

Поиск радиоисточников со значительным изменением координат

© А. А. Осетрова¹, О. А. Титов², А. Е. Мельников³

¹СПБГУ, г. Санкт-Петербург, Россия

²Geoscience Australia, г. Канберра, Австралия

³ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Реферат

Третья реализация фундаментальной системы координат ICRS построена по координатам 4536 радиоисточников. Основу каталога ICRF3 составляют 303 «опорных» объекта, точность определения координат которых составляет 30 мкс дуги. Однако по данным наблюдений, полученным в 2018–2021 гг. оказалось, что координаты некоторых радиоисточников, входящих в каталог ICRF3, изменяются в диапазоне до 130 мс дуги в течение короткого промежутка времени, что значительно превышает все предыдущие известные вариации на уровне 3 мс дуги. Использование таких объектов в качестве «опорных» может привести к существенной потере точности геодезических параметров (параметров вращения Земли, координат радиотелескопов), в худшем случае, весь эксперимент будет невозможно обработать по стандартной схеме.

В работе проанализированы временные ряды координат радиоисточников, вычисленные по данным геодезических РСДБ-наблюдений в рамках международной РСДБ-службы (IVS) в 1993–2021 гг. Кроме того, в 2019–2021 гг. было проведено семь специальных экспериментов по поиску нестабильных радиоисточников по программе Ru-A на радиотелескопах РСБД-комплекса «Квazar-КВО». В результате было найдено 64 нестабильных радиоисточника, которые соответствуют трем критериям нестабильности: 1) «отскакивающая» первая или последняя точка; 2) «ступенька» — разрыв в координатах внутри временного ряда и 3) большое видимое собственное движение. Для поиска таких аномальных отклонений были разработаны статистические критерии. Наблюдения таких радиоисточников нельзя включать в обычные РСДБ-эксперименты для определения поправок к всемирному времени (UT1–UTC), поскольку это может ухудшить точность полученных результатов. Астрометрически нестабильные радиоисточники не следует использовать для будущих реализаций ICRS.

Ключевые слова: активные ядра галактик, квазары, видимые собственные движения, опорная система отсчета, РСДБ, астрометрически нестабильные радиоисточники, IVS.

Контакты для связи: Осетрова Ангелина Александровна (st075853@student.spbu.ru); Титов Олег Александрович (Oleg.Titov@ga.gov.au).

Для цитирования: А. А. Осетрова, О. А. Титов, А. Е. Мельников. Поиск радиоисточников со значительным изменением координат // Труды ИПА РАН. 2023. Вып. 64. С. 38–45.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.64.38-45>

Search for the Radio Sources with a Significant Change in the Coordinates

A. A. Osetrova¹, O. A. Titov², A. E. Melnikov³

¹Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

²Geoscience Australia, Canberra, Australia

³Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia

Abstract

The third realization of the fundamental ICRS coordinate system is based on the positions of 4536 radio sources. The basis of the ICRF3 catalog consists of 303 «defining» objects, the floor accuracy of their positions reaches 30 mas. However, the recent VLBI observations (after the ICRF3 was released) have disclosed an unprecedented change in apparent positions of some ICRF3 radio sources (as much as 130 mas) over rather short time interval. This displacement significantly exceeds all previous known variations in radio source positions (within 3 mas). Using these objects as «reference» ones may lead to a significant loss of accuracy of other geodetic parameters (station positions, Earth Orientation Parameters, etc.). In the worst case, the whole geodetic VLBI experiment would be unusable for analysis.

In the paper, we have analyzed the time series of radio source coordinates which based on the International VLBI Service (IVS) programme in 1993–2021 and 7 experiments obtained at the Institute of Applied Astronomy (IAA) the (Ru-A programme in 2019–2021). We found 64 radio sources with statistically significant change in positions, and distinguished three types of instability («bouncing» first and last points, «step» at the position time series, and steady apparent proper motion) using original statistical criteria. Such «unstable» radio sources should not be scheduled in standard geodetic VLBI experiments due to potentially severe loss of accuracy. In the context of next ICRF catalogue preparation, such radio sources should be moved in the list of astrometrically unstable objects.

Keywords: AGN, quasars, apparent proper motion, reference frame, VLBI, unstable radio sources, IVS.

Contacts: Angelina A. Osetrova (st075853@student.spbu.ru); Oleg A. Titov (Oleg.Titov@ga.gov.au).

For citation: Osetrova A. A., Titov O. A., Melnikov A. E. Search for the radio sources with a significant change in the coordinates // Transactions of IAA RAS. 2023. Vol. 64. P. 38–45.
<https://doi.org/10.32876/AplAstron.64.38-45>

Введение

Внегалактические радиоисточники, наблюдающиеся методами РСДБ, используются для построения фундаментальной небесной системы координат в соответствии с резолюцией Генеральной Ассамблеи Международного Астрономического Союза (МАС), принятой в 1991 г. В настоящее время используется третья версия каталога радиоисточников (ICRF3), принятая в 2018 г. ([Charlot et al., 2020](#)), в которой фундаментальная система определяется координатами 303 так называемых «опорных» объектов. Точность оценивания координат этих объектов составляет 30 мкс дуги. В то же самое время сравнительно небольшой процент радиоисточников демонстрирует различный уровень астрометрической нестабильности с амплитудой более 3 мс дуги. Такие объекты в каталог ICRF3 не включаются.

При составлении каталога ICRF3 не были найдены объекты с изменениями координат, превышающими величину 3 мс дуги: такой поиск не проводился, так как не ожидалось, что возможно изменение координат на величину, превышающую 3 мс дуги в несколько раз. Однако, после 2018 г. были обнаружены объекты (3C48, СТА21, 1144+352, 1328+254), изменившие свои координаты на значительную величину (20–130 мс дуги) на интервале времени от 3 до 30 лет ([Titov et al., 2022](#)). Координаты таких объектов в каталоге ICRF3 обычно представляют какие-то промежуточные значения между оценками координат до разрыва и после.

В табл. 1 приведены оценки координат нестабильных радиоисточников, сделанные до разрыва (в 2014 г. — для 1328+254, в 1996 г. — для СТА21 и 1144+352) и после разрыва (в 2017 г. — для

1328+254, 1144+352 и в 2018 г. — для СТА21), и каталожные величины ICRF3.

Использование объектов с такой беспрецедентно большой астрометрической нестабильностью в качестве «опорных» может негативно сказаться на определении точности геодезических параметров (ПВЗ, координат радиотелескопов). Поэтому задача о выявлении радиоисточников с такими значительными изменениями видимых положений имеет важное прикладное значение.

В первом приближении обычно считается, что наблюдаемые радиоисточники являются точечными объектами, поэтому при РСДБ-наблюдениях фазовый отклик не зависит ни от длины используемой базы, ни от ее ориентации в пространстве. Однако подавляющее большинство наблюдаемых радиоисточников имеет протяженную структуру на различных длинах волн, в том числе и на длине волны 3.5 см (X-диапазон), на которой проводятся регулярные геодезические наблюдения международной РСДБ-службой IVS. Изменение видимых координат может быть вызвано двумя причинами:

1. Реальным изменением структуры объекта (движением вещества джета, появлением новых компонент и т. д.) ([Marcaide et al., 1985](#), [Kellermann et al., 2004](#), [Titov, 2017](#)).

2. Смещением фазового центра из-за изменений в составе РСДБ-сети (различные длины и ориентации баз относительно протяженного источника) ([Charlot, 1990](#)), при этом структура радиоисточника может оставаться прежней.

Цель данной работы — систематический поиск радиоисточников, наблюдавшихся в 1993–2021 гг., у которых имеются видимые изменения координат с амплитудой от 5 мс дуги.

Таблица 1

Координаты (α в часах, минутах, секундах, δ в градусах, минутах, секундах) нестабильных радиоисточников на разные моменты времени и в каталоге ICRF3

	До разрыва	После разрыва	ICRF3
1328+254	13 30 37.689987 +25 09 10.87753	13 30 37.696161 +25 09 10.99190	13 30 37.695195 +25 09 10.94444
1144+352	11 47 22.130129 +35 01 07.52526	11 47 22.128933 +35 01 07.53518	11 47 22.129282 +35 01 07.53082
СТА21 (0316+162)	03 18 57.802586 +16 28 32.69706	03 18 57.803208 +16 28 32.66539	03 18 57.803043 +16 28 32.67823

Обработка наблюдений

Для получения временных рядов суточных координат радиоисточников было обработано 3956 24-часовых РСДБ-экспериментов по программам IVS (Nothnagel et al., 2017) в 1993–2021 гг. Кроме того, в 2019–2021 гг. было дополнительно проведено 7 24-часовых экспериментов по программе Ru-A (табл. 2) на РСДБ-комплексе «Квазар-КВО» (Shuigina et al. 2019) с участием радиотелескопов Seshan25 (Шанхайская радиоастрономическая обсерватория, Китайская Академия Наук, КНР), Yebes40M (Национальный Географический Институт, Испания), Wark30M (Институт Радиоастрономии и Космических Исследований, Университет Технологий, г. Окленд, Новая Зеландия). Обработка проводилась в программном пакете OSSAM 6.3 методом среднеквадратической коллокации (Titov, 2004). Координаты станций, ПВЗ, координаты радиоисточников оценивались как суточные параметры. Тропосферные параметры и параметры часов оценивались на каждый момент наблюдений. В результате обработки массива РСДБ-наблюдений были получены временные ряды суточных оценок координат прямого восхождения и склонения (α , δ) для 4939 радиоисточников.

Таблица 2

Эксперименты по программе Ru-A: были задействованы радиотелескопы в Обсерваториях «Бадарь» (Bd), «Зеленчукская» (Zc), «Светлое» (Sv), «Йебес» (Ys), «Шанхай» (Sh) и «Варквус» (Wa)

Дата проведения эксперимента	Список радиотелескопов
27 июня 2020	Bd-Sv-Zc-Sh-Yb
28 ноября 2020	Bd-Sv-Zc-Yb
26 декабря 2020	Bd-Sv-Zc-Sh-Yb
20 марта 2021	Bd-Sv-Zc-Sh
27 марта 2021	Bd-Sv-Zc-Sh-Wa
10 апреля 2021	Bd-Sv-Zc-Sh
28 августа 2021	Bd-Sv-Zc

Отбор объектов

С учетом ошибок наблюдений для каждого радиоисточника вычислялись СКО координат ψ_α и ψ_δ по формуле

$$\psi_x^2 = \frac{\sum_1^N p_{x_i} (x_i - \bar{x})^2}{\sum_1^N p_{x_i}},$$

где x_i — суточные оценки координат для i -го эксперимента (α, δ), N — количество точек во временном ряду для данного радиоисточника, $p_{x_i} \sim \frac{1}{\sigma_{x_i}^2}$ — веса для оценки x_i , \bar{x} — средневзвешенное значение

координат, σ_{x_i} — формальная ошибка к x_i . После этого вычислялось комбинированное СКО:

$$\psi = \sqrt{\psi_\alpha^2 \cos^2 \delta + \psi_\delta^2}. \quad (1)$$

Этот параметр описывается распределением Релея с параметром масштаба σ , который характеризует разброс точек вокруг средневзвешенного значения. По выборке из 4939 объектов оценка параметра $\sigma = 0.6 \pm 0.1$ (рис. 1). В данной работе к астрометрически нестабильным отнесены те объекты, у которых СКО превышало параметр масштаба в 3 раза, то есть $\psi \geq C_\psi = 3\sigma \approx 1.8$ мс дуги. Данный выбор позволяет ограничиться только теми объектами, которые находятся на «хвосте» распределения Релея и, соответственно, могут оказаться нестабильными (справа от вертикальной линии на рис. 1). Всего нами было выделено 715 объектов с $\psi \geq 1.8$ мс дуги.

Из предварительно отобранных 715 объектов только у 64 было обнаружено наличие хотя бы одного из трех выделенных признаков нестабильности:

1. «Отскакивающая» первая или последняя точка — аномальное отклонение первого или последнего значения временного ряда. Этот признак нестабильности отделен от характера нестабильности по типу «ступенька», потому что отскок одной точки может быть вызван наблюдательной ошибкой, но при этом нельзя исключать наличие разрыва первого рода (28 объектов).

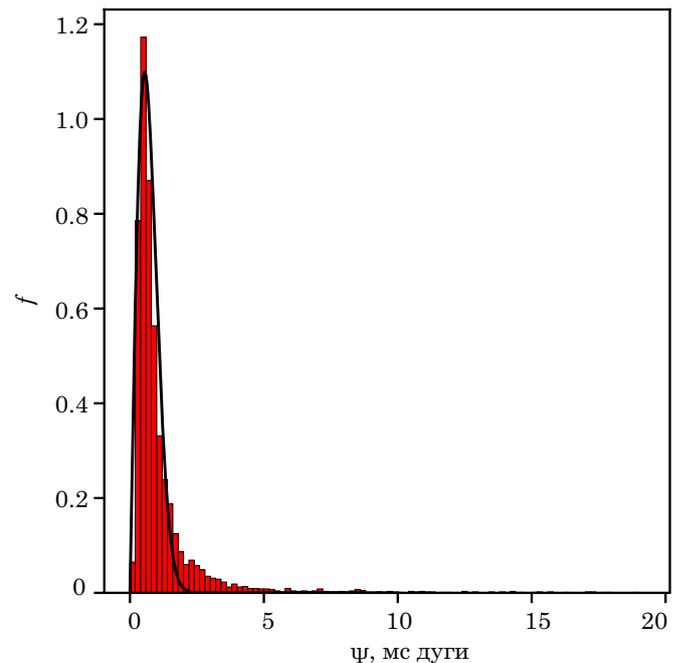


Рис. 1. Распределение ψ у объектов описывается распределением Релея с параметром масштаба $\sigma = 0.6 \pm 0.1$

2. «Ступенька» — разрыв первого рода в точном ряде координат объектов. При этом до и после разрыва должно быть как минимум 2 точки (27 объектов).

3. Необычно большое собственное движение, более-менее равномерное по всему интервалу наблюдений, и, вероятно, связанное со «сверхсветовым движением» джета наблюдаемого объекта (9 объектов).

У остальных 651 объектов большое СКО является следствием зашумленности временного ряда, связанной с ошибками наблюдений без каких-то выраженных аномалий.

«Отскакивающая» первая или последняя точка

В ряде случаев во временных рядах координат объектов наблюдается разрыв. В большинстве случаев отскакивающей является первая точка временного ряда, когда первое наблюдение радиосточника произошло задолго до всех остальных наблюдений. Типичным примером является объект 1518+046 (первое наблюдение проведено 1995 г., а остальные — в 2015–2019 гг.) (рис. 2а и 2б).

Такой разрыв может быть вызван ошибочным определением координат в первом или последнем эксперименте, особенно если это происходило еще в начале эры РСДБ, при недостаточном количестве наблюдений, и соответственно большой формальной ошибке. Кроме того, отскок одной точки временного ряда от всех остальных точек может быть вызван реальным изменением структуры объекта, смещением фазового центра из-за изме-

нения РСДБ-сети и т. д. Например, у радиосточника 1518+046 все наблюдения проводились на одной и той же сети VLBA (Gordon et al., 2016), поэтому изменение координат этого объекта из-за изменений в составе РСДБ-сети маловероятно, и отмеченный «скачок» в координатах радиосточника, скорее всего, связан с внезапным изменением структуры объекта. Разность положений радиосточника 1518+046 в каталогах ICRF3 и ICRF2 составляет -14 мс дуги по прямому восхождению и -23 мс дуги по склонению. Источник 1518+046 описан как компактный симметричный объект (CSO) с северной частью, состоящей из двух горячих точек, и хвостом/лепестком в южной части, удаленными друг от друга на 60 мс дуги по прямому восхождению и 120 мс дуги по склонению (Xiang et al., 2006), что значительно превышает разности между каталогами ICRF3 и ICRF2. Значит, в будущем возможны эволюция структуры объекта и, как следствие, большое изменение координат. Для подтверждения реальности большого «скачка» в координатах можно проводить проверку по радиокартам, как для объекта 1524–136, который будет обсуждаться позже.

Алгоритм выявления таких объектов осуществлялся на основе статистики ψ (формула 1). Для каждой точки ряда вычисляется функция $\psi_1[i]$ — ψ для всех точек с 1 по N , исключая i -ю. Если существенный вклад в ψ дает первая или последняя точка, то $\psi_1[1]$ или $\psi_1[N]$ будет минимально. Таким образом, необходимое условие $\psi_1[1] = \min \psi_1$ или $\psi_1[N] = \min \psi_1$.

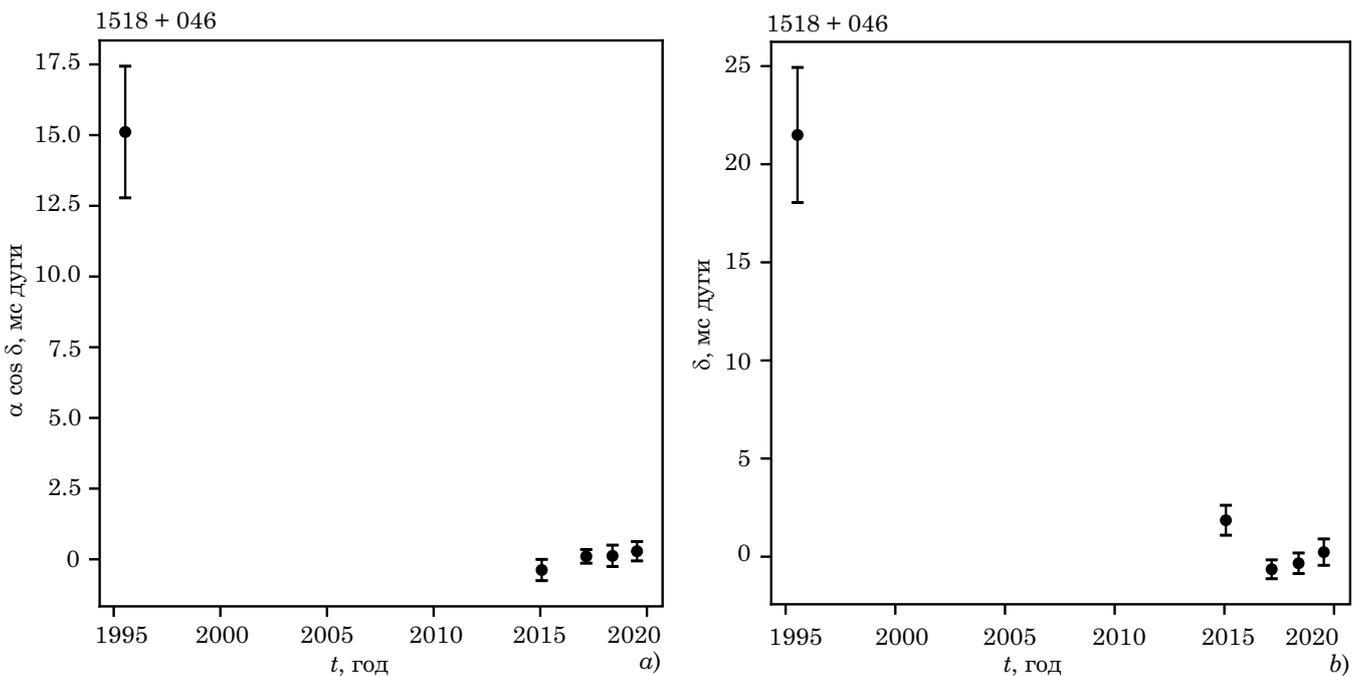


Рис. 2. Радиосточник 1518+046 показывает нестабильность по прямому восхождению на 9 ± 3 мс дуги (а) и по склонению на 23 ± 5 мс дуги (б)

Значимость разрыва проверяется по критерию 3σ (2 или 3 условие):

$$|\alpha_1 - \alpha_2| > 3\sqrt{\sigma_{\alpha_1}^2 + \sigma_{\alpha_2}^2} \quad (2)$$

$$|\delta_1 - \delta_2| > 3\sqrt{\sigma_{\delta_1}^2 + \sigma_{\delta_2}^2} . \quad (3)$$

«Ступенька»

В эту категорию входят 27 объектов с разрывом первого рода в рядах координат. Примером нестабильности по этому типу служит радиосточник 1328+254, у которого между 2016 и 2018 годами произошел разрыв координат с амплитудой примерно 80 мс дуги по прямому восхождению и 120 мс дуги по склонению. Визуально такой разрыв выглядит как ступенька по обоим компонентам (рис. 3а и 3б). Для таких объектов приблизительный момент скачка определяется методом непараметрической регрессии, реализованной функцией `estimateSingleCp` в библиотеке `BinSegBstrap` в программном пакете R ([McDaid, Pein, 2022](#)).

Пусть i — точка, в которой разрыв определяется функцией `estimateSingleCp`. Тогда, обозначив $j = i - 2, i - 1, i + 1, i + 2$, вычислим абсолютные отклонения по обоим координатам:

$$|\alpha_i - \alpha_j| > 3\sqrt{\sigma_{\alpha_i}^2 + \sigma_{\alpha_j}^2} , \quad (4)$$

$$|\delta_i - \delta_j| > 3\sqrt{\sigma_{\delta_i}^2 + \sigma_{\delta_j}^2} . \quad (5)$$

Обнаруженные отклонения проверяются на значимость по критерию 3σ . Если хотя бы для одного j выполняется условие (4) и/или (5), то счи-

тается, что разрыв между двумя частями временного ряда координат является статистически значимым (рис. 3а и 3б).

Другим примером объекта, отнесенного нами к этому же признаку нестабильности, является радиосточник 1524–136. Хотя разрыв в координатах произошел между первой и второй точкой временного ряда (и по этой причине 1524–136 должен был бы относиться к первому признаку), мы включили его сюда, потому что изменение координат 1524–136 подтверждается радиокартой и может считаться достоверным.

Этот объект является особенным, потому что разность оценок координат 1524–136 ([Gordon et al., 2016](#)) в каталогах ICRF2 и ICRF3 составляет 30 мс дуги по прямому восхождению и –100 мс дуги по склонению (рис. 4а и 4б). При этом координаты в каталоге ICRF2 были определены только по одному эксперименту, выполненному в 1997 г., а в каталоге ICRF3 — по трем экспериментам в 2014–2017 гг. Следует отметить, что эксперимент 1997 г. (первая точка на рис. 4а и 4б) при составлении каталога ICRF3 был отброшен по формальному признаку — из-за большого расхождения координат 1997 года с координатами 2014–2017 гг. Такое большое расхождение противоречило всему опыту, накопленному при составлении фундаментальных каталогов по данным РСДБ-наблюдений, поскольку типичные вариации координат для радиосточников, как правило, не превышают 3 мс дуги. Поэтому наблюдения 1524–136 от 1997 г. были проигнорированы как нестандартные. Однако радиокарта в X-полосе (рис. 5) ([Mantovani et al., 2002](#)) указывает на сложную структуру объекта,

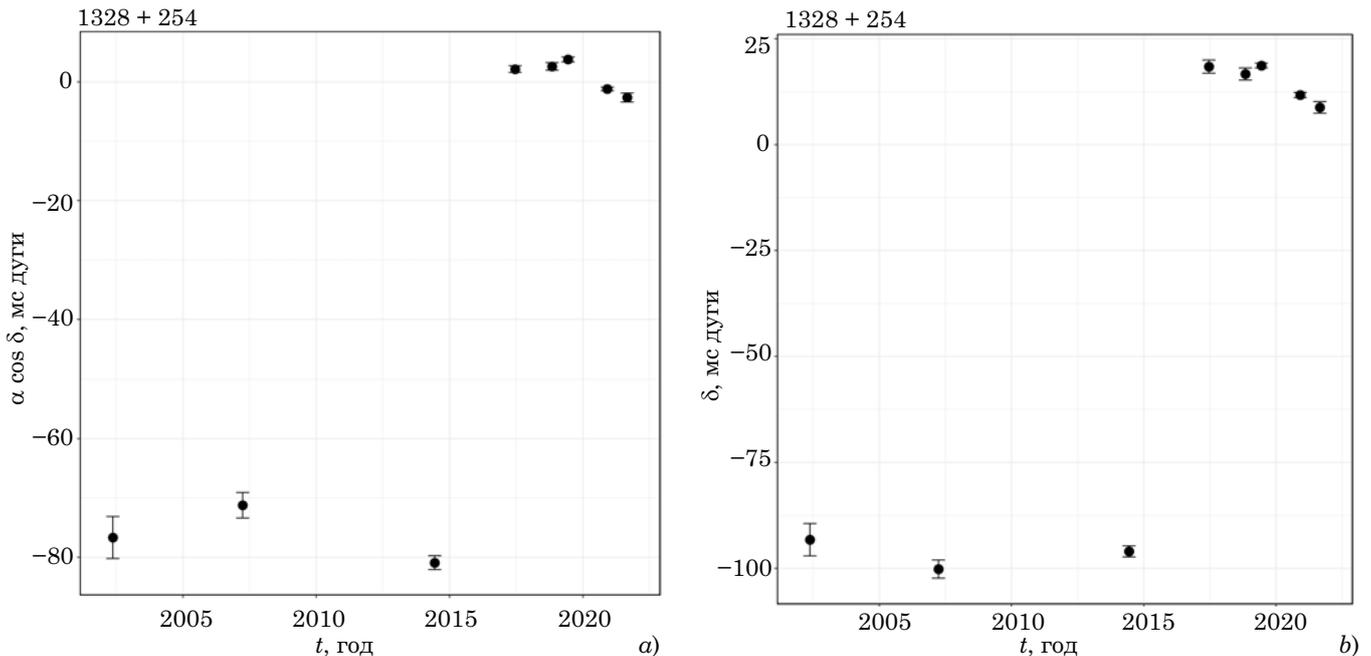


Рис. 3. Радиосточник 1328+254 показывает нестабильности по типу «ступеньки». Разрыв координат происходит между 2017–2018 гг. примерно на 80 мс дуги по прямому восхождению (а) и 112 мс дуги по склонению (б)

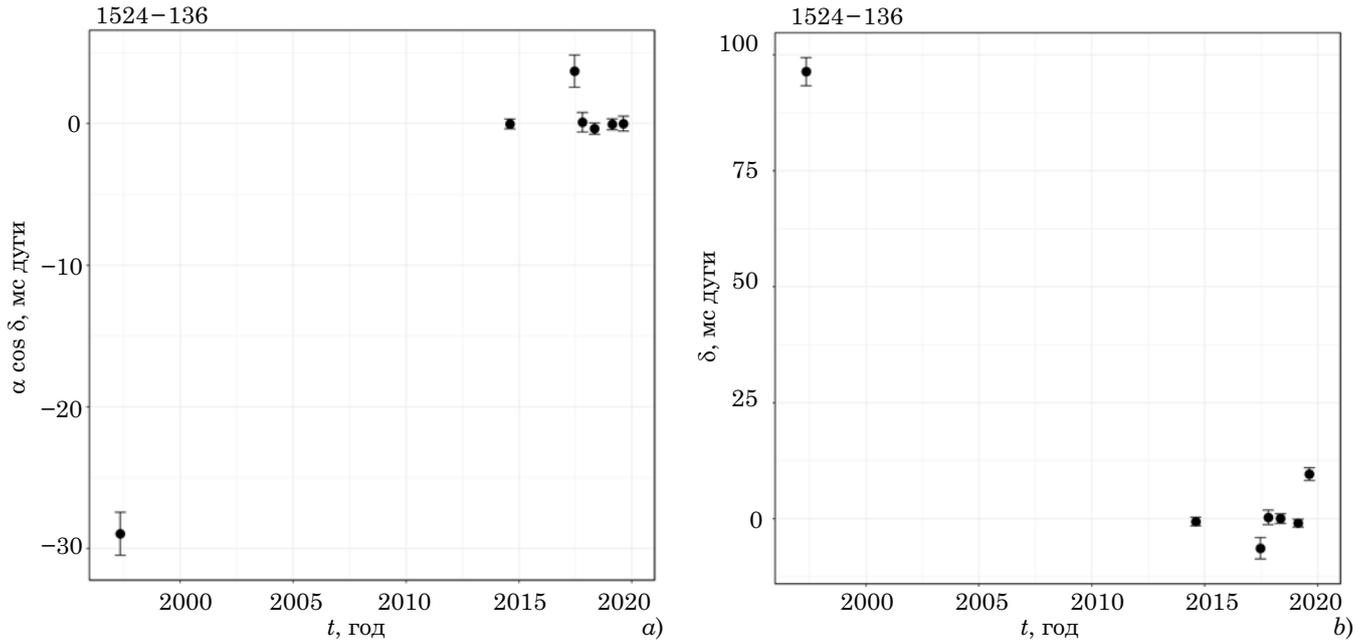


Рис. 4. Радиоисточник 1524–136. Временные ряды по координатам по прямому восхождению (а) и склонению (б) демонстрируют изменение координат на 30 и –100 мс дуги соответственно

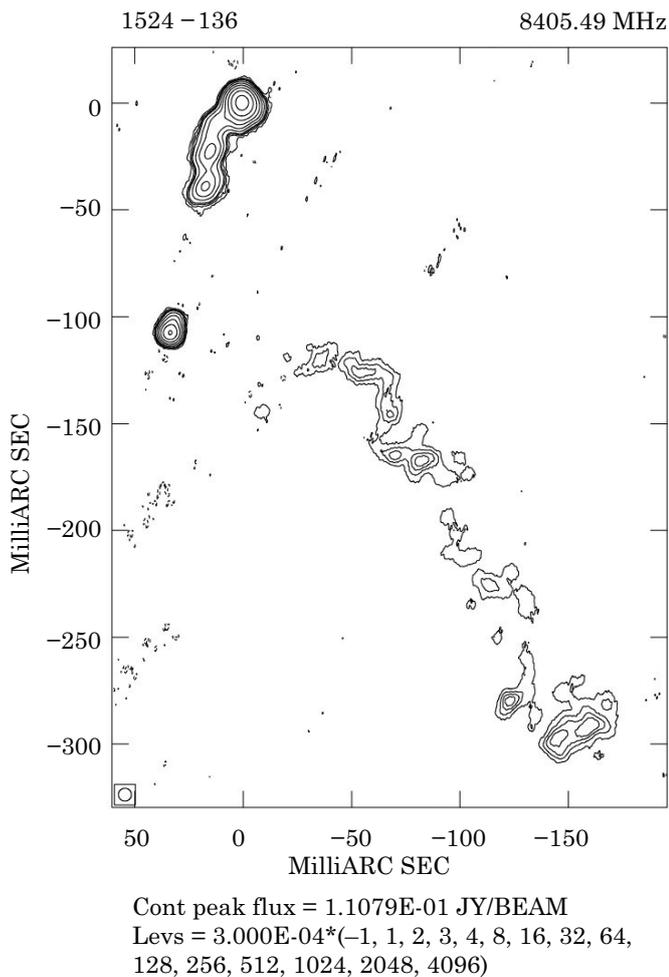


Рис. 5. РСДБ-изображение 1524–136 в X-диапазоне (8.4 ГГц) (Mantovani et al. 2002)

при этом выделяются центральное ядро, мощный джет, вытянутый в северном направлении, и контрджет, вытянутый в южном направлении. Разность координат между ядром и северным джетом соответствует расхождению между каталогами ICRF2 и ICRF3.

В 1997 г. плотность потока от северного джета намного превышала плотность потока от ядра и южного джета (Mantovani et al. 2002), поэтому координаты объекта в каталоге ICRF2 определялись положением северного джета (в самой верхней точке). Вероятно, позднее ситуация могла измениться и плотность потока от ядра стала больше плотности потока от северного джета. Поэтому координаты радиоисточника по данным 2014–2017 гг. в каталоге ICRF3 стали определяться по ядру объекта, сдвинувшись на 30 мс дуги и –100 мс дуги по прямому восхождению и склонению соответственно. Безусловно при составлении новых каталогов следует учитывать, что большие изменения в координатах вполне допустимы, и оценивать такие объекты как астрометрически нестабильные.

Большое собственное движение

Параллаксы внегалактических источников, так же как и собственные движения, вызванные физическими причинами, пренебрежимо малы из-за больших расстояний до объектов (менее 1 мкс дуги для параллаксов и менее 1 мкс дуги/год для собственных движений) (Kardashev, 1986). Именно поэтому для построения небесной системы координат, основанной на кинематическом принципе, используются наиболее удаленные объекты

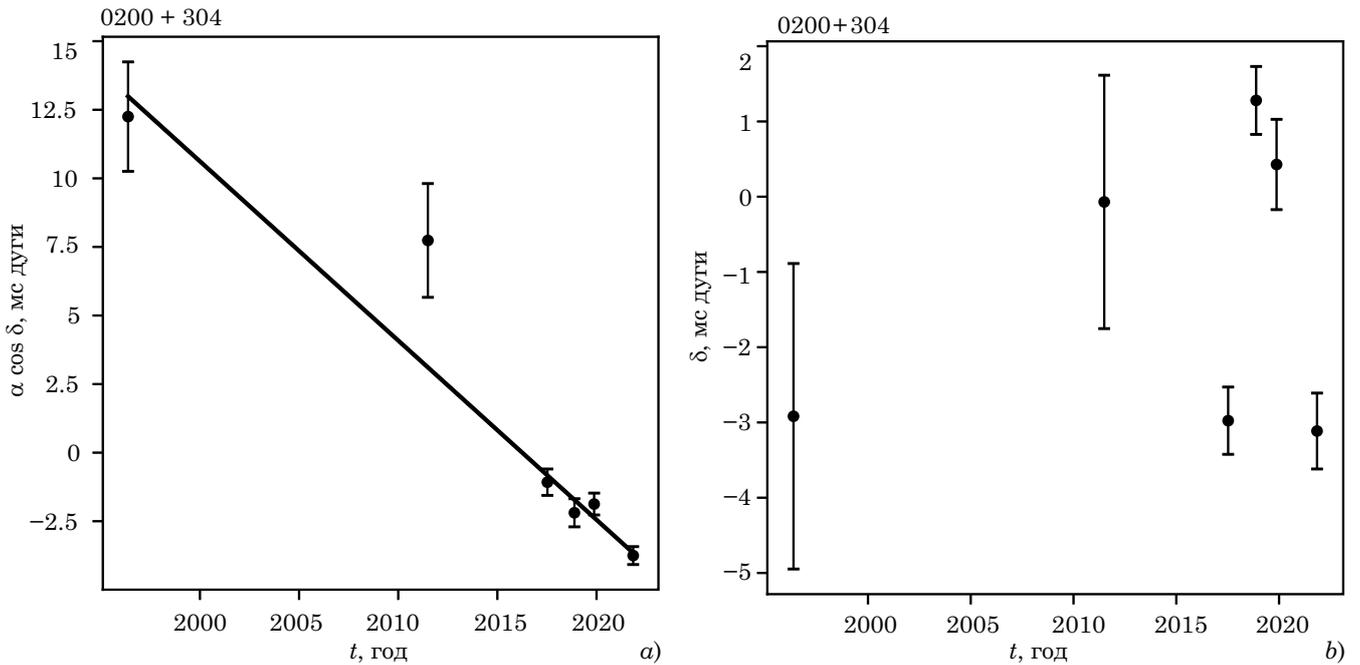


Рис. 6. Радиосточник 0200+304, $\mu_{\alpha \cos \delta} = -0.7 \pm 0.1$ мс дуги/год

во Вселенной. Тем не менее видимые собственные движения наблюдаются (с амплитудой до нескольких мс дуги/год), но эти движения, как правило, вызваны быстрым изменением структуры наблюдаемого объекта.

Мы выделили 9 радиосточников, у которых собственное движение, описываемое линейной мо-

делью от времени (хотя бы по одной координате), оказалось достаточно большим, что привело к накоплению большой разности в координатах объекта между первой и последней точкой на достаточно длинном интервале наблюдений. Мы считали, что линейная модель хорошо описывает

Таблица 3

Астрометрически нестабильные радиосточники

«Отскакивающая» первая или последняя точка		«Ступенька»		Большое собственное движение
0116+082	1516-240	0030+196	1449+139	0200+304
0158-041	1518+046	0116+319	1450+641	0350+177
0229+072	1529-373	0423-163	1524-136	0436-089
0252+818	1545-120	0622+147	1740-517	0656-062
0336+539	1645+174	0711+356	1825-055	0751+393
0517-027	1713-191	0732+237	1829+290	0932-281
0839+157	1751+050	1117-248	2105-212	1221+248
1042+178	1814+349	1117+146	2135-184	1540-077
1216-062	1832+687	1144+352	2203-188	2255+426
1306+660	1948-047	1305+770	2210+016	
1338+362	2154-183	1319-270	2250+023	
1503-091	2318-195	1328+254	3C48	
1506+591	2337-063	1334-179	СТА21	
1507-246	2358+406	1421+122		

наблюдательные данные, если уровень нулевой гипотезы об отсутствии линейной зависимости меньше 5 %, а коэффициент детерминации¹ R^2 (Dodge, Y., 2008, P. 88–91) больше 80 %.

Хорошим примером данной нестабильности является радиоисточник O200+304 (рис. 6a и 6b) с собственным движением по прямому восхождению $\mu_{\alpha\cos\delta} = -0.7 \pm 0.1$ мс дуги/год. За 25 лет полный сдвиг по прямому восхождению между 1996 г. и 2021 г. составил -17 ± 3 мс дуги. При этом по склонению никаких аномалий у этого объекта не наблюдается.

Результаты

По исследованию временных рядов радиоисточников выявлено 64 нестабильных (табл. 3). Предложена следующая классификация нестабильных объектов, учитывающая особенности временных рядов их координат:

- 1) «отскакивающая» первая или последняя точка;
- 2) «ступенька»;
- 3) собственное движение.

Заключение

Использование объектов с большим изменением координат из табл. 3 для некоторых экспериментов, например для определения поправок к всемирному времени (UT1–UTC), может привести к значительному ухудшению результатов. Эти нестабильные радиоисточники не следует включать в список опорных объектов следующего каталога ICRF, который используется для решения прикладных и фундаментальных задач.

Ряд объектов представляет астрофизический интерес:

- 1) компактные симметричные объекты (Compact Symmetric Object, CSO);
- 2) источники с быстрыми джетами.

В дальнейшем будет продолжаться работа по поиску нестабильных объектов и построению радиокарт для выяснения структуры радиоисточников.

Литература

Charlot P. Radio-source structure in astrometric and geodetic very long baseline interferometry // *The Astronomical Journal*. 1990. Vol. 99. P. 1309. doi 10.1086/115419.

Charlot P., Jacobs C., Gordon D., et al. The third realization of the International Celestial Reference Frame by very long baseline interferometry // *Astronomy & Astrophysics*. 2020. Vol. 644, Article Number A. 159. 28 p.

Dodge Y. The concise encyclopedia of statistics. New York: Springer New York, 2008. 612 p. P. 88–91.

Gordon D., Jacobs C., Beasley A., et al. Second epoch VLBA calibrator survey observations: VCS-II // *The Astronomical Journal*. 2016. Vol. 151. P. 154.

Kardashev N. S. Cosmological proper motion // *Soviet Astronomy*. 1986. Vol. 30. P. 501.

Kellermann K. I., Lister M. N., Homan D. C., et al. Sub-milliarcsecond imaging of quasars and active galactic nuclei. III. Kinematics of parsec-scale radio jets // *The Astrophysical Journal*. 2004. Vol. 609. P. 539563.

Mantovani F., Saikia D. J., Bondi M., et al. B1524–136: A CSS quasar with two-sided radio jets // *Astronomy and Astrophysics*. 2002. Vol. 389. P. L15–L19.

Marcaide J., Bartel N., Gorenstein M., et al. Quasar 4C39.25 is not contracting // *Nature*. 1985. Vol. 314. P. 424. URL: <https://doi.org/10.1038/314424a0> (дата обращения: 15.01.2023).

McDaid K., Pein F. Piecewise smooth regression by bootstrapped binary segmentation, 2022 [Электронный ресурс]. URL: <https://cran.r-project.org/web/packages/BinSegBstrap/vignettes/BinSegBstrap.pdf> (дата обращения: 15.01.2023).

Nothnagel A., Artz T., Behrend D., Malkin Z. International VLBI Service for Geodesy and Astrometry — delivering high-quality products and embarking on observations of the next generation // *Journal of Geodesy*. 2017. Vol. 91(7). P. 711–721.

Shuigina N., Ivanov D., Ipatov A., et al. Russian VLBI network “Quasar”. Current status and outlook // *Geodesy and Geodynamics*. 2019. Vol. 10(2). P. 150–156.

Titov O. A. Construction of a celestial coordinate reference frame from VLBI data // *Astronomy Reports*. 2004. Vol. 48. P. 941–948.

Titov O. A. Apparent proper motion of radio sources from geodetic VLBI data // *Astronomy Letters*. 2007. Vol. 33. P. 481–487.

Titov O., Frey S., Melnikov A., et al. Unprecedented change in the position of four radio sources // *MNRAS*. 2022. Vol. 512, Iss. 1. P. 874–883.

Xiang L., Reynolds C., Strom R. G., Dallacasa D. European VLBI network observations of fourteen GHz-peaked-spectrum radio sources at 5 GHz // *Astronomy and Astrophysics*. 2006. Vol. 454 (3). P. 729–740.

¹ Это доля дисперсии зависимой переменной, объясняемой линейной моделью, в данном линейном случае $R^2 = \frac{\sum_i^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_i^N (y_i - \bar{y})^2}$.