31	105	$2.0 (2.5) \times 10^{29}$	3.5×10^{28}

Таблица 6. Средние значения спектральных индексов на частотах 11.2–22.3, 8.2–11.2, 4.7–8.2, 2.3–4.7 и 1.2–2.3 ГГц для трех типов блазаров. Стандартные отклонения указаны в скобках

Тип блазара	$\alpha_{11.2-22.3}$	$\alpha_{8.2-11.2}$	$\alpha_{4.7-8.2}$	$\alpha_{2.3-4.7}$	$\alpha_{1.2-2.3}$
FSRQ	–0.09 (0.41)	–0.22 (0.44)	–0.13 (0.45)	+0.16 (0.38)	–0.11 (0.52)
BL Lac	+0.03 (0.46)	–0.21 (0.54)	–0.17 (0.52)	–0.17 (0.60)	–0.46 (0.64)
Blaz.un.t.	–0.10 (0.48)	–0.31 (0.49)	–0.21 (0.56)	–0.01 (0.55)	–0.22 (0.70)

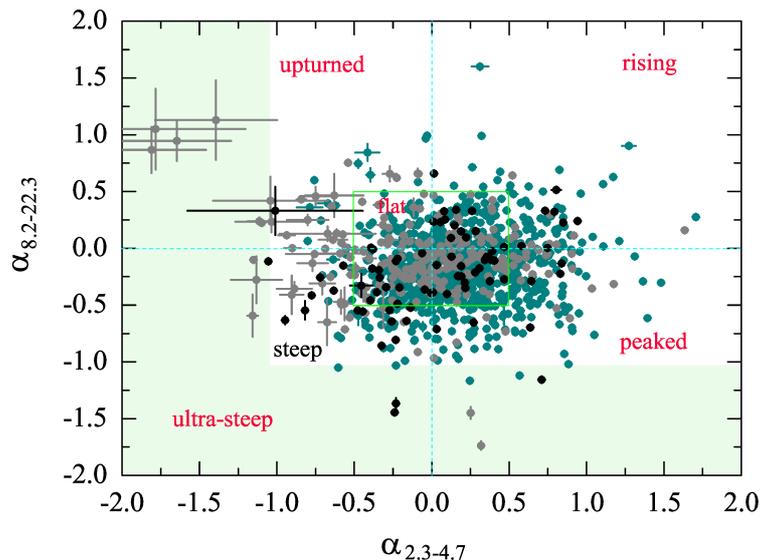


Рис. 7. Двухцветная диаграмма для спектральных индексов. Зеленый прямоугольник обозначает область спектральных индексов от -0.5 до 0.5 , светло-зеленым отмечена область ультра-крутых спектров с $\alpha \leq -1.1$. FSRQ-бلاзары отмечены зеленым, лацертиды — серым, а блазары неопределенного типа — черным цветом.

ошибок параметров, включенных в формулы их расчетов.

Содержание основной таблицы VLcat, измерения РАТАН-600 и расчетные параметры (α , V_S , $P_{4.7}$) доступны для экспорта в формате текстового файла (CSV) при нажатии меню «Export main table and RATAN-600 data». Меню «Help» на главной странице каталога предоставляет описание каталога и всех его инструментов.

5. РАДИОСВОЙСТВА БЛАЗАРОВ КАТАЛОГА

Спектральные индексы и индекс переменности радиоизлучения объектов вычислены на основе наблюдений, полученных на одном инструменте на нескольких частотах одновременно, что минимизирует влияние неоднородностей измерений на результат. Медианные и средние значения красного смещения, спектральной плотности потока и радиосветимости для FSRQ, BL Lac и блазаров неопределенного типа представлены в таблице 5. Полученные радиосвойства объектов отражают широкий диапазон их параметров и статистические отличия между типами блазаров.

5.1. Спектральный индекс

Проанализированы средние радиоспектры блазаров, построенные только по измерениям РАТАН-600 в 2005–2022 гг. Средние значения спектральных индексов, согласно формуле (1), для трех типов блазаров в пяти частотных интервалах

Таблица 7. Типы радиоспектров блазаров каталога

Тип	Критерий	N (%)
Flat	$-0.5 \leq \alpha \leq 0$	876 (50.5)
Peaked	$\alpha_{\text{low}} \geq +0.5, \alpha_{\text{high}} \leq -0.5$	26 (1.5)
Rising	$\alpha > 0$	476 (27.5)
Upturn	$\alpha_{\text{low}} < 0, \alpha_{\text{high}} > 0$	109 (6.3)
Steep	$-1.1 < \alpha < -0.5$	208 (12)
Ultra-steep	$\alpha \leq -1.1$	39 (2.2)

приведены в таблице 6. Медианные значения $\alpha_{8.2-22.3}$ составляют -0.15 для FSRQ, -0.08 для лацертид и -0.18 для блазаров неопределенного типа.

На рис. 7 представлено распределение спектральных типов в удобной форме двухцветной диаграммы, на которой нанесены низкочастотный и высокочастотный спектральные индексы. Зеленый прямоугольник обозначает диапазон спектральных индексов от -0.5 до 0.5 («blazar box»). Светло-зеленым отмечена область ультракрутых спектров с $\alpha \leq -1.1$. Другие области отмечены согласно критериям спектральной классификации из таблицы 7.

Подавляющее большинство блазаров имеют плоские (876, 50.5%) или растущие (476, 27.5%) спектры. Обнаружена незначительная доля (26, 1.5%) блазаров со спектральным макси-

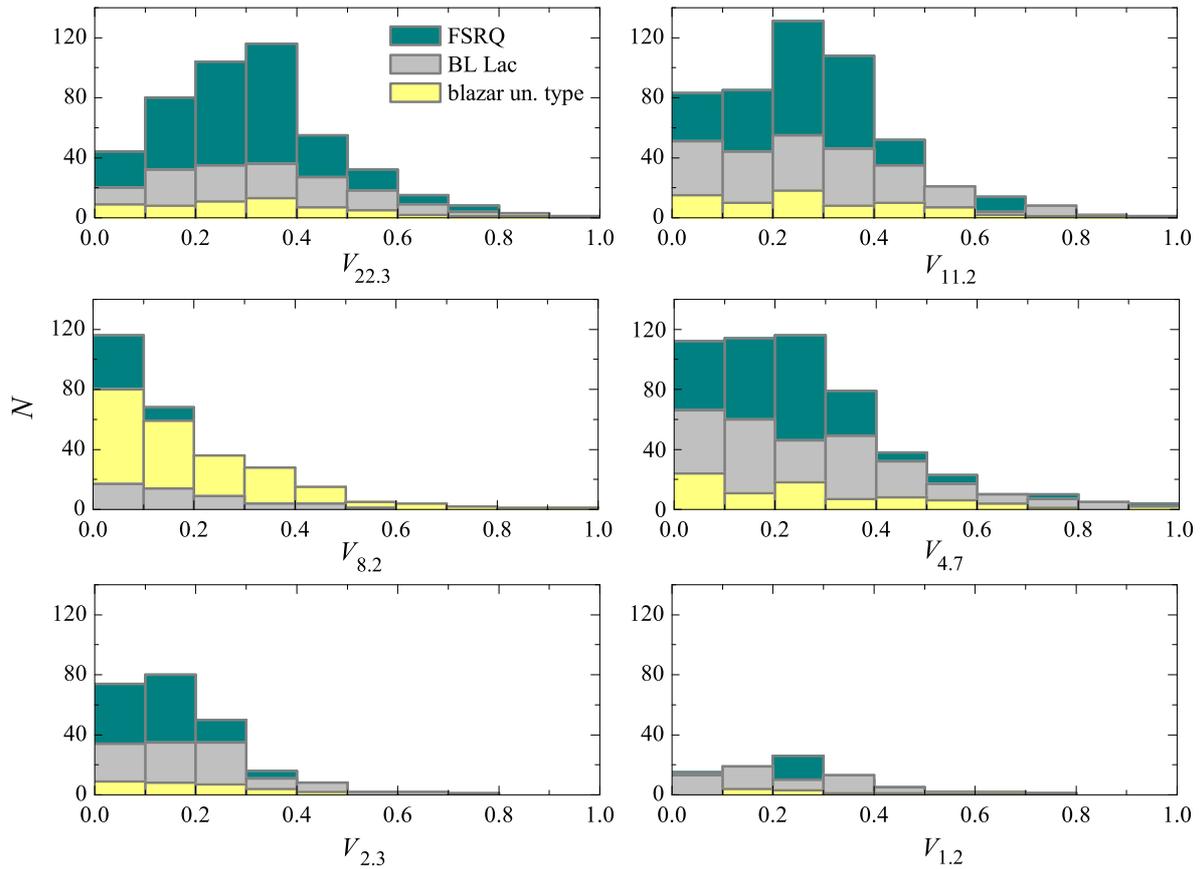


Рис. 8. Распределения трех типов блазаров по индексам переменности на 22.3, 11.2, 8.2, 4.7, 2.3 и 1.2 ГГц.

Таблица 8. Средние значения индексов переменности, рассчитанные на пяти частотах 2.3, 4.7, 8.2, 11.2 и 22.3 ГГц для трех типов блазаров. Стандартные отклонения указаны в скобках

Тип блазара	$V_{22.3}$	$V_{11.2}$	$V_{8.2}$	$V_{4.7}$	$V_{2.3}$
FSRQ	0.28 (0.21)	0.23 (0.23)	0.10 (0.14)	0.23 (0.20)	0.15 (0.12)
BL Lac	0.30 (0.23)	0.27 (0.20)	0.17 (0.18)	0.25 (0.25)	0.17 (0.15)
Blaz.un.t.	0.26 (0.22)	0.26 (0.20)	0.15 (0.14)	0.15 (0.14)	0.16 (0.14)

мумом (таблица 7) и спектральными индексами $\alpha_{\text{low}} \geq +0.5$ и $\alpha_{\text{high}} \leq -0.5$, соответствующими параметрам спектров классических gigahertz-peaked spectrum (GPS) источников (de Vries et al. 1997). Всего 2.2% блазаров имеют ультракрутой радиоспектр с $\alpha \leq -1.1$.

5.2. Переменность

Индексы переменности V_S (выражение 2) были вычислены с использованием квазиодновременных измерений РАТАН-600 на частотах 2.3, 4.7, 7.7/8.2, 11.2 и 21.7/22.3 ГГц. Распределения V_S для разных типов блазаров показаны на рис. 8.

Средние значения V_S для каждого типа приведены в таблице 8. Наибольшие индексы переменности получены на 22.3 ГГц. В среднем, блазары типа лацертид более переменны на всех частотах. Средние и медианные значения V_S на 22.3 ГГц лежат в пределах от 0.07 до 0.30 с максимальными значениями 1.77, 0.90 и 0.89 для FSRQ, лацертид и блазаров неопределенного типа, соответственно. Максимальные индексы переменности 0.90–1.77 получены для FSRQ и лацертид на 4.7–22.3 ГГц. Для блазаров неопределенного типа наибольшие индексы переменности несколько меньше почти на всех частотах, $V_{\text{max}} = 0.53$ –0.89.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлен интерактивный онлайн-каталог многочастотных измерений блазаров на РАТАН-600 — «RATAN-600 multi-frequency catalogue of blazars» (BLcat), который представляет массив измерений спектральных плотностей потоков более чем 1700 блазаров в частотном диапазоне от МГц до сотен ГГц. Основу каталога составляют квазиодновременные измерения РАТАН-600 на частотах в диапазоне 1.2–22.3 ГГц, которые дополнены радиоданными внешних баз данных, благодаря чему временное покрытие составляет 30–40 лет.

В каталоге представлены измеренные спектральные плотности потоков, спектральные индексы, переменность и радиосветимость для большого списка блазаров. Содержимое каталога регулярно пополняется новыми наблюдательными данными РАТАН-600 и литературными измерениями.

При использовании данных опубликованных в каталоге или представленных в нем инструментов расчета параметров просьба приводить ссылку на данную работу.

БЛАГОДАРНОСТИ

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 SIMBAD. Авторы выражают свою признательность инструментам ASDC, в частности каталогу блазаров Roma-BZCAT⁵. В работе также использовались инструменты языка программирования Python: *astroquery* (Ginsburg et al. 2019) и *astropy* (Price-Whelan et al. 2018, Robitaille et al. 2013).

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках национального проекта «Наука» при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, соглашение № 075-15-2020-778.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

⁵<http://www.asdc.asi.it/bzcat/>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. M. G. Aartsen et al. (IceCube Collab.), *Science* **361** (6398), 147 (2018).
2. P. A. R. Ade et al. (Planck Collab.), *Astron. and Astrophys.* **594**, id. A13 (2016).
3. M. Ajello, R. Angioni, M. Axelsson, et al., *Astrophys. J.* **892** (2), id. 105 (2020).
4. H. D. Aller, M. F. Aller, G. E. Latimer, and P. E. Hodge, *Astrophys. J. Suppl.* **59**, 513 (1985).
5. M. F. Aller, H. D. Aller, and P. A. Hughes, *Astrophys. J.* **399**, 16 (1992).
6. D. R. Altschuler, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **65**, 267 (1986).
7. E. Angelakis, L. Fuhrmann, I. Myserlis, et al., *Astron. and Astrophys.* **626**, id. A60 (2019).
8. J. W. M. Baars, R. Genzel, I. I. K. Pauliny-Toth, and A. Witzel, *Astron. and Astrophys.* **61**, 99 (1977).
9. R. H. Becker, R. L. White, and A. L. Edwards, *Astrophys. J. Suppl.* **75**, 1 (1991).
10. J. J. Condon, W. D. Cotton, E. W. Greisen, et al., *Astron. J.* **115** (5), 1693 (1998).
11. W. H. de Vries, P. D. Barthel, and C. P. O’Dea, *Astron. and Astrophys.* **321**, 105 (1997).
12. J. N. Douglas, F. N. Bash, F. A. Bozayan, et al., *Astron. J.* **111**, 1945 (1996).
13. A. Ginsburg, B. M. Sipőcz, C. E. Brasseur, et al., *Astron. J.* **157** (3), 98 (2019).
14. Y. A. Gordon, M. M. Boyce, C. P. O’Dea, et al., *Research Not. Amer. Astron. Soc.* **4** (10), id. 175 (2020).
15. P. C. Gregory and J. J. Condon, *Astrophys. J. Suppl.* **75**, 1011 (1991).
16. S. E. Healey, R. W. Romani, G. B. Taylor, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **171** (1), 61 (2007).
17. T. Hovatta and E. Lindfors, *New Astronomy Reviews* **87**, article id. 101541 (2019).
18. T. Hovatta, E. Lindfors, S. Kiehlmann, et al., *Astron. and Astrophys.* **650**, id. A83 (2021).
19. N. Hurley-Walker, J. R. Callingham, P. J. Hancock, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **464** (1), 1146 (2017).
20. H. T. Intema, P. Jagannathan, K. P. Mooley, and D. A. Frail, *Astron. and Astrophys.* **598**, id. A78 (2017).
21. S. O. Kiikov, M. G. Mingaliev, V. A. Stolyarov, and M. S. Stupalov, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **54**, 5 (2002).
22. D. V. Korolkov and I. N. Pariiskii, *Sky Telesc.* **57**, 324 (1979).
23. Y. A. Kovalev, N. S. Kardashev, Y. Y. Kovalev, et al., *Advances in Space Research* **65** (2), 745 (2020).
24. Y. Y. Kovalev, N. A. Nizhelsky, Y. A. Kovalev, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **139**, 545 (1999).
25. H. Kuehr, A. Witzel, I. I. K. Pauliny-Toth, and U. Nauber, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **45**, 367 (1981).
26. M. Lacy, S. A. Baum, C. J. Chandler, et al., *Publ. Astron. Soc. Pacific* **132** (1009), id. 035001 (2020).

27. T. J. W. Lazio, E. B. Waltman, F. D. Ghigo, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **136** (2), 265 (2001).
28. M. Massardi, A. Bonaldi, L. Bonavera, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **415** (2), 1597 (2011).
29. M. Massardi, R. D. Ekers, T. Murphy, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **384** (2), 775 (2008).
30. E. Massaro, P. Giommi, C. Leto, et al., *Astron. and Astrophys.* **495**, 691 (2009).
31. E. Massaro, A. Maselli, C. Leto, et al., *Astrophys. and Space Sci.* **357** (1), article id. 75 (2015).
32. T. Mauch, T. Murphy, H. J. Buttery, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **342** (4), 1117 (2003).
33. M. Mingaliev, Y. Sotnikova, T. Mufakharov, et al., *Astronomische Nachrichten* **338**, 700 (2017a).
34. M. G. Mingaliev, Y. V. Sotnikova, N. N. Bursov, et al., *VizieR Online Data Catalog J/AZh/84/387* (2008).
35. M. G. Mingaliev, Y. V. Sotnikova, T. V. Mufakharov, et al., *VizieR Online Data Catalog (other)* **0330**, J/other/AstBu/70 (2015).
36. M. G. Mingaliev, Y. V. Sotnikova, T. V. Mufakharov, et al., *VizieR Online Data Catalog J/AN/338/700* (2017b).
37. M. G. Mingaliev, Y. V. Sotnikova, I. Tornainen, et al., *Astron. and Astrophys.* **544**, id. A25 (2012a).
38. M. G. Mingaliev, Y. V. Sotnikova, I. Tornainen, et al., *VizieR Online Data Catalog J/A+A/544/A25* (2012b).
39. M. G. Mingaliev, Y. V. Sotnikova, R. Y. Udovitskiy, et al., *Astron. and Astrophys.* **572**, id. A59 (2014).
40. K. J. Mitchell, B. Dennison, J. J. Condon, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **93**, 441 (1994).
41. T. V. Mufakharov, M. G. Mingaliev, Y. V. Sotnikova, et al., *VizieR Online Data Catalog J/MNRAS/450/2658* (2015a).
42. T. V. Mufakharov, Y. V. Sotnikova, A. K. Erkenov, and M. G. Mingaliev, *VizieR Online Data Catalog (other)* **0330**, J/other/AstBu/69 (2015b).
43. E. Nieppola, T. Hovatta, M. Tornikoski, et al., *Astron. J.* **137** (6), 5022 (2009).
44. E. Nieppola, M. Tornikoski, and E. Valtaoja, *Astron. and Astrophys.* **445**, 441 (2006).
45. F. Ochsenbein, P. Bauer, and J. Marcout, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **143**, 23 (2000).
46. M. Ott, A. Witzel, A. Quirrenbach, et al., *Astron. and Astrophys.* **284**, 331 (1994).
47. P. Padovani, D. M. Alexander, R. J. Assef, et al., *Astron. and Astrophys. Rev.* **25** (1), article id. 2 (2017).
48. Y. N. Parijskij, *IEEE Antennas and Propagation Magazine* **35**, 7 (1993).
49. R. A. Perley and B. J. Butler, *Astrophys. J. Suppl.* **204** (2), article id. 19 (2013).
50. R. A. Perley and B. J. Butler, *Astrophys. J. Suppl.* **230** (1), article id. 7 (2017).
51. A. Plavin, Y. Y. Kovalev, Y. A. Kovalev, and S. Troitsky, *Astrophys. J.* **894** (2), id. 101 (2020).
52. A. M. Price-Whelan et al. (Astropy Collab.), *Astron. J.* **156** (3), article id. 123 (2018).
53. H. P. Reuter, C. Kramer, A. Sievers, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **122**, 271 (1997).
54. J. L. Richards, W. Max-Moerbeck, V. Pavlidou, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **194**, article id. 29 (2011).
55. T. P. Robitaille et al. (Astropy Collab.), *Astron. and Astrophys.* **558**, id. A33 (2013).
56. E. Salonen, H. Terasranta, S. Urpo, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **70**, 409 (1987).
57. G. A. Seielstad, T. J. Pearson, and A. C. S. Readhead, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **95**, 842 (1983).
58. Y. V. Sotnikova, T. V. Mufakharov, E. K. Majorova, et al., *VizieR Online Data Catalog (other)* **0330**, J/other/AstBu/74 (2019b).
59. H. Tabara and M. Inoue, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **39**, 379 (1980).
60. G. B. Taylor, R. C. Vermeulen, A. C. S. Readhead, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **107**, 37 (1996).
61. H. Terasranta, M. Tornikoski, A. Mujunen, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **132**, 305 (1998).
62. H. Teräsraanta, J. Achren, M. Hanski, et al., *Astron. and Astrophys.* **427**, 769 (2004).
63. H. Terasranta, M. Tornikoski, E. Valtaoja, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **94**, 121 (1992).
64. P. G. Tsybulev, *Astrophysical Bulletin* **66**, 109 (2011).
65. P. G. Tsybulev, N. A. Nizhelskii, M. V. Dugin, et al., *Astrophysical Bulletin* **73** (4), 494 (2018).
66. R. Y. Udovitskiy, Y. V. Sotnikova, M. G. Mingaliev, et al., *Astrophysical Bulletin* **71** (4), 496 (2016).
67. C. M. Urry and P. Padovani, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **107**, 803 (1995).
68. O. V. Verkhodanov, *ASP Conf. Ser.* **125**, 46 (1997).
69. O. V. Verkhodanov, S. A. Trushkin, H. Andernach, and V. N. Chernenkov, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **58**, 118 (2005).
70. O. V. Verkhodanov, S. A. Trushkin, H. Andernach, and V. N. Chernenkov, *Data Science Journal* **8**, 34 (2009).
71. O. V. Verkhodanov, S. A. Trushkin, and V. N. Chernenkov, *Baltic Astronomy* **6**, 275 (1997).
72. M. Villata, C. M. Raiteri, G. Tosti, et al., *Memorie della Società Astronomica Italiana* **73**, 1191 (2002).
73. R. L. White, R. H. Becker, D. J. Helfand, and M. D. Gregg, *Astrophys. J.* **475** (2), 479 (1997).
74. A. E. Wright, M. R. Griffith, A. J. Hunt, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **103**, 145 (1996).
75. A. E. Wright, R. M. Wark, E. Troup, et al., *Publ. Astron. Soc. Australia* **8** (3), 261 (1990).

The RATAN-600 Multi-Frequency Catalogue of Blazars— BLcat

Yu. V. Sotnikova¹, T. V. Mufakharov^{1,2}, M. G. Mingaliev^{1,2,3}, R. Y. Udovitskiy¹, T. A. Semenova¹,
A. K. Erkenov¹, N. N. Bursov¹, A. G. Mikhailov¹, and Yu. V. Cherepkova¹

¹Special Astrophysical Observatory of RAS, Nizhny Arkhyz, 369167 Russia

²Kazan Federal University, 18 Kremlyovskaya St., Kazan, 420008 Russia

³Institute of Applied Astronomy of RAS, St. Petersburg, 191187 Russia

In this paper we present the RATAN-600 multi-frequency catalogue of blazars, an updated version of the BLcat: the RATAN-600 multi-frequency catalogue of BL Lacertae objects. The main novelty in the catalogue is an extension of the sample with flat-spectrum radio quasars (FSRQs), thus currently it contains more than 1700 blazars of different types. The main feature of the BLcat is a compilation of radio continuum data for blazars based on the RATAN-600 quasi-simultaneous measurements at frequencies 1.2, 2.3, 4.7, 7.7/8.2, 11.2, and 21.7/22.3 GHz. We additionally supplement the catalogue with the radio data from external sources to provide a more complete opportunity to study radio spectra and radio light curves. For the convenience of users, we developed tools to calculate the spectral index, variability index, and radio luminosity. We briefly describe basic radio properties of blazar subsamples of the catalogue: spectral classification, spectral indices, flux density variability, and radio luminosity.

Keywords: *catalogues—galaxies: active—BL Lacertae objects: general—quasars: general—radio continuum: galaxies*