

ВНЕГАЛАКТИЧЕСКИЕ РАДИОИСТОЧНИКИ С БОЛЬШИМ ИЗМЕНЕНИЕМ ВИДИМЫХ КООРДИНАТ

© 2024 г. А. А. Осетрова^{1*}, О. А. Титов², А. Е. Мельников³

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

²Геосайнс Австралия, Канберра, Австралия

³Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург, Россия

Поступила в редакцию 02.12.2024 г.

После доработки 12.12.2024 г.; принята к публикации 12.12.2024 г.

Проведен анализ временных рядов координат 5468 радиоисточников, полученных по геодезическим РСДБ-наблюдениям в 1993–2024 гг. Выделены 49 объектов, координаты которых изменяются в пределах от 6 до 143 мс дуги. Выделено несколько типов астрометрической нестабильности, что, по-видимому, связано с разным характером астрофизических процессов в активных ядрах галактик. В некоторых случаях быстрое изменение координат происходит на сравнительно коротком интервале времени (1–3 года). Эти особенности необходимо учитывать при составлении следующего фундаментального астрометрического каталога ICRF.

Ключевые слова: РСДБ, собственные движения, ICRF, активные ядра галактик, внегалактические радиоисточники, IVS.

DOI: 10.31857/S0320010824110027, EDN: LTLKJX

ВВЕДЕНИЕ

Международная небесная система координат (ICRS) опирается на высокоточные координаты внегалактических радиоисточников, наблюдаемых методом радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой (РСДБ), в соответствии с резолюцией Международного Астрономического Союза (МАС) 1991 г. Последняя реализация ICRS — каталог ICRF3, принятый Генеральной Ассамблеей МАС в 2018 г., содержит координаты 4536 объектов (Шарло и др., 2020). Из них 303 радиоисточника являются опорными и определяют направление фундаментальных осей ICRS, откладываемых от барицентра Солнечной системы, с точностью до 30 микросекунд дуги (мкс дуги). Все внегалактические радиоисточники расположены на значительном удалении от земного наблюдателя (>1 Мпк), поэтому их годовые параллаксы находятся за пределами точности наблюдений (<1 мкс дуги), и соответственно ожидается, что видимые собственные движения, вызванные относительным движением объекта и земного наблюдателя, также пренебрежимо малы (<1 мкс дуги/год). Однако активные ядра галактик, как правило, имеют протяженную структуру (например, в форме компактного ядра и вытянутого джета), размер которой может достигать порядка нескольких десятков угловых минут в оптическом диапазоне длин волн. Взаимное расположение и яркость отдельных компонент могут быстро меняться из-за физических процессов, происходящих внутри активных ядер галактик. Результаты

корреляционной обработки данных наземного радиоинтерферометра на частоте 8.4 ГГц позволяют исследовать область неба размером около 3 секунд дуги (например, обычный набор радиотелескопов Европейской РСДБ сети со стандартными параметрами обработки данных: усреднение по времени 2 с и частоте 1 МГц соответственно¹). Таким образом, мы легко можем регистрировать изменение координат даже очень далекого радиоисточника на уровне 50–500 мс дуги. На рис. 1 в качестве примера приведены временные ряды оценок координат одного из часто наблюдаемых радиоисточников, 1101+384, с 1995 по 2024 г. Координаты 1101+384 не претерпели каких-либо заметных изменений за почти 30-летний период наблюдений, поэтому этот объект относится к категории астрометрически стабильных. Однако такие астрометрически стабильные объекты составляют менее половины от общего количества. В настоящей статье мы рассмотрим объекты, вариации координат которых, в отличие от 1101+384, могут быть значительными.

При составлении каталога ICRF3 использовались РСДБ-наблюдения по 2018 г. включительно, при этом не было отмечено объектов, для которых видимые изменения координат превышали бы 3 мс дуги. Аналогичная картина наблюдалась и ранее при составлении каталога ICRF2, когда в список нестабильных было выделено 39 объектов (Ма и др., 2009). Однако при обработке новых наблюдений, выполненных на сети VLBA (Гордон и др., 2016), было обнаружено,

*Электронный адрес: gelaosetrova@gmail.com

¹<https://planobs.jive.eu>

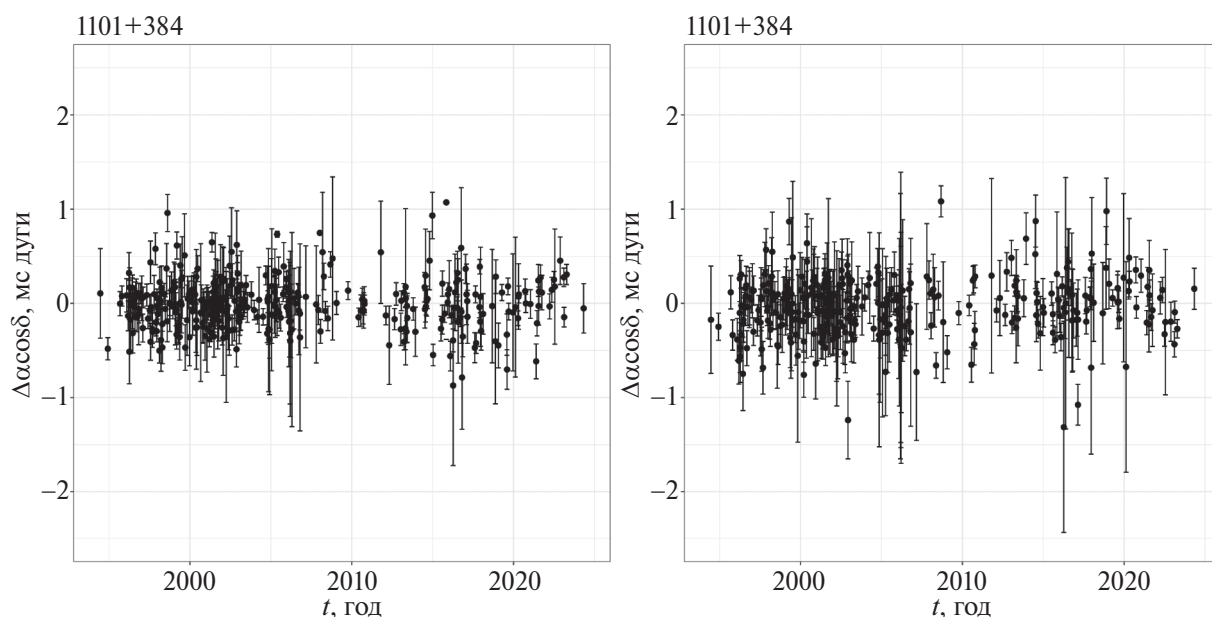


Рис. 1. Оценки поправок координат радиоисточника 1101+384 по прямому восхождению (слева) и по склонению (справа).

что четыре радиоисточника (3C48, 3C211, 1144+352, 1328+254) изменили астрометрические координаты в пределах от 20 до 130 мс дуги на интервале времени от 3 до 20 лет (Титов и др., 2022). Как будет показано ниже, с проведением новых наблюдений список астрометрически нестабильных радиоисточников продолжает расширяться.

Вариации видимых координат радиоисточников можно обнаружить в результате сравнения радио- и оптических каталогов. Орош и Фрей (2013) сравнили радио координаты каталога ICRF2 с оптическими координатами обзора Sloan Digital Sky Survey 9-го релиза (SDSS DR9) (Йорк и др., 2000), и обнаружили 51 объект, для которых разность координат больше 170 мс дуги. Однако часть объектов в этом списке, видимо, являются результатом неточной идентификации. Например, радиоисточник 0726–132 (J0729–1320) в статье Орош и Фрей (2013) был соотнесен со звездой Галактики, расположенной примерно в 0".5 от радиоисточника. Оптический квазар с красным смещением $z = 0.3435$ был отождествлен Титовым и др. (2013). Этот квазар имеет координаты, совпадающие с координатами радиоисточника, но в обзоре SDSS DR9 этот объект практически сливается с изображением более яркой звезды поля.

Макаров и др. (2017) привели список из 188 объектов с большими разностями координат “радио–оптика” (от 0.46 до 1000 мс дуги), полученный в результате анализа каталога ICRF2 (Фей и др., 2015) и оптического каталога Gaia DR1 (Gaia Collaboration, 2016). Часть объектов, по-видимому, попали в этот список также из-за ошибочного отождествления. Но, как будет показано ниже, для некоторых объектов большие разности “радио–оптика” связаны с переменностью координат в радиодиапазоне.

При кросс-индексации каталога рентгеновских источников СРГ/ePOЗИТА (Хамитов и др., 2022) и каталога квазаров LQAC-5 (Суше и др., 2002) с оптическим каталогом Gaia EDR3 сообщалось о существовании в Gaia EDR3 объектов с большим собственным движением и значимым положительным параллаксом. Однако Хамитов и др. (2023) указали, что для ряда таких объектов подобные аномалии объясняются не переменностью квазаров в оптическом диапазоне, а наличием транзитных событий на луче зрения в окрестности ядер АЯГ (вспышки Сверхновых, события приливного разрушения звезд в АЯГ с двойными ядрами, переменность сверхгигантов большой массы, наличие – ассоциаций на фоне АЯГ переменной яркости и др.).

Обнаружение столь экстремальной астрометрической нестабильности для объектов из каталога ICRF3 можно отнести к разряду неприятных сюрпризов. В данной ситуации это означает, что любой радиоисточник, имеющий протяженную структуру, может неожиданно сместиться относительно каталожного положения на 50–100 мс дуги, в то время как для определения параметров вращения Земли (ПВЗ) необходимо, чтобы координаты опорных объектов отклонялись от каталожных не более, чем 1 мс дуги. Если по каким-то причинам такой “нестабильный” объект окажется включен в наблюдательную программу для определения ПВЗ, то это создаст определенные трудности при обработке наблюдений. Примеры влияния объектов с нестабильными координатами на результаты оценивания других параметров приведены в работе (Титов, 2007). Поэтому список астрометрически нестабильных объектов требует постоянной проверки и обновления.

Например, много нестабильных объектов было об-

наружено при обработке большого массива РСДБ-данных, полученных уже после выхода ICRF3. Красна и др. (2023) опубликовали каталог VIE2022b-sx, добавив несколько миллионов новых наблюдений и около 1000 новых объектов за 2018–2022 гг. В результате сравнения этого каталога с ICRF3 было найдено 36 объектов, у которых разности “радио–оптика” превышают 10 мс дуги. Это означает, что новые наблюдения, проведенные между 2018 и 2022 гг., позволяют выявить много новых примеров астрометрической нестабильности. В некоторых случаях эта разность не является статистически значимой, так как не превышает утроенную ошибку. Тем не менее все эти 36 объектов могут впоследствии оказаться астрометрически нестабильными, поэтому их необходимо проверять при создании нового каталога ICRF.

Циган и др. (2024) разработали различные статистические критерии, чтобы исследовать реалистичную точность оценивания координат радиоисточников. По оценке этих авторов реалистичные ошибки координат, основанные на анализе временных рядов, намного больше, чем формальные ошибки координат для стандартной суточной серии. Это может означать, что точность координат в будущем каталоге ICRF будет определяться различными скрытыми причинами, в основном, временными изменениями протяженной структуры радиоисточников. Следует отметить, что Циган и др. (2024) рассматривают нестабильность радиоисточников в статистическом смысле, предполагая, что все изменения координат происходят более-менее плавно. Какие-то аномальные варианты астрометрической нестабильности при этом не рассматриваются.

Цель настоящей статьи заключается в выявлении именно таких объектов, демонстрирующих аномальную астрометрическую нестабильность, обусловленную различными астрофизическими процессами. Для этого были вычислены временные ряды координат радиоисточников с 1993 по 2024 г., разработаны критерии поиска объектов с большим изменением координат, найдено 49 нестабильных объектов и по ним выделено четыре типа астрометрической нестабильности.

ОБРАБОТКА И ДАННЫЕ

Для оценивания координат радиоисточников использовались все РСДБ-наблюдения, выполненные по программам IVS с 1993 г. (Нотнагель и др., 2004). Дополнительно в обработку были включены 25 экспериментов, проведенных в 2017–2021 гг. под общей координацией Института прикладной астрономии (ИПА РАН) (программа Ru-A), с участием радиотелескопов российского РСДБ-комплекса “Квазар-КВО” Бадары (Bd), Зеленчукская (Zc), Светлое (Sv) и радиотелескопов Йебес (Ys), Шанхай (Sh), Куньмин (Km), Хобарт (Ho), ХартРАО (Hh).

Временные ряды координат радиоисточников были получены в результате обработки 4515 24-часовых РСДБ-экспериментов методом наименьших квадратов с предварительной калибровкой тропосферы (Титов и др., 2024) в программном пакете OSSAM 6.3 (Титов и др., 2004). Параметры вращения Земли, координаты станций и координаты радиоисточников оценивались как суточные параметры для каждого 24-часового эксперимента. В результате были обработаны координаты 5468 радиоисточников. Для 5224 объектов, наблюдавшихся в трех и более экспериментах, были получены ряды суточных поправок $(\Delta\alpha_i \cos \delta, \Delta\delta_i)$ к координатам из опорного каталога, в качестве которого был выбран aus2024b (aus2024b.crf²).

Полная поправка к координатам на каждый момент t_i вычисляется по формуле $\Delta r_i = \sqrt{(\Delta\alpha_i \cos \delta)^2 + \Delta\delta_i^2} = \sqrt{\Delta\alpha_i^{*2} + \Delta\delta_i^2}$. Поскольку поправки $\Delta\alpha_i^*$ и $\Delta\delta_i$ коррелированы, то квадрат ошибки величины r_i вычисляется по следующей формуле:

$$\begin{aligned} \sigma_{\Delta r_i}^2 &= \left(\frac{\partial \Delta r_i}{\partial \Delta\alpha_i^*} \right)^2 \sigma_{\Delta\alpha_i^*}^2 + \left(\frac{\partial \Delta r_i}{\partial \Delta\delta_i} \right)^2 \sigma_{\Delta\delta_i}^2 + \\ &+ 2 \frac{\partial \Delta r_i}{\partial \Delta\alpha_i^*} \frac{\partial \Delta r_i}{\partial \Delta\delta_i} \text{cov}(\alpha_i^*, \delta_i) = \frac{\Delta\alpha_i^{*2}}{\Delta r_i^2} \sigma_{\Delta\alpha_i^*}^2 + \frac{\Delta\delta_i^2}{\Delta r_i^2} \sigma_{\Delta\delta_i}^2 + \\ &+ 2 \frac{\Delta\alpha_i^*}{\Delta r_i} \frac{\Delta\delta_i}{\Delta r_i} \text{corr}(\Delta\alpha_i^*, \Delta\delta_i) \sigma_{\Delta\alpha_i^*} \sigma_{\Delta\delta_i}. \end{aligned} \quad (1)$$

Астрометрическая нестабильность временного ряда каждого радиоисточника характеризуется взвешенным среднеквадратическим отклонением (СКО) ψ (формула 2):

$$\psi = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_{\Delta r_i}^2} (\Delta r_i - \bar{\Delta r})^2}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_{\Delta r_i}^2}}}. \quad (2)$$

При вычислении статистики ψ учитывается формальная ошибка оценок координат для каждой сессии. Грубые значения координат входят в статистику с меньшим весом, поэтому оценки координат с большей формальной ошибкой не будут давать заметный вклад в ψ .

Статистика ψ была применена для выявления радиоисточников с подозрением на астрометрическую нестабильность. При случайном характере отклонения суточных координат от среднего такая статистика характеризует уровень разброса точек. Если какой-то объект имеет внутреннюю структуру с высокой степенью переменности как по времени, так и по амплитуде, то значение ψ для такого объекта будет гораздо больше, чем для объекта со сравнительно незначительными изменениями координат.

На рис. 2а представлена гистограмма распределения ψ в интервале $[0, \sigma_\psi]$, где σ_ψ — среднеквадратическое отклонение, вычисленное по всей выборке ψ .

²<https://cdsis.nasa.gov/archive/vlbi/ivsproducts/crf/>

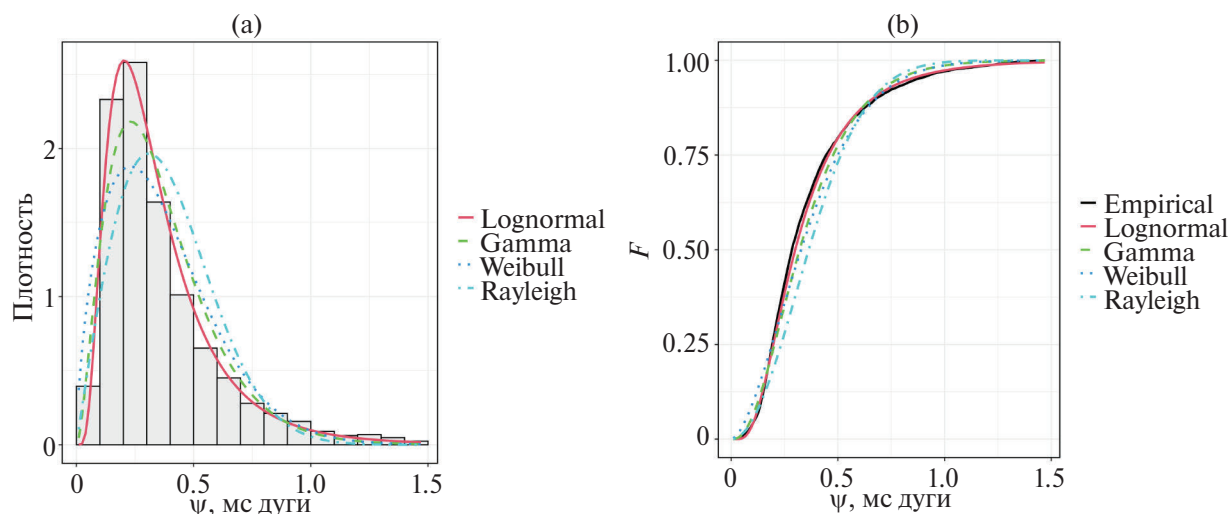


Рис. 2. Гистограмма распределения статистики ψ (а), график сравнения эмпирической и теоретической функции распределения (б).

Такой выбор интервала позволяет минимизировать влияние экстремально нестабильных радиоисточников на правый хвост распределения, что делает возможным более детальное исследование функции распределения ψ для остальных радиоисточников и определение порога нестабильности. Максимальное значение величины ψ составляет 52.59 мс дуги и не попадает в отображенный на графике диапазон. Далее мы применили несколько теоретических распределений, чтобы аппроксимировать наблюдаемое распределение точек на рис. 2а: 1) логнормальное; 2) гамма-распределение; 3) Вейбулла и 4) Рэлея, с использованием библиотеки `fitdistrplus` в языке программирования R (Делиньетт-Мюллер, Дутанг, 2015). На рис. 2б представлено сопоставление четырех кумулятивных функций этих распределений с эмпирической зависимостью. Наибольшее соответствие наблюдениям демонстрирует кумулятивная функция логнормального распределения, поэтому для дальнейшего анализа было выбрано логнормальное распределение.

Если случайная величина ψ на данном интервале подчиняется логнормальному распределению $\psi \sim \text{LogNormal}(\mu, \sigma^2)$, это означает, что $\ln(\psi)$ имеет нормальное распределение: $\ln(\psi) \sim N(\mu, \sigma^2)$.

В качестве порога нестабильности C_ψ выбран квантиль 97.72% логнормального распределения величины ψ . Натуральный логарифм этого порога примерно соответствует значению $\mu + 2\sigma$ для случайной величины $\ln(\psi)$. Таким образом, порог нестабильности задается выражением

$$C_\psi = Q_{0.9772}(\psi) = e^{Q_{0.9772}(N(\mu, \sigma^2))} = 1.0 \text{ мс дуги}.$$

Каждый объект, для которого выполнялось условие $\psi > C_\psi$, считался “подозрительным” на нестабильность. Всего в эту группу попало 320 объектов.

Следующим важным фактором является отличие вариаций координат от простого случайного процес-

са. Действительно, в большинстве случаев никакого аномального поведения в рядах координат не наблюдается, и в этом случае значение ψ просто характеризует большой разброс оценок в случайном отношении. Однако примерно для 15% объектов вариации рядов координат ведут себя аномально, и именно эти объекты представляют особенный интерес. При этом визуально выделяются четыре типа астрометрической нестабильности: 1) “ступенька”; 2) “отскакивающая” первая или последняя точка; 3) “пик”; 4) собственное движение.

Из 320 объектов со значениями $\psi > 1.0$ мс дуги были отобраны 49 объектов, у которых наблюдаются вышеперечисленные аномалии в пределах от 6 до 143 мс дуги. В следующем разделе мы подробнее рассматриваем все эти четыре типа астрометрической нестабильности.

ЧЕТЫРЕ ТИПА АСТРОМЕТРИЧЕСКОЙ НЕСТАБИЛЬНОСТИ

“Ступенька” и “пик”

“Ступенька”. Традиционно считается, что ожидаемые изменения координат радиоисточников в течение длительных временных интервалов находятся на уровне нескольких миллисекунд дуги (Ма и др., 2009). Статистические критерии, применяемые в различных программных комплексах для обработки РСДБ-наблюдений, разрабатывались с учетом данного предположения. Поэтому, когда оказалось, что объект 1328+254 изменил свое положение на 150 мс дуги между 2014 и 2017 гг. (рис. 3), то это стало неожиданной аномалией, так как такой сдвиг координат на таком коротком интервале времени ранее никогда не отмечался (Титов и др., 2022). Графически вариации координат на рис. 3 имеют ступенчатый вид по обеим компонентам, поэтому данный вид астрометрической

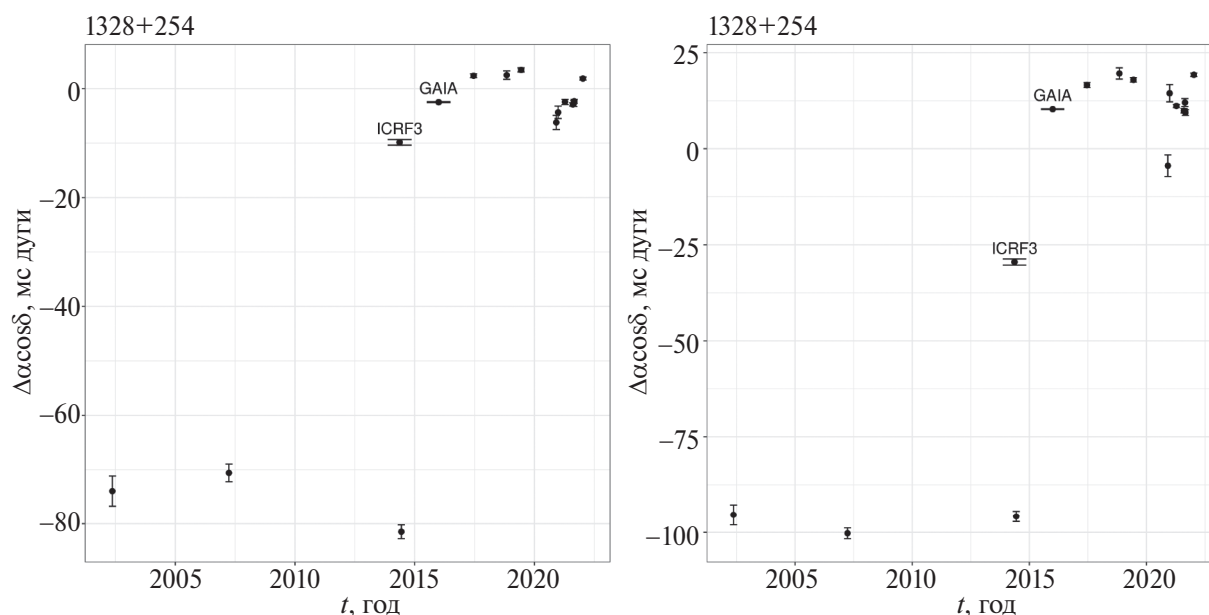


Рис. 3. “Ступенька”: Временные ряды координат радиосточника 1328+254 по прямому восхождению (слева) и склонению (справа). Максимальная разность между двумя положениями объекта составляет 84.0 ± 1.5 мс дуги по прямому восхождению и 115.4 ± 2.0 мс дуги по склонению. Координаты в каталоге ICRF3 определены по трем точкам до “скачка” в координатах и одной после “скачка” (средний момент для этих четырех сессий $T = 2014.9$), поэтому не совпадают с положением объекта ни до, ни после “скачка”. По той же причине большая разность Gaia DR3 – ICRF3 является только признаком нестабильности радиокоординат объекта, которую, однако, нельзя использовать для количественной оценки.

нестабильности условно назван “ступенькой”. К сожалению, между 9 июня 2014 г. и 15 июля 2017 г. этот радиосточник не наблюдался. Если предположить, что процесс изменения координат проходил между этими двумя датами с одним и тем же темпом, то можно вычислить нижний предел на амплитуду собственного движения, которая составляет в таком случае примерно 50 мс/год, хотя, возможно, процесс шел гораздо быстрее. В литературе имеется лишь карта объекта 1328+254 на 5 ГГц (рис. 4а). Хотя и радиокоординаты получены на другой частоте 8.4 ГГц, эту карту можно использовать для демонстрации. Объект состоит из двух компонент: компактной северо-восточной, соответствующей положению объекта после скачка, и протяженной юго-западной, доминирующей до разрыва в координатах.

Прецедент 1328+254 заставил целенаправленно заниматься поиском подобных объектов, у которых изменение координат происходило скачкообразно. Таких объектов оказалось много, при этом в ряде случаев такой “скачок” в рядах координат отмечался лишь для одной точки временного ряда (первой или последней). Поэтому мы разделили все объекты на две группы:

1. К первой группе относятся радиосточники, в рядах координат которых имеются как минимум две точки до и после скачка. Это значительно снижает вероятность ложной идентификации из-за случайных ошибок. Для таких объектов график

изменений координат имеет ступенчатый вид как на рис. 3. Соответственно, объект 1328+254 относится именно к этой группе.

2. Во вторую группу собраны объекты, для которых “отскок” наблюдается только для одной 24-часовой сессии. Такая аномалия представляется недостаточно надежной, так как наблюдаемый “отскок” может быть вызван ошибкой обработки, изменением конфигурации РСДБ-сети или действительным физическим изменением положения. Для подтверждения реальности сдвига координат требуется дополнительная проверка. Например, анализ изменений радиокарты объекта позволит выявить появление новых компонент (или значительное изменение соотношения яркости существующих компонент). В табл. 1 включены 16 объектов такого типа, для которых количество наблюдений в таком эксперименте больше 10.

Следует отметить, что координаты квазара 1328+254 (рис. 3) в каталоге ICRF3 представляют собой некоторую комбинацию координат до и после “скачка”, включая три эксперимента до 2014 г. (02MAY14XV, 07MAR27XA, 14JUN09XC) и один эксперимент в 2017 г. (17JUN15XC). Это наглядно представлено на рис. 3, где координаты объекта 1328+254 из каталога ICRF3 располагаются между двумя группами точек. Оптические координаты 1328+254 из каталога Gaia DR3 с эталонной эпохой $T = 2016.0$ находятся ближе

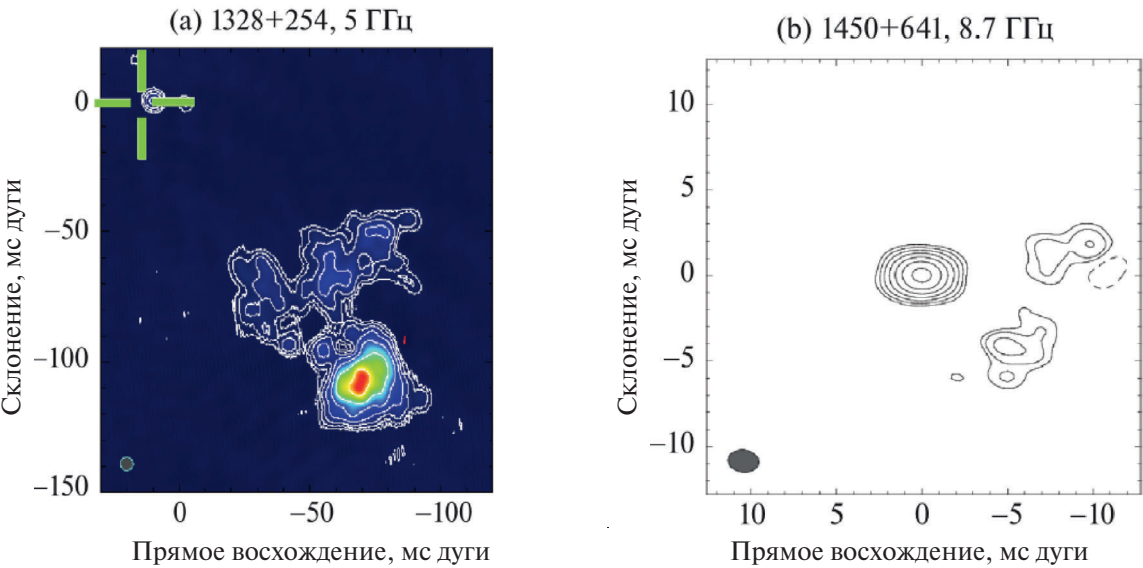


Рис. 4. (а) – Карта радиоисточника 1328+254 частоте 5 ГГц из работы (Фрей и др., 2024). Зеленым крестом на карте 1328+254 показано положение в каталоге Gaia DR3. (b) – Карта радиоисточника 1450+641 на частоте 8.7 ГГц за 2017 г., построенная по данным из базы изображений Astrogéo.

Таблица 1. Список нестабильных радиоисточников с “отскакивающей” первой или последней точкой

Объект	RA (ICRF3) hh mm ss	DE (ICRF3) ° ' "	Эксперимент		Разность по	
			α	δ	$\Delta\alpha^*$ мс дуги	$\Delta\delta$ мс дуги
0022–423	0 24 42.99	–42 2 3.95	22NOV11XC	22NOV11XC	4.8 ± 0.6	31.2 ± 2.4
0030+196	0 32 38.34	19 53 53.77	23FEB06XU	23FEB06XU	19.4 ± 5.3	26.5 ± 5.8
0116+082	1 19 1.27	8 29 54.70	02MAY14XV	02MAY14XV	-2.2 ± 0.5	10.2 ± 1.0
0229+072	2 32 4.80	7 26 5.49	21NOV04XC	21NOV04XC	2.5 ± 0.3	-4.9 ± 0.7
0336+539	3 40 6.49	54 5 38.78		13JAN09XA		7.2 ± 0.9
0402+379	4 5 49.26	38 3 32.23	96JUN07XV		5.7 ± 0.7	
1216–062 ^{aus}	12 18 36.18	–6 31 16.61	22AUG25XC		9.2 ± 2.2	
1306+660 ^{1,2}	13 8 21.96	65 44 15.18	17MAY27XC	17MAY27XC	-18.7 ± 5.4	-22.1 ± 6.9
1506+591 ^{aus}	15 7 47.39	58 57 27.65	22DEC12XC	22DEC12XC	-4.4 ± 1.1	-8.7 ± 1.1
1518+046	15 21 14.42	4 30 21.64	95JUL15XV	95JUL15XV	-14.6 ± 2	-23.2 ± 2.9
1544+820	15 40 15.88	81 55 5.79	22AUG25XC		-9.2 ± 2	
1645+174	16 47 41.84	17 20 11.86	07AUG01XA	07AUG01XA	-3.7 ± 1.2	15.8 ± 1.9
1755+626 ¹	17 55 48.44	62 36 44.19	17SEP26XC	17SEP26XC	-54.1 ± 3.9	-87.3 ± 2.8
1814+349	18 16 23.90	34 57 45.75	21AUG14XC		8.4 ± 2.7	
1943+546	19 44 31.51	54 48 7.06	94AUG12XV		-6.9 ± 0.7	
2311–452	23 14 9.38	–44 55 49.24		22MAY08XC		-8.5 ± 0.9

Примечание. ¹ Объекты, у которых разность координат между каталогами ICRF3 и VIE2022b превышает 10 мс дуги (Красна и др., 2023).

² Объект из списка наиболее нестабильных объектов (Циган и др., 2024).

^{aus} Новый объект, для которого приведены координаты из каталога aus2024b.

1-й столбец – название радиоисточника; 2-й и 3-й столбцы – прямое восхождение и склонение из каталога ICRF3.

4-й и 5-й столбцы – эксперимент с “отскакивающей” точкой, по прямому восхождению и склонению соответственно. 6-й и 7-й столбцы – разность между двумя удаленными положениями объекта в моменты времени t_2 и t_1 ($t_2 > t_1$) по прямому восхождению и склонению.

к радиокоординатам 1328+254 после 2017 г., поэтому большая разность между радио- и оптическими координатами этого объекта определяется тремя положениями до 2014 г. Расхождение между оптическими координатами 1328+254 и радиокоординатами после 2017 г. составляет всего несколько миллисекунд дуги (Титов и др., 2020).

“Пик”. Также нами была выделена группа радиоисточников, изменение координат которых весьма необычно. На каком-то интервале времени положение объекта имеет заметное собственное движение, но при достижении максимального отклонения координаты возвращаются к своим прежним значениям. Графически временной ряд координат такого объекта выглядит как “пик”, направленный вверх или вниз, при этом “пик” формируется несколькими точками. Некоторые из этих объектов можно было бы отнести и к категории нестабильных по “собственному движению” на некотором интервале времени, однако они выделены в отдельную группу, потому что изменение координат происходит сравнительно быстро; и, скорее всего, физический процесс, приводящий к такому изменению координат, не является продолжительным.

В качестве примера можно привести радиоисточник 1450+641 (рис. 5). На графиках вариаций координат 1450+641 его прямое восхождение в 2018 г. начало медленно изменяться. Этот процесс продолжался в течение трех лет, и в 2021 г. смещение достигло максимальной амплитуды — около 25 мс дуги. Неожиданно, через 14 дней после достижения максимального отклонения положение радиоисточника источ-

ника вернулось к исходным значениям (близким к координатам каталога ICRF3), сформировав направленный вниз “пик” на левом графике (рис. 5). При этом никаких изменений по склонению не наблюдается. Нами была построена радиокарта этого объекта в X-диапазоне (рис. 4b) с использованием алгоритмов самокалибровки в пакете difmap (Шепхерд, 2017). Откалиброванные данные были взяты из базы данных Astrogéo³. Структура радиоисточника ориентирована и вытянута в направлении восток-запад. Вероятно, в 2018–2021 гг. яркость западной компоненты постепенно увеличивалась относительно восточной, а в 2021 г. процесс пошел в обратную сторону с гораздо более высокими темпами. Так как наблюдаемый “пик” был сформирован тремя точками, такую аномалию можно считать достоверной, но столь быстрая эволюция координат этого объекта по прямому восхождению требует объяснения.

Для поиска объектов с нестабильностью типа “ступенька” и “пик” использовался один и тот же алгоритм, приведенный ниже; дальнейшая идентификация производилась визуальным методом.

Предположим, что временной ряд координат какого-то объекта состоит из N точек ($i = 1, 2, \dots, N$). Выбирается j -я точка, и весь ряд разбивается на три выборки, в первую входят все точки с номерами $i \neq j$, во вторую — точки с номерами ($i = 1, 2, \dots, j$), в третью — точки с номерами ($i = j, j + 1, j + 2, \dots, N$). По компонентам ($\Delta\alpha_i^*, \Delta\delta_i$) для трех выборок точек по формуле (2) вычисляются статистики $\psi_1(j)$, $\psi_2(j)$ и $\psi_3(j)$ соответственно.

³<http://astrogéo.org/>

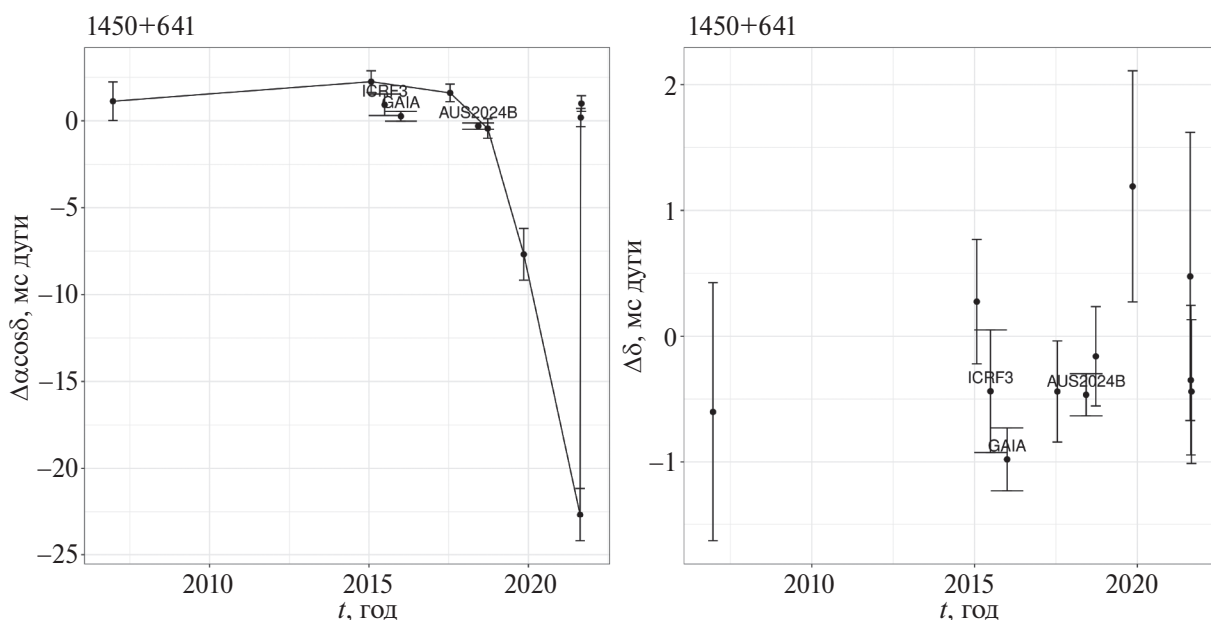


Рис. 5. “Пик”: Временные ряды координат радиоисточника 1450+641 по прямому восхождению (слева) и склонению (справа). Максимальное отклонение между конечной и начальной точкой “пика” по скорректированному прямому восхождению составляет -24.9 ± 1.6 мс дуги.

Если разрыв произошел в j -й точке временного ряда, то в статистику $\psi_2(j)$ войдут $j - 1$ точка до разрыва и аномальная точка j , а в статистику $\psi_3(j)$ — все точки после разрыва. В этом случае будет выполняться неравенство $\psi_2(j) > \psi_3(j)$. Соответственно, для значений $\psi_2(j-1)$ и $\psi_3(j-1)$ ситуация будет обратная. Вычисляя значения $\psi_2(j)$ и $\psi_3(j)$ по всем точкам можно установить, между какими из них произошел разрыв координат. После этого остается только проверить значимость разрыва или пика по критерию 3σ :

$$\Delta\alpha^* = |\Delta\alpha_i \cos(\delta) - \Delta\alpha_j \cos(\delta)| \geq 3\sqrt{(\sigma_{\Delta\alpha_i} \cos \delta)^2 + (\sigma_{\Delta\alpha_j} \cos \delta)^2}, \quad (3)$$

$$\Delta\delta = |\Delta\delta_i - \Delta\delta_j| \geq 3\sqrt{\sigma_{\Delta\delta_i}^2 + \sigma_{\Delta\delta_j}^2}, \quad (4)$$

где $i = 1, 2, \dots, j-1, j+1, \dots, N$. Разрыв является статистически значимым, если одно из приведенных выше неравенств (3) и (4) выполняется хотя бы для одной точки.

Статистика ψ имеет смысл СКО, поэтому аномальный “отскок” одной из точек временного ряда будет доминировать в этой статистике. Удаление этой аномальной точки значительно уменьшит значение $\psi_1(j)$. Поэтому это свойство используется для поиска объектов с “отскакивающей” первой или последней точкой. Для “отскакивающей” первой точки требуется выполнение условий $\psi_2(2) > \psi_3(2)$ и $\psi_1(1) = \min(\psi_1)$, для “отскакивающей” последней точки — $\psi_2(N) > \psi_3(N)$, $\psi_1(N) = \min(\psi_1)$. Статистическая значимость разрыва в координатах проверяется также по формулам (3) и (4).

Радиоисточники с признаками нестабильности по критериям “ступенька” и “пик” приведены в табл. 2. В столбцах 5 и 6 этой таблицы приведены разности координат, превышающие утроенную ошибку, по прямому восхождению и склонению соответственно. Самые большие изменения координат, превышающие по модулю 50 мс дуги, обнаружены у шести радиоисточников — 3С48, 0350+177, 1050+056, 1328+254, 1524–136, 1740–517.

“Собственное движение”

“Собственное движение” — это линейная или квадратичная зависимость координат от времени, равномерная на всем интервале наблюдений, приводящая к значимому изменению в координатах и удовлетворяющая трем условиям:

1. Собственное движение статистически значимо: оценка амплитуды превышает утроенную ошибку (критерий 3σ).
2. Модуль разности между первой или последней точками, вычисленный по формулам (3) и (4), превышает утроенную ошибку.

3. Коэффициент детерминации R^2 больше 80%.

R^2 отражает насколько хорошо данная регрессионная модель объясняет наблюдательные данные. Для функции $y(x)$ равенство $R^2 = 100\%$ означает, что все изменения зависимой переменной y вокруг среднего значения полностью определяются независимой переменной x (в нашем случае это момент времени). При $R^2 = 0\%$ переменная y никак не зависит от переменной x . На практике регрессионная модель обычно считается достаточно хорошей, если выполняется условие $R^2 \geq 80\%$, и, как правило, R^2 никогда не достигает 100%.

Для случая взвешенной регрессии (с учетом индивидуальных ошибок) параметр R^2 вычисляется по формуле:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum w_{y_i}(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum w_{y_i}(y_i - \frac{1}{\sum w_{y_i}} \sum y_i w_{y_i})^2},$$

где y_i — наблюдаемое значение, \hat{y}_i — значение, полученное из взвешенного МНК, w_{y_i} — вес для наблюдения y_i .

В качестве переменной y_i рассматриваются поправки к координатам по прямому восхождению ($\Delta\alpha_i \cos \delta$) и склонению ($\Delta\delta_i$). При этом веса пропорциональны квадрату ошибки: $w_{\Delta\alpha_i} \sim 1/\sigma_{\Delta\alpha_i}^2$, $w_{\Delta\delta_i} \sim 1/\sigma_{\Delta\delta_i}^2$.

В качестве примера мы выбрали радиоисточник 0711+356, для которого было обнаружено большое квадратичное собственное движение, статистически значимое по обоим компонентам (рис. 6). Собственное движение этого объекта (см. табл. 4) описывается следующими формулами: $\Delta\alpha^* \sim (0.01 \pm 0.00)t^2 + (0.10 \pm 0.03)t$, $\Delta\delta \sim (-0.03 \pm 0.01)t^2 + (-0.33 \pm 0.05)t$, где t — момент времени, а амплитуды и их ошибки приведены в миллисекундах дуги.

Радиоисточник 0711+356 входит в список объектов с большим расхождением между радио- и оптическими координатами Gaia DR1 – ICRF2, равным 31.03 мс дуги (Макаров и др., 2017). Примерно такое же расхождение (31.24 мс) заявлено в статье (Петров, Ковалев, 2017) на сходном наблюдательном материале. Однако для обновленных каталогов разность Gaia DR3 — ICRF3 получается намного меньшей (4.17 мс дуги) (Ковалев и др., 2020). Такая большая разность объясняется большим различием координат для этого объекта в каталогах Gaia DR1 и Gaia DR3 (Gaia Collaboration, 2023). Сравнение координат в различных каталогах приведено в табл. 3.

Как показано на рис. 6 и в табл. 3, средние координаты для радиоисточника 0711+356 в 2015–2016 гг., полученные по решению aus2024b (т.е. близкие к эталонной эпохе наблюдений Gaia DR3 (2016 г.), практически не отличаются от оптических. Разности по

Таблица 2. Список нестабильных радиоисточников с типом нестабильности “ступенька” или “пик”

Объект	Тип нестабильности	RA (ICRF3) hh mm ss	DE (ICRF3) ° ' "	Разность по	
				$\Delta\alpha^*$ мс дуги	$\Delta\delta$ мс дуги
0350+177 ^{1,2}	S	3 52 52.92	17 54 36.73	-16.3 ± 1.3	84.9 ± 1.9
0622+147	P	6 25 45.92	14 40 19.74		-8.0 ± 0.8
0732+237	P	7 35 59.92	23 41 2.87	8.5 ± 1.3	6.2 ± 1.2
0932–281 ¹	P	9 35 11.50	–28 20 31.53	-29.0 ± 3.4	-41.7 ± 9.7
0958+559 ^{aus}	S	10 1 57.80	55 40 47.25	-25.2 ± 0.9	20.7 ± 1.0
1050+056 ^{aus}	S	10 52 39.17	5 24 56.43	-77.8 ± 3.4	28.6 ± 3.7
1117+146	P	11 20 27.81	14 20 54.97	-7.2 ± 1.1	26.9 ± 1.9
1305+770	S	13 7 5.25	76 49 18.17	-11.0 ± 1.4	6.0 ± 1.5
1319+270	P	13 22 14.97	26 45 46.28	11.0 ± 3.2	
1328+254 ^{1,2,3}	S	13 30 37.70	25 9 10.94	84.0 ± 1.5	115.4 ± 2.0
1334–179 ^{aus}	P	13 37 37.55	–18 11 40.94	19.0 ± 1.2	-21.1 ± 2.7
1421+122 ³	P	14 23 30.10	11 59 51.25	-15.6 ± 2.2	7.4 ± 1.7
1450+641	P	14 51 57.36	63 57 19.20	-24.9 ± 1.6	
1503–091	P	15 6 3.03	–9 19 12.06	-12.4 ± 1.1	
1524–136 ³	S	15 26 59.44	–13 51 0.26	31.0 ± 1.3	-98.5 ± 2.3
1740–517	S	17 44 25.45	–51 44 43.74	-23.4 ± 1.6	-45.3 ± 1.6
1829+290	P	18 31 14.86	29 7 10.29	14.8 ± 2.1	
2105–212 ¹	P	21 8 29.34	–21 1 38.19	-45.2 ± 2.5	
2203–188 ³	P	22 6 10.42	–18 35 38.73	-25.6 ± 2.6	-28.9 ± 3.6
2210+016	P	22 12 37.97	1 52 51.19	7.1 ± 0.7	-5.1 ± 1.0
2304+377	S	23 7 0.99	38 2 42.23	7.9 ± 1.3	-3.2 ± 1
2358+406	P	0 0 53.08	40 54 1.81	-3.6 ± 1.0	13.4 ± 1.2
3C48 ^{1,2,3}	S	1 37 41.30	33 9 35.13	-7.2 ± 2.3	-58.1 ± 4.2
СТА21 ¹	P	3 18 57.80	16 28 32.68	9.8 ± 0.8	-33.4 ± 1.4

Примечание. ¹ Объекты, у которых разность координат между каталогами ICRF3 и VIE2022b превышает 10 мс дуги (Красна и др., 2023).

² Объект из списка наиболее нестабильных объектов (Циган и др., 2024).

³ Объект из списка объектов с большими разностями “радио-оптика” (Макаров и др., 2017).

^{aus} Новый объект, для которого приведены координаты из каталога aus2024b.

1-й столбец — название радиоисточника; 2-й столбец — тип нестабильности — ступенька (S) или пик (P). 3-й и 4-й столбцы — координаты из каталога ICRF3.

5-й и 6-й столбцы — разность между двумя положениями объекта в моменты времени t_2 и t_1 : $t_2 > t_1$ по прямому восхождению и склонению.

Таблица 3. Разница координат радиоисточника 0711+356 между различными астрометрическими каталогами (оптическими: Gaia DR1, Gaia DR3; и радиокаталогами: ICRF2, ICRF3, aus2024b)

Средний момент наблюдений / эпоха		Каталоги для сравнения	Разность между координатами	
первого каталога	второго каталога		α мс дуги	δ мс дуги
2015.0	2016.0	Gaia DR1– Gaia DR3	-27.4 ± 5.6	28.2 ± 7.1
2015.0	1992.0	Gaia DR1 – ICRF2	-25.1 ± 5.7	23.4 ± 7.2
1992.0	2002.7	ICRF2 – ICRF3	-0.5 ± 1.0	0.9 ± 1.6
2016.0	2002.7	Gaia DR3 – ICRF3	1.8 ± 0.2	-3.9 ± 0.2
2016.2	2016.0	aus2024b – Gaia DR3	-0.6 ± 0.3	0.2 ± 0.2

Примечание. В первом и втором столбцах приведены эталонная эпоха (для оптических каталогов) и средний момент наблюдений (для радиокаталогов) для первого и второго каталога соответственно.

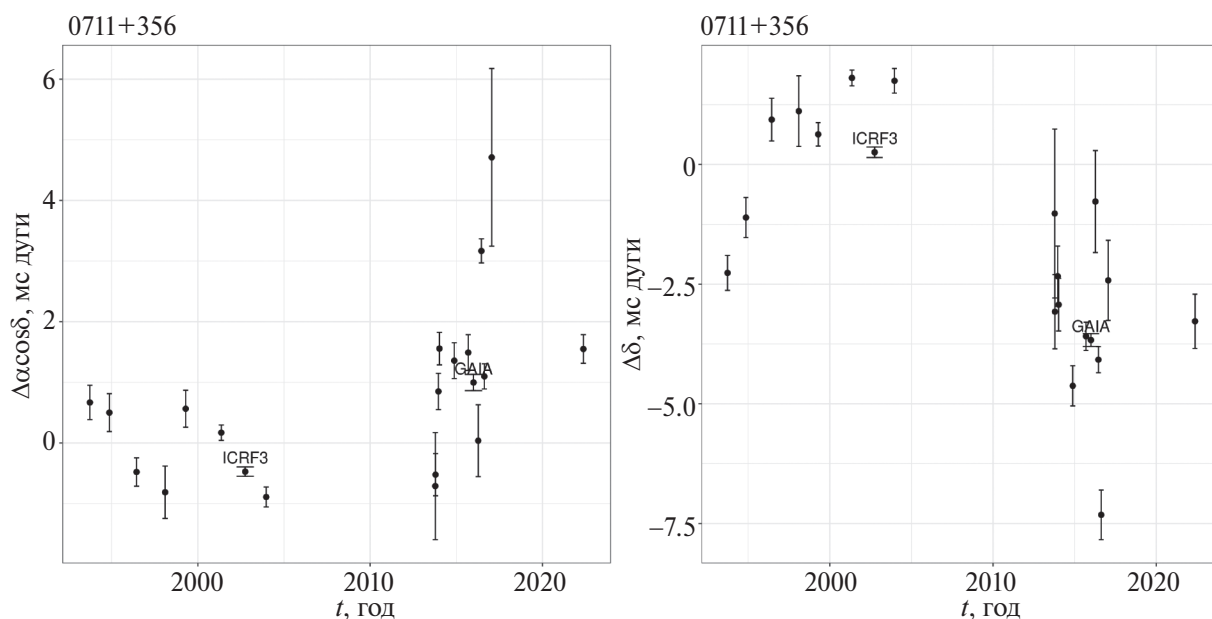


Рис. 6. Временные ряды координат радиоисточника 0711+356 по прямому восхождению (слева) и по склонению (справа).

компонентам между радио и оптикой составляют -0.5 ± 0.2 мс дуги, 0.2 ± 0.3 мс дуги по прямому восхождению (умноженному на $\cos \delta$) и склонению соответственно. Поэтому можно считать, что разность координат между Gaia DR3 – ICRF3 и aus2024b – Gaia DR3 вызвано исключительной переменностью координат 0711+356 в радиодиапазоне.

В табл. 4 приведены объекты с большим собственным движением. Самое большое линейное собственное движение обнаружено у радиоисточников 0956–256 и 1657–298. Для 0956–256 оно было определено только по трем экспериментам, поэтому для окончательного подтверждения нужны новые наблюдения.

Координаты 1657–298 в каталоге ICRF3 были определены с низкой точностью по данным только одного эксперимента 17AUG08XA, и всего по шести наблюдениям. При обработке новых наблюдений оказалось, что координаты этого объекта отличаются от приведенных в ICRF3, при этом наблюдается линейный ход с собственным движением около 13 мс дуги/год (рис. 7). Радиоисточник 1657–298 расположен в плоскости нашей Галактики, что затрудняет оптическое отождествление. В непосредственной близости был обнаружен двойной рентгеновский объект MXB 1658–298 с координатами $\alpha = 17^{\text{h}}02^{\text{m}}06^{\text{s}}.54$; $\delta = -29^{\circ}56'44''$.1. Хотя расхождение координат достаточно велико, в базе NED радиоисточник 1657–298 отождествлен с MXB 1658–298 (Бахрамиан и др., 2016). Необходимо накопить больше астрометрических данных, чтобы окончательно определиться с тем, имеет ли объект галактическую или внегалактическую природу. После 2017 г. объект 1657–298 наблюдался еще в четырех экспериментах, поэтому в новом ре-

шении aus2024b было получено пять суточных оценок координат, с временным интервалом примерно один год (рис. 7). Координаты для четырех новых экспериментов более согласованы между собой, с поправкой на то, что по склонению обнаружено достаточно большое собственное движение, примерно равное 13.4 ± 2.3 мс дуги в год (табл. 4). При этом пересмотренная оценка координат по данным эксперимента 17AUG08XA отличается от первоначальной (которая и была использована для каталога ICRF3) примерно на 250 мс дуги по прямому восхождению и 500 мс дуги по склонению. Поэтому координаты объекта 1657–298 в каталоге ICRF3 можно считать не очень надежными. С учетом того, что формальная ошибка координат по эксперименту 17AUG08XA гораздо больше, чем для четырех новых наблюдений, следует ожидать, что в новом каталоге координаты 1657–298 будут отличаться от координат из ICRF3 на почти 500–600 мс дуги, что уже отмечено в статье Красна и др., (2023).

ОБСУЖДЕНИЕ ПРИЧИН НЕСТАБИЛЬНОСТИ

При создании нового каталога ICRF всегда стараются отбирать “точечные” радиоисточники, для которых групповая задержка не зависит от структуры радиоисточника, потому что протяженная структура создает дополнительную так называемую “структурную” задержку, что приводит к существенной потере точности координат в каталоге. Переменность координат чаще всего связана с видимыми изменениями в структуре объекта. Например, у объекта СТА21 это, по-видимому, вызвано целой комбинацией причин, таких как сверхсветовое движение джета, появление новых компонент (Фрей, Титов, 2021), а так-

Таблица 4. Список нестабильных радиоисточников по собственному движению

Объект	RA (ICRF3) hh mm ss	DE (ICRF3) ° ' "	$\mu_{\Delta\alpha^*}$ мс дуги/год	$\mu_{\Delta\delta}$ мс дуги/год	Разность по	
					$\Delta\alpha^*$ мс дуги	$\Delta\delta$ мс дуги
0200+304	2 3 45.36	30 41 29.11	-0.51 ± 0.11		-13.3 ± 1.7	
0423–163	4 25 53.57	–16 12 40.24	0.36 ± 0.10		9.3 ± 1.7	13.3 ± 3
0711+356 ²	7 14 24.82	35 34 39.80	0.10 ± 0.03	-0.33 ± 0.05	2.0 ± 0.3	-9.1 ± 0.6
			[мс дуги/год]	[мс дуги/год]		
			0.01 ± 0.00	-0.03 ± 0.01	2.0 ± 0.3	-9.1 ± 0.6
			[мс дуги/год ²]	[мс дуги/год ²]		
0956–256 ^{aus}	9 58 23.27	–25 56 15.49	-35.05 ± 1.76		-72.5 ± 5.6	92.6 ± 8.4
1021–006	10 24 29.59	0 52 55.50		0.10 ± 0.03	4.2 ± 0.6	5.2 ± 0.4
1144+352 ²	11 47 22.13	35 1 7.53	-0.83 ± 0.10	0.53 ± 0.06	-21.5 ± 0.4	13.9 ± 0.6
1540–077	15 43 1.69	–7 57 6.64	-0.35 ± 0.06		-6.4 ± 2.1	
1657–298 ¹	17 1 9.84	–29 54 39.80		13.45 ± 2.33	-25.5 ± 8	52.8 ± 10.1
2135–184 ²	21 38 41.93	–18 10 44.38		1.79 ± 0.56	-17.2 ± 5.3	46.5 ± 13.5

Примечание. ¹ Объекты, у которых разность координат между каталогами ICRF3 и VIE2022b превышает 10 мс дуги (Красна и др., 2023).

² Объект из списка объектов с большими разностями “радио-оптика” (Макаров и др., 2017).

^{aus} Новый объект, для которого приведены координаты из каталога aus2024b.

1-й столбец – название радиоисточника; 2-й и 3-й столбцы – прямое восхождение и склонение из каталога ICRF3. 4-й и 5-й столбцы – оценки собственного движения по прямому восхождению или склонению. 6-й и 7-й столбцы – полная разница по прямому восхождению $\Delta\alpha^*_{\text{max}} - \Delta\alpha^*_{\text{min}}$ и склонению $\Delta\delta_{\text{max}} - \Delta\delta_{\text{min}}$ за весь интервал наблюдений.

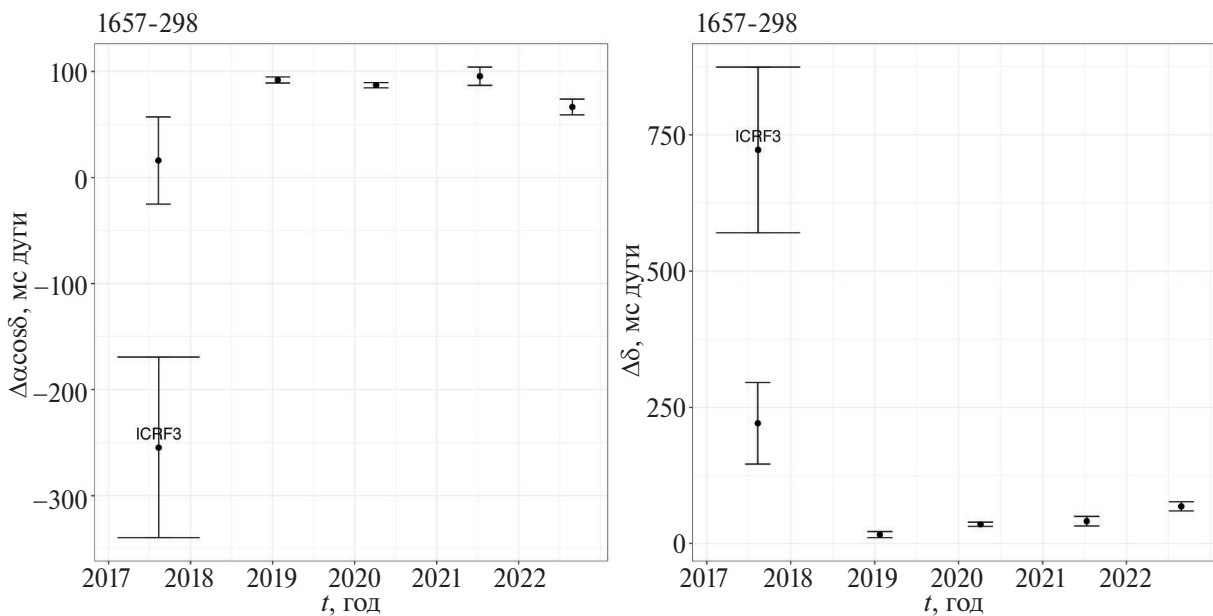


Рис. 7. Временной ряд координат объекта 1657–298 по прямому восхождению (слева) и по склонению (справа).

же движение горячих точек в радиолобах, характерное для компактных симметричных объектов (CSO), к которым относится СТА21. Поэтому при анализе причин астрометрической нестабильности нужно учитывать множество разнообразных факторов.

Наблюдаемые вариации координат всех вышеперечисленных типов, скорее всего, обусловлены изменением отношения яркости одной компоненты по сравнению с другой (хотя могут быть и другие причи-

ны, исследование которых выходит за рамки данной статьи). Изменение относительной яркости приводит к тому, что положение фазового центра, который и определяет астрометрические координаты объекта, сдвигается в сторону более яркой компоненты. Таким образом, необычно большие скачки координат могут быть интерпретированы как результат быстрых изменений относительной яркости компонент, удаленных друг от друга на сравнительно большое угловое

Таблица 5. Поправки координат гравитационной линзы 1422+231 (1422+23C) по отношению к ее средним координатам

Время год	Объект	$\Delta\alpha^*$ мс дуги	$\Delta\delta$ мс дуги	Число наблюдений	Эксперимент
2005.525	1422+231	-50.5 ± 2.0	127.3 ± 2.3	4	05JUL09XV
2017.543	1422+23C	-515.3 ± 0.2	-865.2 ± 1.0	8	17JUL16XC
2018.054	1422+23C	146.1 ± 2.4	339.9 ± 3.4	4	18JAN18XC
2021.232	1422+231	212.4 ± 0.6	196.4 ± 0.7	16	21MAR24XA
2022.024	1422+231	207.3 ± 0.6	201.6 ± 0.8	26	22JAN07XC

расстояние (до 1"). Большие видимые собственные движения, вероятно, вызваны наличием яркого джета,двигающегося с околосветовой скоростью в течение достаточно большого интервала времени.

Некоторые приведенные выше радиоисточники могут быть радиозвездами нашей Галактики (с нестабильностью по собственному движению) как 1657–298 или гравитационными линзами, как например, 1422+231 (Патнаик и др., 1992). Этот объект наблюдался в пяти РСДБ экспериментах между 2005 и 2022 гг. (причем, под двумя именами, 1422+231 и 1422+23C), и в табл. 5 приведены оценки поправок к его средним координатам, которые отличаются исключительной нестабильностью от сессии к сессии с разбросом до 1 секунды дуги. Хотя для астрофизических исследований такие наблюдения, видимо, представляют определенный интерес, но с точки зрения астрометрии этот объект следует относить к разряду нестабильных. Известные гравитационные линзы 1422+231 (Патнаик и др., 1992), 0132–097 (Гликман и др., 2023), 0411+054 (Браун и др., 2003), 2114+022 (Аугусто и др., 2001) были обнаружены приведенными выше алгоритмами, однако не были включены в табл. 1, 2, 4, поскольку уже известно, что астрометрические положения таких объектов могут быть нестабильными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей статье представлены нестабильные радиоисточники с изменением в координатах от 6 до 143 мс дуги или собственными движениями от 0.1 мс дуги/год до 35 мс дуги/год (по модулю по одной из координат) (табл. 1, 2, 4). При построении следующей реализации ICRS такие радиоисточники следует включать в список нестабильных и не использовать в суточных сессиях для определения ПВЗ (например, IVS-R1, R4).

К тому же, как было проиллюстрировано выше, существуют ситуации, при которых разности ICRF3 – Gaia DR3 могут не иметь физического смысла (случай 1328+254), поэтому при составлении разностей “радио–оптика” требуется исследовать и проверять объекты на астрометрическую нестабильность.

С появлением новых наблюдений список нестабильных радиоисточников, вероятно, будет пополняться.

Астрометрически нестабильные радиоисточники могут быть индикаторами различных астрофизических процессов, и их систематическое исследование позволит выяснить причины такой эволюции координат.

БЛАГОДАРНОСТИ

Мы благодарим IVS (<https://ivscc.gsfc.nasa.gov/products-data/index.html>) и Astrogeo (<http://astrogeo.org>) за предоставленные данные. Также выражаем особую признательность Сандору Фрею за присланный оригинал радиокарты объекта 1328+254. Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП/УНУ “Радиоинтерферометрический комплекс «Квазар-КВО»”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аугусто и др. (P. Augusto, I.W.A. Browne, N.P. Wilkinson, et al.), *MNRAS* **326**, 1007 (2001).
2. Бахрамиан и др. (A. Bahramian, C.O. Heinke, R. Wijnands, et al.), *Astron. Telegram*, February, 1, 8699 (2016).
3. Браун и др. (W.A. Browne, P.N. Wilkinson, N.J.F. Jackson, et al.), *MNRAS* **341**, 13 (2003).
4. Гликман и др. (E. Glikman, C.E. Rusu, G.C.-F. Chen, et al.), *Astrophys. J.* **943**, 25 (2023).
5. Gaia Collaboration, *Astron. Astrophys.* **595**, A2 (2016).
6. Gaia Collaboration, *Astron. Astrophys.* **674**, A1 (2023).
7. Гордон и др. (D. Gordon, C. Jacobs, A. Beasley, A. Peck, R. Gaume, P. Charlot, A. Fey, C. Ma, O. Titov, and D. Boboltz), *Astron. J.* **151**, 154 (2016).
8. Делиньетт-Мюллер, Дютанг (M.L. Delignette-Muller and C. Dutang), *J. Statist. Software* **64(4)**, 1 (2015).
9. Ковалев и др. (Y. Kovalev, D. Zobnina, A. Plavin, and D. Blinov), *MNRAS* **493 (1)** (2020).
10. Красна и др. (H. Krasna, L. Baldreich, J. Boehm, et al.), *Astron. Astrophys.* **679**, A53 (2023).
11. Йорк и др. (D.G. York, et al.), *Astron. J.* **120**, 1579 (2000).
12. Ма и др. (C. Ma, E.F. Arias, G. Bianco, D.A. Boboltz, S.L. Bolotin, P. Charlot, G. Engelhardt, et al.), *IERS Technical Note* 35, 1 (2009).
13. Макаров и др. (V.V. Makarov, J. Frouard, C.T. Berghea, A. Rest, K.C. Chambers, N. Kaiser, R.-P. Kudritzki, et al.), *Astrophys. J. Lett.* **835**, L30 (2017).
14. Нотнагель и др. (A. Nothnagel, T. Artz, D. Behrend, and Z. Malkin), *J. Geodesy* **91(7)**, 711 (2017).
15. Орош, Фрей (F. Orosz and S. Frey), *Astron. Astrophys.* **553**, A13 (2013).

16. Патнаик и др. (A.R. Patnaik, I.W.A. Browne, D. Walsh, F.H. Chaffee, and C.B. Foltz), *MNRAS* **259**, 1 (1992).
17. Петров, Ковалев (L. Petrovand and Y. Kovalev), *MNRAS* **467**, L71 (2017).
18. Суше и др. (J. Souchay, N. Secrest, S. Lambert, N. Zacharias, F. Taris, C. Barache, et al.), *Astron. Astrophys.* **660**, A16, 1 (2022).
19. Титов и др. (O. Titov, V. Tesmer, and J. Boehm), *Inter. VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2004 General Meet. Proceed.* (Ed. N.R. Vandenberg, K.D. Baver, Ottawa: NASA, 2004), p. 267.
20. Титов (O. Titov), *J. Geod.*, **81(6)**, 455, (2007).
21. Титов и др. (O. Titov, L. Stanford, H.M. Johnston, T. Pursimo, R.W. Hunstead, D.L. Jauncey, K. Maslennikov, and A. Boldycheva), *Astron. J.* **146**, 10 (2013).
22. Титов и др. (O. Titov, S. Frey, A. Melnikov, S. Lambert, S. Fengchun, X. Bo, G. Javier, T. Belen, et. al.), *MNRAS* **512**, 874 (2022).
23. Титов и др. (O. Titov, H. Krasna, S. Willcocks, Y. Lopez, and A. Osetrova), 13th IVS General Meet. and 25th Anniversary, Tsukuba, Japan, Zenodo (2024).
24. Хамитов И.М., Бикмаев И.Ф., Гильфанов М.Р и др., Письма в Астрон. журн. **49(6)**, 369 (2023) [I.M. Khamitov et al., *Astron. Lett.* **49**, 271 (2023)].
25. Хамитов И.М., Бикмаев И.Ф., Гильфанов М.Р и др., Письма в Астрон. журн. **48(12)**, 828 (2022) [I.M. Khamitov et al., *Astron. Lett.* **48**, 724 (2022)].
26. Фей и др. (A.L. Fey, D. Gordon, C.S. Jacobs, C. Ma, R.A. Gaume, E.F. Arias, G. Bianco, et al.), *Astron. J.* **150(2)**, 58 (2015).
27. Фрей и др. (S. Frey, O. Titov, A. Melnikov, and S. Lambert), *Proceed. of the 16th Europ. VLBI Network Symp.* (Ed. E. Ros, S. Dzib, I. Rottmann, J.A. Zensus), September 2nd–6th 2024, Bonn, Germany.
28. Фрей, Титов (S. Frey and O. Titov), *Res. Notes AAS* **5**, 60 (2021).
29. Циган и др. (P. Cigan, V. Makarov, N.J. Secrest, D. Gordon, M.C. Johnson, and S. Lambert), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **274 (2)** (2024).
30. Шарло и др. (P. Charlot, C.S. Jacobs, D. Gordon, S. Lambert, A. de Witt, J. Bohm, A.L. Fey, R. Heinkelmann, et al.), *Astron. Astroph.* **644**, 159 (2020).
31. Шепхерд и др. (M.C. Shepherd), *Astron. Soc. Pacific Conf. Ser.* **125**, *Astron. Data Analysis Software and Systems VI* (Ed. G. Hunt, H. Payne, 1997), p. 77.
32. Шуйгина и др. (N. Shuygina, D. Ivanov, A. Ipatov, I. Gayazov, D. Marshalov, A. Melnikov, S. Kurdubov, M. Vasilyev, et al.), *Geod. Geodyn.* **10(2)**, 150 (2019).