

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМЕНИ П. Н. ЛЕБЕДЕВА
АСТРОКОСМИЧЕСКИЙ ЦЕНТР

На правах рукописи

Зобнина Дарья Игоревна

**Многодиапазонные исследования линейной поляризации и ее
переменности в активных ядрах галактик**

Специальность 1.3.1 —
«Физика космоса, астрономия»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
док. физ.-мат. наук, проф. РАН
Пушкарев Александр Борисович

Москва — 2023

Оглавление

| | Стр. |
|--|-----------|
| Список рисунков | 4 |
| Список таблиц | 9 |
| Введение | 10 |
| Глава 1. Свойства оптической линейной поляризации АЯГ со значимыми радио-оптическими сдвигами положений | 20 |
| 1.1 Исследование различия между положением АЯГ в радио- и оптическом диапазонах | 20 |
| 1.2 Наблюдательные данные и выборка | 24 |
| 1.3 Свойства оптической поляризации АЯГ со значимыми сдвигами РСДБ– <i>Gaia</i> | 25 |
| 1.3.1 Направление оптической поляризации | 26 |
| 1.3.2 Степень оптической поляризации | 29 |
| 1.4 Области образования поляризованного оптического излучения в АЯГ | 33 |
| 1.4.1 Релятивистская струя | 34 |
| 1.4.2 Аккреционный диск | 34 |
| 1.4.3 Области рассеяния за пределами аккреционного диска | 35 |
| 1.5 Обсуждение результатов анализа оптической поляризации | 36 |
| 1.6 Выводы | 38 |
| Глава 2. Исследование усредненной по времени линейной поляризации и ее переменности в парсековых джетах АЯГ на частоте 15 ГГц | 40 |
| 2.1 Магнитное поле и линейно-поляризованное излучение парсековых струй АЯГ | 40 |
| 2.2 Построение выборки | 42 |
| 2.3 Построение карт усредненной по времени линейной поляризации и ее переменности | 48 |
| 2.3.1 Стековые изображения линейной поляризации | 51 |

| | Стр. |
|---|------------|
| 2.3.2 Медианные карты и распределения переменности линейно-поляризованного излучения | 62 |
| 2.3.3 Сравнение стековых и медианных распределений линейной поляризации | 64 |
| 2.3.4 Оценка ошибок построенных карт | 71 |
| 2.4 Переменность направления линейной поляризации в областях РСДБ-ядра и джета | 73 |
| 2.5 Эволюция переменности и усредненных по эпохам величин поляризационных характеристик вдоль джета | 80 |
| 2.5.1 Переменность направления поляризации | 84 |
| 2.5.2 Стековая и медианная степень поляризации и ее переменность | 89 |
| 2.6 Распределение стекового направления поляризации по струе, эволюция переменности и усредненной по эпохам поляризации поперек выброса | 95 |
| 2.7 Выводы | 106 |
| Заключение | 108 |
| Список цитируемой литературы | 110 |
| Приложение А. Стековые и медианные изображения, распределения переменности линейной поляризации на частоте 15 ГГц для 15 АЯГ | 130 |

Список рисунков

| | | |
|-----|--|----|
| 1.1 | Диаграмма направления сдвигов РСДБ– <i>Gaia</i> относительно парсекового выброса. | 22 |
| 1.2 | Распределение угла между EVPA в оптическом диапазоне и направлением парсекового джета для АЯГ со сдвигами РСДБ– <i>Gaia</i> и разными значениями угла Ψ | 27 |
| 1.3 | Распределение угла между EVPA в оптическом диапазоне и направлением парсекового джета для АЯГ со сдвигами РСДБ– <i>Gaia</i> для всей выборки, квазаров и лацертид. | 28 |
| 1.4 | Распределение степени поляризации в оптическом диапазоне АЯГ со смещениями координат и разными значениями угла Ψ | 30 |
| 1.5 | Медианная степень оптической поляризации полной выборки, квазаров и лацертид, которые имеют сдвиги РСДБ– <i>Gaia</i> и значимую величину угла Ψ | 31 |
| 1.6 | Распределение степени поляризации в оптическом диапазоне АЯГ со сдвигами РСДБ– <i>Gaia</i> для полной выборки, квазаров и лацертид. . . | 32 |
| 1.7 | Медианная степень оптической поляризации всех АЯГ из пересечения исследуемой выборки с радио-оптическими сдвигами положений и значимой величиной угла Ψ с объединением выборок гамма-ярких и гамма-слабых источников из программы RoboPol и отдельно для квазаров и лацертид. | 33 |
| 2.1 | Гистограмма распределения количества эпох наблюдений АЯГ выборки. | 44 |
| 2.2 | Гистограмма распределения промежутка времени между соседними эпохами наблюдений для источников выборки. | 45 |
| 2.3 | Гистограмма распределения временного интервала наблюдения источников выборки. | 46 |
| 2.4 | Гистограммы распределения красного смещения для квазаров и лацертид из выборки. | 47 |
| 2.5 | Сплайн-подгонки зависимости размера большой и малой осей эллиптической диаграммы направленности от склонения источника. . | 49 |
| 2.6 | Зависимость систематического сдвига, порожденного баисом Райса, от отношения сигнал-шум. | 53 |

| | | |
|------|---|----|
| 2.7 | Стековая карта линейной поляризации для объекта типа BL Lac 2254+074. | 54 |
| 2.8 | Зависимость уровня шума на картах P_{stack} от количества эпох. | 58 |
| 2.9 | Зависимость уровня шума на картах P_{stack} от временного интервала наблюдения. | 60 |
| 2.10 | Зависимость величины отношения площади поляризационной структуры к площади структуры источника в полной интенсивности от временного интервала наблюдения. | 61 |
| 2.11 | Карты переменности линейной поляризации и m_{median} для лацертиды 2254+074. | 65 |
| 2.12 | Карты переменности линейной поляризации и m_{median} для 2200+420 (BL Lacertae). | 66 |
| 2.13 | Стековая карта и медианная степень поляризации для квазара 0710+196. | 67 |
| 2.14 | Стековая карта и медианная степень поляризации для квазара 1722+401. | 68 |
| 2.15 | Зависимость пика медианной поляризационной интенсивности от пика стековой поляризационной интенсивности. | 69 |
| 2.16 | Стековая карта и медианная степень поляризации для лацертиды 0518+211. | 70 |
| 2.17 | Распределение остаточной амплитуды инструментальной поляризации для каждой антенны VLBA. | 73 |
| 2.18 | Гистограмма распределения отношения поляризационной интенсивности РСДБ-ядра к наблюдаемой медианной поляризационной интенсивности на расстоянии 1.5 размеров РСДБ-ядра на карте от положения РСДБ-ядра. | 75 |
| 2.19 | Гистограммы распределения медианы σ_{EVPA} для РСДБ-ядер и джетов для всей выборки. | 76 |
| 2.20 | Карта переменности EVPA для квазара 0333+321. | 77 |
| 2.21 | Карта переменности EVPA для квазара 1127–145. | 79 |
| 2.22 | Гистограммы распределения медианы переменности направления поляризации для РСДБ-ядер квазаров и лацертид и источников этих оптических классов, находящихся на сравнимых красных смещениях. | 81 |

| | | |
|------|--|-----|
| 2.23 | Гистограмма распределения коэффициентов корреляции Кендалла между абсолютной переменностью степени поляризации и медианной степенью поляризации. | 83 |
| 2.24 | Распределение переменности направления поляризации вдоль джета для радиогалактики 1514+004. | 83 |
| 2.25 | Гистограмма распределения коэффициентов корреляции Кендалла между переменностью EVPA и расстоянием от РСДБ-ядра вдоль хребтовой линии. Карта σ_{EVPA} для квазара 1222+216. | 85 |
| 2.26 | Зависимость переменности направления поляризации от медианной степени поляризации для АЯГ выборки. | 86 |
| 2.27 | Карты переменности EVPA для лацертид 0106+678 и 0118–272. | 87 |
| 2.28 | Карты переменности EVPA для квазара 2230+114. | 88 |
| 2.29 | Гистограмма распределения коэффициентов корреляции Кендалла между стековой степенью поляризации и расстоянием от РСДБ-ядра вдоль хребтовой линии. | 90 |
| 2.30 | Стековые карты линейной поляризации для источника с неопределенным оптическим классом 0509+406 и лацертиды 0603+476. | 91 |
| 2.31 | Гистограмма распределения коэффициентов корреляции Кендалла для зависимости медианной степени поляризации от r_{along} . Карта m_{med} для квазара 1150+497. | 92 |
| 2.32 | Карта медианной степени поляризации для квазара 2128–123. | 93 |
| 2.33 | Гистограмма распределения коэффициентов корреляции Кендалла для зависимости относительной переменности степени поляризации от расстояния от РСДБ-ядра вдоль хребтовой линии. | 94 |
| 2.34 | Стековая карта линейной поляризации для квазара 0333+321. Поперечные профили m_{stack} и P_{stack} за пределами области РСДБ-ядра. | 97 |
| 2.35 | Стековая карта линейной поляризации для квазара 1150+812. Поперечные профили m_{stack} и P_{stack} за пределами области РСДБ-ядра. | 98 |
| 2.36 | Стековая карта линейной поляризации для лацертиды 1717+178. Поперечные профили m_{stack} и P_{stack} за пределами области РСДБ-ядра. | 100 |
| 2.37 | Стековая карта линейной поляризации для VL Lacertae (2200+420). Поперечные профили m_{stack} и P_{stack} за пределами области РСДБ-ядра. | 101 |
| 2.38 | Поперечные профили m_{stack} для 307 АЯГ. | 102 |

| | | |
|------|---|-----|
| 2.39 | Распределение m_{med} поперек джета для квазара 0336–019 на $r_{\text{along}} = 3$ мсек дуги от видимого начала выброса. | 103 |
| 2.40 | Распределение плотности модуля разности позиционных углов стекового электрического вектора и локальной области струи в зависимости от расстояния от хребтовой линии поперек джета за пределами РСДБ-ядра для 378 АЯГ. | 105 |
| A.1 | Стековая карта линейной поляризации для квазара 0336–019. | 130 |
| A.2 | Карты переменности линейной поляризации и m_{median} для квазара 0336–019. | 131 |
| A.3 | Стековая карта линейной поляризации для радиогалактики 0415+379. | 132 |
| A.4 | Карты переменности линейной поляризации и m_{median} для радиогалактики 0415+379. | 133 |
| A.5 | Стековая карта линейной поляризации для радиогалактики 0430+052. | 134 |
| A.6 | Карты переменности линейной поляризации и m_{median} для радиогалактики 0430+052. | 135 |
| A.7 | Стековая карта линейной поляризации для лацертиды 0735+178. | 136 |
| A.8 | Карты переменности линейной поляризации и m_{median} для лацертиды 0735+178. | 137 |
| A.9 | Стековая карта линейной поляризации для квазара 0738+313. | 138 |
| A.10 | Карты переменности линейной поляризации и m_{median} для квазара 0738+313. | 139 |
| A.11 | Стековая карта линейной поляризации для лацертиды 0754+100. | 140 |
| A.12 | Карты переменности линейной поляризации и m_{median} для лацертиды 0754+100. | 141 |
| A.13 | Стековая карта линейной поляризации для квазара 0836+710. | 142 |
| A.14 | Карты переменности линейной поляризации и m_{median} для квазара 0836+710. | 143 |
| A.15 | Стековая карта линейной поляризации для квазара 1127–145. | 144 |
| A.16 | Карты переменности линейной поляризации и m_{median} для квазара 1127–145. | 145 |
| A.17 | Стековая карта линейной поляризации для квазара 1226+023. | 146 |
| A.18 | Карты переменности линейной поляризации и m_{median} для квазара 1226+023. | 147 |
| A.19 | Стековая карта линейной поляризации для квазара 1253–055. | 148 |

| | | |
|------|---|-----|
| A.20 | Карты переменности линейной поляризации и m_{median} для квазара 1253–055. | 149 |
| A.21 | Стековая карта линейной поляризации для квазара 1551+130. | 150 |
| A.22 | Карты переменности линейной поляризации и m_{median} для квазара 1551+130. | 151 |
| A.23 | Стековая карта линейной поляризации для квазара 1611+343. | 152 |
| A.24 | Карты переменности линейной поляризации и m_{median} для квазара 1611+343. | 153 |
| A.25 | Стековая карта линейной поляризации для квазара 1633+382. | 154 |
| A.26 | Карты переменности линейной поляризации и m_{median} для квазара 1633+382. | 155 |
| A.27 | Стековая карта линейной поляризации для квазара 1641+399. | 156 |
| A.28 | Карты переменности линейной поляризации и m_{median} для квазара 1641+399. | 157 |
| A.29 | Стековая карта линейной поляризации для квазара 2251+158. | 158 |
| A.30 | Карты переменности линейной поляризации и m_{median} для квазара 2251+158. | 159 |

Список таблиц

| | | |
|-----|---|-----|
| 1.1 | Свойства подвыборок. | 26 |
| 2.1 | Распределение источников выборки по оптическому классу и по положению синхротронного пика в спектре энергии. | 43 |
| 2.2 | Общие свойства АЯГ выборки. | 44 |
| 2.3 | Свойства стековых и медианнах карт линейной поляризации. | 57 |
| 2.4 | Неполяризованные АЯГ. | 59 |
| 2.5 | Результаты статистического сравнения медианных значений $\sigma_{E\text{VPA}}$ в областях РСДБ-ядра и джета. | 78 |
| 2.6 | Типично наблюдаемые распределения $E\text{VPA}_{\text{stack}}$ и виды поперечных профилей m_{stack} и P_{stack} | 105 |

Введение

Активные ядра галактик (АЯГ) — центральные области галактик, физические процессы в которых сопровождаются выделением большого количества энергии, которое нельзя объяснить активностью звездной и газовой составляющей [1]. АЯГ излучают во всех диапазонах электромагнитного спектра и, возможно, являются источниками высокоэнергетичных (больше 10^{12} эВ) нейтрино [2–5]. Излучение этих объектов имеет преимущественно нетепловую природу, на что указывает форма их спектра (например, [6]).

Примерно 10% – 15% АЯГ являются радиогромкими [7]. Они намного ярче в радиодиапазоне, чем в оптическом. Согласно унифицированной модели [8], в центре таких активных ядер находится сверхмассивная черная дыра, окруженная аккреционным диском. Вещество диска, теряя угловой момент вследствие турбулентности или вязкости, падает на черную дыру. В непосредственной близости от горизонта событий образуются биполярные истечения плазмы (джеты), ориентированные вдоль оси вращения аккреционного диска или черной дыры. Вещество в них ускоряется до релятивистских скоростей, на что указывает видимое сверхсветовое движение [9; 10], высокие (медиана ≈ 10) доплер-факторы [10–12] и яркостные температуры (до 10^{10-13} К) [12–14], а также малые углы раскрытия выбросов [15]. При этом процесс формирования и ускорения джетов до конца не изучен. Теоретически было показано, что ускорение может происходить за счет энергии и углового момента керровской черной дыры [16] или аккреционного диска [17].

К радиогромким АЯГ, в частности, относятся блазары. Они включают в себя квазары с плоским спектром и объекты типа BL Lacertae (далее лацертиды). Отличительной особенностью лацертид является отсутствие сильных эмиссионных и абсорбционных линий в оптическом спектре [18]. Струи квазаров и лацертид имеют малый угол ($< 10^\circ$) с лучом зрения (например, [12; 19]). Квазары типично находятся на больших красных смещениях (медиана ≈ 1.5) [20]. Это позволяет считать, что их положение на небе практически не меняется со време-

нем, поэтому эти объекты можно использовать в качестве опорных источников небесной системы координат.

Международная небесная система отсчета ICRF3 [21] построена на измерениях положений компактных внегалактических радиоисточников методами радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ). Этот подход был предложен в 60-е годы прошлого века Л.И. Матвеевко, Н.С. Кардашевым и Г.Б. Шоломицким [22] и в настоящее время позволяет измерять абсолютные положения источников с точностью до ~ 30 микросекунд дуги [21]. В оптическом диапазоне сравнимой с ICRF3 точностью, но значительно большей плотностью источников обладает система отсчета *Gaia*-CRF2 [23], построенная по измерениям координат примерно полумиллиона квазаров космическим телескопом *Gaia* Европейского космического агентства, который был запущен на орбиту в 2013 году [24]. Первое сравнение положений активных ядер, определенных в радио- и оптическом диапазонах, показало, что для большинства источников эти координаты совпадают в пределах ошибок измерений, однако для примерно 5% (≈ 110) объектов существуют значимые сдвиги между двумя положениями [25] (сдвиги РСДБ–*Gaia*). В работе [26] было проведено сравнение координат активных ядер из каталога *Gaia* Data Release 1 с координатами из наиболее полного на тот момент каталога абсолютной астрометрии, построенного по РСДБ-наблюдениям, Radio Fundamental Catalogue (RFC) 2016с¹. Этот анализ обнаружил около 400 объектов, имеющих значимые сдвиги положений. При использовании каталога *Gaia* Data Release 2 [27], содержащего почти на 50% больше источников и точнее измеренные положения, и RFC, построенного по РСДБ-наблюдениям, доля активных ядер со значимыми радио-оптическими сдвигами положений возросла до примерно 9%, что составляет около 900 объектов [28]. Объяснение этого феномена критически важно для физической модели внутренних областей АЯГ.

Изображения, построенные на основе РСДБ-наблюдений, показывают структуру источника на парсековых масштабах. РСДБ-мониторинг АЯГ позволяет построить усредненные по эпохам и совмещенные по положению РСДБ-ядра (стековые) карты распределения полной интенсивности по объекту. РСДБ-ядро является ярким, частично оптически толстым началом струи и, как правило, представляет собой наиболее яркую компактную деталь на РСДБ-карте. При возрастании интервала времени, который покрывают эпохи наблюдения, ширина выброса, восстанавливаемая на стековых изображениях, увеличивается. В рабо-

¹<http://astrogeo.smce.nasa.gov/>

те [15] было обнаружено, что при временном покрытии в шесть лет и более на таких картах типично проявляется полная ширина внутренних областей струи, детектируемая в полной интенсивности. Стековые изображения полной интенсивности используются для изучения структуры выбросов, например, формы струи [29; 30] или угла ее раскрыва [15]. Актуальный вопрос о конфигурации магнитного поля в джете на парсековых масштабах [31; 32] можно исследовать с помощью стековых карт, показывающих усредненное распределение линейной поляризации вдоль и поперек струи [A2, A3].

РСДБ-данные также используются для исследования переменности линейно-поляризованного излучения АЯГ (например, [33; 34]). Причиной изменения степени поляризации и ее направления (позиционного угла электрического вектора) в выбросе может служить движение яркой детали по винтовой траектории в магнитном поле спиральной конфигурации [33] или распространение компоненты вдоль изгиба джета [35; 36]. Также в работе [37] было предложено интерпретировать изменение направления поляризации на $\sim 180^\circ$ в блазаре ОJ 287 моделью джета с постоянной поляризацией и двумя последовательными вспышками, у которых векторы поляризации вращаются в противоположных направлениях. Переменность поляризации также может возникать из-за геометрических эффектов, таких как изменение доплеровского усиления вследствие прецессии выброса, магнито-гидродинамических волн, распространяющихся в струе [38; 39], турбулентности [40] или отражать пространственно-временную эволюцию магнитного поля [A3].

Изучение переменности линейной поляризации парсековых джетов является актуальным, поскольку способствует получению информации о физических условиях во внутренних областях АЯГ, а именно позволяет исследовать изменение направления и степени упорядоченности магнитного поля, свойства турбулентности и непрозрачности излучения плазмы. Сравнивая результаты анализа с предсказаниями различных моделей переменности, можно определить, какие физические процессы могут быть причиной этих вариаций.

Цель работы

Основной целью данного исследования является изучение конфигурации и степени упорядоченности магнитного поля релятивистской струи активного ядра галактики, а также изменения со временем этих характеристик поля вдоль и поперек струи.

Для этого были поставлены и решены следующие задачи:

- анализ вклада релятивистского джета, аккреционного диска, полярных и экваториальных областей рассеяния излучения, а также пылевого тора в интегральную оптическую поляризацию АЯГ на основе опубликованных данных;
- исследование направления и степени интегральной оптической линейной поляризации АЯГ, у которых наблюдаются значимые сдвиги РСДБ–*Gaia*;
- построение РСДБ-карт переменности степени и направления линейной поляризации, а также стековых карт полной и поляризационной интенсивности, степени и направления поляризации, карт медианы по эпохам поляризационной интенсивности и степени поляризации для выборки из 436 АЯГ на частоте 15 ГГц;
- исследование переменности направления поляризации ядер и джетов, как целого, используя построенные РСДБ-карты соответствующего распределения на частоте 15 ГГц;
- анализ эволюции переменности степени и направления поляризации, медианы степени поляризации по эпохам, стековых распределений степени поляризации, ее направления, поляризационной интенсивности вдоль и поперек хребтовой линии джета, используя построенные РСДБ-карты на частоте 15 ГГц.

Научная новизна

Научная новизна результатов, полученных в Главе 1, заключается в том, что впервые были выделены АЯГ с ярким протяженным оптическим выбросом с использованием данных о линейной поляризации в оптическом диапазоне и радио-оптическом сдвиге положений. Также впервые была получена информация о конфигурации магнитного поля в струе у таких источников. Анализ поляризационных характеристик у различных компонент активного ядра показал, что у блазаров основной вклад в степень оптической поляризации вносит синхротронное излучение релятивистского выброса. Это дало возможность определить доминирующий источник оптического излучения у объектов со значимыми сдвигами РСДБ–*Gaia*, а также проверить и подтвердить гипотезу о том, что смещение, при котором положение, измеряемое *Gaia*, находится ниже по струе относительно РСДБ-положения, обусловлено протяженным оптическим джетом, а сдвиг в противоположном направлении — доминированием аккреционного диска в полном оптическом излучении [41].

Научная новизна исследования, описанного в Главе 2, состоит в том, что впервые проводится массовый анализ переменности линейной поляризации, медианной по эпохам степени поляризации, стековых распределений степени, направления и интенсивности поляризации релятивистских выбросов АЯГ на парсековых масштабах на частоте 15 ГГц. Использование данных мониторинговой программы MOJAVE (Monitoring of Jets in AGNs with VLBA Experiments)² [42] и архивных наблюдений на VLBA с общим временным интервалом до 24 лет и достаточно высокой для отслеживания морфологических изменений скважностью дало уникальную возможность оценить переменность поляризации и ее усредненные по эпохам характеристики, а большое количество источников — получить статистически значимые результаты о ее свойствах. В частности, оказалось, что направление поляризации в джетах АЯГ гораздо более стабильное, чем в РСДБ-ядрах.

²<https://www.cv.nrao.edu/MOJAVE>

Научная и практическая значимость

Результаты, описанные в Главе 1, совместно с предыдущими работами по данной теме [28; 41], показывают, что наблюдения в нескольких диапазонах электромагнитного спектра, в данном случае в радио- и оптическом, позволяют исследовать структуру и физические условия в системе «аккреционный диск — джет». Это подчеркивает научную значимость подобных исследований и служит их мотивацией.

Результаты анализа переменности линейной поляризации и ее усредненных по эпохам значений в джетах получены на основе богатого наблюдательного материала, накопленного в рамках самого крупного проекта по исследованию АЯГ (MOJAVE), а потому являются значимыми для более глубокого понимания свойств магнитного поля в релятивистских струях и уточнения моделей джетов.

Достоверность результатов

Достоверность результатов исследования основывается на использовании данных наблюдений, полученных на инструментах мирового класса и традиционных методах обработки данных. Полученные результаты проверялись с помощью стандартных статистических подходов, например, рандомизационного теста [43], бутстрапа [44] и Монте-Карло моделирования. Достоверность дополнительно обоснована апробацией основных результатов на научных конференциях и семинарах, а также их публикацией в международных журналах.

Методология и методы исследования

В данной работе картографирование РСДБ-данных АЯГ проводилось с помощью стандартного метода CLEAN [45], реализованного в пакете *DIFMAP* [46]. Усреднение степени поляризации в Главе 1 выполнялось с использова-

нием метода максимального правдоподобия [47]. Полная поперечная структура релятивистского джета в полной интенсивности восстанавливалась с помощью метода стекинга (пространственно-временного усреднения) [15]. Также при анализе данных применялись корреляционный тест Кендалла [48], статистический тест Андерсона-Дарлинга [49], бутстрап [44] и рандомизационный тест [43].

Апробация результатов

Результаты представлялись на следующих российских и международных конференциях:

- XXXVI Всероссийская конференция «Актуальные проблемы внегалактической астрономии», Пущино, 24–27 апреля 2019 г.
- «A Centenary of Astrophysical Jets: Observation, Theory, and Future Prospects», обсерватория Джодрелл Бэнк, Великобритания, 23–26 июля 2019 г.
- XVII Конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования», Москва, 30 сентября – 2 октября 2020 г.
- 63-я Всероссийская научная конференция МФТИ, Москва, 23–29 ноября 2020 г.
- «Extragalactic jets on all scales — launching, propagation, termination», Гейдельберг, Германия, 14–18 июня 2021 г. (онлайн).
- EVN Mini-Symposium & Users Meeting, Корк, Ирландия, 12–14 июля 2021 г. (онлайн).
- Всероссийская астрономическая конференция 2021 года «Астрономия в эпоху многоканальных исследований», Москва, 23–28 августа 2021 г.
- 64-я Всероссийская научная конференция МФТИ, Москва, 29 ноября – 3 декабря 2021 г.
- 15th EVN Symposium & Users Meeting: Providing the Sharpest View of the Universe, Корк, Ирландия, 11–15 июля 2022 г.

Основные результаты, выносимые на защиту

1. Исследованы направление и степень оптической линейной поляризации у 287 АЯГ со значимыми сдвигами РСДБ–*Gaia*. Получено, что объекты со сдвигами вниз по струе имеют значимо бóльшую степень поляризации (медиана 4.7%), чем источники с противоположным направлением сдвига (медиана 1.2%). Это обусловлено тем, что сдвиг вниз по струе происходит из-за протяженного оптического выброса, а смещение в противоположную сторону — из-за доминирования аккреционного диска в полном оптическом излучении. Также обнаружено, что у большинства источников со сдвигами вниз по выбросу направление оптической поляризации сонаправлено с выбросом, что является указанием на крупномасштабное тороидальное магнитное поле струи.

2. Анализ РСДБ-карт распределений усредненной по эпохам степени линейной поляризации 436 АЯГ в радиодиапазоне на частоте наблюдения 15 ГГц показал ее значимый рост вниз по струе, типично на 12% (в среднем около 2%/мсек дуги). Это может быть вызвано такими эффектами, как укручение спектрального индекса, ослабление ударных волн и уменьшение деполяризации, порожденной фарадеевским вращением, с расстоянием от РСДБ-ядра. Установлено значимое возрастание, типично на 20%, степени линейной поляризации к краю струи, а также асимметричность поперечных профилей поляризационной интенсивности и степени поляризации. Это указывает на тороидальную или спиральную конфигурацию крупномасштабного магнитного поля выброса.

3. Исследование стековых РСДБ-карт направления линейной поляризации 436 АЯГ на частоте наблюдения 15 ГГц показало, что наблюдаются три основные характерные распределения: 1) преимущественно вдоль хребтовой линии в пределах центрального канала струи (типично для лацертид), 2) ортогонально выбросу по всей его ширине (типично для квазаров и радиогалактик), 3) с постепенным поворотом электрического вектора от локального направления выброса в центральном канале к поперечному у его края (типично для квазаров). При этом профиль стековой степени поляризации поперек струи имеет U- или W-образную форму. Эти наблюдательные результаты указывают на присутствие спирального магнитного поля, ассоциированного с выбросом, с возможным образованием сдвигового слоя и соответствующей оболочки с продольным полем в результате взаимодействия выброса с окружающей средой.

4. Проведен анализ РСДБ-карт переменности линейной поляризации 436 АЯГ на частоте 15 ГГц. Обнаружено, что переменность направления поляризации в области РСДБ-ядра значимо выше (медиана примерно 25°), чем во внешних областях струи (медиана около 10°). Это может являться следствием искривленности струи в РСДБ-ядре и/или того, что компоненты с разным направлением поляризации в этой области не разрешаются. Установлено, что направление поляризации в РСДБ-ядрах лацертид более стабильно, чем в квазарах. Показано, что направление поляризации в выбросе обычно становится более стабильным с удалением от РСДБ-ядра: типичные изменения направления поляризации спадают с $\approx 28^\circ$ около РСДБ-ядра до примерно 8° на периферии струи. Причиной этого может являться возрастание доли регулярной компоненты магнитного поля.

Публикации автора по теме диссертации

Основные результаты по теме диссертации изложены в трех научных статьях, опубликованных в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК.

- A1. *Kovalev Y. Y., Zobnina D. I., Plavin A. V., Blinov D.* Optical polarization properties of AGNs with significant VLBI-Gaia offsets // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2020. — Vol. 493, no. 1. — P. L54–L58. — DOI: [10.1093/mnrasl/slaa008](https://doi.org/10.1093/mnrasl/slaa008).
- A2. *Pushkarev A. B., Aller H. D., Aller M. F., Homan D. C., Kovalev Y. Y., Lister M. L., Pashchenko I. N., Savolainen T., Zobnina D. I.* MOJAVE XX. Persistent linear polarization structure in parsec-scale AGN jets // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2023. — Vol. 520, no. 4. — P. 6053–6069. — DOI: [10.1093/mnras/stad525](https://doi.org/10.1093/mnras/stad525).
- A3. *Zobnina D. I., Aller H. D., Aller M. F., Homan D. C., Kovalev Y. Y., Lister M. L., Pashchenko I. N., Pushkarev A. B., Savolainen T.* MOJAVE - XXI. Decade-long linear polarization variability in AGN jets at parsec scales // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2023. — Vol. 523, no. 3. — P. 3615–3628. — DOI: [10.1093/mnras/stad1481](https://doi.org/10.1093/mnras/stad1481).

Личный вклад

В работе [A1] соискатель оценил вклад релятивистского джета, аккреционного диска и областей рассеяния излучения в интегральную оптическую поляризацию АЯГ по опубликованным теоретическим и наблюдательным работам, проанализировал данные и участвовал, наравне с другими соавторами, в обсуждении результатов и подготовке публикации.

В работе [A2] вклад соискателя заключается в анализе стековых карт степени и направления поляризации, поляризационной интенсивности, а также участии, наравне с другими соавторами, в обсуждении результатов и подготовке публикации.

В работе [A3] вклад соискателя основной. Он включает в себя построение РСДБ-карт распределения стековой полной интенсивности, переменности поляризации и медианной по эпохам степени поляризации, а также медианной поляризационной интенсивности, проведение анализа этих карт, обсуждение результатов и подготовку публикации.

Объем и структура работы.

Диссертация состоит из Введения, двух Глав, Заключения и Приложения. Полный объем диссертации составляет 159 страниц, включая 77 Рисунков и 7 Таблиц. Список литературы содержит 179 наименований.

Глава 1. Свойства оптической линейной поляризации АЯГ со значимыми радио-оптическими сдвигами положений

1.1 Исследование различия между положением АЯГ в радио- и оптическом диапазонах

Аккреционный диск АЯГ имеет субпарсековые масштабы [50; 51]. Прямые наблюдения этих областей на данный момент невозможны из-за недостаточного углового разрешения оптических инструментов. Для оценки размера аккреционного диска, к примеру, используют переменность кривых блеска в оптическом диапазоне [50] или эхокартирование [51]. В работах [26; 28; 41; 52; 53] предлагалось исследовать систему «аккреционный диск — джет» с помощью эффекта сдвига между положением АЯГ, определенным в радиодиапазоне с помощью РСДБ, и положением, измеренным космическим оптическим телескопом *Gaia* [27], так называемый сдвиг РСДБ–*Gaia*.

В работе [25] сравнивались положения в радио- и оптическом диапазонах примерно 2200 АЯГ, которые входили во вторую реализацию международной небесной системы отсчета ICRF2 [54] и для которых были проведены наблюдения на телескопе *Gaia*. Для построения ICRF2 были использованы РСДБ-наблюдения, проведенные до 2008 года. Система отсчета *Gaia* совмещалась с системой отсчета ICRF2 [55], поэтому различия между положениями источников не ожидалось. Действительно, медианное угловое расстояние между координатами в радио- и оптическом диапазонах составило ≈ 1.2 мсек дуги. Однако, для примерно 130 активных ядер измеренное угловое расстояние между положениями превышало 10 мсек дуги. Около 5% рассматриваемых объектов показывали значимую разницу на уровне 1 мсек дуги и более. Авторы предположили, что причинами таких различий могли являться форма яркой хозяйской галактики или близко расположенная звезда в проекции на небо.

Позже было проведено подобное сравнение координат в радио- и оптическом диапазонах для более полной по сравнению с используемой в работе

[25] реализации каталога *Gaia* Data Release 1 [55] и каталога Radio Fundamental Catalogue¹ (RFC) 2016с, в котором были собраны РСДБ-наблюдения вплоть до 2016 года [26]. RFC 2016с содержал в 3.5 раза больше источников, чем ICRF2. Пересечение каталогов *Gaia* Data Release 1 и RFC 2016с составило около 6000 АЯГ с вероятностью ложной позиционной кросс-идентификации менее 2×10^{-4} . Медианный сдвиг между положениями в разных диапазонах составил 2.2 мсек дуги. Из этой выборки 384 объекта имели значимые на уровне 3σ радио-оптические смещения положений, которые частично объясняются большими ошибками РСДБ- и *Gaia*-координат из-за недостаточного количества наблюдений. Однако, у примерно 2/3 источников погрешности были малы, причем среди таких активных ядер много объектов с положениями в оптическом диапазоне, измеренными с большой точностью. Это является аргументом в пользу существования АЯГ с радио-оптическими сдвигами, причинами которых являются физические условия в источнике. Для понимания этих причин необходимо привлечь дополнительную информацию о структуре источников на миллисекундных масштабах.

Источники, для которых проводились измерения РСДБ-координат, являются радиогромкими и имеют асимметричную структуру «РСДБ-ядро — выброс». Пусть смещение положений РСДБ–*Gaia* направлено от астрометрических координат источника в радио- к координатам в оптическом диапазоне. Тогда можно определить угол Ψ между направлением сдвига РСДБ–*Gaia* и направлением джета на парсековых масштабах: углу $\Psi = 0^\circ$ соответствует сдвиг по направлению струи, $\Psi = 180^\circ$ — смещение в сторону начала струи (Рисунок 1.1). В работе [52] измерили Ψ для около 3000 активных ядер. Анализ этих источников показал, что распределение угла Ψ имеет значимые пики на 0° (p -value $< 10^{-8}$) и 180° (p -value ≈ 0.007) для всей выборки. Этот результат сохраняется, если рассматривать объекты с погрешностью координат менее 50%. Наличие предпочтительного направления сдвига координат указывает на то, что смещения нельзя полностью объяснить неучтенными ошибками измерений. Действительно, такие погрешности могли бы способствовать либо равномерному распределению сдвигов РСДБ–*Gaia* по углу Ψ , либо наличию преобладающего направления, которое бы определялось инструментом, например, направление сканирования в случае систематических ошибок *Gaia* [53]. Предпочтительное направление вдоль выброса может быть создано только за счет структуры «РСДБ-ядро — джет».

¹<http://astrogeo.smce.nasa.gov/>

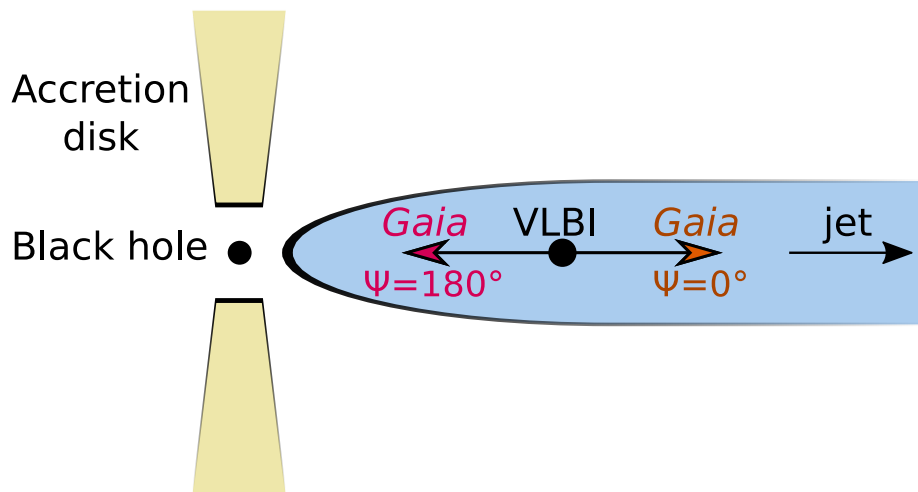


Рисунок 1.1 — Диаграмма направления сдвигов РСДБ–*Gaia* относительно парсекового выброса: $\Psi = 0^\circ$ соответствует сдвигу вниз по джету (положение в оптическом диапазоне дальше от центральной машины, чем в радио), $\Psi = 180^\circ$ — вверх по струе (положение в оптическом диапазоне ближе к началу джета, чем в радио). На рисунке указаны основные компоненты АЯГ: черная дыра, аккреционный диск и релятивистский джет.

РСДБ-координаты определяются с помощью измерений функции видности, поэтому на них не оказывает влияние протяженная структура источника. Телескоп *Gaia*, наоборот, проводит наблюдение полного оптического потока от объекта. Следовательно, протяженный оптический джет на масштабах сотен парсек, который наблюдается в некоторых активных ядрах [56; 57], может смещать положение, измеряемое *Gaia*, по струе. Аккреционный диск и хозяйская галактика способствуют сдвигам координат вверх по выбросу и в любом направлении, соответственно. Положение РСДБ-ядра зависит от частоты наблюдения [58–61]: чем выше частота, тем ближе наблюдаемое РСДБ-ядро к апексу джета из-за синхротронного самопоглощения. Этот эффект может способствовать смещению радио-координат по струе, то есть образованию сдвига с $\Psi = 180^\circ$. Сдвиг РСДБ-ядра в сантиметровом диапазоне составляет порядка мсек дуги и меньше [62–65]. В работе [66] было получено, что если смещение РСДБ-ядра зависит от частоты наблюдения ν как ν^{-1} , то этот эффект не влияет на положение РСДБ-ядра, измеряемое с помощью абсолютной РСДБ-астрометрии. Наблюдения (например, [62]) показывают, что систематического отклонения от этой зависимости нет, а остаточное смещение РСДБ-ядра для источников с другой зависимостью [65] на порядок меньше, чем измеряемые сдвиги РСДБ–*Gaia* с $\Psi = 180^\circ$. Сильное рассеяние радиоизлучения (например, [67]) и яркий контр-

джет также сдвигают РСДБ-координаты, но для большинства источников такие ситуации встречаются редко.

В работе [41] исследовались АЯГ со сдвигами РСДБ–*Gaia*, полученные при пересечении каталога *Gaia* Data Release 2 [27] и RFC 2018b. Оба каталога содержат бóльшее количество источников по сравнению с теми, которые использовались в статьях [26; 52; 53]. В *Gaia* Data Release 2 также значимо выше точность положений активных ядер, чем в *Gaia* Data Release 1. Пересечение *Gaia* Data Release 2 и RFC 2018b составило около 9000 объектов с вероятностью ложной позиционной кросс-идентификации менее 2×10^{-4} . При этом медианная величина смещения РСДБ–*Gaia* равнялась 1.2 мсек дуги. Количество источников со значимыми радио-оптическими сдвигами положений составило примерно 900. Распределение этих объектов по Ψ подтверждает результат работы [52] о существовании значимых пиков на значениях 0° и 180° .

Активные ядра со сдвигами РСДБ–*Gaia* с $\Psi = 180^\circ$ имеют преимущественно голубой цвет в оптическом диапазоне, в то время как объекты с $\Psi = 0^\circ$ — как красный, так и голубой цвет [41]. Эти особенности указывают на то, что причиной сдвигов с $\Psi = 0^\circ$ может являться яркий протяженный оптический джет, который смещает центростид *Gaia* дальше от начала струи, а с $\Psi = 180^\circ$ — преобладание аккреционного диска в полном оптическом потоке [41]. Действительно, пик спектра теплового излучения аккреционного диска находится в ультрафиолетовом диапазоне, а парсековые джеты большинства источников исследуемой выборки имеют частоту пика синхротронного излучения ниже 10^{14} Гц и, следовательно, обладают спадающим спектром в оптическом диапазоне [68]. Если источник со смещением РСДБ–*Gaia* по струе имеет голубой цвет, то это может соответствовать случаю, когда основной вклад в оптическое излучение делает аккреционный диск, но также присутствует протяженный оптический выброс. АЯГ со сдвигами, направленными по выбросу и против него, также различаются величиной смещения: сдвиги по джету больше (до 20–50 мсек дуги), чем в сторону центрального источника (до 2–5 мсек дуги) [41].

В объектах с малым углом к лучу зрения оптическое излучение релятивистского джета имеет высокую степень поляризации, а излучение аккреционного диска почти неполяризовано из-за симметрии относительно оси системы (Разделы 1.4 и 1.5), поэтому используя данные об интегральной линейной оптической поляризации можно проверить гипотезу о причинах сдвигов, выделить АЯГ с яркими протяженными оптическими выбросами и определить конфигу-

рацию магнитного поля в этих выбросах. В данной главе приводятся результаты анализа оптической поляризации АЯГ с наблюдаемыми сдвигами РСДБ–*Gaia*. Основные результаты, Таблицы и Рисунки, кроме Рисунка 1.7, опубликованы в статье [A1]. Личный вклад в данную работу приводится во Введении к диссертации.

1.2 Наблюдательные данные и выборка

В работе [28] была получена выборка из 9081 АЯГ, у которых РСДБ-положение не совпадает с координатами, измеренными *Gaia*. Эти источники были найдены путем пересечения RFC 2018b, который является наиболее полным каталогом РСДБ-положений АЯГ, и *Gaia* Data Release 2 [27]. Вероятность ложной позиционной кросс-идентификации этих объектов не превышает 2×10^{-4} . Около 9% источников из этой выборки имеют значимые сдвиги РСДБ–*Gaia* с ошибками $\sigma_\Psi < 35^\circ$, что примерно соответствует 2σ [41]. Такие значения Ψ в нашем анализе считались значимыми. Также предполагалось, что источник имеет сдвиг вниз по струе ($\Psi = 0^\circ$), если у него $\Psi \in (-45^\circ, +45^\circ)$, и вверх по джету ($\Psi = 180^\circ$), если $\Psi \in (180^\circ - 45^\circ, 180^\circ + 45^\circ)$.

Одноэпоховые измерения оптической линейной поляризации 430 блазаров были взяты из статей [69; 70]. В этих работах источники в основном наблюдались в оптической полосе V на телескопе Very Large Telescope и 3.6-м телескопе, расположенных в Европейской южной обсерватории. Порог детектирования степени поляризации составлял 0.6%, погрешность направления поляризации — меньше 14° .

Информация также была взята из наблюдений двух программ мониторинга оптической поляризации блазаров: Kanata [71] и RoboPol [72]. Были использованы данные из проекта Kanata для 27 АЯГ в полосе R, для 37 источников — в полосе V. Степень поляризации для каждого АЯГ усреднялась по эпохам методом максимального правдоподобия [47], который учитывает одновременно и переменность поляризации, и инструментальную погрешность. Степень поляризации 158 блазаров, измеренная в рамках программы RoboPol [73] в полосе R, тоже усреднялась по эпохам методом максимального правдоподобия. Среднее

по эпохам направление поляризации для каждого АЯГ вычислялось как позиционный угол центра измерения на плоскости параметров Стокса Q и U . Результаты такого подхода более точные, чем вычисление медианы распределения направления поляризации в случае, если пик распределения находится около перехода $180^\circ - 0^\circ$.

Если АЯГ наблюдалось в обеих программах мониторинга, предпочтение отдавалось каталогу RoboPol, потому что их наблюдения проводились почти одновременно (2013–2014 гг.) с *Gaia*. В случае, если для объекта имелись данные и в полосе V, и в полосе R в проекте Kanata, использовалось значение в полосе R, поскольку эти наблюдения обычно имеют большее отношение сигнала к шуму. Степень поляризации излучения АЯГ в соседних полосах V и R согласуется в пределах ошибок для большинства источников, поскольку она слабо зависит от длины волны в оптическом диапазоне (например, [74]). Таким образом, были собраны архивные данные усредненных по эпохам степени и направления поляризации для 535 источников.

Пересечение выборки АЯГ с измеренной оптической поляризацией с источниками со значимыми сдвигами РСДБ–*Gaia* составляет 287 активных ядер. Именно эти объекты рассматривались в данном исследовании. Пять источников из этой выборки не имеют значимо детектируемой поляризации, поэтому они были исключены из анализа направления поляризации. Степень поляризации у этих объектов была взята равной уровню детектирования, поскольку эти верхние пределы меньше всех значимых значений в выборке.

1.3 Свойства оптической поляризации АЯГ со значимыми сдвигами РСДБ–*Gaia*

Были выделены подвыборки квазаров и лацертид, а также подвыборки по величине угла Ψ : $\Psi = 0^\circ$, $\Psi = 180^\circ$ и остальные значения угла. В случае разделения по величине Ψ рассматривались только значимые смещения ($\sigma_\Psi < 35^\circ$), поскольку разделение идет по значению угла Ψ . Свойства подвыборок описаны в Таблице 1.1.

Таблица 1.1 — Свойства подвыборок. Колонки: (1) подвыборка; (2) число источников в подвыборке; (3) значимость пика на 0° в распределении $EVPA-PA_{jet}$, где $EVPA$ (electric vector position angle) — позиционный угол электрического вектора в оптическом диапазоне, PA_{jet} — позиционный угол парсекового джета (Рисунки 1.2 и 1.3); (4) медиана степени линейной поляризации в оптическом диапазоне p_{med} и ее погрешность на уровне 1σ (Рисунки 1.4, 1.5, 1.6). В данной таблице представлены АЯГ, для которых имеются измерения оптической поляризации (Раздел 1.2) и наблюдаются значимые радио-оптические сдвиги положений [28; 41] с любым уровнем значимости величины угла Ψ . Вся выборка включает в себя квазары, лацертиды, сейфертовские галактики и радиогалактики. Подвыборки « $\Psi = 0^\circ$ », « $\Psi = 180^\circ$ » и «Другие значения Ψ » получены из полной выборки, представленной в Таблице, после фильтрации по σ_Ψ (Раздел 1.2). Метод оценивания значимости пика в колонке (3) описывается в Разделе 1.3.1.

| Подвыборка (1) | Число источников (2) | Значимость пика на 0° (3) | p_{med} (%) (4) |
|------------------------|-------------------------|-------------------------------------|----------------------|
| Полная выборка | 287 | 0.999 | $3.7^{+0.2}_{-0.2}$ |
| Квазары | 134 | 0.789 | $2.5^{+0.6}_{-0.5}$ |
| Лацертиды | 99 | >0.999 | $8.1^{+0.3}_{-0.6}$ |
| $\Psi = 0^\circ$ | 82 | >0.999 | $4.7^{+0.4}_{-0.8}$ |
| $\Psi = 180^\circ$ | 37 | 0.932 | $1.2^{+0.2}_{-0.3}$ |
| Другие значения Ψ | 35 | 0.887 | $3.7^{+1.0}_{-1.3}$ |

1.3.1 Направление оптической поляризации

Распределение угла между направлением поляризации (позиционный угол электрического вектора; $EVPA$) в оптическом диапазоне из опубликованных данных (Раздел 1.2) и направлением парсекового джета PA_{jet} , измеренным по РСДБ-изображениям в работе [41], $EVPA-PA_{jet}$ приведено на Рисунках 1.2 и 1.3. На $EVPA-PA_{jet} = 0^\circ$ наблюдается значимый пик для всей выборки и отдельно для лацертид (Таблица 1.1). Более того, наиболее ярко выраженный пик на 0° проявляется у тех АЯГ, у которых значимые смещения РСДБ-*Gaia* с $\Psi = 0^\circ$. Согласно [41], оптическое излучение таких объектов в основном приходит из джета. Значимость пика на 0° оценивалась с помощью метода бутстрап с использованием 10000 случайных реализаций, в каждой из которых из первоначальной выборки была взята подвыборка с заменой равная по количеству объектов выборке. Значимость пика оценивалась, как доля реализаций, в которых количество источников с $-30^\circ < EVPA < 30^\circ$ больше, чем в случае

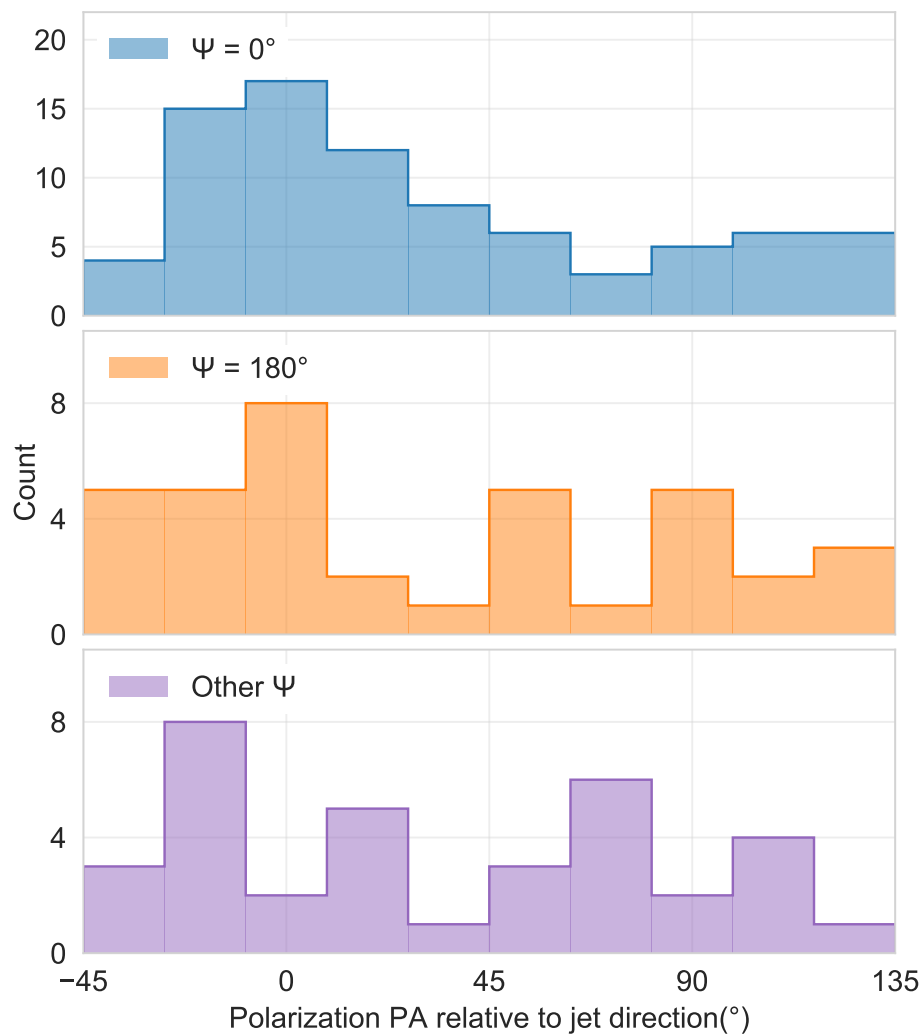


Рисунок 1.2 — Распределение угла между EVPA в оптическом диапазоне и направлением парсекового джета в градусах для АЯГ со сдвигами РСДБ–*Gaia* и разными значениями угла Ψ : $\Psi = 0^\circ$ (сверху), $\Psi = 180^\circ$ (посередине) и другие значения Ψ (снизу). Свойства подвыборок описаны в Таблице 1.1.

равномерного распределения. Преимуществом метода бутстрап является отсутствие требований к распределению данных, поскольку вероятность оценивается исходя из наблюдаемого распределения величины. Более подробное описание этого подхода приведено в [44].

Сонаправленность направления оптической поляризации со струей была отмечена и ранее. В работе [75] параллельность оптического EVPA и направления парсекового выброса была обнаружена для 21 АЯГ. Позже, для 18 квазаров была найдена преимущественно сонаправленность между направлением поляризации в оптическом диапазоне и направлением наиболее внутренних частей струи, измеренным на частоте 43 ГГц [76]. Особенностью этого анализа являлось то, что наблюдения в радио- и оптическом диапазонах были неод-

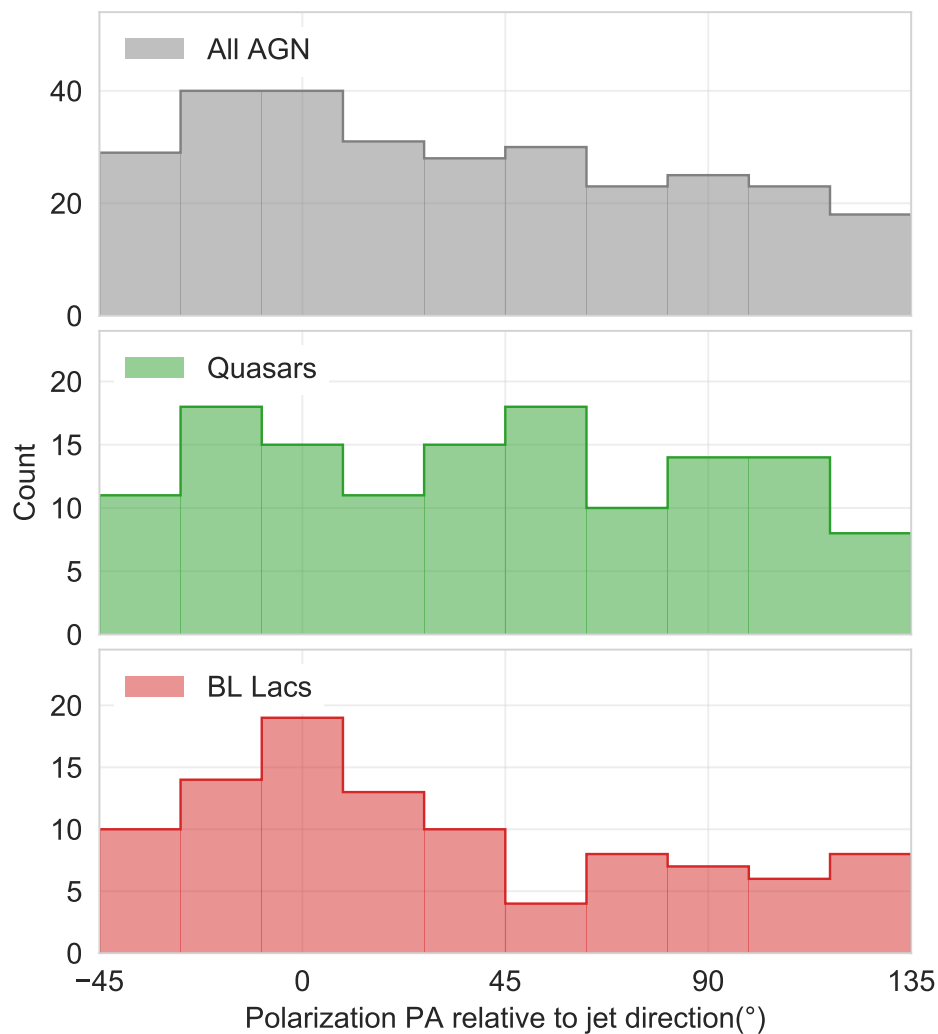


Рисунок 1.3 — Распределение угла между EVPA в оптическом диапазоне и направлением парсекового джета в градусах для АЯГ со сдвигами РСДБ–*Gaia*: вся выборка (сверху), отдельно квазары (посередине) и лацертиды (снизу). Свойства подвыборок описаны в Таблице 1.1.

новременными. Промежуток времени между ними составлял примерно месяц. В работах [77–79] подобная сонаправленность была подтверждена для лацертид. В [77] наблюдения в радио- на частоте 5 ГГц и оптическом диапазонах проводились одновременно, в остальных статьях использовалось направление РСДБ-структуры на частотах 2, 8, 15, 22 и 43 ГГц из опубликованных данных. Параллельность EVPA в оптическом диапазоне и направления выброса может являться указанием на доминирование тороидальной компоненты магнитного поля. Также была обнаружена корреляция между направлением оптической поляризации и направлением килопарсековой структуры у квазаров [80], сейфертовских галактик [81] и радиогалактик (например, [82]).

1.3.2 Степень оптической поляризации

На Рисунках 1.4, 1.5 и Таблице 1.1 видно, что типичная степень поляризации в оптическом диапазоне АЯГ с радио-оптическими сдвигами положений вверх по струе в несколько раз меньше, чем для источников со сдвигами вниз по джету. Значимость этого различия составляет больше 0.999. Согласно работе [8] из всех оптических классов активных ядер лацертиды имеют наибольший вклад синхротронного излучения джета в полный поток. Следовательно, они должны иметь сдвиги РСДБ–*Gaia* с $\Psi = 0^\circ$ [41] и наиболее высокую степень поляризации, что было известно ранее [83] и подтверждено нашим анализом (Рисунок 1.6, Таблица 1.1). Однако значимая разница между степенью поляризации источников со смещениями вниз и вверх по джету обусловлена не только лацертидами. Если рассматривать только квазары, значимость этого результата составляет 0.998. Для лацертид разница между источниками с $\Psi = 0^\circ$ и $\Psi = 180^\circ$ оказалась незначимой. Объекты этого оптического класса с $\Psi = 180^\circ$ имеют красный оптический цвет и сравнимую с источниками с $\Psi = 0^\circ$ степень поляризации. Следовательно, у лацертид со смещениями положения вверх по струе доминирует релятивистский джет в оптическом излучении, а угол $\Psi = 180^\circ$, вероятно, говорит о том, что центроид *Gaia* указывает на короткий оптический джет, основание которого находится выше по струе, чем начало радиоджета из-за синхротронного самопоглощения (например, [60]). Неопределенности медиан и значимость их разницы определялись с помощью подхода аналогичного случаю со значимостью пика на $EVPA - PA_{jet} = 0^\circ$ (Раздел 1.3.1). В каждой реализации к степени поляризации прибавлялась случайная ошибка, которая имела нормальное распределение со стандартным отклонением равным ошибке измерения. Значимость того, что медиана степени поляризации для одной выборки больше, чем для другой определялась, как количество реализаций, в которых это неравенство сохраняется. Также сравнивались поляризационные свойства объектов с большими и малыми сдвигами РСДБ–*Gaia*, но из-за небольшого количества источников значимых различий обнаружить не удалось.

Важно отметить, что АЯГ, для которых были собраны архивные поляризационные данные (Раздел 1.2), являются в основном блазарами и имеют большой вклад синхротронного излучения джета в полный поток. Следовательно, эта выборка может быть систематически смещена в сторону источников с

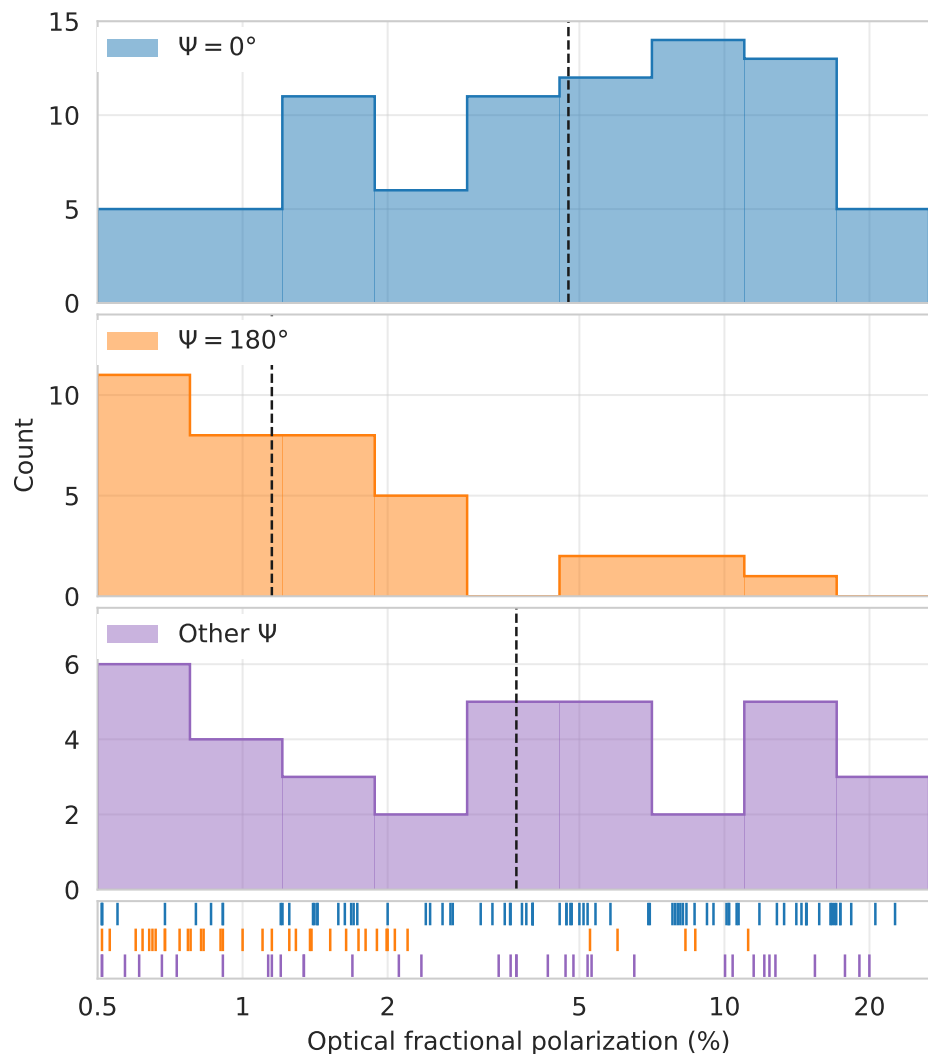


Рисунок 1.4 – Распределение степени поляризации в оптическом диапазоне в процентах для АЯГ со смещениями координат вниз по выбросу (« $\Psi = 0^\circ$ », сверху), вверх по выбросу (« $\Psi = 180^\circ$ », посередине) или имеющие другой угол с парсековым джетом (снизу). Информация по подвыборкам представлена в Таблице 1.1. Вертикальными пунктирными линиями обозначены медианы распределений. На нижнем рисунке черточками показаны значения степени поляризации отдельных источников. Ось степени поляризации логарифмическая, значения меньше 0.5% показаны равными 0.5%.

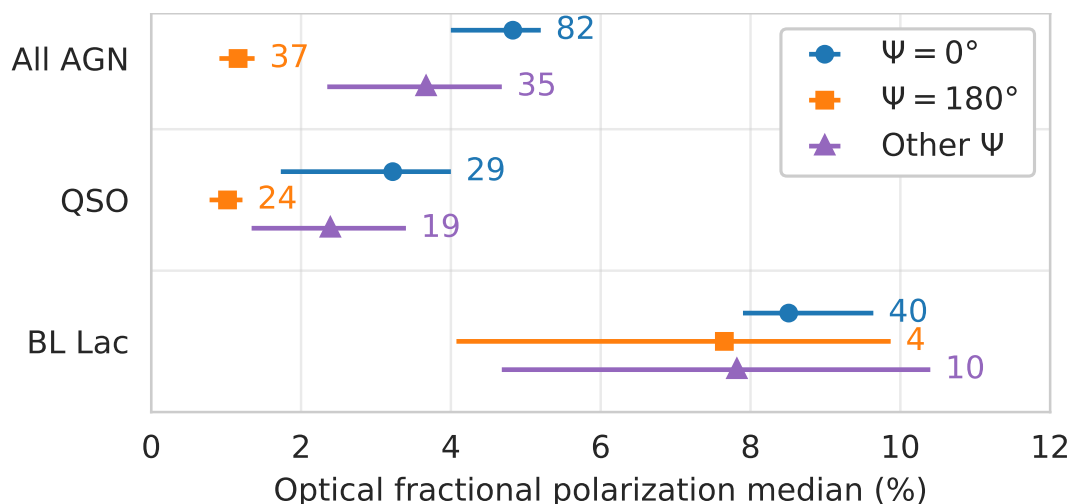


Рисунок 1.5 — Медианная степень оптической поляризации в процентах для полной выборки, квазаров и лацертид, которые имеют сдвиги РСДБ–*Gaia* и значимую величину угла Ψ ($\sigma_\Psi < 35^\circ$). Линиями показана ошибка на уровне 1σ , числами — количество источников в подвыборке, цветами — различные значения угла Ψ .

более высокой степени поляризации в оптическом диапазоне. Поэтому анализ был проведен также для двух выборок программы RoboPol, одна из которых состоит из несмещенной популяции ярких в гамма-диапазоне активных ядер, другая — слабых в гамма-диапазоне объектов. Информация о выборках приведена в статье [84]. В этой работе было показано, что степень поляризации ярких в гамма-диапазоне источников значимо выше степени поляризации слабых. Для первых средняя степень поляризации составляет 6.4%, для вторых — 3.2%. Причиной такого различия может являться более упорядоченное магнитное поле в областях, в которых зарождается основная часть синхротронного излучения, у ярких в гамма-диапазоне АЯГ, чем у слабых. Ударные волны, ускоряющие частицы, излучающие в гамма-диапазоне, могут способствовать упорядочиванию магнитного поля и, следовательно, увеличению степени поляризации. Анализ выборок гамма-ярких и гамма-слабых АЯГ подтвердил полученные нами ранее результаты, хотя и с меньшей значимостью из-за меньшего количества объектов. Пересечение исследуемой выборки с выборкой ярких в гамма-диапазоне источников составило 50 объектов, слабых в гамма-диапазоне источников — 12 АЯГ. На Рисунке 1.7 показана медиана степени поляризации для пересечения исследуемой выборки со сдвигами положений и значимой величиной угла Ψ с объединением выборок гамма-ярких и гамма-слабых активных ядер. Яркие в гамма-диапазоне источники типично имеют более высокие доплер-факторы [85; 86], поэтому у них вклад релятивистской струи в излучение выше. Благодаря

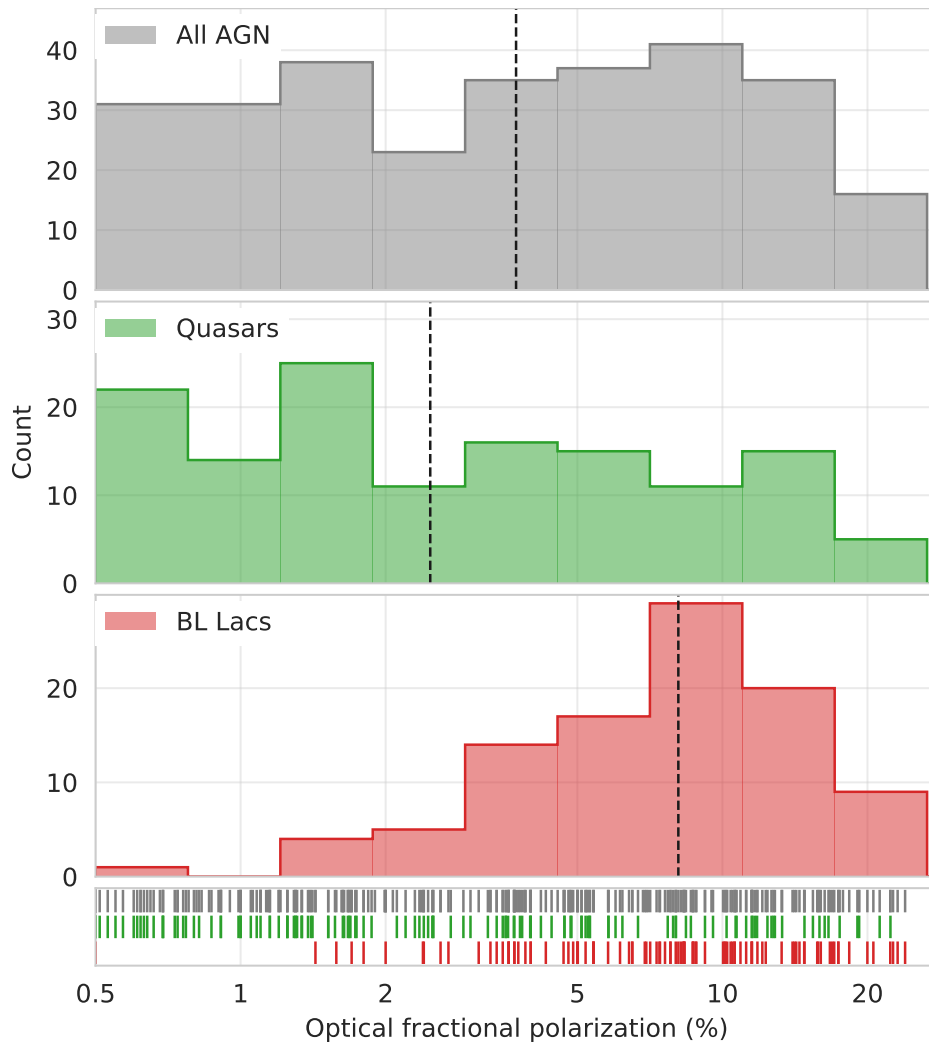


Рисунок 1.6 — Распределение степени поляризации в оптическом диапазоне в процентах для полной выборки АЯГ со сдвигами РСДБ–*Gaia* (сверху), а также отдельно для квазаров (посередине) и лацертид (снизу). Информация по подвыборкам приведена в Таблице 1.1. Вертикальными пунктирными линиями показаны медианы распределений. На нижнем рисунке черточками показаны значения степени поляризации отдельных источников. Ось степени поляризации логарифмическая, значения меньше 0.5% показаны равными 0.5%.

этой особенности большинство таких источников в исследуемой выборке имеют РСДБ–*Gaia* смещение, направленное по джету. Слабые в гамма-диапазоне объекты, рассматриваемые нами, наоборот, в основном показывают $\Psi = 180^\circ$.

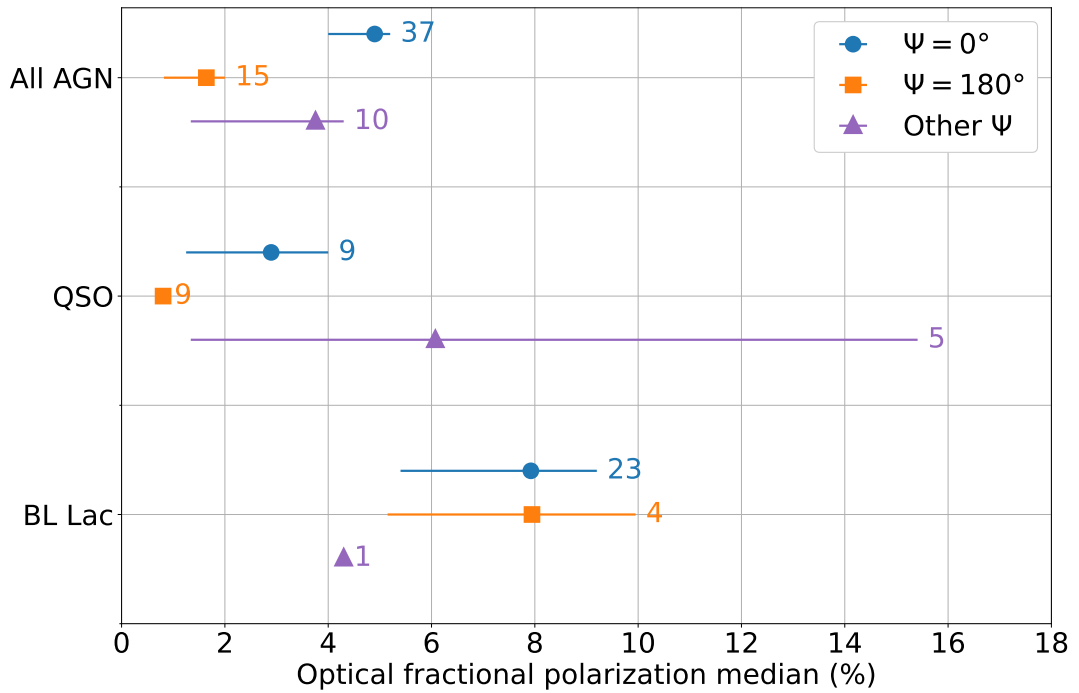


Рисунок 1.7 — Медианная степень оптической поляризации в процентах для всех АЯГ из пересечения исследуемой выборки с радио-оптическими сдвигами положений и значимой величиной угла Ψ с объединением выборок гамма-ярких и гамма-слабых источников из программы RoboPol, а также отдельно для квазаров и лацертид. Линиями показана ошибка на уровне 1σ , числами — количество источников в подвыборке, цветами — различные значения угла Ψ . Неопубликованный иллюстративный материал, рисунок выполнен диссертантом.

1.4 Области образования поляризованного оптического излучения в АЯГ

Основной вклад в оптическое излучение активных ядер галактик вносят релятивистская струя, аккреционный диск и области образования широких и узких эмиссионных линий. Механизмы излучения этих областей и физические условия в них сильно различаются, что оказывает влияние на характеристики линейной поляризации в оптическом диапазоне. Наличие нескольких областей со сравнимой плотностью потока поляризованного излучения, но с разным EVPA, приводит к уменьшению интегральной степени поляризации и влияет на ее результирующее направление.

1.4.1 Релятивистская струя

Из теории [87; 88] и наблюдений (например, [73; 89]) известно, что синхротронное излучение релятивистских струй является сильно поляризованным. Теоретический предел для степени поляризации этого излучения в оптически тонком случае составляет около 75% [87] в однородном магнитном поле. Наблюдаемая степень поляризации джетов в радиодиапазоне варьируется от нескольких процентов в частично оптически толстом РСДБ-ядре до нескольких десятков процентов в областях оптически тонкого джета [90]. В радиодиапазоне РСДБ-ядро доминирует в полном и линейно-поляризованном излучении на парсековых масштабах (например, [90; 91]). В оптическом диапазоне наблюдаемая степень поляризации выброса достигает 45% [92]. Также фарадеевское вращение фактически не влияет на направление линейной поляризации излучения с такими малыми длинами волн, как в оптическом диапазоне. Следовательно, определив оптический EVPA, можно сделать вывод об ориентации магнитного поля в области струи, из которой приходит бóльшая часть поляризованного излучения.

1.4.2 Аккреционный диск

Тепловое излучение аккреционного диска рассеивается, проходя через его атмосферу и таким образом поляризуется. Теоретические модели предсказывают возрастание степени поляризации с увеличением угла θ между осью симметрии системы и лучом зрения до 10–20% и выше. Например, в работах [93; 94] для упрощения рассматривается только рэлеевское рассеяние, в этом случае степень поляризации излучения диска может достигать $\approx 12\%$ для $\theta = 90^\circ$, при этом EVPA будет перпендикулярен оси диска. Также можно учитывать рассеяние оптически толстого излучения аккреционного диска на ветре от этого диска [95]. Это приводит к сонаправленности EVPA и струи, а максимальная степень поляризации составляет около 12%.

1.4.3 Области рассеяния за пределами аккреционного диска

Излучение из центральных областей активного ядра может становиться линейно-поляризованным за счет томсоновского рассеяния на электронах и пыли в экваториальной плоскости за пределами аккреционного диска. Этот механизм был предложен для объяснения направления оптической поляризации параллельного джету у АЯГ, у которых наблюдается область образования широких эмиссионных линий [96]. В этой статье предполагалось, что рассеяние происходит на слое вещества, находящимся в плоскости диска за его пределами или даже дальше, чем область образования широких эмиссионных линий. Причем было обнаружено, что форма этого слоя слабо влияет на степень и направление поляризации [97]. Максимальная степень поляризации, порожденная таким рассеянием, составляет около 10%, а ее направление зависит от геометрической толщины слоя и оптической толщи.

В статье [97] также рассматривалось рассеяние излучения от центрального источника на электронах и пыли в полярной области, которую обычно представляют в виде конуса. Он может являться ветром от аккреционного диска или образовываться в результате прецессии струи. Направление поляризации в этом случае будет перпендикулярно оси конуса. Степень поляризации возрастает с увеличением угла к лучу зрения, поскольку томсоновское рассеяние на большие углы способствует более высокой степени поляризации. При больших углах раскрыва степень поляризации становится меньше, так как происходит суммирование по более широкому распределению направлений поляризации. При угле раскрыва 10° максимальная степень поляризации может превосходить 80%, при 45° — уже примерно 40%–50%. В работе [97] отмечалось, что высокие степени поляризации (более 60%) не наблюдаются из-за неоднородности рассеивающего конуса и/или высокой оптической толщи.

Рассеяние излучения аккреционного диска может происходить на пылевом торе. Его вещество переизлучает ультрафиолетовые и оптические фотоны от диска в инфракрасном диапазоне (например, [98]). В более ранних работах пыль в торе описывалась непрерывным тороидальным распределением [99; 100]. Такая конфигурация может быть нестабильной, поэтому были предложены модели, в которых тор имел комковатую структуру (например, [101–103]). На такую структуру также указывают наблюдения [104–106]. Вещество в торе частич-

но ионизируется центральным источником. Наблюдения сейфертовских галактик показывают, что угол полураскрыва тора составляет 40° – 50° [107; 108]. При рассеянии на торе направление поляризации почти везде будет перпендикулярно его оси, а максимальная степень поляризации (20%–30% [97], а в некоторых работах [109] до 60%) достигается при больших углах к лучу зрения, при которых тор для наблюдателя не выглядит осесимметричным.

1.5 Обсуждение результатов анализа оптической поляризации

Подавляющее большинство объектов исследуемой выборки являются блазарами, которые наблюдаются под малым углом к лучу зрения ($\theta \approx 5^\circ$). В пользу этого говорят видимые сверхсветовые скорости [9; 10], высокие доплер-факторы [10–12] и наблюдаемые односторонние релятивистские струи [42]. Таким образом, степень поляризации излучения от аккреционного диска, тора и рассеивающих областей, согласно приведенным выше моделям, не превосходит 1% из-за симметрии системы, а направление поляризации зависит от модели. Следовательно, доминирующий вклад в линейно-поляризованное оптическое излучение активного ядра вносит релятивистская струя.

Сравнение направления парсекового джета и EVPA в оптическом диапазоне (Раздел 1.3.1) показало, что направление поляризации преимущественно сонаправлено со струей. Наиболее ярко это видно для АЯГ со сдвигами РСДБ–*Gaia* вниз по выбросу. У таких источников предполагается, что джет вносит доминирующий вклад в оптическое излучение [41]. Следовательно, этот результат указывает на доминирование тороидальной компоненты магнитного поля (например, [110]), поскольку излучение релятивистской струи оптически тонкое. Таким образом, сонаправленность EVPA и направления парсекового выброса, измеренного по РСДБ–данным, указывает на крупномасштабное тороидальное поле джета [16; 17] или на ударные волны [111], распространяющиеся по струе.

Анализ направления радио-оптических смещений координат и интегральной степени оптической поляризации АЯГ подтверждает предположение о том, что большинство наблюдаемых сдвигов связано с физическими свойствами си-

стемы «аккреционный диск — джет». Медиана степени поляризации источников с $\Psi = 180^\circ$ оказалась наименьшей во всей выборке и в подвыборке квазаров (Таблица 1.1, Рисунок 1.5). Этот результат указывает на то, что аккреционный диск доминирует или, по крайней мере, вносит значительный вклад в оптическое излучение активных ядер со сдвигами положений вверх по струе, в то время как релятивистские выбросы определяют наблюдательные свойства объектов со сдвигами вниз по струе. Полученные выводы показывают, что оптическая поляриметрия является важным дополнительным источником информации. Она, совместно с наблюдениями на космическом телескопе *Gaia* и на РСДБ-решетках, помогает разделить вклады аккреционного диска и струи в полное излучения АЯГ и исследовать их по отдельности. Другой подход к решению этой проблемы представлен в работе [112], где разделение вкладов диска и джета в оптическое излучение блазара 3C 273 было сделано с использованием эхокартирования и многочастотных наблюдений.

Центральные области АЯГ могут быть закрыты пылевым тором. В этом случае положение, измеренное *Gaia*, будет сдвигаться вниз по струе относительно РСДБ-положения для источников, которые наблюдаются под большим углом к лучу зрения. В статье [41] рассматривается этот эффект для сейфертовских галактик. В сейфертовских галактиках I типа центральные области, содержащие аккреционный диск, доступны для наблюдения, а в сейфертовских галактиках II типа эти компоненты активного ядра закрыты пылевым тором [8]. Таким образом, сейфертовские галактики II типа почти не будут иметь смещений с $\Psi = 180^\circ$ в отличие от галактик I типа. Действительно, было обнаружено, что более 80% сдвигов РСДБ–*Gaia* в сейфертовских галактиках II типа имеют $\Psi = 0^\circ$, а у галактик I типа примерно половина смещений координат происходит вверх по струе.

В исследуемой выборке, содержащей 287 объектов, только 45 сейфертовских галактик и радиогалактик: восемь источников имеют значимое смещение координат по джету, девять — против направления джета, шесть — другие значения угла Ψ . Все результаты анализа поляризации сохраняются, если сейфертовские галактики и радиогалактики не рассматривать.

Пыль поглощает излучение от родительской галактики и таким образом может влиять на положение, измеряемое *Gaia*. Однако большинство блазаров находятся в гигантских эллиптических галактиках, у которых поглощение мало [113]. Более того, поглощение в родительской галактике приводило бы к разному направлению сдвигов относительно джета, но наблюдается сонаправленность

радио-оптических смещений координат с локальным направлением выброса [41; 52]. Вклад родительской галактики в излучение уменьшается с красным смещением, а сдвиги в квазарах в обоих направлениях видны у объектов и на малых, и на больших красных смещениях [41], также как разница в степени поляризации (Рисунок 1.5).

1.6 Выводы

В предыдущих работах [41; 52] высказывалась гипотеза о природе сдвигов между координатами АЯГ, измеряемыми оптическим телескопом *Gaia* и определяемыми с помощью РСДБ-астрометрии. Положение в оптическом диапазоне может сдвигаться к началу выброса, если аккреционный диск вносит доминирующий вклад в оптическое излучение. Смещение этого положения по струе было интерпретировано наличием яркого протяженного оптического джета. Анализ оптической линейной поляризации источников со значимыми сдвигами РСДБ–*Gaia* говорит в пользу этой гипотезы. Тепловое излучение аккреционного диска слабополяризовано в отличие от синхротронного излучения релятивистского выброса. Следовательно, источники с $\Psi = 180^\circ$ должны иметь степень оптической поляризации значимо ниже, чем объекты со сдвигами в противоположную сторону. Такая значимая разница наблюдается для всей исследуемой выборки, а также для подвыборки квазаров (Раздел 1.3.2). У лацертид, у которых детектируются сдвиги вверх и вниз по джету, в полном оптическом излучении доминирует струя. Это приводит к незначимой разнице между степенью оптической поляризации у объектов с $\Psi = 0^\circ$ и $\Psi = 180^\circ$ (Рисунок 1.5).

Для большинства источников со значительным вкладом джета в оптическое излучение было получено, что направление поляризации в оптическом диапазоне сонаправлено со струей. Ранее подобный результат был получен в работах [75; 76; 79] и других. Крупномасштабное тороидальное магнитное поле джета может приводить к направлению поляризации параллельному джету.

Результаты нашего анализа и статей [28; 41] показывают, что существует большое количество АЯГ с протяженной структурой на миллисекундных масштабах, которая излучает в оптическом диапазоне. Ее можно изучать при

помощи РСДБ-наблюдений и телескопа *Gaia*. Это открывает новое направление в исследовании активных ядер. Мониторинг оптической поляризации источников со значимыми радио-оптическими смещениями положений одновременно с наблюдениями *Gaia* поможет разделить объекты на те, в которых доминирует вклад аккреционного диска, и на те, в которых в основном релятивистская струя излучает в оптическом диапазоне. Такое исследование будет способствовать лучшему пониманию структуры и физики системы «аккреционный диск — джет».

Глава 2. Исследование усредненной по времени линейной поляризации и ее переменности в парсековых джетах АЯГ на частоте 15 ГГц

2.1 Магнитное поле и линейно-поляризованное излучение парсековых струй АЯГ

В Главе 1 рассматривалось интегральное линейно-поляризованное излучение АЯГ в оптическом диапазоне и было показано, что оно в основном идет от релятивистской струи. В радиодиапазоне наибольший вклад в поляризацию на парсековых масштабах также вносит джет (например, [114–116]). Наблюдаемая степень линейной поляризации возрастает от нескольких процентов в области РСДБ-ядра до 10% и выше в более далеких частях струи [90; 117]). Бóльшая степень поляризации в частях джета далеких от ядерных указывает на увеличение однородности магнитного поля с удалением от РСДБ-ядра [87].

Направление поляризации в лацертидах часто совпадает с локальным направлением джета [61; 118; 119] в отличие от квазаров, у которых распределение направления поляризации по отношению к локальному направлению выброса не имеет выраженного пика [119]. У объектов этих оптических классов также различаются степень поляризации компонент джетов: ≈ 0.03 для квазаров и ≈ 0.1 для лацертид. Возможной причиной этой разницы являются более сильные ударные волны поперек струи [119; 120] или более выраженная компонента спирального магнитного поля в лацертидах. В случае ударных волн направление поляризации будет сонаправлено со струей, поскольку измерения степени поляризации [119] и спектрального индекса (например, [121; 122]) показывают, что излучение джета является оптически тонким.

Релятивистский выброс пронизан глобальным стабильным во времени магнитным полем, которое играет ключевую роль в его запуске и ускорении [16; 17], а также коллимации (например, [123; 124]). Измерения меры фарадеевского вращения показывают, что она имеет градиент поперек струи в нескольких десятках источников [125–127]. Это является свидетельством присутствия то-

роидальной компоненты глобального магнитного поля, которая способствует коллимации выбросов [128; 129].

Турбулентность плазмы в джете приводит к уменьшению однородности магнитного поля. На это указывает сильная переменность степени и направления поляризации [36; 37]. В значительном количестве наблюдений видна корреляция вращения EVPA со вспышками (например, [33; 130]). Это может свидетельствовать о том, что вспышки связаны с прохождением ударной волны по струе [38]. С другой стороны, статистический анализ изменения направления поляризации, проведенный в рамках программы мониторинга оптической поляризации АЯГ RoboPol, не показал связи между поворотом EVPA и вспышками [47]. Такой вид переменности хорошо описывается в модели TEMZ (Turbulent Extreme Multi-Zone Model; [40]), в которой релятивистский джет состоит из независимых излучающих ячеек, в каждой из которых магнитное поле ориентировано случайным образом.

Целью исследования, представленного в данной Главе, являлись визуализация и анализ стабильной компоненты магнитного поля парсекового выброса и пространственно-временных изменений степени упорядоченности и направления переменной составляющей этого поля вдоль и поперек джета. Для изучения магнитного поля были использованы многоэпоховые РСДБ-данные линейной поляризации на частоте 15 ГГц для 436 АЯГ. Упорядоченность и конфигурация стабильной во времени составляющей магнитного поля были исследованы с помощью стековых линейно-поляризационных карт. Такие изображения были построены, используя многоэпоховое пространственно-временное усреднение. Эта процедура усреднения эффективно подавляет переменную составляющую, если она носит случайный характер. Анализ распределения переменности поляризации помогает определить возможные причины изменения однородности и направления магнитного поля релятивистского выброса. Основные результаты, Таблицы и Рисунки, кроме Рисунков 2.4, 2.6, 2.15, 2.18, 2.23, 2.24 и 2.26, исследования, приведенного в этой Главе, опубликованы в статьях [A2; A3]. Личный вклад в данные работы указан во Введении к диссертации.

2.2 Построение выборки

Для исследования усредненной по эпохам поляризации и ее переменности необходимы наблюдения, которые с одной стороны имеют достаточную скважность, с другой — покрывают широкий промежуток времени. Этими свойствами обладают данные программы долгосрочного мониторинга MOJAVE (Monitoring of Jets in AGNs with VLBA Experiments, [42]), в рамках которой проводятся наблюдения на РСДБ-системе апертурного синтеза VLBA (Very Long Baseline Array). Выборка источников этой программы в основном состоит из АЯГ северного полушария неба, которые имеют яркую компактную радиоструктуру на миллисекундных масштабах. Для нашего анализа из этой выборки были отобраны 438 объектов, которые имеют по крайней мере пять эпох наблюдений параметров Стокса I , Q и U с 19 января 1996 года по 4 августа 2019 года. При исследовании одноэпоховых карт полной интенсивности I авторы работы [67] обнаружили, что излучение от квазара 2023+335 подвержено сильному рефракционному рассеянию. Это влияет на определение положения и свойств РСДБ-ядра, поэтому этот источник был исключен из исследуемой выборки. Для уменьшения шума на усредненных по эпохам картах полной интенсивности эпохи, в которых шум I превосходит более, чем в три раза медианный по эпохам шум для данного источника, исключались из анализа. Доля таких карт невелика и составляет около 1%. У квазара 1329–126 только четыре эпохи удовлетворяют этому критерию, поэтому он в дальнейшем анализе не рассматривался. После этого в выборке осталось 436 источников. Они имеют 367 уникальных эпох наблюдений. Исследуемые АЯГ являются в основном квазарами (259 источников, $\approx 59\%$ выборки) и лацертидами (136 источников, $\approx 31\%$ выборки). Около 5% АЯГ (24 источника) — радиогалактики, остальные источники — сейфертовские галактики первого типа с узкими эмиссионными линиями в оптическом спектре и АЯГ, у которых оптический класс не определен (Таблица 2.1).

По положению синхротронного пика в спектре блазары делятся на классы LSP (low-synchrotron-peaked, синхротронный пик на низких частотах), если в системе отсчета источника пик находится на частотах ниже 10^{14} Гц, ISP (intermediate-synchrotron-peaked, синхротронный пик на средних частотах), если частота пика находится в диапазоне от 10^{14} Гц до 10^{15} Гц, и HSP (high-synchrotron-peaked, синхротронный пик на высоких частотах), если частота пика

Таблица 2.1 — Распределение источников выборки по оптическому классу и по положению синхротронного пика в спектре энергии.

| Оптический класс | LSP | ISP | HSP | Неопределен | Всего |
|--|-----|-----|-----|-------------|-------|
| Квазары | 251 | 5 | ... | 3 | 259 |
| Лацертиды с измеренным z | 41 | 11 | 22 | ... | 74 |
| Лацертиды с неизмеренным z | 34 | 24 | 4 | ... | 62 |
| Радиогалактики | 20 | 3 | ... | 1 | 24 |
| Сейфертовские галактики первого типа с узкими линиями | 5 | 1 | ... | ... | 6 |
| Неопределен | 8 | 1 | ... | 2 | 11 |
| Всего | 359 | 45 | 26 | 6 | 436 |

выше 10^{15} Гц. В исследуемой выборке преобладают LSP источники, поскольку они являются яркими в радиодиапазоне в отличие от АЯГ других классов, у которых пик в спектре сдвинут в область более высоких частот. Распределение источников исследуемой выборки по положению синхротронного пика приведено в Таблице 2.1. Для лацертид с неизмеренным красным смещением z (62 источника) для определения частоты синхротронного пика использовалось медианное z для лацертид из исследуемой выборки (0.27), для АЯГ с неопределенным оптическим классом (8 источников) — медианное z по всей выборке (0.79), поскольку только у одного АЯГ с неопределенным оптическим классом измерено красное смещение. Квазары и радиогалактики в выборке в основном являются объектами LSP класса, в то время как у лацертид примерно 55% источников LSP класса, 26% — ISP и 19% — HSP классов. Подавляющее большинство исследуемых АЯГ наблюдаются под малым углом к лучу зрения, поэтому из-за эффекта доплеровского усиления излучения у них детектируется только релятивистское истечение, направленное на наблюдателя. У девяти объектов (радиогалактик 0128+554, 0238–084, 0305+039, 0316+413, 1228+126, 1509+054, 1957+405, лацертиды 1413+135 и квазара 2043+749) наблюдается и контр-джет на миллисекундных масштабах.

Общие свойства рассматриваемых источников приводятся в Таблице 2.2. Распределение количества эпох у активных ядер исследуемой выборки приведено на Рисунке 2.1. Медианное по выборке число эпох равняется девяти, однако, примерно у 6% источников количество наблюдений превышает 30.

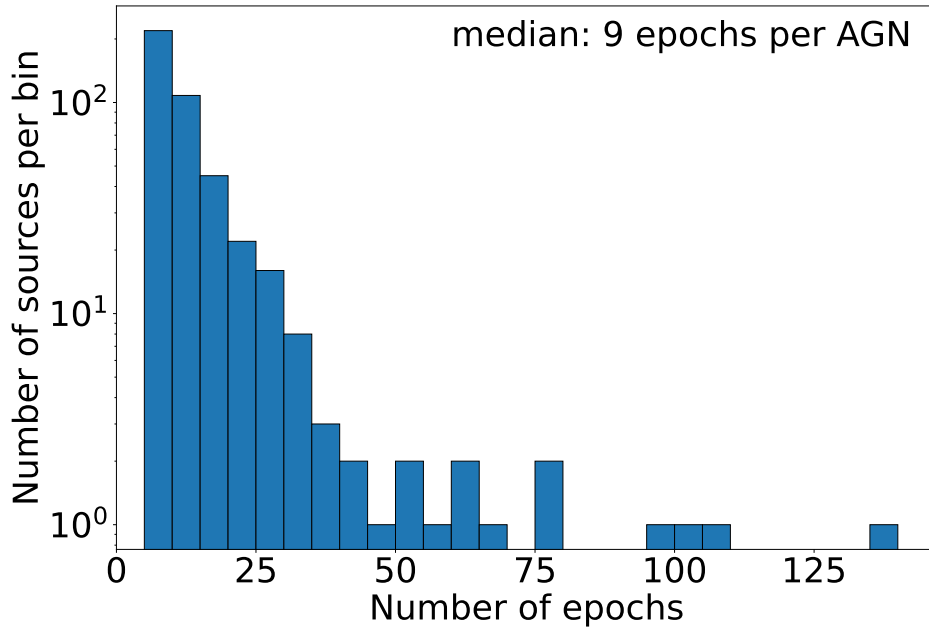


Рисунок 2.1 — Гистограмма распределения количества эпох наблюдений АЯГ из исследуемой выборки. Медианное количество эпох равняется девяти.

Таблица 2.2 — Общие свойства исследуемых АЯГ. Колонки: (1) название источника в формате B1950, (2) альтернативное имя источника, (3) оптический класс: Q — квазар, B — объект типа BL Lac, G — радиогалактика, N — сейфертовская галактика первого типа с узкими линиями, U — класс неопределен, (4) класс по положению синхротронного пика в спектре энергии, (5) красное смещение, (6) ссылка на измерение красного смещения и/или определение оптического класса. Полная таблица доступна в электронном виде в базе данных CDS: <https://cdsarc.cds.unistra.fr/viz-bin/cat/J/MNRAS/520/6053>.

| Источник | Альтернативное имя источника | Опт. класс | Класс по синхр. пику | z | Ссылка на данные z и/или опт. класса |
|----------|------------------------------|------------|----------------------|-------|--|
| (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) |
| 0003–066 | NRAO 005 | B | LSP | 0.347 | [131] |
| 0003+380 | S4 0003+38 | Q | LSP | 0.229 | [132] |
| 0006+061 | TXS 0006+061 | B | LSP | ... | [133] |
| 0007+106 | III Zw 2 | G | LSP | 0.089 | [134] |
| 0010+405 | 4C +40.01 | Q | LSP | 0.256 | [135] |
| 0011+189 | RGB J0013+191 | B | LSP | 0.477 | [136] |
| 0012+610 | 4C +60.01 | U | LSP | ... | ... |
| 0014+813 | S5 0014+813 | Q | LSP | 3.382 | [137] |
| 0015-054 | PMN J0017-0512 | Q | LSP | 0.226 | [138] |
| 0016+731 | S5 0016+73 | Q | LSP | 1.781 | [139] |

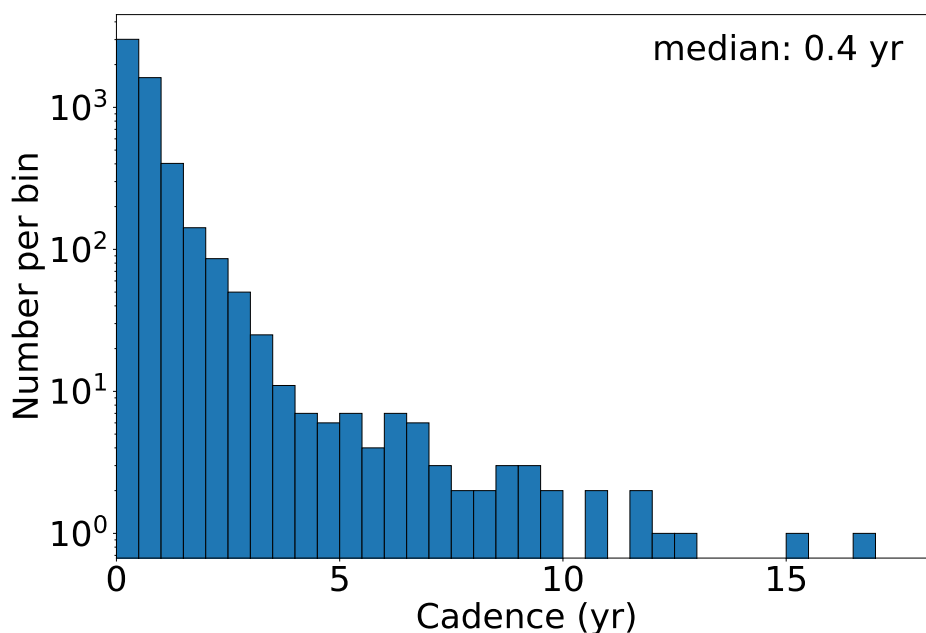


Рисунок 2.2 — Гистограмма распределения промежутка времени между соседними эпохами наблюдений в годах для источников исследуемой выборки. Медианный по выборке промежуток составляет 0.4 года.

На Рисунке 2.2 изображена гистограмма распределения промежутка времени между соседними эпохами для всех источников. Эта величина находится в широком диапазоне и типично составляет примерно полгода, хотя существуют единичные пары эпох, интервал между которыми превышает 15 лет. В программе MOJAVE скважность эпох наблюдений определяется темпом морфологических изменений, то есть источники, у которых собственное движение компонент выше, наблюдаются чаще. У квазара 0306+102 и лацертиды 1147+245 имеется одна эпоха, удаленная на 17 и 15 лет от остальных эпох, соответственно. Это не влияет сильно на оценку переменности, поскольку измеряются типичные изменения степени и направления линейной поляризации.

На Рисунке 2.3 показано распределение временного периода между первой и последней эпохами наблюдения для рассматриваемых источников, он изменяется от одного года до ≈ 24 лет. На этой гистограмме справа находятся источники, которые наблюдались в рамках программы 2 см VLBA Обзора [140; 141] и мониторинг которых продолжается в проекте MOJAVE. Гамма-яркие АЯГ с высокой вероятностью позиционных ассоциаций с объектами, наблюдаемыми гамма-телескопом *Fermi-LAT* после 2008 года [142], были включены в программу MOJAVE позже, поэтому они имеют меньшее покрытие по времени.

В данной работе проводится анализ усредненной по эпохам поляризации и ее переменности поперек струи, поэтому необходимо восстановить как мож-

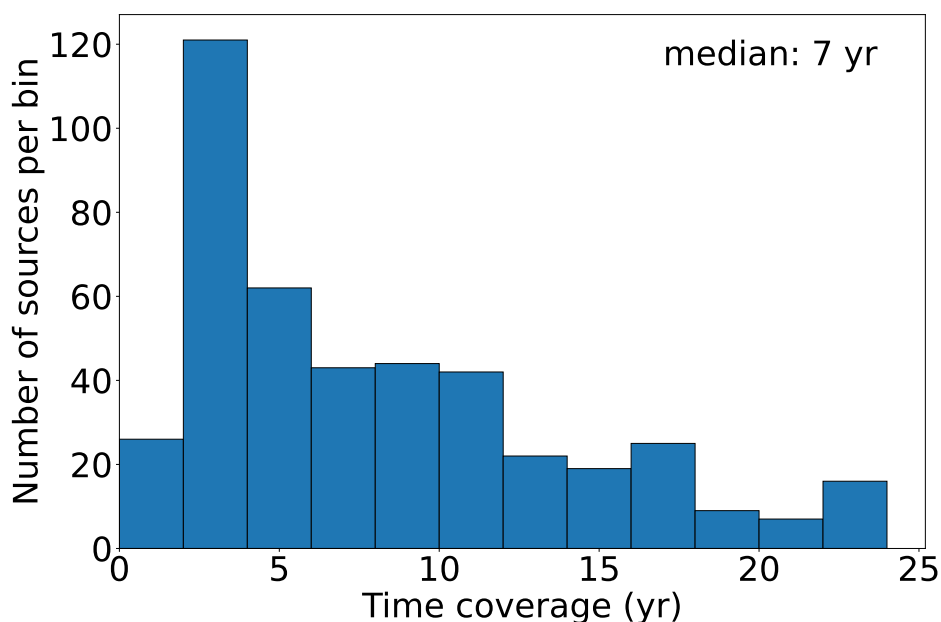


Рисунок 2.3 — Гистограмма распределения периода времени между первой и последней эпохами наблюдений в годах для источников рассматриваемой выборки. Медиана распределения составляет 7 лет.

но более полную поперечную структуру выброса в полной интенсивности. Это можно сделать путем построения стековых карт ([15], Раздел 2.3.1). Ширина джета на таких изображениях зависит от продолжительности мониторинга АЯГ: чем дольше наблюдается источник, тем шире детектируется струя, пока не проявится вся ее поперечная структура. Было обнаружено, что для восстановления полной ширины джета в полной интенсивности на частоте 15 ГГц типично необходимо покрытие по времени не менее пяти лет [15]. Около 60% АЯГ из исследуемой выборки удовлетворяют этому условию. В данном исследовании предполагалось, что на стековых картах полной интенсивности видна вся ширина джета. Причинами увеличения ширины струи с увеличением времени наблюдения также могут являться нестабильности, распространяющиеся вниз по выбросу, и изменения направления внутреннего джета, наблюдающиеся во многих источниках [143; 144].

Красное смещение измерено для 358 источников из исследуемой выборки: 258 квазаров, 76 лацертид, 24 радиогалактик. Для квазаров красное смещение находится в диапазоне от 0.05 до 3.40 (Рисунок 2.4, сверху), для лацертид — от 0.02 до 1.67 (Рисунок 2.4, снизу), для радиогалактик — от 0.004 до 0.266. Медиана красного смещения по всей выборке составляет 0.79. Информация о z приведена в Таблице 2.2.

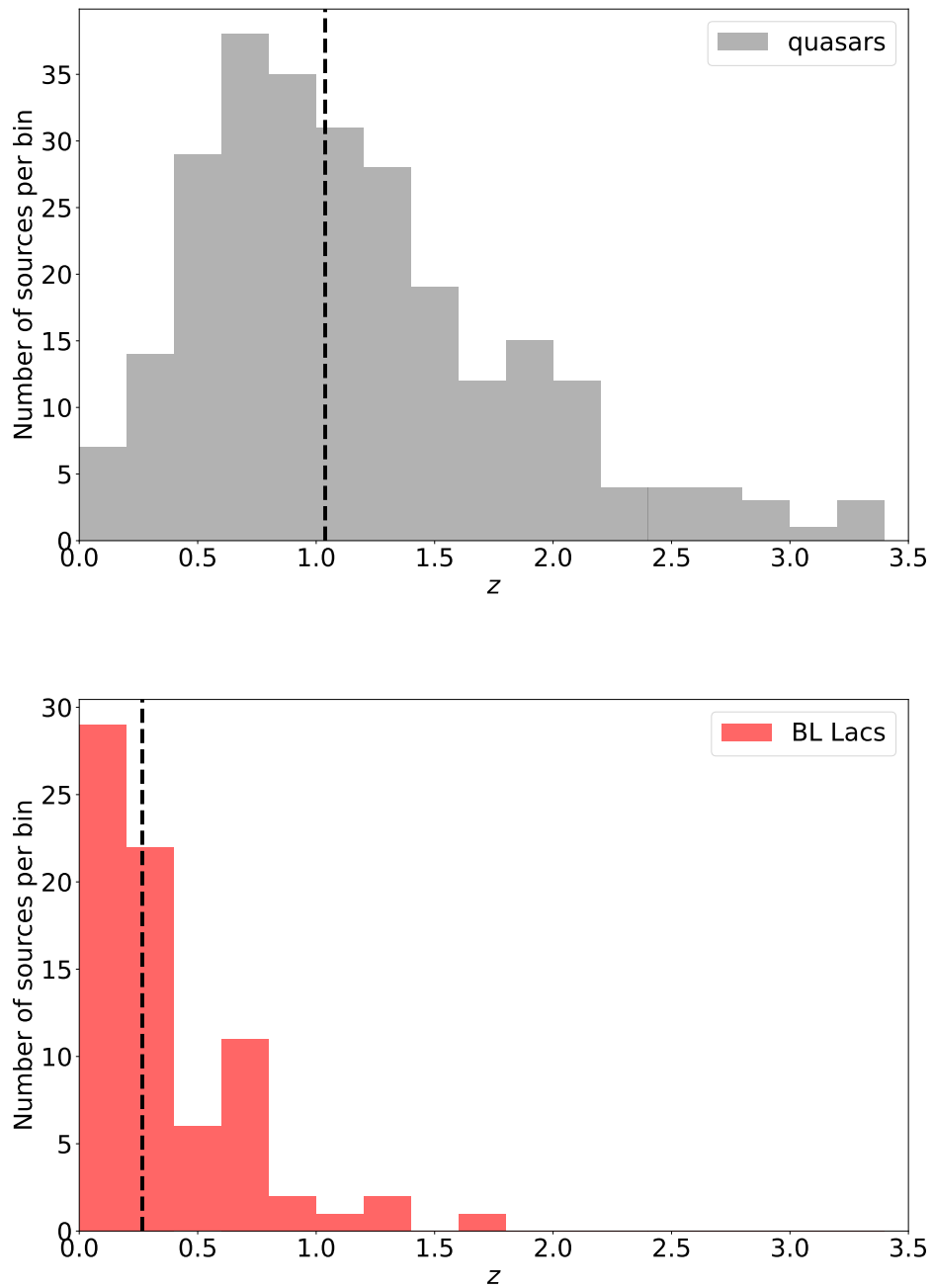


Рисунок 2.4 — Гистограммы распределения красного смещения для квазаров (сверху) и лацертид (снизу) из исследуемой выборки. Медианы распределений показаны пунктирными линиями.

Неопубликованный иллюстративный материал, рисунок выполнен диссертантом.

2.3 Построение карт усредненной по времени линейной поляризации и ее переменности

Для восстановления и анализа стабильной и переменной компонент магнитного поля парсекового выброса АЯГ были использованы данные проекта MOJAVE и архивные наблюдения на системе апертурного синтеза VLBA на 15 ГГц, полученные с 19 января 1996 года по 4 августа 2019 года. Всего, в анализе использовались 5846 одноэпоховых карт 436 источников. Детальный процесс калибровки и картографирования этих данных описан в статье [145]. Одноэпоховые карты 419 АЯГ были восстановлены с полем зрения 40×40 мсек дуги. Остальные источники были картографированы с бóльшим полем, поскольку они имеют более протяженную структуру. На всех изображениях пиксель имеет размер 0.1×0.1 мсек дуги. Одноэпоховые карты параметров Стокса I , Q и U были получены с круговой диаграммой направленности, размер b которой характеризовался полной шириной на половине мощности (FWHM). Он измерялся в мсек дуги и определялся, как

$$b = \frac{b_{\text{maj}} + b_{\text{min}}}{2}, \quad (2.1)$$

где

$$b_{\text{maj}} = 1.28 - \delta \times 8.95 \times 10^{-3} - \delta^2 \times 7.91 \times 10^{-5} + \delta^3 \times 1.24 \times 10^{-6}, \quad (2.2)$$

$$b_{\text{min}} = 0.52 + \delta \times 1.01 \times 10^{-3} + \delta^2 \times 8.88 \times 10^{-6} - \delta^3 \times 5.57 \times 10^{-8}, \quad (2.3)$$

где δ — склонение источника на эпоху J2000 в градусах. Выражения b_{maj} и b_{min} были получены, как сплайн-подгонки к FWHM большой и малой осей эллиптической диаграммы направленности с естественным взвешиванием данных для нескольких тысяч наблюдений, которые были проведены в рамках мониторинговой программы MOJAVE на 15 ГГц. Графики этих функций в зависимости от склонения приведены на Рисунке 2.5. Так как положение телескопов VLBA не меняется относительно поверхности Земли, то uv -покрытие радиоинтерферометра в основном зависит только от склонения объекта.

Для прослеживания наиболее ярких областей джета была построена хребтовая линия, используя карты полной интенсивности, усредненные по эпохам.

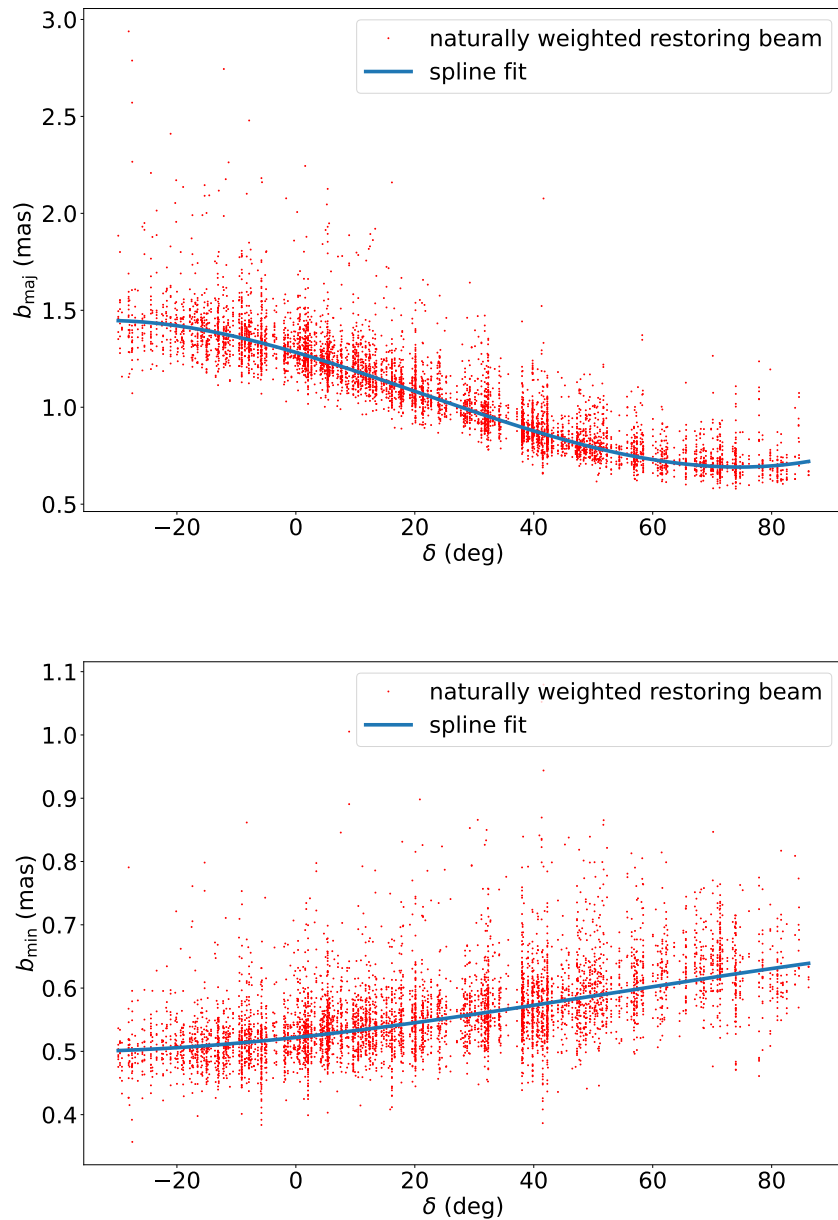


Рисунок 2.5 — Сплайн-подгонки зависимости размера большой b_{maj} (сверху) и малой b_{min} (снизу) осей оригинальной эллиптической диаграммы направленности с использованием естественного взвешивания данных в мсек дуги от склонения источника δ в градусах. Результаты подгонки обозначены сплошными синими линиями. Красные точки соответствуют размерам диаграмм направленности из наблюдений.

Каждая точка этой линии являлась взвешенным средним интенсивности по азимутальному срезу на данном расстоянии от РСДБ-ядра [15]. Начало хребтовой линии совпадало с положением РСДБ-ядра, а азимутальные срезы были сделаны с шагом в 0.5 мсек дуги. Области, в которых отношение сигнала к шуму было менее четырех, не учитывались при построении. Затем была проведена интерполяция полученных точек хребтовой линии кубическим сплайном так, что соседние точки находились примерно на расстоянии 0.1 мсек дуги. Для источников, у которых детектируется контр-джет, хребтовая линия строилась только для джета, который направлен на наблюдателя.

Заметим, что в случае, если диаграмма направленности является эллиптической функцией Гаусса, то есть эллиптической диаграммой направленности, которая сильно вытянута по одной оси (для источников с низкими склонениями), на направление хребтовой линии может оказывать влияние ориентация большой оси диаграммы направленности. Поэтому для проведения анализа поляризации вдоль и поперек джета была выбрана круговая диаграмма направленности. Для исследования того, насколько сильно влияет скругление диаграммы направленности на полученные карты линейной поляризации, было проведено сравнение изображений, свернутых с круговой диаграммой направленности, с изображениями, свернутыми со средней по эпохам эллиптической диаграммой. Оказалось, что изменение формы диаграммы направленности приводит к разнице, медиана которой меньше 1%. Это различие максимально для источников со склонением ниже 0° : медиана по источнику может достигать 4% для переменности EVPA, 6% — для медианной степени поляризации и 2% — для относительной переменности степени поляризации. С увеличением склонения разница уменьшается.

Затем одноэпоховые карты I , Q и U для данного источника накладывались по положению РСДБ-ядра, которое было получено из моделирования структуры объекта в плоскости пространственных частот uv с помощью процедуры *modelfit* в пакете *DIFMAP* [46]. При моделировании использовалось такое число компонент, чтобы адекватно воспроизводить структуру источника после свертки с соответствующей диаграммой направленности [144]. Предполагалось, что положение РСДБ-ядра не меняется со временем. Однако рождение компонент может незначительно сдвигать его.

2.3.1 Стековые изображения линейной поляризации

Для всех рассматриваемых АЯГ были построены усредненные по эпохам карты параметров Стокса I_{stack} , Q_{stack} , U_{stack} . Используя эти изображения, были получены стековые карты поляризационной интенсивности $P_{\text{stack}} = \sqrt{Q_{\text{stack}}^2 + U_{\text{stack}}^2}$. Для оценки шума стековой полной интенсивности $I_{\text{stack,rms}}$ вычислялись средние квадратичные по четырем внешним квадрантам карты, каждый из которых занимал 1/16 часть площади изображения. Медиана по трем оценкам среднеквадратичного за исключением наибольшего принималась в качестве оценки шума.

Поскольку поляризационный шум имеет рэлеевское распределение, возникает баис Райса [146], который приводит к повышению наблюдаемого P в шумных областях и почти не влияет на P в областях с большой величиной отношения сигнал-шум. Зависимость систематической ошибки, порожденной этим эффектом, от отношения сигнал-шум приведена на Рисунке 2.6. Стековые карты P были поправлены за баис Райса по формуле [146]

$$P_{\text{true}} = P_{\text{obs}} \sqrt{1 - (P_{\text{obs,uncertain.}}/P_{\text{obs}})^2}, \quad (2.4)$$

где P_{true} — поляризационная интенсивность, поправленная за баис Райса, P_{obs} — наблюдаемая поляризационная интенсивность с ошибкой $P_{\text{obs,uncertain.}}$. Шум P_{obs} определялся, как

$$P_{\text{obs,uncertain.}} = \frac{Q_{\text{uncertain.}} + U_{\text{uncertain.}}}{2}, \quad (2.5)$$

где $Q_{\text{uncertain.}}$ и $U_{\text{uncertain.}}$ — ошибки измеренных параметров Стокса Q и U , которые учитывают тепловой шум (Q_{rms} и U_{rms}) и неопределенность, порожденную остаточной инструментальной поляризацией, $\sigma_{\text{D-term}}$. Они были вычислены по формулам

$$Q_{\text{uncertain.}} = \sqrt{Q_{\text{rms}}^2 + \sigma_{\text{D-term}}^2}, \quad (2.6)$$

$$U_{\text{uncertain.}} = \sqrt{U_{\text{rms}}^2 + \sigma_{\text{D-term}}^2}. \quad (2.7)$$

Q_{rms} и U_{rms} определялись аналогично $I_{\text{stack,rms}}$. Шум инструментальной поляризации оценивался по формуле

$$\sigma_{\text{D-term}} = 0.005 \sqrt{\frac{I^2 + (0.3 \times I_{\text{peak}})^2}{N_{\text{ant}} \times N_{\text{IF}} \times N_{\text{scan}} \times N_{\text{epoch}}}}, \quad (2.8)$$

где I и I_{peak} соответствуют значению полной интенсивности в пикселе и в пике на изображении, соответственно, N_{ant} — количеству антенн, участвующих в наблюдениях, N_{IF} — количеству спектральных каналов, N_{scan} — количеству сканов с независимыми параллактическими углами, N_{epoch} — количеству эпох наблюдений. Формулы 2.5–2.7 были взяты из работы [147], выражение 2.8 — из [A2], где формула из [147] была переписана для случая многоэпоховых данных. Поскольку шум в P_{stack} имеет распределение Рэлея, то погрешность этой величины оценивалась по формуле

$$P_{\text{stack,uncertain.}}^2 = \sum_{i,j=1}^{N_{\text{pixel}}} P_{\text{stack},ij}^2 / (2N_{\text{pixel}}), \quad (2.9)$$

где i, j — номер пикселя, а N_{pixel} — общее число пикселей на карте, $0 < P_{\text{stack},ij} < 5I_{\text{stack,rms}}$. Поправка за этот баис составила менее 3.2% в областях, где стековая поляризационная интенсивность больше $4P_{\text{stack,uncertain.}}$, то есть уровня нижнего контура на карте P_{stack} . Затем к I_{stack} и P_{stack} была применена коррекция за систематический сдвиг, порожденный алгоритмом CLEAN (Раздел 2.3.4). Стековые карты степени поляризации и ее направления определялись, как $m_{\text{stack}} = (P_{\text{stack}} - P_{\text{CLEAN bias}}) / (I_{\text{stack}} - I_{\text{CLEAN bias}})$, где $I_{\text{CLEAN bias}}$ и $P_{\text{CLEAN bias}}$ — поправки за CLEAN-баис, и $\text{EVPA}_{\text{stack}} = 0.5 \arctan(U_{\text{stack}}/Q_{\text{stack}})$, соответственно. Направление поляризации слабо подвержено влиянию CLEAN-баиса (Раздел 2.3.4). Значения m_{stack} вычислялись только в пикселях, в которых $P_{\text{stack}} - P_{\text{CLEAN bias}} > 4P_{\text{stack,uncertain.}}$ и $I_{\text{stack}} - I_{\text{CLEAN bias}} > 4I_{\text{stack,rms}}$. После вычитания поправки за систематический сдвиг, внесенный алгоритмом CLEAN, пиксели на картах P_{stack} и m_{stack} , в которых эти величины принимают отрицательные значения, были замаскированы. Количество таких пикселей составляет менее 1% от всех пикселей, в которых P_{stack} больше $4P_{\text{stack,uncertain.}}$. Причем доля отрицательных пикселей, модуль значения которых отличается от нуля на уровне значимости больше 3σ , составляет менее 1%. Типичная мера фарадеевского вращения в областях парсекового выброса составляет около 120 рад/м² [147]. Это соответствует повороту $\text{EVPA} \approx 3^\circ$ на частоте 15 ГГц, поэтому $\text{EVPA}_{\text{stack}}$ не был поправлен за этот эффект. В качестве примера на Рисунке 2.7 приведены стековые карты поляризации для источника 2254+074, который имеет девять эпох наблюдений, что соответствует медиане количества эпох по источникам исследуемой выборки. Стековые карты для VL Lacertae (2200+420), которая имеет наибольшее количество эпох среди источников исследуемой выборки (139 эпох),

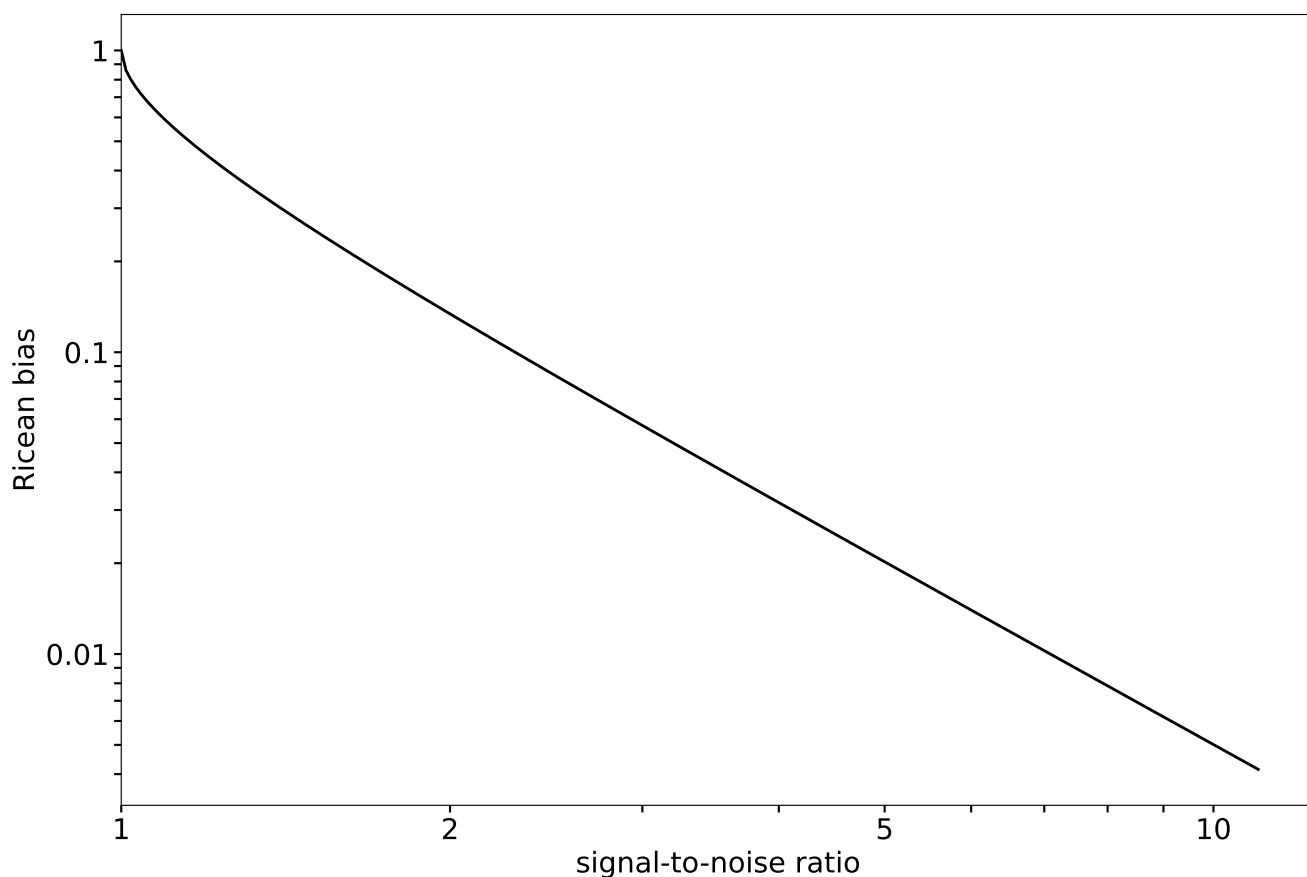


Рисунок 2.6 — Зависимость систематического сдвига, порожденного байсом Райса, от отношения сигнал-шум. Неопубликованный иллюстративный материал, рисунок выполнен диссертантом.

показаны на Рисунке 2.37. В Приложении А приведены стековые карты 15 АЯГ с наиболее богатой протяженной поляризационной структурой. Параметры стековых карт приведены в Таблице 2.3. Процедура оценивания погрешностей, полученных стековых величин, приведена в Разделе 2.3.4.

Примерно 5% источников исследуемой выборки (23 АЯГ) оказались неполяризованными на уровне чувствительности стековых карт. Эти объекты указаны в Таблице 2.4. Одиннадцать из этих источников являются радиогалактиками, что составляет $\approx 46\%$ всех объектов этого оптического класса в выборке. Четыре радиогалактики (0128+554, 1404+286, 1509+054 и 2021+614) относятся к классу компактных симметричных объектов. Неполяризованные квазары и лацертиды встречаются реже: по шесть объектов каждого класса ($\approx 2\%$ и $\approx 4\%$ от объектов того или иного класса, рассмотренных нами, соответственно). Особым случаем является квазар 0710+196. В нем поляризация детектируется в РСДБ-ядре на большинстве эпох. На двух эпохах (19 августа 2009 г. и 25 января 2014 г.) поляризационные интенсивности в этой области были сравнимы между собой и выше, чем на остальных эпохах. При этом изменение EVPA

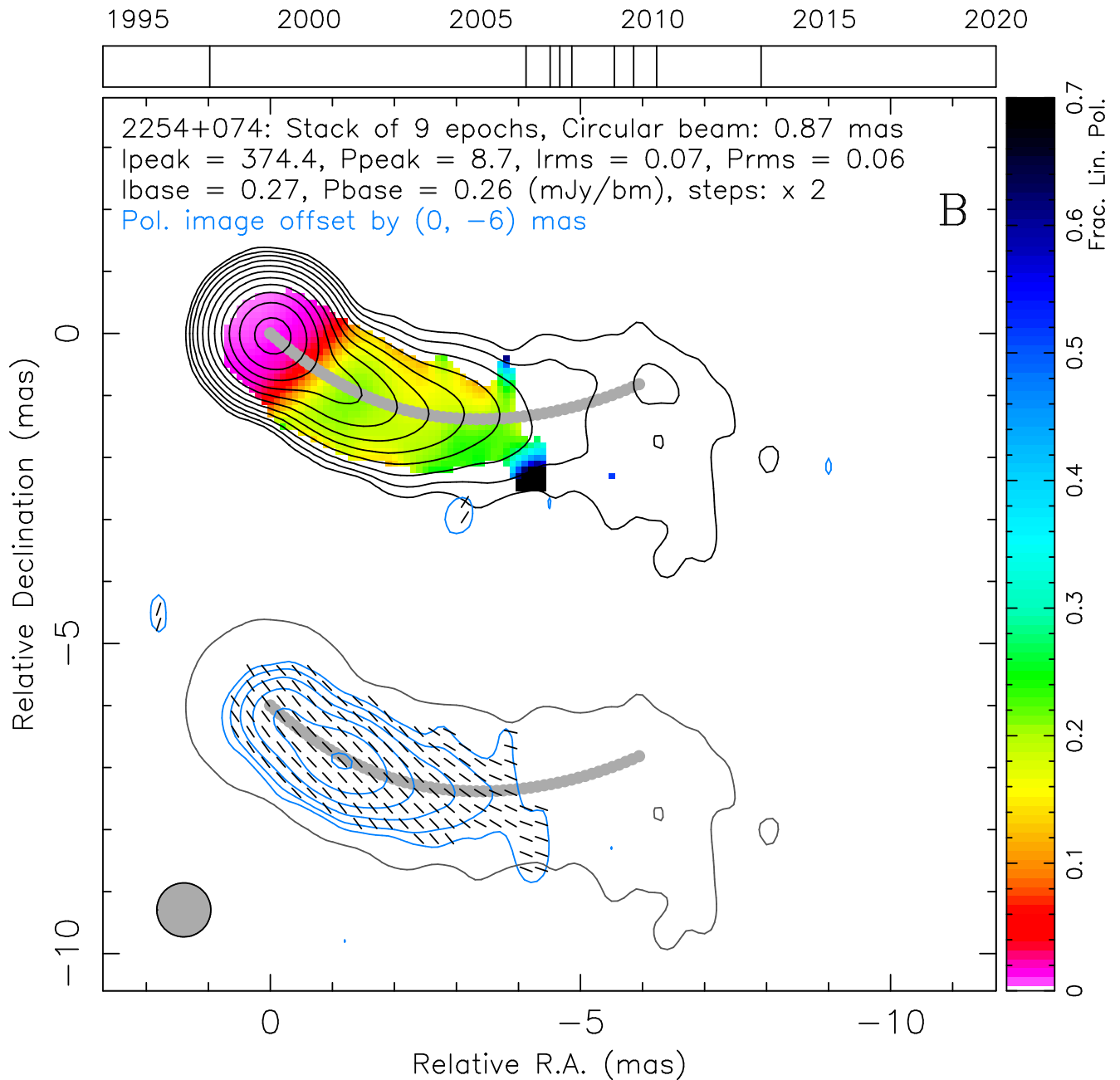


Рисунок 2.7 — Стековая карта линейной поляризации для объекта типа BL Lac 2254+074. Сверху вертикальными черточками показаны эпохи наблюдения. По оси абсцисс карты отложено относительное прямое восхождение в мсек дуги, по оси ординат — относительное склонение в мсек дуги. Точка с координатами (0,0) соответствует фазовому центру карты. На изображении представлены две контурные карты источника: на первой (сверху) — черными контурами показана I_{stack} , цветом — m_{stack} , на второй (снизу) — черный контур соответствует нижнему контуру в полной интенсивности на уровне $4I_{\text{stack,rms}}$, синими контурами показано распределение P_{stack} , а черточками — $EVPA_{\text{stack}}$. Значения контуров I_{stack} и P_{stack} возрастают с коэффициентом 2, начиная с четырехкратного уровня шума. В верхней части изображения приведена информация о количестве эпох, размере диаграммы направленности в мсек дуги, значениях пиков, шума и уровня нижнего контура I_{stack} и P_{stack} в мЯн/луч, а также величина сдвига карты P_{stack} относительно верхней карты I_{stack} в мсек дуги. Серая линия соответствует хребтовой линии, построенной по карте I_{stack} . Серым кружком в левом нижнем углу изображения показана синтезированная диаграмма направленности. В верхнем правом углу карты указано, что оптический класс источника — В (объект типа BL Lac). Стековые карты для всех 436 АЯГ приведены в электронной версии статьи [A2] по ссылке <https://doi.org/10.1093/mnras/stad525>.

между этими эпохами было $\approx 90^\circ$. Это привело к существенной деполяризации потому, что при построении P_{stack} учитывается направление поляризации (Рисунок 2.13). У квазара 1722+401 наблюдалось схожее поведение; на первых двух и на последних двух эпохах EVPA примерно перпендикулярны друг другу, что приводит к значимому подавлению линейной поляризации источника на стековых картах. У квазаров 0710+196 (10 эпох) и 1722+401 (5 эпох) небольшое количество наблюдений, что также способствовало их деполяризации, поскольку эпохи, на которых происходит поворот EVPA доминируют по количеству, как у 1722+401, или по величине измеряемой поляризационной интенсивности, как у 0710+196, над остальными эпохами. Стековые карты этих источников приведены на Рисунках 2.13 (сверху) и 2.14 (сверху). Лацертиды 0329+654 и 2013–092 являются наиболее слабыми источниками в полной интенсивности среди объектов выборки (средний по эпохам полный поток 0329+654 составляет ≈ 67 мЯн, 2013–092 — около 53 мЯн), поэтому в них поляризация не детектируется на нашем уровне чувствительности. Таким образом, только примерно 1% квазаров и 3% лацертид, рассматриваемых нами, оказались неполяризованными. В некоторых источниках, например, 0615–172 и 2021+614, наблюдается слабая и скорее всего ложная поляризация на картах P_{stack} , поскольку поляризационная интенсивность детектируется только на одной эпохе и, следовательно, может обуславливаться остаточной инструментальной поляризацией, вызванной неидеальностью приемников радиоизлучения. Все эти 23 источника были исключены из дальнейшего анализа.

Причина того, что излучение некоторых АЯГ разных оптических классов, находящихся на разных красных смещениях, имеющих разные видимые скорости и наблюдаемые под разными углами к лучу зрения, слабополяризовано, неизвестна. Порог чувствительности, достигаемый на одноэпоховых и стековых картах поляризации, у этих объектов сравним с порогом для других источников исследуемой выборки. Возможно, что АЯГ, джеты которых видны под большим углом к лучу зрения, становятся слабополяризованными из-за сильной фарадеевской деполяризации, обусловленной внешним экраном, которым может являться пылевой тор (например, [148; 149]). Такая ситуация типична для радиогалактик. Также уменьшение поляризационной интенсивности может быть следствием стохастического магнитного поля, которое описывается в модели, представленной в статье [40]. В этом случае, деполяризация происходит из-за того, что поляризованное излучение рассматривается от суперпозиции яче-

ек со случайным направлением поляризации. В пользу этого сценария указывает значительно бóльшая доля слабополяризованных объектов среди радиогалактик по сравнению с блазарами, поскольку в радиогалактиках, как в более близких объектах (медианное $z \approx 0.05$), разрешаются области, находящиеся ближе к истинному началу струи, где ожидается бóльшая турбулентность и выше фарадеевское вращение из-за более высокой плотности тепловой плазмы.

Полученные стекковые карты m_{stack} и $\text{EVPA}_{\text{stack}}$ отражают распределение степени упорядоченности и направления стабильного магнитного поля в парсековой струе. Усреднение по эпохам способствует подавлению переменности этих характеристик и уменьшению шума на изображениях. Путем последовательного добавления эпох было обнаружено, что уровень шума на картах I_{stack} и P_{stack} уменьшается как \sqrt{N} , где N — количество эпох (Рисунок 2.8). Зависимость $P_{\text{stack,uncertain}}$ от времени между первой и последней эпохами при добавлении эпох приведена на Рисунке 2.9. На нем видно, что благодаря увеличению суммарного времени наблюдения источника можно достичь величины шума вплоть до ≈ 30 мкЯн/луч. Также четко различаются три полосы, которые соответствуют сериям наблюдений с разными скоростями записи: 128 Мбит/с (до середины 2007 г., более яркие источники), 512 Мбит/с и 2048 Мбит/с (начиная с 2014 г., более слабые источники). Таким образом, процедура усреднения по эпохам уменьшает шум от нескольких раз для большинства АЯГ до десятка раз для объектов, которые наблюдаются наиболее часто. Для $I_{\text{stack,rms}}$ аналогичные зависимости качественно похожи.

Таблица 2.3 — Свойства стековых и медианных карт поляризации. Колонки: (1) название источника в формате B1950, (2) первая эпоха наблюдения, (3) покрытие по времени τ (год), (4) количество эпох наблюдения, (5) размер диаграммы направленности, (6) пик стековой полной интенсивности, (7) ошибка стековой полной интенсивности, (8) пик стековой поляризационной интенсивности, (9) ошибка стековой поляризационной интенсивности, (10) пик медианной поляризационной интенсивности, (11) медиана по одноэпоховым значениям ошибки поляризационной интенсивности. В данной Таблице собраны данные из Таблицы 2 статьи [A2] и Таблицы 4 статьи [A3]. Полная версия Таблицы 2 доступна в электронном виде в базе данных CDS: <https://cdsarc.cds.unistra.fr/viz-bin/cat/J/MNRAS/520/6053>, Таблицы 4 — <https://cdsarc.cds.unistra.fr/viz-bin/cat/J/MNRAS/523/3615>.

| Источник | Первая эпоха | τ (год) | N (4) | b мсек дуги | $I_{\text{stack,peak}}$ (мЯн/луч) | $I_{\text{stack,rms}}$ (мЯн/луч) | $P_{\text{stack,peak}}$ (мЯн/луч) | $P_{\text{stack,uncertain.}}$ (мЯн/луч) | $P_{\text{med,peak}}$ (мЯн/луч) | median P_{rms} (мЯн/луч) |
|----------|--------------|-----------------|------------|------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|--|------------------------------------|--------------------------------------|
| (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) | (7) | (8) | (9) | (10) | (11) |
| 0003–066 | 2003–02–05 | 9.9 | 18 | 0.93 | 1242.82 | 0.05 | 83.0 | 0.05 | 85.77 | 0.21 |
| 0003+380 | 2006–03–09 | 7.5 | 10 | 0.73 | 462.12 | 0.06 | 3.4 | 0.06 | 5.64 | 0.20 |
| 0006+061 | 2011–12–29 | 1.4 | 5 | 0.88 | 149.60 | 0.07 | 6.5 | 0.07 | 6.09 | 0.20 |
| 0007+106 | 2004–02–11 | 9.4 | 13 | 0.86 | 869.31 | 0.05 | 3.0 | 0.05 | 4.98 | 0.18 |
| 0010+405 | 2006–04–05 | 5.3 | 12 | 0.72 | 508.14 | 0.06 | 3.2 | 0.05 | 3.05 | 0.17 |
| 0011+189 | 2013–12–15 | 2.3 | 8 | 0.82 | 107.94 | 0.02 | 3.5 | 0.02 | 3.46 | 0.07 |
| 0012+610 | 2017–01–03 | 2.5 | 6 | 0.66 | 214.25 | 0.04 | 1.0 | 0.03 | 0.92 | 0.09 |
| 0014+813 | 2016–09–26 | 2.8 | 11 | 0.67 | 381.70 | 0.03 | 17.0 | 0.03 | 15.73 | 0.10 |
| 0015-054 | 2009–07–05 | 4.1 | 8 | 0.92 | 240.61 | 0.05 | 2.8 | 0.04 | 4.41 | 0.16 |
| 0016+731 | 2003–08–28 | 16.0 | 8 | 0.66 | 1390.71 | 0.07 | 13.8 | 0.07 | 26.50 | 0.26 |

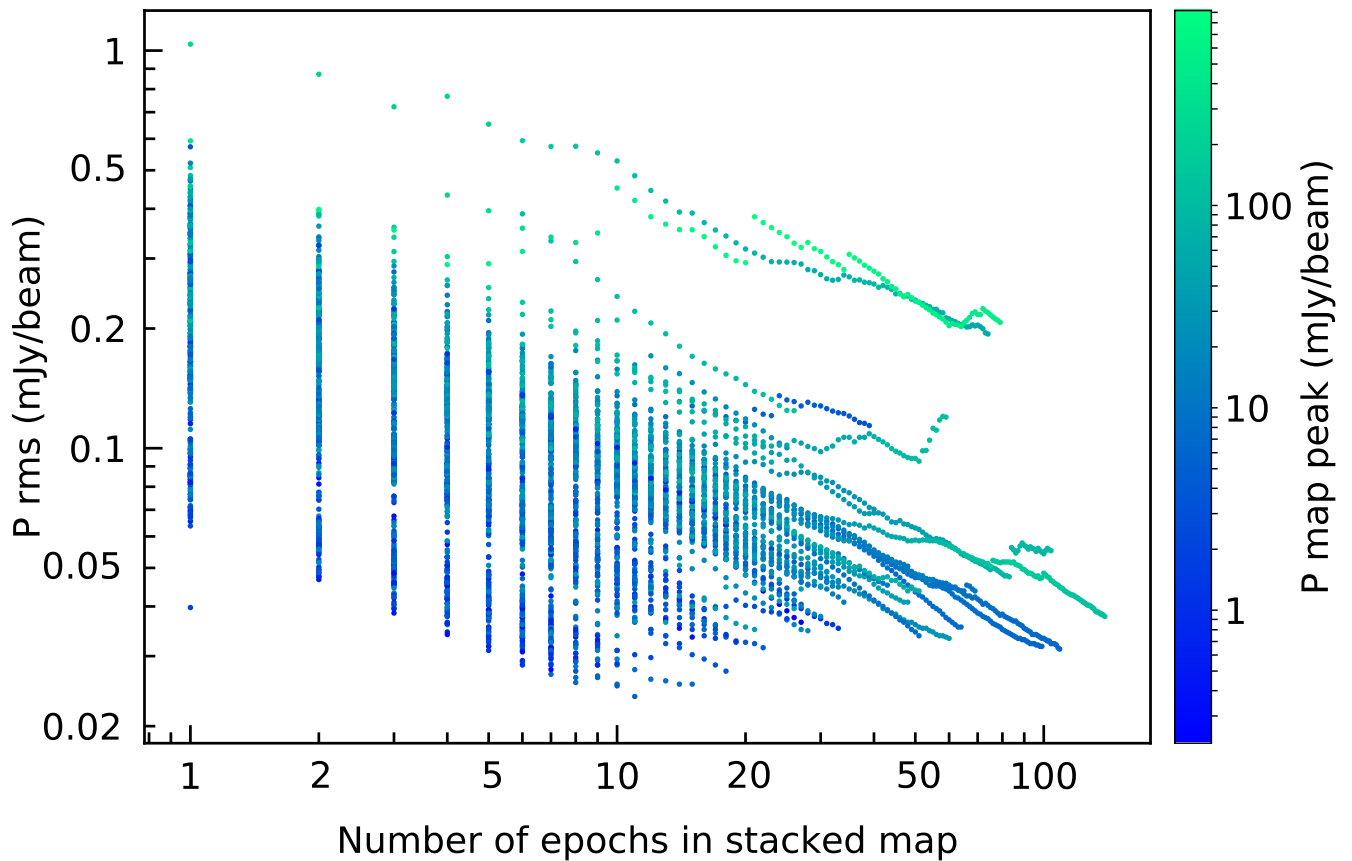


Рисунок 2.8 — Зависимость уровня шума на картах P_{stack} в мЯн/луч от количества эпох, используемых при усреднении. Цветом обозначена величина пика P_{stack} в мЯн/луч.

В работе [15] было обнаружено, что видимый угол раскрыва струи в полной интенсивности возрастает с количеством эпох, которые усредняются в стековом изображении. Эта зависимость немонотонная, плато достигается при временном интервале наблюдения около шести лет, если предположить, что стековая карта показывает полную поперечную структуру джета. В рамках данного диссертационного исследования был проведен анализ подобного эффекта для линейно-поляризованного излучения. При последовательном добавлении эпох были определены площади S_I и S_P внутри контуров $4I_{\text{stack,rms}}$ и $4P_{\text{stack,uncertain.}}$, соответственно. Таким образом, отношение S_P/S_I характеризует степень заполненности карты P_{stack} и ограничено сверху единицей. Еще одной важной характеристикой является период времени между наблюдениями. Если временной интервал наблюдения τ достаточно большой, то S_P/S_I будет достигать насыщения. Эволюция S_P/S_I с увеличением τ для стековых карт показана на Рисунке 2.10. Это отношение возрастает до определенного уровня, который типично составляет $1/3$, но распределен в широком диапазоне от значений близких к нулю до $0.6 - 0.8$, а потом выходит на плато или слабо спадает в

Таблица 2.4 — Неполяризованные АЯГ. Колонки: (1) название источника в формате B1950, ¹ означает, что АЯГ является неполяризованным только на стековых картах, ² — только на медианных картах, (2) альтернативное имя источника, (3) оптический класс: Q — квазар, B — лацертида, G — радиогалактика, (4) класс по положению синхротронного пика в спектре энергии, (5) красное смещение.

| Источник | Альтернативное имя источника | Опт. класс | Класс по синхр. пику | z |
|-----------------------|------------------------------|------------|----------------------|-------|
| (1) | (2) | (3) | (4) | (5) |
| 0055+300 | NGC 315 | G | LSP | 0.017 |
| 0111+021 | UGC 00773 | B | LSP | 0.047 |
| 0128+554 | TXS 0128+554 | G | ... | 0.036 |
| 0238–084 | NGC 1052 | G | LSP | 0.005 |
| 0329+654 | TXS 0329+654 | B | HSP | ... |
| 0615–172 | IVS B0615–172 | B | ISP | 0.098 |
| 0646+600 | S4 0646+60 | Q | LSP | 0.455 |
| 0710+196 ¹ | IVS B0710+196 | Q | LSP | 0.540 |
| 0742+103 | PKS B0742+103 | Q | LSP | 2.624 |
| 1128–047 | PKS 1128–047 | G | LSP | 0.266 |
| 1331+170 ² | OP 151 | Q | LSP | 2.085 |
| 1404+286 | OQ 208 | G | LSP | 0.077 |
| 1413+135 | PKS B1413+135 | B | LSP | 0.247 |
| 1509+054 | PMN J1511+0518 | G | LSP | 0.084 |
| 1637+826 | NGC 6251 | G | LSP | 0.024 |
| 1722+401 ¹ | VIPS 1080 | Q | LSP | 1.049 |
| 1833+326 | 3C 382 | G | ISP | 0.058 |
| 1845+797 | 3C 390.3 | G | LSP | 0.056 |
| 1957+405 | Лебедь А | G | LSP | 0.056 |
| 2013–092 | PMN J2016–0903 | B | ISP | ... |
| 2021+614 | TXS 2021+614 | G | LSP | 0.227 |
| 2031+216 | 4C +21.55 | Q | LSP | 0.174 |
| 2043+749 | 4C +74.26 | Q | ... | 0.104 |
| 2047+098 | PKS 2047+098 | B | LSP | 0.226 |

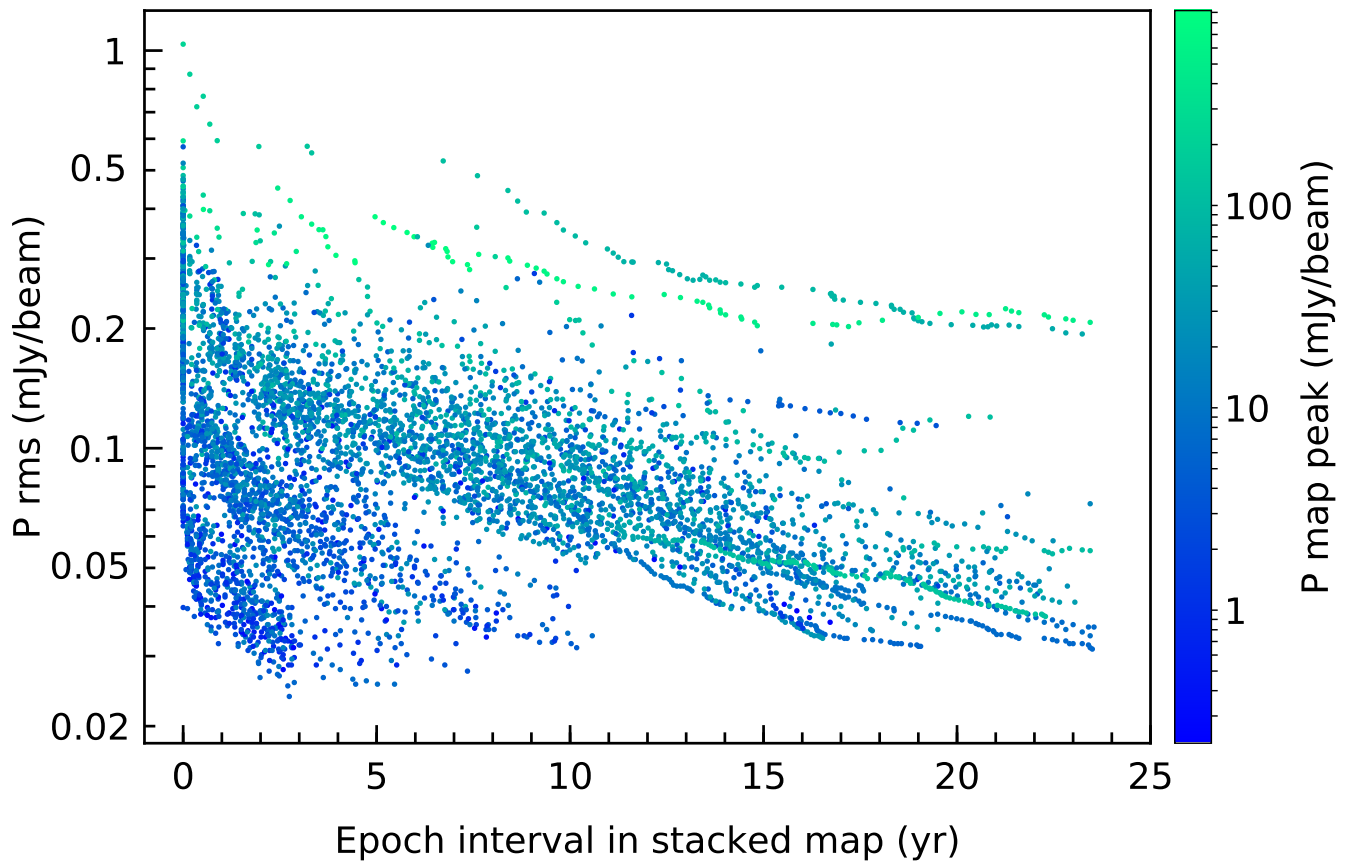


Рисунок 2.9 — Зависимость уровня шума на картах P_{stack} в мЯн/луч от периода времени в годах между первой и последней эпохами, используемых при усреднении. Цветом обозначена величина пика P_{stack} в мЯн/луч.

зависимости от степени переменности источника. Отбор 53 АЯГ с временным интервалом наблюдения более 10 лет и $N > 20$ показал, что максимум S_P/S_I находится в промежутке от 4 до 17 лет с медианой 10.5 ± 2.7 лет.

Очевидно, что движущиеся компоненты струи могут оказывать влияние на результирующие стековые изображения. С целью определения степени этого влияния сравнивались (1) расстояние, которое проходят компоненты вниз по струе $\mu\tau$, где μ — максимальное собственное движение компоненты, взятое из работы [144] и τ — временной интервал между первой и последней эпохами наблюдения (Таблица 2.3), и (2) типичное расстояние между компонентами δr , которое было измерено для 398 источников исследуемой выборки. Медиана отношения $\mu\tau/\delta r$ оказалась равной 1.5. Это указывает на то, что движущиеся компоненты значительно влияют на стековые карты полной интенсивности, сглаживая их вдоль выброса. У примерно 25% источников $\mu\tau/\delta r < 0.5$ из-за малого собственного движения, недостаточного временного интервала, как например у квазара 1550+582, или большого расстояния между компонентами (например, в радиогалактике 1345+125). Влияние движущихся деталей джета

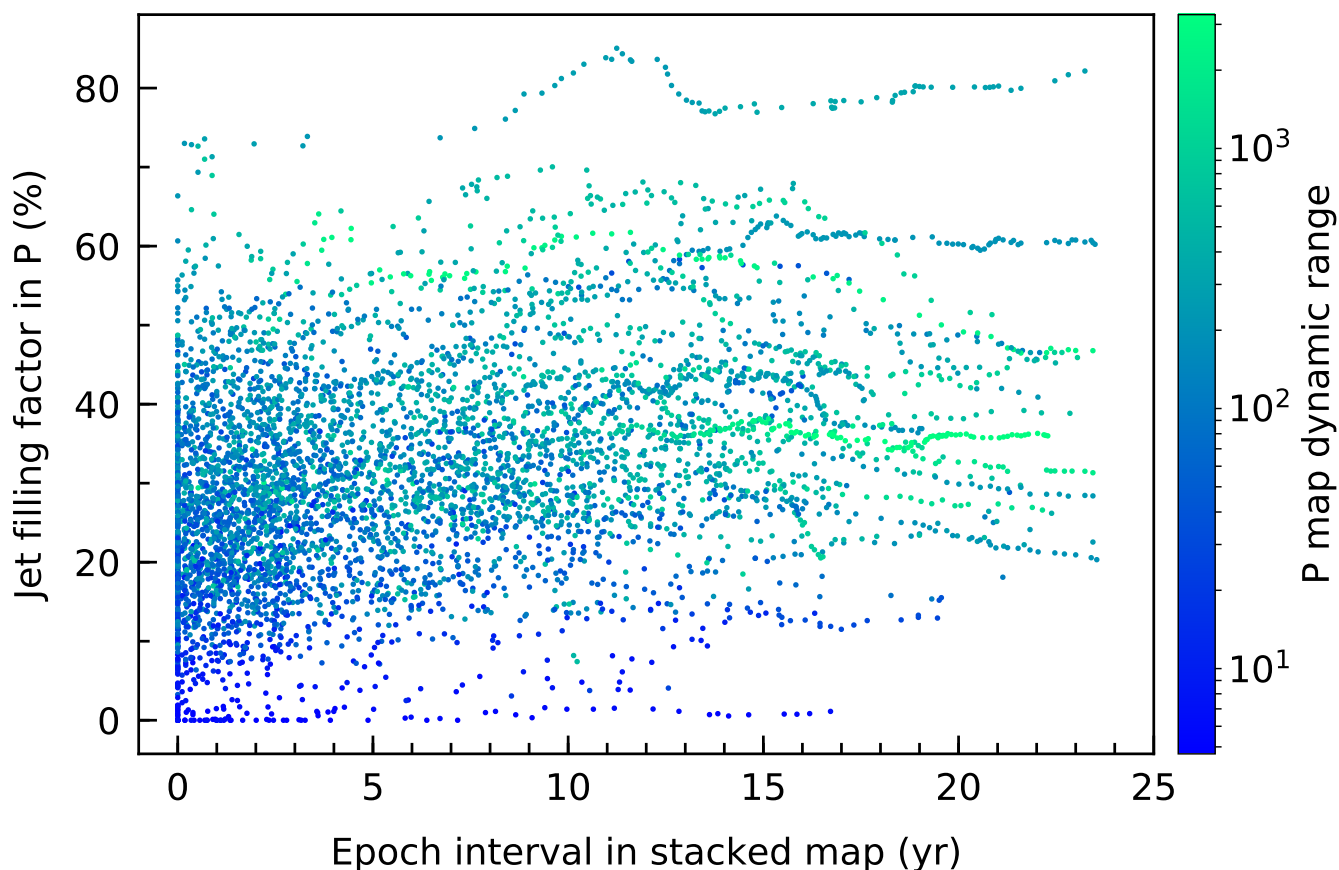


Рисунок 2.10 — Зависимость величины S_P/S_I в процентах от периода времени в годах между первой и последней эпохами, используемых при усреднении. Цветом обозначено отношение пика P_{stack} к $P_{\text{stack,uncertain}}$.

на стековые карты поляризации зависит от природы ярких компонент, что до сих пор остается открытым вопросом физики релятивистских струй активных ядер галактик. Пусть магнитное поле в струе обладает слабой анизотропией и существует оболочка вокруг выброса с полоидальным полем, образующаяся в результате механизма Блэнфорда-Пэйна [17] и дальнейшего взаимодействия с окружающей средой. В этом случае, если компоненты являются ударными волнами, которые сжимают магнитное поле поперек выброса [111; 150], то поляризация их излучения будет направлена перпендикулярно поляризации самого джета и будет доминировать в измеряемой линейной поляризации, если движущихся компонент достаточно много и они яркие. Если движущиеся компоненты являются плазмоидами со случайным направлением магнитного поля, то их влияние на наблюдаемую поляризацию будет мало.

2.3.2 Медианные карты и распределения переменности линейно-поляризованного излучения

Для построения медианных карт и карт переменности поляризации были получены одноэпоховые карты поляризованной интенсивности $P = \sqrt{Q^2 + U^2}$ и направления поляризации $EVPA = 0.5 \arctan(U/Q)$, которое распределено в диапазоне от $-\pi/2$ до $+\pi/2$. Шум на карте поляризационной интенсивности P_{rms} оценивался как $(Q_{\text{rms}} + U_{\text{rms}})/2$ [147]. Ошибки одноэпоховых карт параметров Стокса I_{rms} , Q_{rms} и U_{rms} определялись аналогично $I_{\text{stack,rms}}$ (Раздел 2.3.1). Поляризационная интенсивность характеризуется распределением Рэлея, поэтому уровень 3σ для нормального распределения соответствует уровню $3.4P_{\text{rms}}$. Пиксели на одноэпоховых картах P , в которых значение меньше $3.4P_{\text{rms}}$, были замаскированы как шумные. Также на карты I и P накладывалась маска по уровню $4I_{\text{rms}}$. Следовательно, EVPA вычислялось только в тех пикселях, которые не являются шумными на одноэпоховых картах I и P .

Поляризационная интенсивность была поправлена за баис Райса по формуле 2.4. Для отношения сигнал-шум равного трем разница между измеренным и истинным значением на одноэпоховых картах P может достигать 6% (Рисунок 2.6). Направление поляризации не подвержено влиянию этого эффекта [146]. Сначала на карту распределения линейной поляризации P была наложена маска на уровне $3.4P_{\text{rms}}$, только затем изображения были исправлены за баис Райса, поскольку он влияет на распределение шума. Используя карты I и P с наложенными масками, были построены одноэпоховые изображения степени поляризации $m = P/I$.

Для каждого источника выборки были построены медианные карты P_{med} и m_{med} , у которых значение в каждом пикселе равно медиане по эпохам. Эти изображения характеризуют типичные по времени величины. Карты переменности степени и направления линейной поляризации были определены как стандартное отклонение между одноэпоховыми значениями этих величин в каждом пикселе. EVPA имеет π -неопределенность, поэтому необходимо использовать круговую статистику, которая учитывает эту особенность. Стандартное отклонение направления поляризации σ_{EVPA} определялось, как $\sqrt{-2 \ln R}$ [151], где R — длина результирующего вектора на круге с единичным радиусом. Вычисле-

ния производились с использованием библиотеки *PYTHON SciPy* [152]. Согласно этому определению, σ_{EVPA} может лежать в диапазоне от 0 до ∞ . Однако для наших данных стандартное отклонение EVPA не превосходит $\approx 100^\circ$. Стандартные отклонения m и EVPA, σ_m и σ_{EVPA} , вычислялись только в тех пикселях, которые остаются незамаскированными в трех и более эпохах.

Степень поляризации m по определению всегда неотрицательна. Следовательно, ее изменения становятся несимметричными при приближении m к нулю, поэтому σ_m может недооценивать переменность в этом случае. Однако, m мала в основном в области РСДБ-ядра, а в данной работе рассматриваются преимущественно внешние области выбросов, поэтому было использовано стандартное отклонение в качестве меры переменности. Тем не менее, было проведено сравнение стандартного отклонения с интерквартильным размахом, который определяется как разница между 75 и 25 перцентилями и является более робастной оценкой вариаций. Оказалось, что значение интерквартильного размаха в джете сравнимо со стандартным отклонением и их отношение остается примерно постоянным вниз по струе.

Карты P_{med} , m_{med} и σ_m были поправлены за систематический сдвиг, который вносит алгоритм деконволюции CLEAN (Раздел 2.3.4). На переменность направления поляризации этот баис влияет слабо (Раздел 2.3.4). Как и в случае со стековыми картами (Раздел 2.3.1), поправка за этот эффект приводит к отрицательным значениям в некоторых пикселях. Количество таких пикселей составляет менее 3% от общего числа незамаскированных. Причем большинство соответствующих значений отличаются от нуля незначимо, поэтому все отрицательные значения были заменены нулями.

Для исключения шумных пикселей из анализа были применены следующие маски на медианные карты и карты переменности поляризации: на уровнях $4I_{\text{stack,rms}}$ и $3.4 \times \text{median}(P_{\text{rms}})$. Используя σ_m и m_{med} с наложенными масками, были построены изображения относительной переменности степени поляризации σ_m/m_{med} .

В Таблице 2.3 приведена информация о свойствах полученных медианных карт. На Рисунках 2.11 и 2.12 в качестве примера объектов с типичным (9) и максимальным (139) числом эпох приведены медианные изображения и карты переменности поляризации для источников 2254+074 и 2200+420, соответственно. В Приложении А приведены медианные карты поляризации и ее переменности для 15 АЯГ с наиболее протяженной поляризационной структу-

рой. Ошибки m_{med} , σ_m и σ_{EVPA} оценивались с помощью подхода, описанного в Разделе 2.3.4. Погрешность σ_m/m_{med} оценивалась как

$$(\sigma_m/m_{\text{med}})_{\text{uncertain.}} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{m,\text{uncertain.}}}{m_{\text{med}}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_m m_{\text{med,uncertain.}}}{m_{\text{med}}^2}\right)^2}, \quad (2.10)$$

где $\sigma_{m,\text{uncertain.}}$ и $m_{\text{med,uncertain.}}$ — ошибки σ_m и m_{med} , соответственно.

Как и в случае стековых изображений, $\approx 5\%$ (22 АЯГ, Таблица 2.4) источников выборки оказались неполяризованными на медианных картах. В основном, причиной является их малая поляризационная интенсивность, поэтому 21 объект пересекается с источниками, неполяризованными на стековых картах. У квазаров 0710+196 и 1722+401 детектируется m_{med} из-за того, что степень поляризации наблюдается на некоторых эпохах, в то время как благодаря повороту направления поляризации на $\approx 90^\circ$ между эпохами на картах m_{stack} эти объекты оказались неполяризованными. Медианные карты 0710+196 и 1722+401 приведены на Рисунках 2.13 и 2.14, соответственно. Источник 0742+103 является неполяризованным на медианных картах из-за багса, порожденного алгоритмом CLEAN: после коррекции за него значения P_{med} во всех пикселях оказались отрицательными. Все неполяризованные источники в дальнейшем анализе не рассматривались.

2.3.3 Сравнение стековых и медианных распределений линейной поляризации

Стековые и медианные изображения являются усредненными по эпохам картами. Рассмотрим построение этих карт для поляризационной интенсивности. Для P_{stack} сначала усреднялись одноэпоховые параметры Стокса I , Q и U , а затем стековая карта определялась, как $P_{\text{stack}} = \sqrt{Q_{\text{stack}}^2 + U_{\text{stack}}^2}$. В случае медианных изображений сначала были построены одноэпоховые карты $P = \sqrt{Q^2 + U^2}$, а P_{med} вычислялась как медиана одноэпоховых карт по эпохам. Оба методом построения усредненных по эпохам изображений имеют ряд отличительных особенностей.

При вычислении стековых значений поляризации учитывается направление поляризации (векторное усреднение), то есть если изменение EVPA между

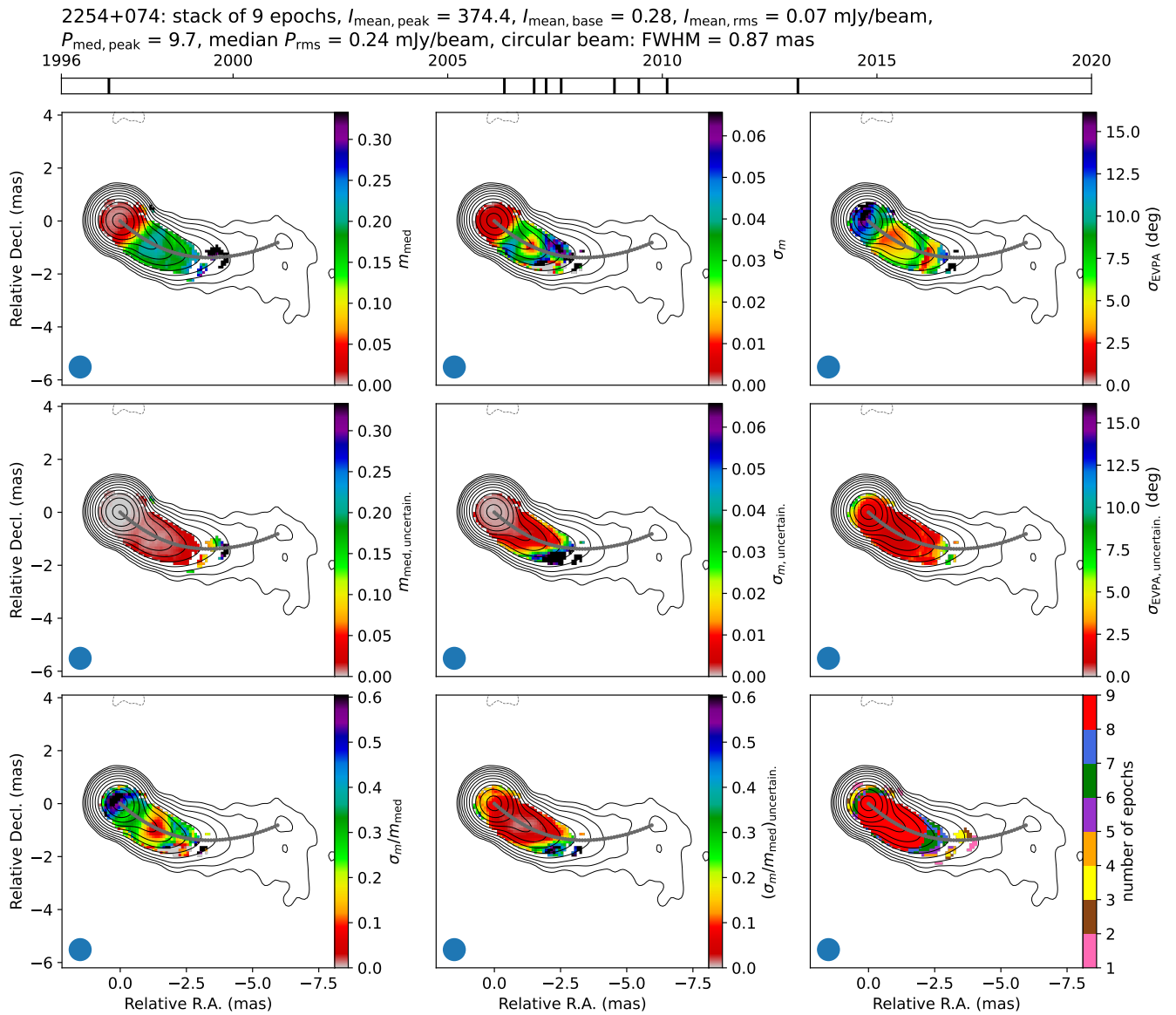


Рисунок 2.11 — Карты переменности линейной поляризации и m_{median} для лацертиды 2254+074. Сверху приведена основная информация по многоэпоховым данным: количество эпох, значения пика и нижнего контура I_{stack} , показанного на картах, шум I_{stack} , пик медианной поляризационной интенсивности P_{med} и медианы по одноэпоховым значениям шума поляризационной интенсивности в мЯн/луч, а также размер диаграммы направленности в мсек дуги. Ниже черточками нанесены на временную шкалу эпохи наблюдений. Верхний ряд карт: медианная степень поляризации m_{med} (слева), абсолютная переменность степени поляризации σ_m (в середине), переменность EVPA σ_{EVPA} в градусах (справа). Средний ряд карт: ошибка медианной степени поляризации (слева), ошибка абсолютной переменности степени поляризации (в середине), ошибка переменности EVPA в градусах (справа). Нижний ряд карт: относительная переменность степени поляризации σ_m/m_{med} (слева), ошибка относительной переменности степени поляризации (в середине), количество эпох, когда m и EVPA незамаскированы в данном пикселе (справа). По осям абсцисс и ординат карт отложены относительные прямое восхождение и склонение в мсек дуги, соответственно. Точка с координатами (0,0) соответствует фазовому центру карты. На всех изображениях черные контуры соответствуют I_{stack} , нижний контур отображен на уровне $4I_{\text{stack, rms}}$, значения для остальных контуров возрастают с коэффициентом 2. Серый контур проведен на уровне $-4I_{\text{stack, rms}}$. Хребтовая линия, построенная по стековой полной интенсивности, обозначена жирной серой линией. На картах ошибок показаны только те пиксели, которые незамаскированы в трех и более Монте-Карло реализациях (Раздел 2.3.4). Диапазоны шкал на картах величины и ее ошибки совпадают. Голубой кружок в нижнем левом углу изображений показывает размер диаграммы направленности по уровню половинной мощности. Медианные карты и карты переменности поляризации для всех 436 АЯГ приведены в электронной версии статьи [A3] по ссылке <https://doi.org/10.1093/mnras/stad1481>.

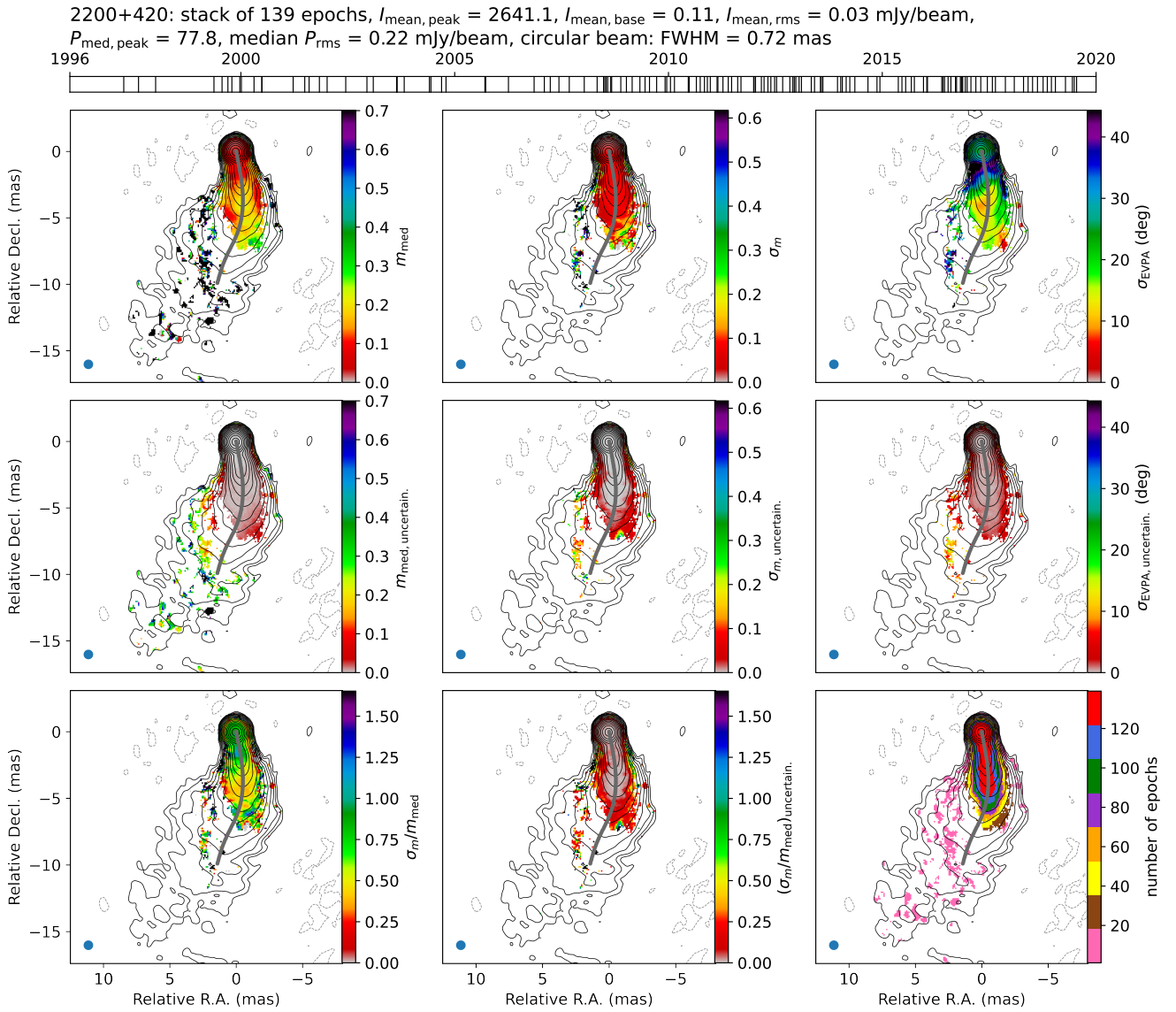


Рисунок 2.12 — Карты переменности линейной поляризации и m_{median} для 2200+420 (BL Lacertae). Обозначения такие же, как на Рисунке 2.11.

эпохами в некоторой области составляет $\approx 90^\circ$, то она на стековых картах будет деполаризована. В то же время, значения P_{med} в такой области будут положительными, поскольку на одноэпоховых изображениях поляризация детектируется. Такая ситуация наблюдается у квазаров 0710+196 и 1722+401 (Разделы 2.3.1 и 2.3.2), их карты показаны на Рисунках 2.13 и 2.14, соответственно. Еще одним следствием учета EVPA при усреднении является то, что пик на картах P_{stack} типично меньше на 30% пика P_{med} (Рисунок 2.15).

Шум параметров Стокса I , Q и U имеет нормальное распределение, поэтому усреднение этих величин по эпохам приводит к уменьшению шума. Следовательно, ошибка P_{stack} тоже уменьшается (см. Рисунок 2.8 и обсуждение в Разделе 2.3.1). В случае P_{med} , а следовательно, и m_{med} уменьшение шума

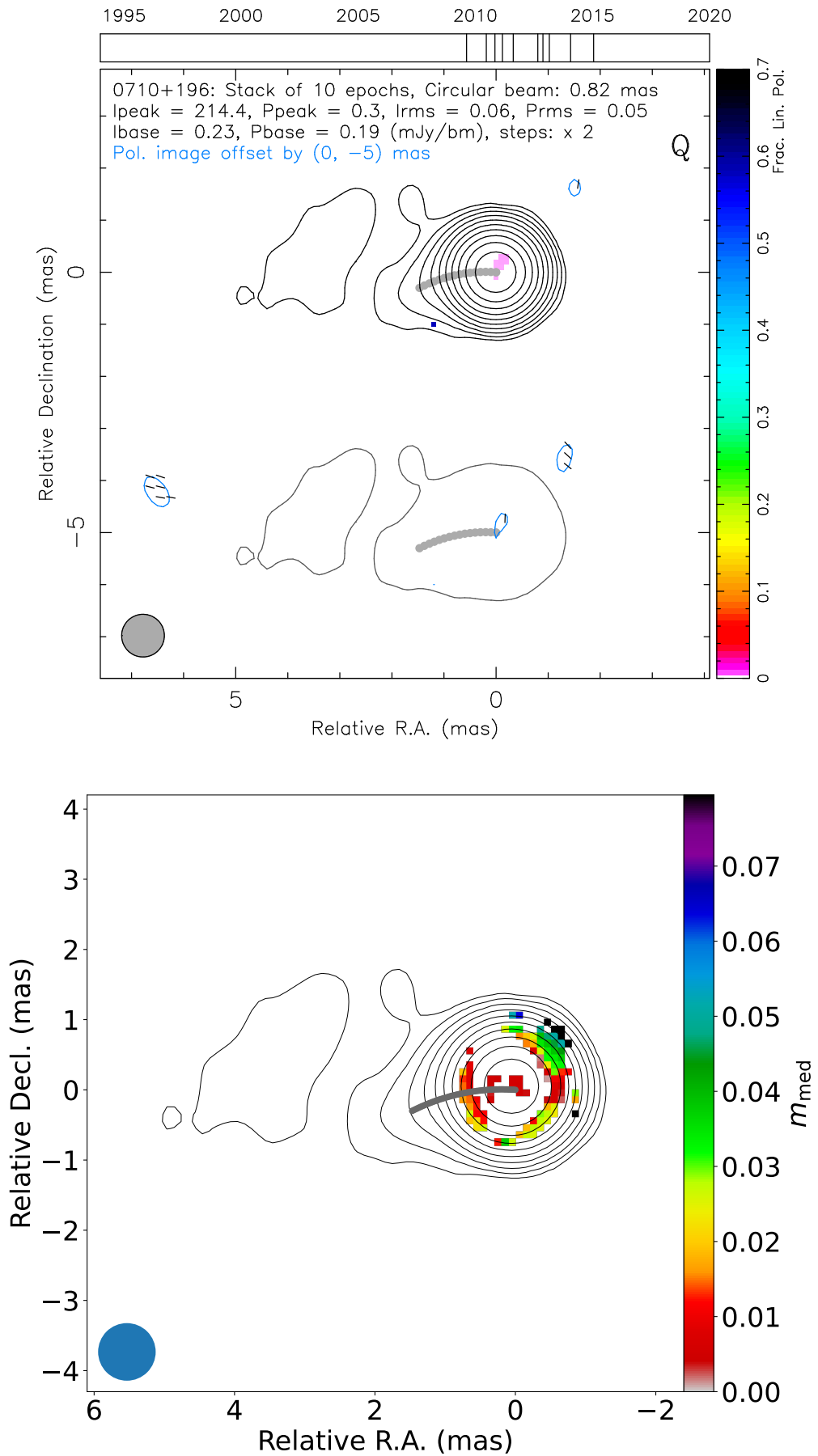


Рисунок 2.13 — Стековая карта (сверху) и медианная степень поляризации (снизу) для квазара 0710+196. Обозначения на стековой карте такие же, как на Рисунке 2.7, на медианной карте — как на Рисунке 2.11.

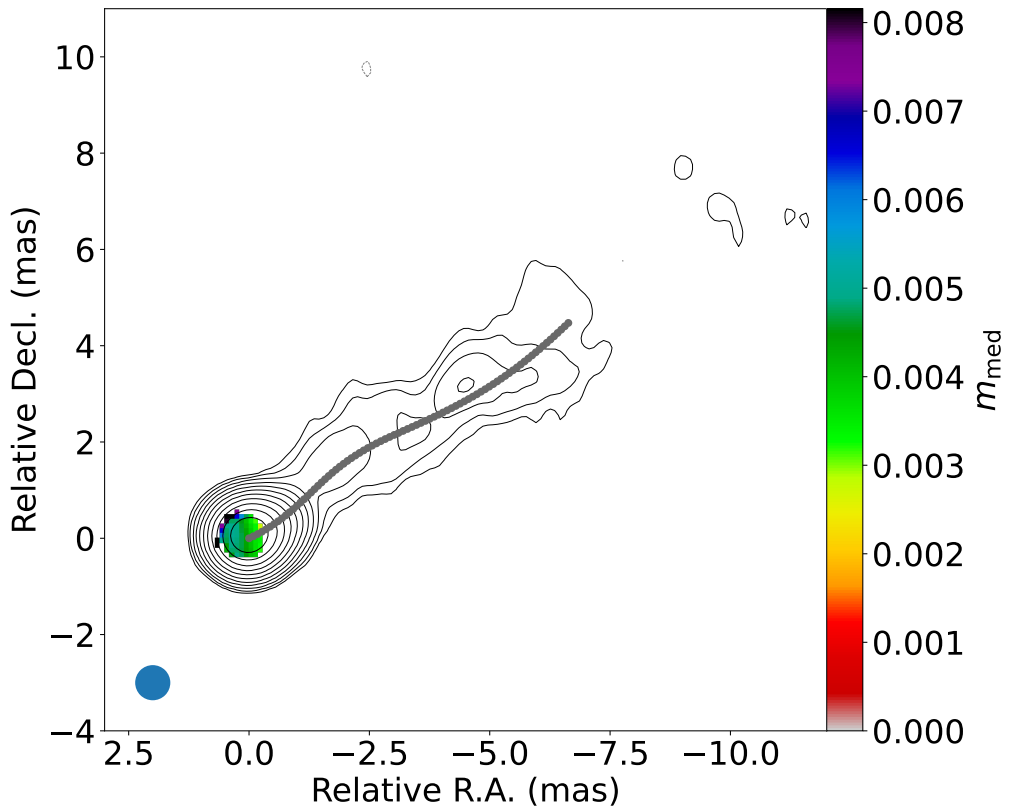
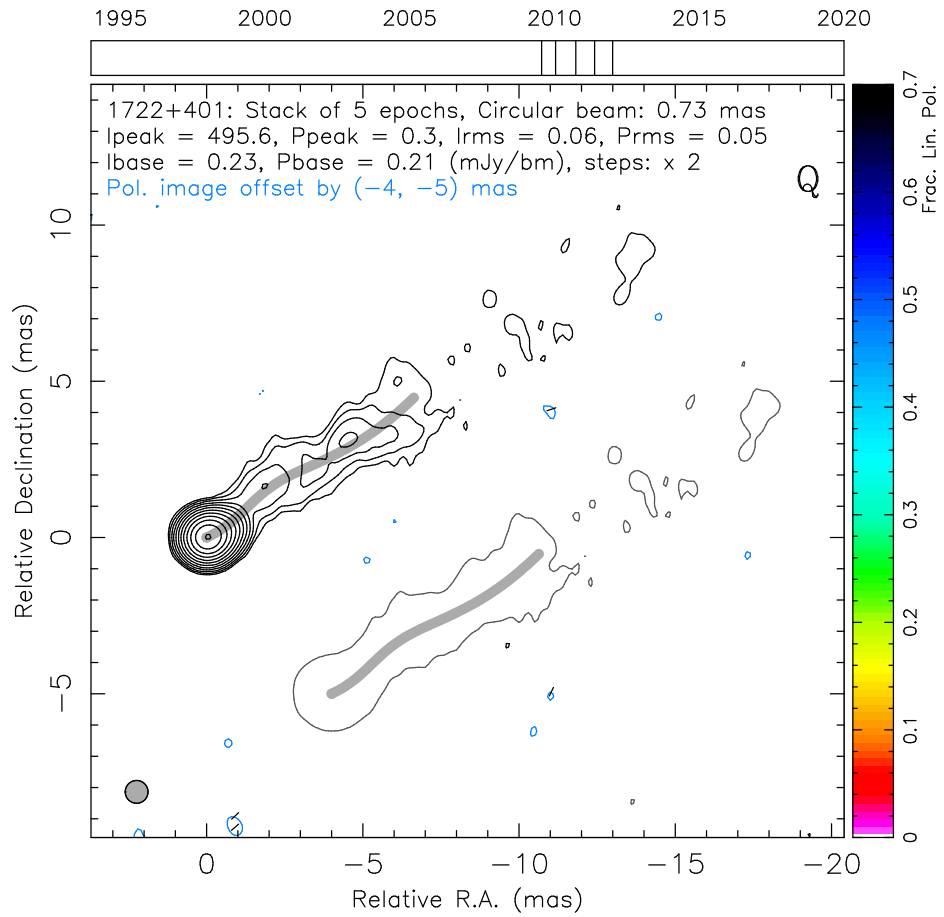


Рисунок 2.14 — Стековая карта (сверху) и медианная степень поляризации (снизу) для квазара 1722+401. Обозначения на стековой карте такие же, как на Рисунке 2.7, на медианной карте — как на Рисунке 2.11.

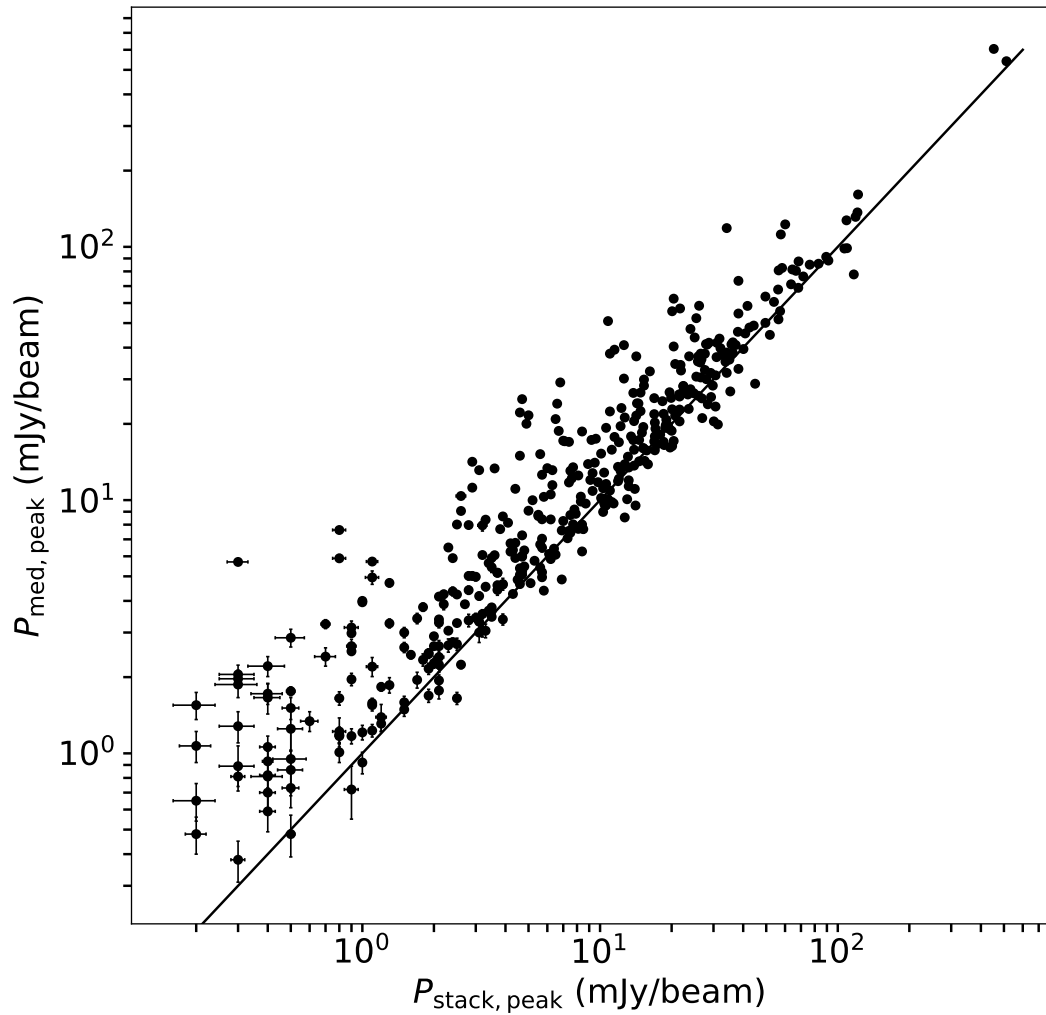


Рисунок 2.15 — Зависимость пика медианной поляризационной интенсивности $P_{\text{med,peak}}$ в мЯн/луч от пика стековой поляризационной интенсивности $P_{\text{stack,peak}}$ в мЯн/луч. В качестве ошибки $P_{\text{med,peak}}$ показана медиана по одноэпоховым P_{rms} , в качестве шума $P_{\text{stack,peak}}$ — $P_{\text{stack,uncertain}}$. Прямая линия соответствует равенству $P_{\text{stack,peak}}$ и $P_{\text{med,peak}}$. Неопубликованный иллюстративный материал, рисунок выполнен диссертантом.

не происходит, поскольку усредняются только положительные величины. Эти особенности, в частности, способствуют большому количеству незамаскированных пикселей на картах m_{stack} по сравнению с m_{med} . В качестве примера на Рисунке 2.16 приведены карты для лацертиды 0518+211, имеющей 17 эпох наблюдений.

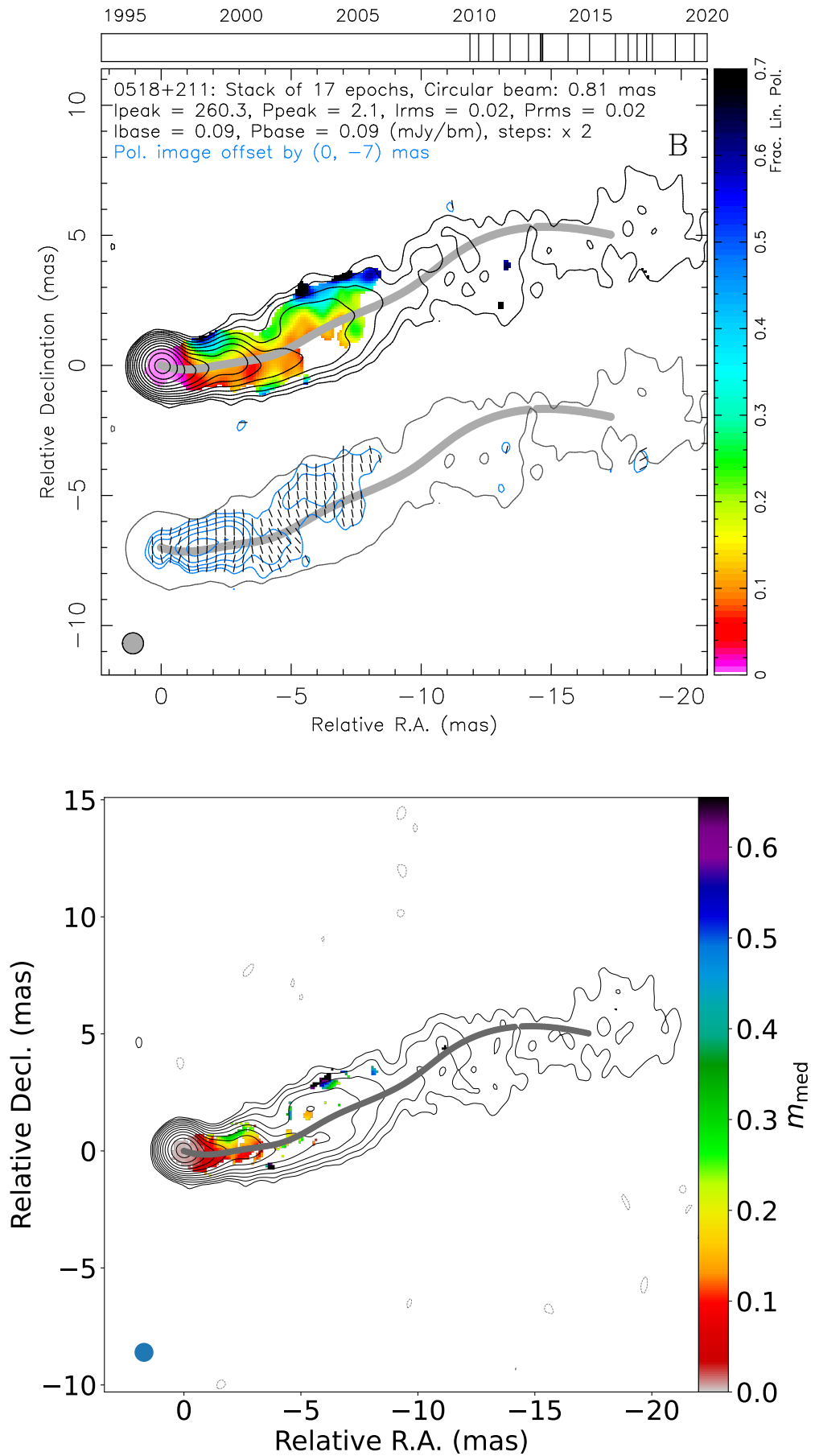


Рисунок 2.16 — Стековая карта (сверху) и медианная степень поляризации (снизу) для лацертиды 0518+211. Обозначения на стековой карте такие же, как на Рисунке 2.7, на медианной карте — как на Рисунке 2.11.

2.3.4 Оценка ошибок построенных карт

Для оценки неопределенностей стековых и медианных карт, а также карт переменности поляризации были использованы Монте-Карло симуляции. В частности, выбор такого подхода был обусловлен тем, что поляризационная интенсивность имеет распределение Рэлея, поэтому получение аналитических выражений для погрешностей среднего, медианы и стандартного отклонения представляет сложность. В [153] было показано, что подход, использующий симуляции, способствует более оптимальным оценкам ошибок полной интенсивности на одноэпоховых изображениях, чем традиционный метод [147]. Основная идея заключается в том, что происходит копирование наблюдательных данных большое число раз, при этом в каждом наборе данных применяется своя реализация шума. Затем каждый набор проходит ту же самую обработку, что и реальные наблюдения, и ошибка оценивается, исходя из разброса значений между реализациям.

Для каждой из 30 Монте-Карло реализаций генерировалась своя функция видности на данную эпоху наблюдений. С этой целью:

1. Создавались модели видностей, используя CLEAN модели для I , Q и U и uv -покрытие для реальных данных. Затем модели сдвигались так, чтобы положение РСДБ-ядра было в фазовом центре. Положение РСДБ-ядра основывалось на результатах моделирования наблюдаемой функции видности гауссовыми компонентами [144].
2. Добавлялся тепловой шум в модели видностей. Предполагалось, что этот шум имеет нормальное распределение в реальной и мнимой частях функции видности. На каждой базе он оценивался с помощью разностного подхода [154].
3. Выполнялось моделирование остаточной неопределенности шкалы амплитуд коэффициентов усиления антенн и взвешивание амплитуд параллельных и смешанных корреляций со случайным коэффициентом. Для этого генерировались две случайных величины C_R и C_L из нормального распределения $N(0, 0.035)$. Это соответствует ошибке в 5%, полученной в работе [122]. Антенным поляризациям R и L соответствуют C_R и C_L , смешанным корреляциям R и L — произведение C_R и C_L .

4. Выполнялось моделирование остаточной ошибки инструментальной поляризации (D-term). Для этого были вычислены реальная и мнимая части остаточного D-term для каждой поляризации (R , L) для каждого спектрального канала на i -ой антенне из нормального распределения $N(0, \sigma_D)$, где σ_D оценивалась из разброса решений для D-term на основании всех эпох наблюдений проекта MOJAVE на каждой из антенн (Рисунок 2.17). В случае других антенн (на восьми эпохах наблюдала одна из станций Very Large Array) использовалось медианное значение σ_D для антенн VLBA. Затем полученные оценки остаточного D-term добавлялись в данные с помощью линейной аппроксимации [155].
5. Проводилось моделирование ошибки абсолютного направления линейной поляризации. Для этого EVPA поворачивался на случайный угол, который был взят из нормального распределения $N(0, \sigma_{EVPA})$, где $\sigma_{EVPA} = 3^\circ$ [147]. Поворот был сделан в плоскости пространственных частот путем добавления одной и той же величины к функциям видности Q и U .

Полученные искусственные данные картографировались в пакете *DIFMAP*, используя ту же процедуру, что и для реальных наблюдений. Затем в каждой Монте-Карло реализации строились медианные и стековые изображения, а также изображения переменности поляризации. Карты ошибок определялись, как стандартное отклонение между реализациями в каждом пикселе.

В работе [147] обнаружили, что алгоритм CLEAN вносит ошибку, которая может зависеть от структуры источника. В данном исследовании этот систематический сдвиг был оценен, как разность между средним по Монте-Карло реализациям изображением и CLEAN-моделью структуры источника из работы [144], свернутой с круговой диаграммой направленности, размер которой определялся по формулам 2.1 – 2.3. Таким образом, были получены карты распределения байеса для всех стековых и медианных карт, а также карт переменности поляризации, кроме $EVPA_{\text{stack}}$ и σ_{EVPA} . Было обнаружено, что направление поляризации не подвержено систематической ошибке, вносимой алгоритмом CLEAN, поскольку причины для систематического отклонения EVPA в том или ином направлении отсутствуют. Поправка за систематический сдвиг вводилась путем вычитания карты распределения байеса из изображения.

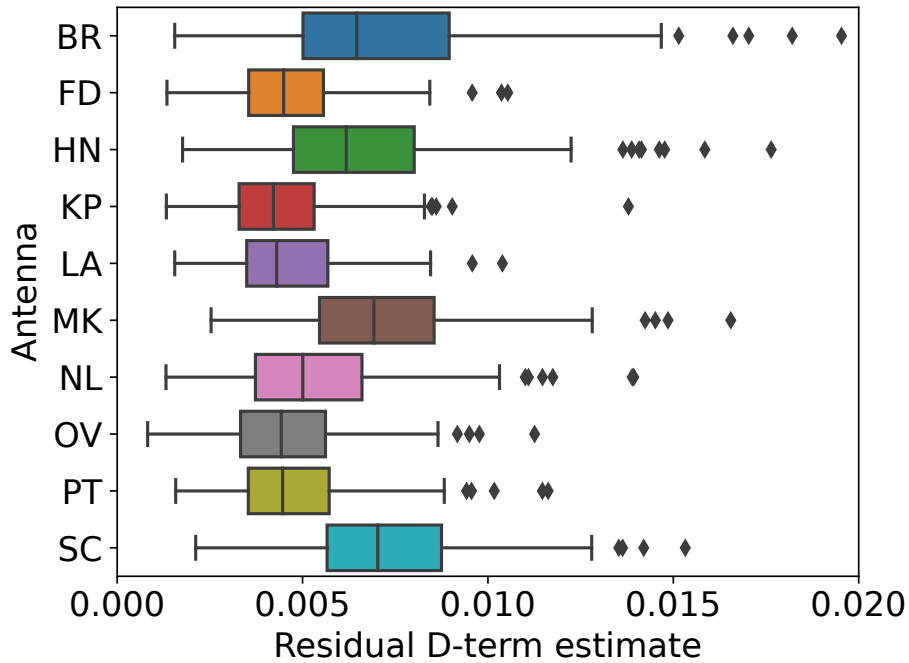


Рисунок 2.17 — Распределение остаточной амплитуды инструментальной поляризации для каждой антенны VLBA. По оси абсцисс отложена оценка остаточной амплитуды D-term, по оси ординат — антенны VLBA: BR — Brewster, FD — Fort Davis, HN — Hancock, KP — Kitt Peak, LA — Los Alamos, MK — Mauna Kea, NL — North Liberty, OV — Owens Valley, PT — Pie Town, SC — St. Croix. Остаточная амплитуда для каждой антенны была оценена как стандартное отклонение разницы между решением для данного источника и медианы по всей выборки для действительной и мнимой части D-term для каждого спектрального канала и поляризации. Цветом для каждой антенны закрашен интервал от 25 до 75 перцентиля (интерквартильный размах). Линия соответствует медианному значению, планка погрешностей — $1.5 \times$ интерквартильный размах. Ромбы показывают значения остаточной амплитуды D-term за пределами планки погрешностей. Здесь не приведены 12 точек со значениями от 0.020 до 0.063.

Типичное значение поправки для I_{stack} составляет около 0.11 мЯн/луч, P_{stack} — 0.03 мЯн/луч, P_{med} — 0.13 мЯн/луч, m_{med} — 0.03×10^{-1} , σ_m — 0.02×10^{-2} .

2.4 Переменность направления линейной поляризации в областях РСДБ-ядра и джета

Одной из целей данного исследования является изучение изменений направления магнитного поля с помощью распределений переменности EVPA. В работах [33; 37; 156; 157] вариации направления поляризации связывают с

движением компонент по струе. Область РСДБ-ядра покрывает наиболее внутренние части АЯГ, в которых образуются компоненты. Она не разрешается, поэтому измеряется интегральное по всей области направление поляризации. В более внешних областях струи можно измерить направление поляризации каждой компоненты, как это было сделано, например в работе [90]. Следовательно, ожидается, что РСДБ-ядро и джет будут иметь разные свойства переменности σ_{EVPA} .

В данном исследовании был проведен анализ σ_{EVPA} в областях струи и РСДБ-ядра, как целого. В качестве размера ядерной области на карте был взят полученный из моделирования структуры источника гауссовыми компонентами размер компоненты РСДБ-ядра (полная ширина на уровне половины мощности) [144], усредненный по эпохам и свернутый с диаграммой направленности. Чтобы выделить области РСДБ-ядра и джета на картах усредненной по эпохам поляризации и ее переменности, был проведен анализ вклада обеих областей в величину медианной по эпохам поляризационной интенсивности P_{med} вдоль хребтовой линии. Для этой оценки РСДБ-ядро на распределении P_{med} рассматривалось, как одномерная гауссова функция с FWHM равной FWHM ядерной области на карте. В качестве максимума РСДБ-ядра и его положения были использованы пик на карте P_{med} и его положение. Было обнаружено, что расстояние по хребтовой линии от положения РСДБ-ядра, на котором его вклад в P_{med} меньше 50%, составляет 1.5 размеров ядерной области на карте (Рисунок 2.18). Было принято, что граница между РСДБ-ядром и струей проходит перпендикулярно хребтовой линии на этом расстоянии от РСДБ-ядра.

Для каждого АЯГ вычислялись медианные σ_{EVPA} по областям РСДБ-ядра и джета. Распределения этих величин приведены на Рисунке 2.19. Переменность направления поляризации типично не имеет систематических изменений вдоль и поперек хребтовой линии (Разделы 2.5.1 и 2.6), поэтому медиана является хорошей оценкой характерного σ_{EVPA} по выбросу. В области РСДБ-ядра переменность поляризации имеет широкое распределение вплоть до $\approx 60^\circ$ с медианным значением — примерно 25° . Для областей струи внешних по отношению к области РСДБ-ядра распределение уже: интерквартильный размах составляет около 9° , тогда как для РСДБ-ядер он равен $\approx 20^\circ$. Максимальное значение переменности направления поляризации для джетов составляет $\approx 50^\circ$, а медиана медианной по выбросу σ_{EVPA} — около 10° . Непараметрический корреляционный тест Кендалла [158] не обнаружил значимой зависимости пере-

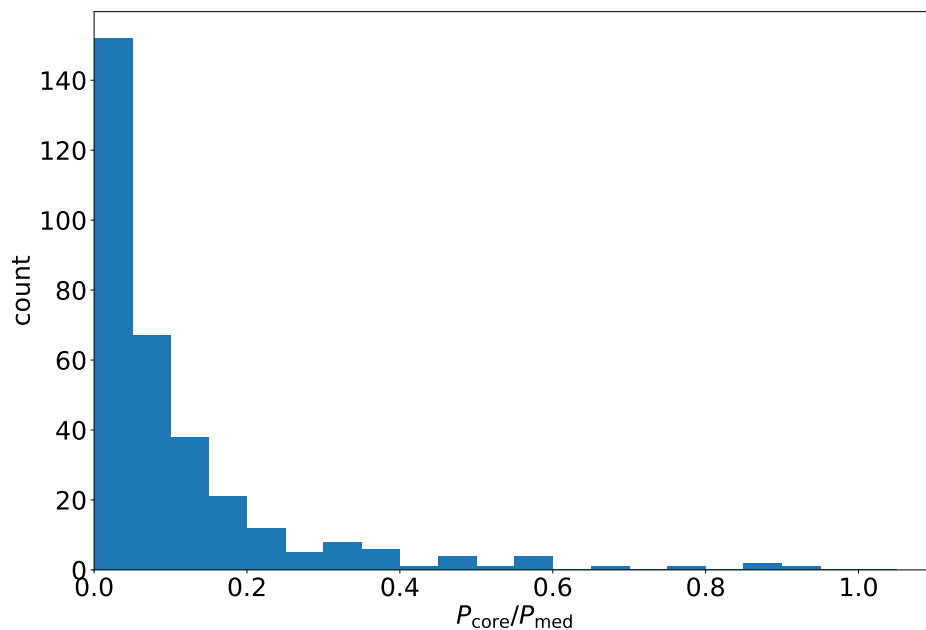


Рисунок 2.18 — Гистограмма распределения отношения поляризационной интенсивности РСДБ-ядра P_{core} к наблюдаемой медианной поляризационной интенсивности P_{med} на расстоянии 1.5 размеров РСДБ-ядра на карте от положения РСДБ-ядра. Неопубликованный иллюстративный материал, рисунок выполнен диссертантом.

менности EVPA с красным смещением ни для полной выборки, ни отдельно для разных оптических и спектральных классов. В этом исследовании было условлено, что зависимость является значимой, если p -value меньше 0.05. Качественно такие же результаты получились для пересечения исследуемой выборки и полной по плотности потока выборки MOJAVE 1.5 Jy Quarter Century [159]. Далее это пересечение будет называться подвыборкой MOJAVE 1.5JyQC. Она включает в себя 207 АЯГ, это составляет примерно 90% от выборки MOJAVE 1.5 Jy Quarter Century, содержащей 232 объекта, и около 47% от исследуемой выборки. Примерно 76% источников подвыборки MOJAVE 1.5JyQC являются квазарами класса LSP, около 18% — лацертидами, остальные объекты — радиогалактики, сейфертовские галактики первого типа с узкими линиями и АЯГ, оптический класс которых неопределен. Доля лацертид класса LSP составляет примерно 78% от всех лацертид подвыборки MOJAVE 1.5JyQC, для исследуемой выборки эта доля составляет $\approx 55\%$ (Таблица 2.1).

Было проведено сравнение распределений медианных значений σ_{EVPA} в областях РСДБ-ядра и выброса для полной выборки, а также для подвыборок разных оптических и спектральных классов с помощью двухвыборочного критерия Андерсона-Дарлинга [49]. Было обнаружено, что переменность EVPA значимо выше в области РСДБ-ядра по сравнению с джетом для всей выборки, а

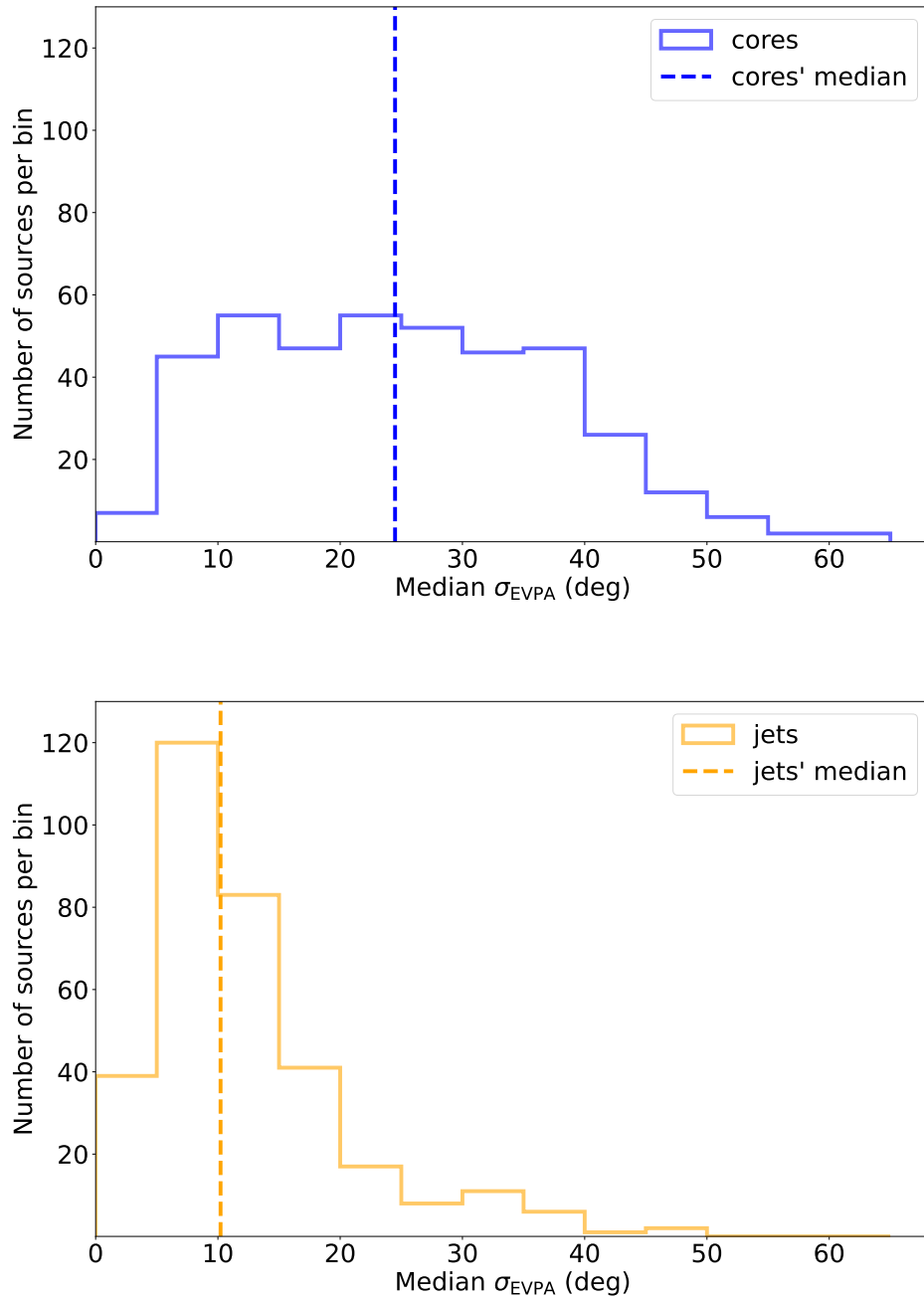


Рисунок 2.19 — Гистограммы распределения медианы σ_{EVPA} в градусах для РСДБ-ядер (сверху) и джетов (снизу) для всей выборки. Пунктирные линии показывают медиану распределений.

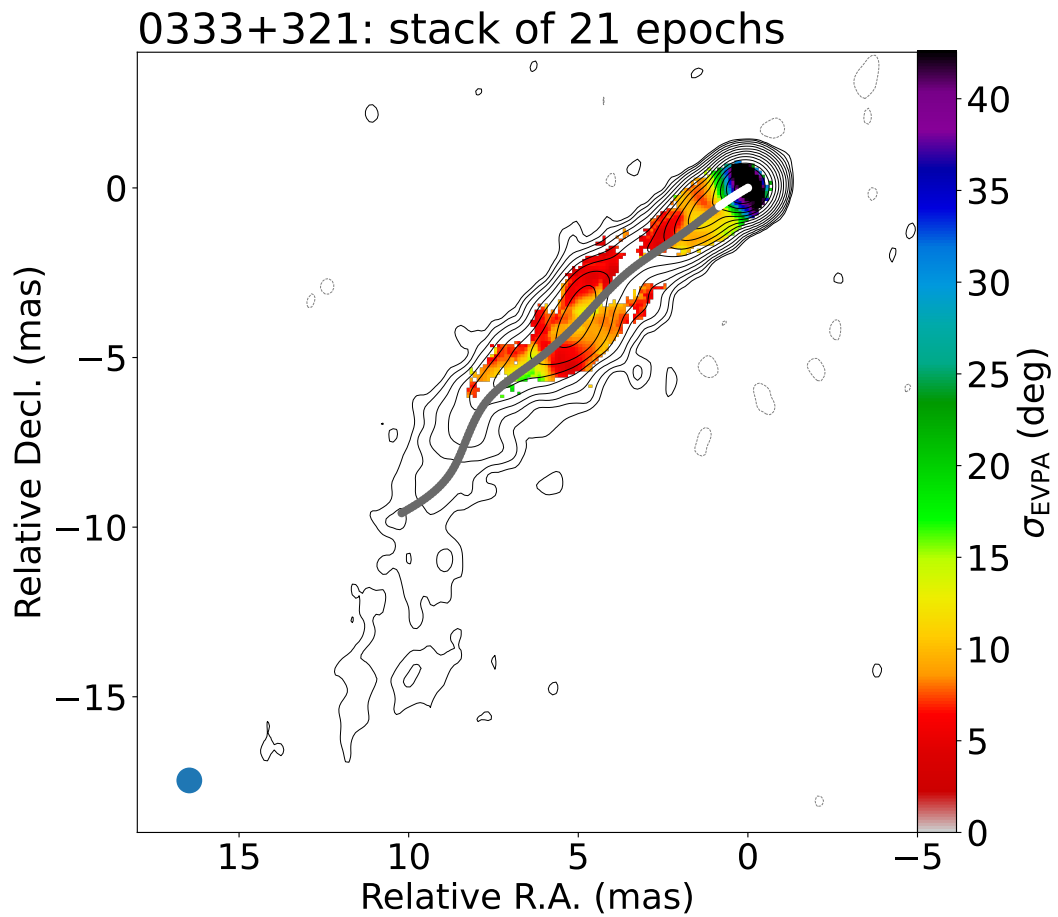


Рисунок 2.20 — Карта переменности EVPA для квазара 0333+321. Белая и серая линии обозначают участки хребтовой линии в областях РСДБ-ядра и джета, соответственно. Обозначения на карте такие же, как на Рисунке 2.11.

также отдельно для квазаров, лацертид, источников классов LSP и ISP, квазаров и лацертид класса LSP, лацертид класса ISP и объединения лацертид классов ISP и HSP. Значимая разница для объединения лацертид классов ISP и HSP обусловлена источниками класса ISP, которые составляют около 60% подвыборки. На Рисунке 2.20 в качестве примера приведена карта σ_{EVPA} для квазара 0333+321, у которого переменность EVPA в ядерной области больше, чем в джете.

Полученные результаты были проверены с помощью рандомизационного теста [43]. Из объединения медианных значений σ_{EVPA} по РСДБ-ядру и джету выбирались две подвыборки с количеством элементов равным объединению изначальных подвыборок с заменой, различие между которыми затем оценивалось с помощью теста Андерсона-Дарлинга. Процедура повторялась 10000 раз, p -value рандомизационного теста принималось равным относительному числу случаев, когда статистика теста Андерсона-Дарлинга превышала статистику для изначальных сравниваемых подвыборок. Оказалось, что p -value рандомизаци-

Таблица 2.5 — Результаты статистического сравнения медианных значений σ_{EVPA} в областях РСДБ-ядра и джета. Колонки: (1) сравниваемые подвыборки, (2) результат сравнения: существует ли значимая разница между распределениями медианного значения σ_{EVPA} для подвыборок, (3) p -value теста сравнения, (4) количество объектов в сравниваемых подвыборках.

| Сравниваемые подвыборки (1) | Результат (2) | P -value (3) | Количество источников (4) |
|--|------------------|-------------------|------------------------------|
| РСДБ-ядра и джеты (полная выборка) | Да | <0.0001 | 402 и 328 |
| РСДБ-ядра и джеты квазаров | Да | <0.0001 | 251 и 211 |
| РСДБ-ядра и джеты лацертид | Да | <0.0001 | 126 и 98 |
| РСДБ-ядра и джеты АЯГ класса LSP | Да | <0.0001 | 338 и 278 |
| РСДБ-ядра и джеты АЯГ класса ISP | Да | 0.0001 | 39 и 32 |
| РСДБ-ядра и джеты квазаров класса LSP | Да | <0.0001 | 244 и 207 |
| РСДБ-ядра и джеты лацертид класса LSP | Да | 0.0003 | 72 и 55 |
| РСДБ-ядра и джеты лацертид класса ISP | Да | 0.0003 | 33 и 27 |
| РСДБ-ядра и джеты объединения лацертид классов ISP и HSP | Да | <0.0001 | 54 и 43 |
| РСДБ-ядра квазаров и лацертид | Да | <0.0001 | 251 и 126 |
| джеты квазаров и лацертид | Нет | 0.9995 | 211 и 98 |

онного теста очень близко к значению, даваемому тестом Андерсона-Дарлинга для изначальных подвыборок. Результаты сравнения медиан стандартного отклонения $EVPA$ для РСДБ-ядер и джетов с помощью рандомизационного теста приведены в Таблице 2.5. Для подвыборки MOJAVE 1.5JyQC результаты получаются качественно такими же.

Основной причиной повышенной переменности направления поляризации в области РСДБ-ядра, скорее всего, является то, что в этой области компоненты с разным $EVPA$ не разрешаются. Это также приводит к более низкой наблюдаемой степени поляризации, чем в джете (например, [119; 160]). Поскольку неразрешенные компоненты движутся и их непрозрачность меняется со временем, то интегральная степень и направление поляризации в ядерной области также будут эволюционировать с течением времени. В редких случаях излучение в субкомпоненте может стать оптически толстым, что приведет к повороту направления поляризации на $\approx 90^\circ$. Однако в работе [161] было показано, что такая ситуация является маловероятной при условиях, которые типично встречаются в АЯГ.

Вклад в менее стабильное направление поляризации в ядерной области может давать искривление струи: движение по нему компонент даже с одинаковым $EVPA$ будет способствовать вариациям направления поляризации из-за недостаточности углового разрешения. Для проверки этого предположения были отобраны АЯГ, у которых визуально наблюдается искривление парсекового джета на стековой карте полной интенсивности. У 27 из 48 источников

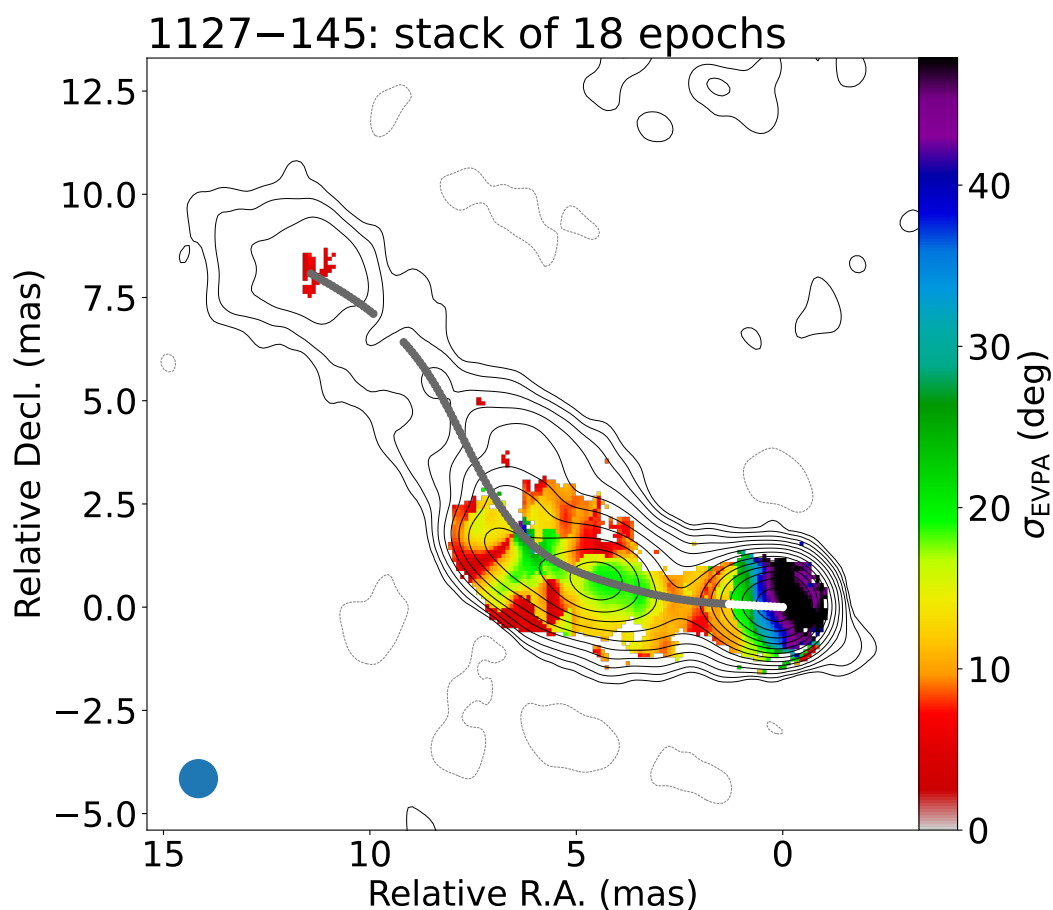


Рисунок 2.21 — Карта переменности EVPA для квазара 1127–145. Белая и серая линии обозначают участки хребтовой линии в областях РСДБ-ядра и джета, соответственно. Обозначения на карте такие же, как на Рисунке 2.11.

действительно видно возрастание переменности EVPA в области изгиба, что подтверждает гипотезу. На Рисунке 2.21 приведено распределение переменности направления поляризации для квазара 1127–145, у которого наблюдается такое поведение. У ЗС 273 и ЗС 279 было обнаружено, что величина изменений со временем фарадеевской меры вращения в РСДБ-ядре может составлять более 1000 рад/м^2 [162], в то время как в выбросе она составляет несколько сотен рад/м^2 [162; 163]. Такой эффект тоже может давать вклад в наблюдаемую разницу между переменностью направления поляризации в РСДБ-ядре и джете. Монотонный поворот EVPA на $\sim 180^\circ$ воспроизводится, например, в модели, рассматривающей струю и яркую компоненту, у которой поляризация излучения меняется намного быстрее, чем у струи [157].

В работе [34] было обнаружено, что направление линейной поляризации в РСДБ-ядрах лацертид более стабильное, чем в квазарах. Их выборка состояла из 387 АЯГ и переменность поляризации оценивалась по пяти эпохам наблю-

дений, покрывающих период в 2.3 года. В нашем исследовании количество источников больше и типичный временной интервал наблюдения существенно шире, чем в [34], самих эпох также заметно больше (Раздел 2.2). Тест Андерсона-Дарлинга, примененный к нашим данным, также показывает значимую разницу между σ_{EVPA} в ядерных областях квазаров и лацертид. Это различие видно на Рисунке 2.22 (сверху). Рандомизационный тест показывает, что данная разница значима с $p\text{-value} < 0.0001$. Этот результат согласуется с тем, что в ядерных областях квазаров статистически наблюдается меньшая степень поляризации, чем в лацертидах [A2]. В квазарах, в среднем, наблюдается более высокая мера фарадеевского вращения по сравнению с лацертидами [147]. Возможно, такая разница приводит к большим изменениям со временем меры вращения в РСДБ-ядрах квазаров. Более переменное направление поляризации в РСДБ-ядрах квазаров, чем в лацертидах может быть следствием такого различия. Также было исследовано различие σ_{EVPA} в РСДБ-ядрах у квазаров и лацертид, находящихся на сравнимых красных смещениях. Поскольку объекты данных оптических классов имеют разное распределение по z (Раздел 2.2 и Рисунок 2.4), то выбирались источники в таком диапазоне, чтобы медианы распределений квазаров и лацертид были близки. Это оказался диапазон по z от 0.15 до 0.5. В него попадают 29 квазаров и 25 лацертид. Значимой разницы между σ_{EVPA} в данных источниках нет (Рисунок 2.22, снизу).

Разница между σ_{EVPA} в РСДБ-ядрах квазаров и лацертид из подвыборки MOJAVE 1.5JyQC оказалась незначимой: $p\text{-value}$ рандомизационного теста равняется 0.12. К такому результату приводит отсутствие лацертид с более стабильным направлением поляризации в ядерной области.

2.5 Эволюция переменности и усредненных по эпохам величин поляризационных характеристик вдоль джета

Для изучения изменений стабильной и переменной компонент магнитного поля вдоль струи был проведен статистический анализ свойств стековой и медианной степени поляризации, m_{stack} и m_{med} , относительной переменности степени поляризации σ_m/m_{med} и переменности направления поляризации σ_{EVPA}

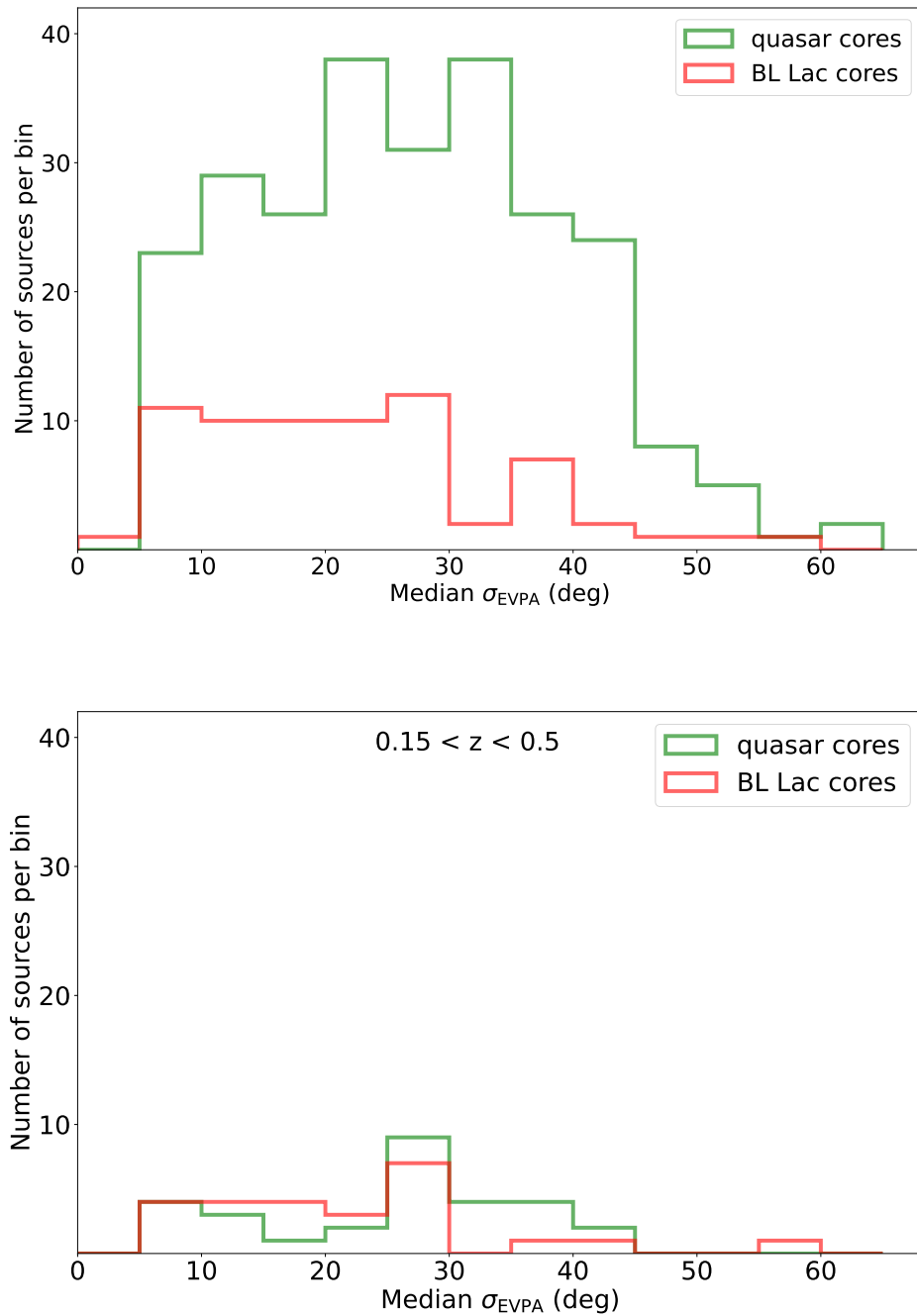


Рисунок 2.22 — Гистограммы распределения медианы переменности направления поляризации σ_{EVPA} в градусах для РСДБ-ядер квазаров и лацертид (сверху) и источников этих оптических классов, находящихся на сравнимых красных смещениях в диапазоне от 0.15 до 0.5 (снизу). Зеленое распределение соответствует квазарам, красное — лацертидам.

вдоль хребтовой линии джета за пределами ядерной области. В каждом источнике были выделены области РСДБ-ядра и струи, используя метод, описанный в Разделе 2.4.

Из-за значимой корреляции между абсолютной переменностью степени поляризации σ_m и медианной степенью поляризации (Рисунок 2.23) σ_m здесь не рассматривалась. Причиной зависимости между этими величинами может быть шум в областях с малым отношением сигнал-шум. В околоядерной области этот эффект можно объяснить в рамках модели, в которой глобальное магнитное поле описывается множеством ячеек со случайным направлением поля [40]: более высокую наблюдаемую степень поляризации можно представить, как меньшее количество независимых ячеек, которые помещаются в диаграмму направленности или располагаются вдоль луча зрения. Тогда малые значения σ_m/m_{med} соответствуют случаю, когда влияние стохастических полей мало. Также априори не ожидается, что σ_m/m_{med} зависит от расстояния от РСДБ-ядра, как σ_m . Для анализа был использован корреляционный тест Кендалла. Было принято считать зависимость значимой, если $p\text{-value} < 0.05$. Из-за свертки карт с диаграммой направленности соседние пиксели являются зависимыми. Они могут дать ложную значимую зависимость, поэтому выбирались независимые пиксели вдоль хребтовой линии, удаленные друг от друга на расстояние равное половине диаграммы направленности. В случае m_{stack} рассматривались только независимые пиксели, в которых $P_{\text{stack}} > 4P_{\text{stack,uncertain}}$.

Поскольку тест Кендалла относится к ранговым и не учитывает ошибки величин, то, чтобы исключить случаи, когда корреляция формально получается значимой, но ошибки настолько большие, что эта зависимость может оказаться ложной (пример представлен на Рисунке 2.24), джеты, у которых значения величины во всех независимых пикселях вдоль хребтовой линии неразличимы в пределах 1σ , не рассматривались при исследовании m_{med} , σ_m/m_{med} и σ_{EVPA} . В анализе участвовали только те источники, у которых после всех описанных выше требований осталось не менее пяти независимых пикселей с детектируемой поляризацией вдоль хребтовой линии за пределами РСДБ-ядра.

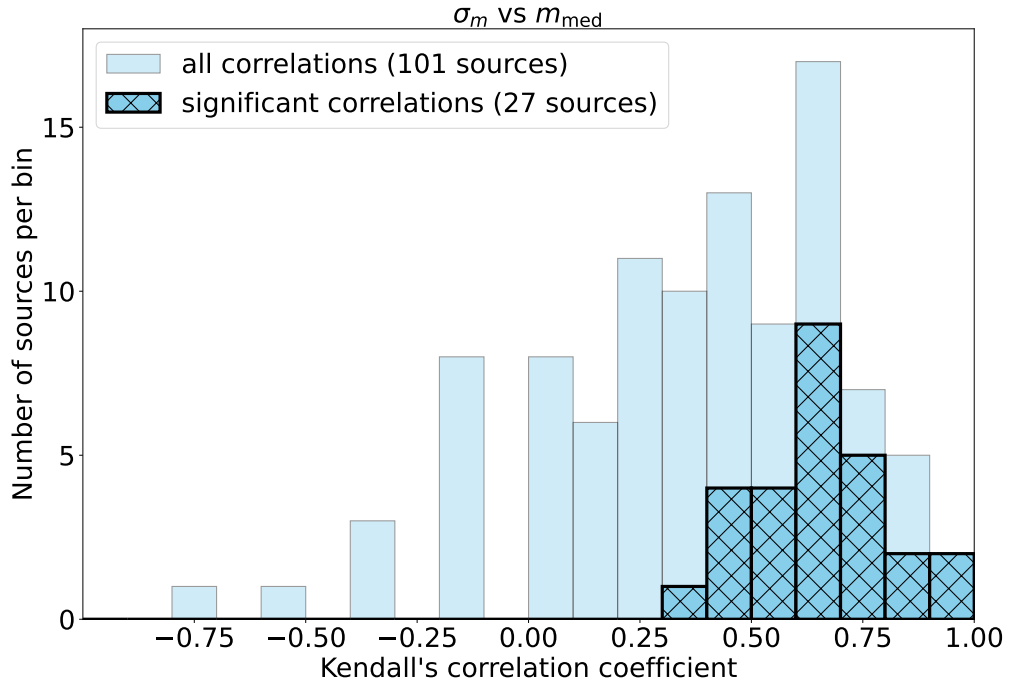


Рисунок 2.23 — Гистограмма распределения коэффициентов корреляции Кендалла между абсолютной переменностью степени поляризации σ_m и медианной степенью поляризации m_{med} . Закрашенные бины показывают коэффициенты корреляции для всех отобранных 101 источника, заштрихованные — только для 27 объектов, для которых корреляция оказалась значимой.

Неопубликованный иллюстративный материал, рисунок выполнен диссертантом.

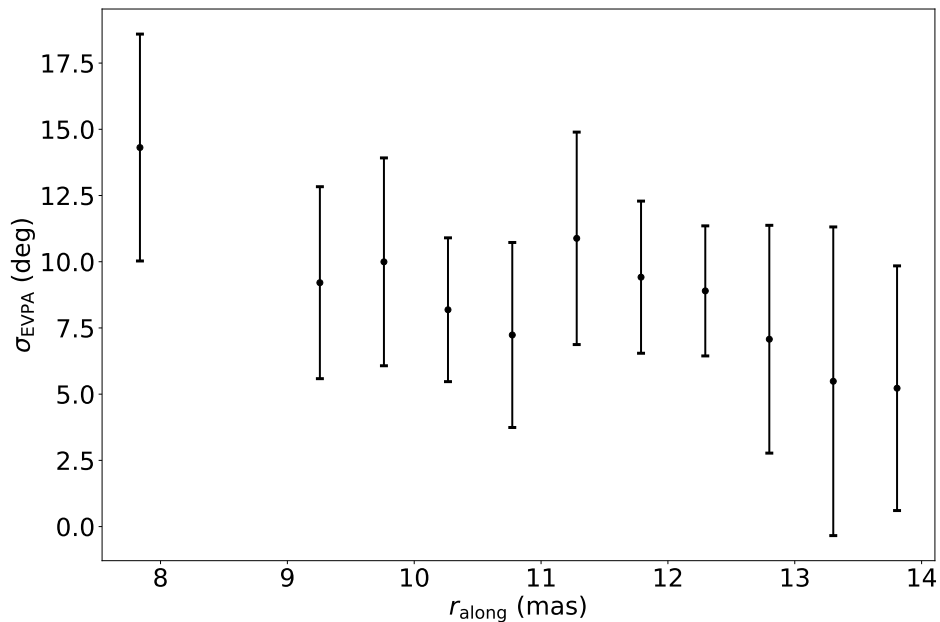


Рисунок 2.24 — Распределение переменности направления поляризации σ_{EVPA} в градусах вдоль джета для радиогалактики 1514+004. По оси абсцисс показано расстояние от РСДБ-ядра вдоль хребтовой линии r_{along} в мсек дуги. Коэффициент корреляции Кендалла между σ_{EVPA} и r_{along} равен -0.6 , p -value = 0.006. Неопубликованный иллюстративный материал, рисунок выполнен диссертантом.

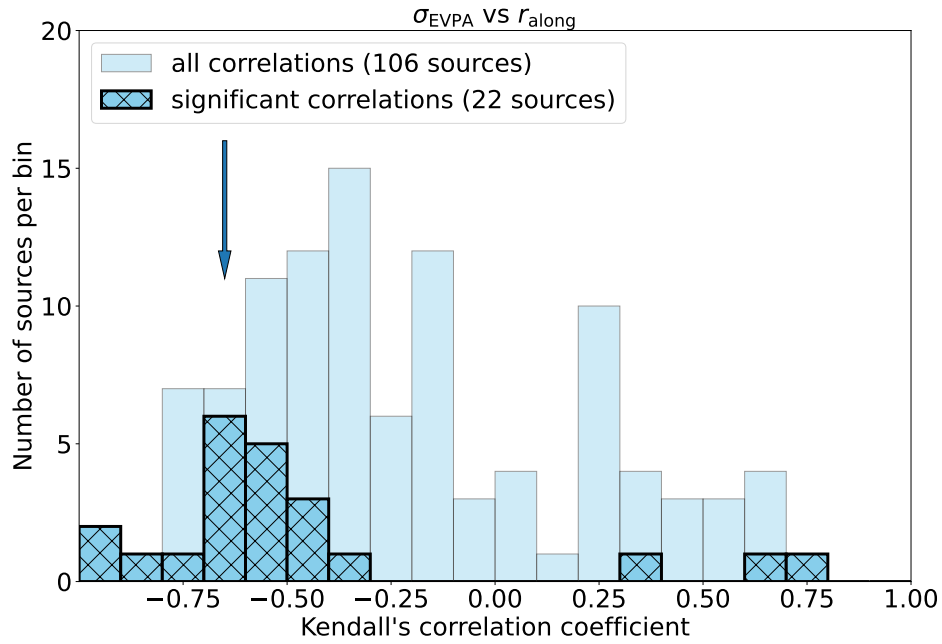
диссертантом.

2.5.1 Переменность направления поляризации

У 106 АЯГ профили переменности направления поляризации вдоль хребтовой линии удовлетворяли требованиям, применяемым при анализе корреляций, описанным выше в данном Разделе. На Рисунке 2.25 показана гистограмма распределения коэффициентов корреляции между σ_{EVPA} и расстоянием от РСДБ-ядра вдоль хребтовой линии r_{along} . Для 22 из 106 источников тренд оказался значимым, причем преимущественно спадающим. Снизу на Рисунке 2.25 представлена карта σ_{EVPA} для квазара 1222+216, как АЯГ, показывающего типичную значимую зависимость переменности направления поляризации от расстояния от РСДБ-ядра. На гистограмме видно, что большинство рассматриваемых объектов имеют незначимую корреляцию. Однако, большинство значимых коэффициентов корреляции являются отрицательными. Это указывает на то, что направление поляризации, а следовательно и магнитного поля выброса, становится более стабильным по мере удаления от РСДБ-ядра. Таким образом, доля упорядоченного магнитного поля возрастает вниз по струе. При рассмотрении источников отдельных оптических и спектральных классов, подвыборки MOJAVE 1.5JyQC распределение коэффициентов корреляции качественно не меняется.

Примерно 75% (16 из 22) значимых отрицательных корреляций σ_{EVPA} с r_{along} видны в активных ядрах с интервалом между крайними эпохами не менее 12 лет и с более чем 15 эпохами. Это также указывает на то, что наблюдаемое увеличение стабильности направления магнитного поля с расстоянием от РСДБ-ядра не является случайным, поскольку детектируется преимущественно в объектах, наблюдения которых проводились длительное время. Еще одним аргументом в пользу существования зависимости σ_{EVPA} по мере удаления от РСДБ-ядра является наличие связи между переменностью направления и медианной степенью поляризации (Рисунок 2.26): σ_{EVPA} убывает с увеличением m_{med} . Упорядоченность магнитного поля увеличивается вниз по струе (Раздел 2.5.2) и его направление становится более стабильным.

У трех АЯГ было обнаружено значимое увеличение переменности направления поляризации вниз по струе. Карты переменности EVPA для этих источников приведены на Рисунках 2.27 и 2.28. В лацертиде 0106+678 значимое возрастание переменности направления поляризации с увеличением r_{along} про-



1222+216: stack of 48 epochs

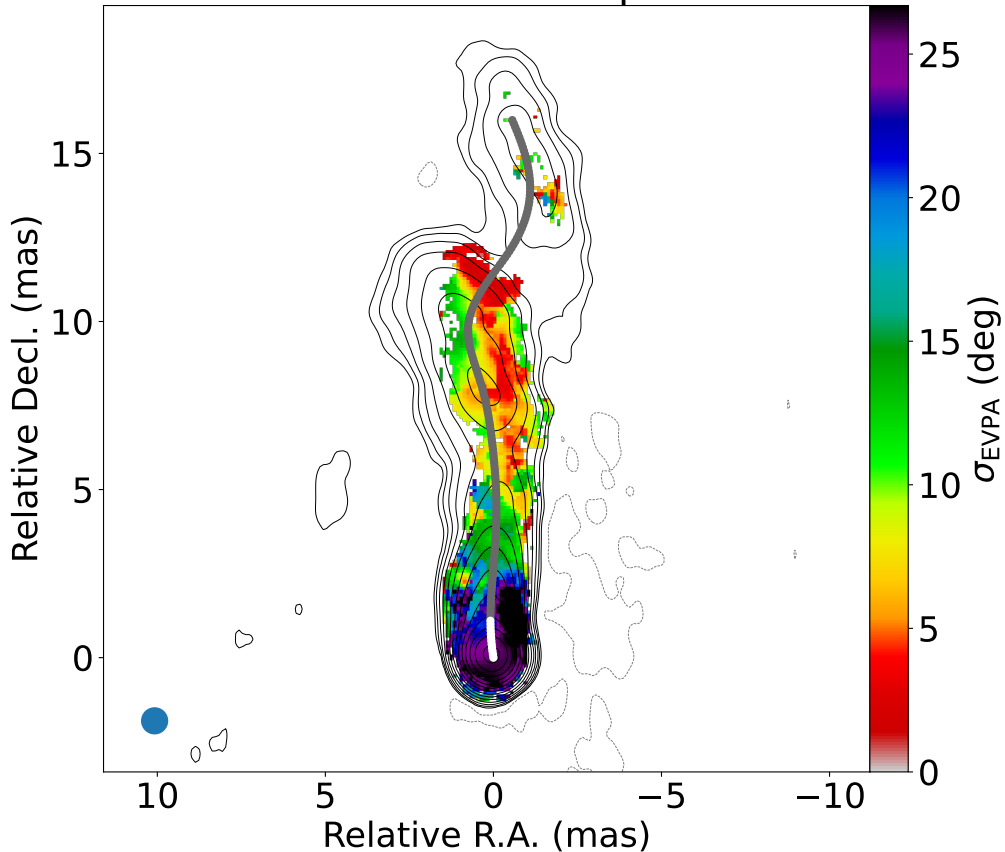


Рисунок 2.25 — Сверху: гистограмма распределения коэффициентов корреляции Кендалла между переменностью EVPA σ_{EVPA} и расстоянием от РСДБ-ядра вдоль хребтовой линии r_{along} . Закрашенные бины показывают коэффициенты корреляции для всех отобранных 106 источников, заштрихованные — только для 22 источников, для которых корреляция оказалась значимой. Стрелка над гистограммой показывает бин, в котором находится коэффициент корреляции для квазара 1222+216. Снизу: карта σ_{EVPA} для источника 1222+216 (48 эпох), как примера объекта со значимой отрицательной корреляцией между σ_{EVPA} и r_{along} . Белая и серая линии обозначают участки хребтовой линии в областях РСДБ-ядра и джета, соответственно. Обозначения на карте такие же, как на Рисунке 2.11.

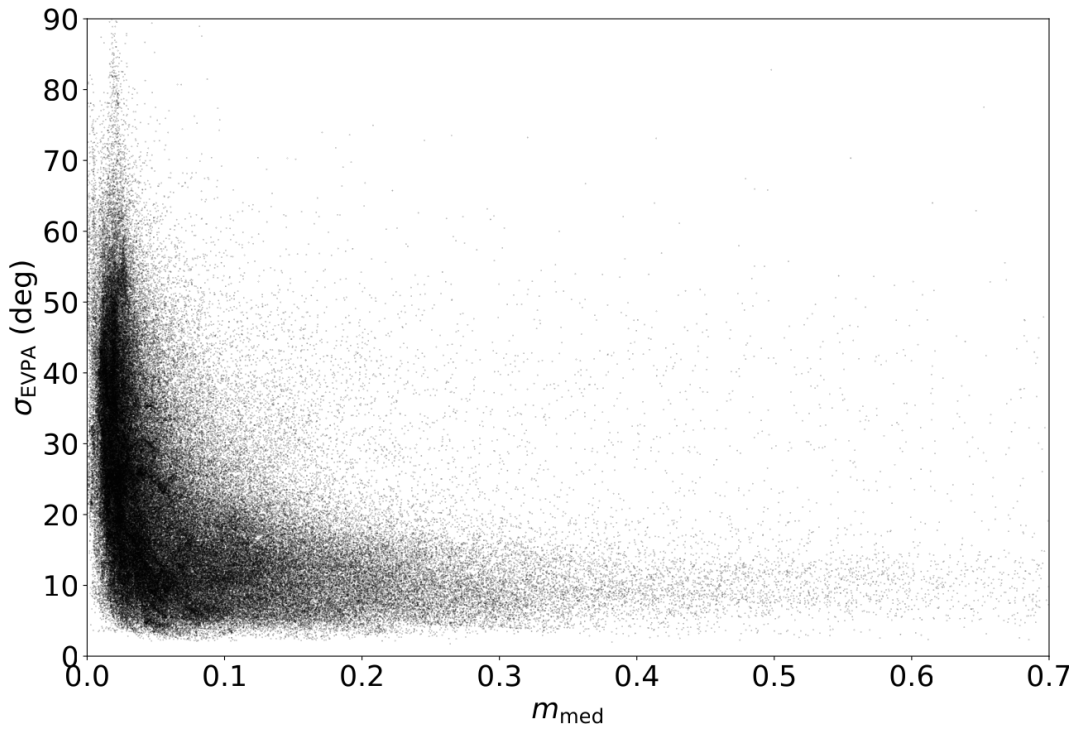


Рисунок 2.26 — Зависимость переменности направления поляризации σ_{EVPA} в градусах от медианной степени поляризации m_{med} для всех АЯГ исследуемой выборки. Показаны только значения, которые являются значимыми на уровне 3σ . Неопубликованный иллюстративный материал, рисунок выполнен диссертантом.

исходит за счет двух пикселей на расстоянии ≈ 3.5 мсек дуги от РСДБ-ядра, где EVPA становится менее стабильным, чем в областях выше по струе. На одноэпыховых картах [42] видно, что чем уже область с детектируемой поляризацией на $r_{along} \approx 3.5$ мсек дуги, тем лучше сонаправлено EVPA с локальным направлением выброса. Это может указывать на то, что на разных эпохах поляризованное излучение может приходить в основном из центральной части джета или также из оболочки вокруг него. В последнем случае к излучению канала струи с направлением поляризации, сонаправленным с джетом, добавляется излучение оболочки, которое имеет другое EVPA, что в итоге приводит к отклонению EVPA от направления струи. Изменение угла к лучу зрения тоже может приводить к возрастанию σ_{EVPA} . В лацертиде 0118–272 значимая положительная корреляция σ_{EVPA} с r_{along} возникает из-за неоднородности в области на масштабах диаграммы направленности и неопределенности в построении хребтовой линии около края джета. В квазаре 2230+114 EVPA становится значимо более переменным с расстоянием от РСДБ-ядра из-за возрастания σ_{EVPA} в квазистационарной компоненте на $r_{along} \approx 8$ мсек дуги (Рисунок 3 для квазара 2230+114 в [144]).

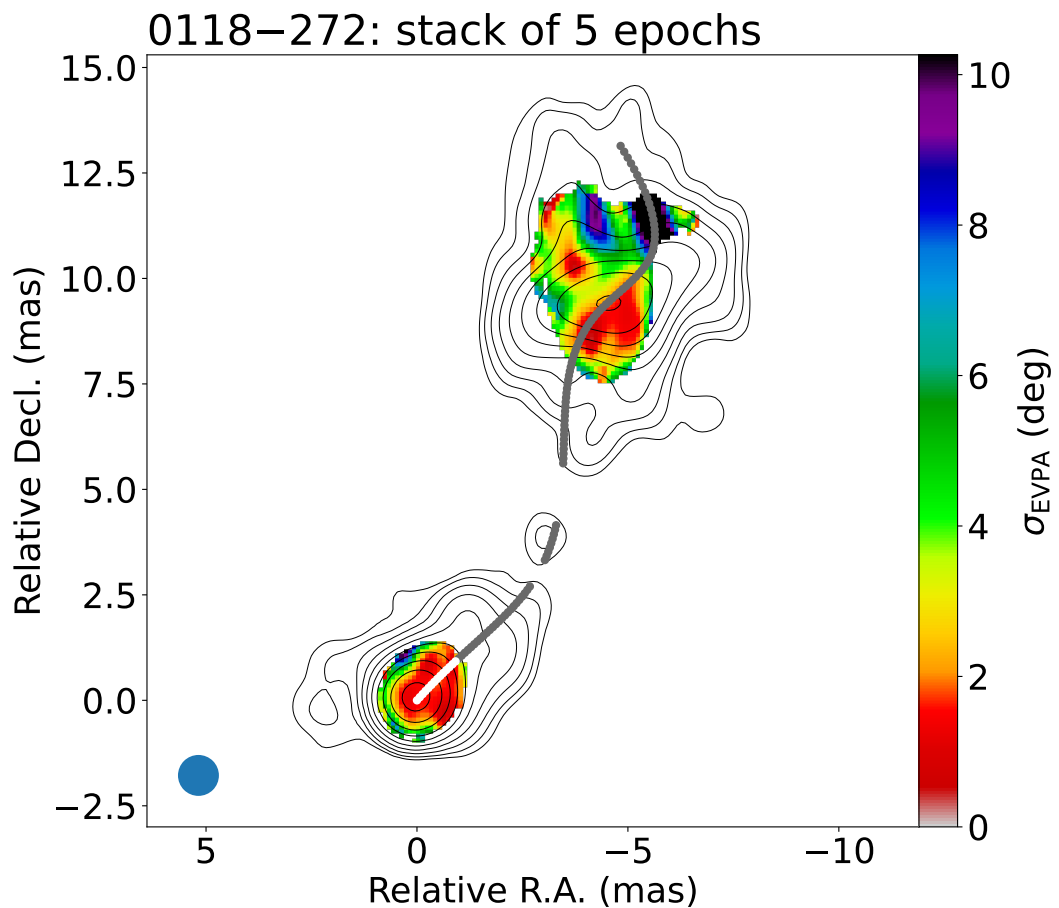
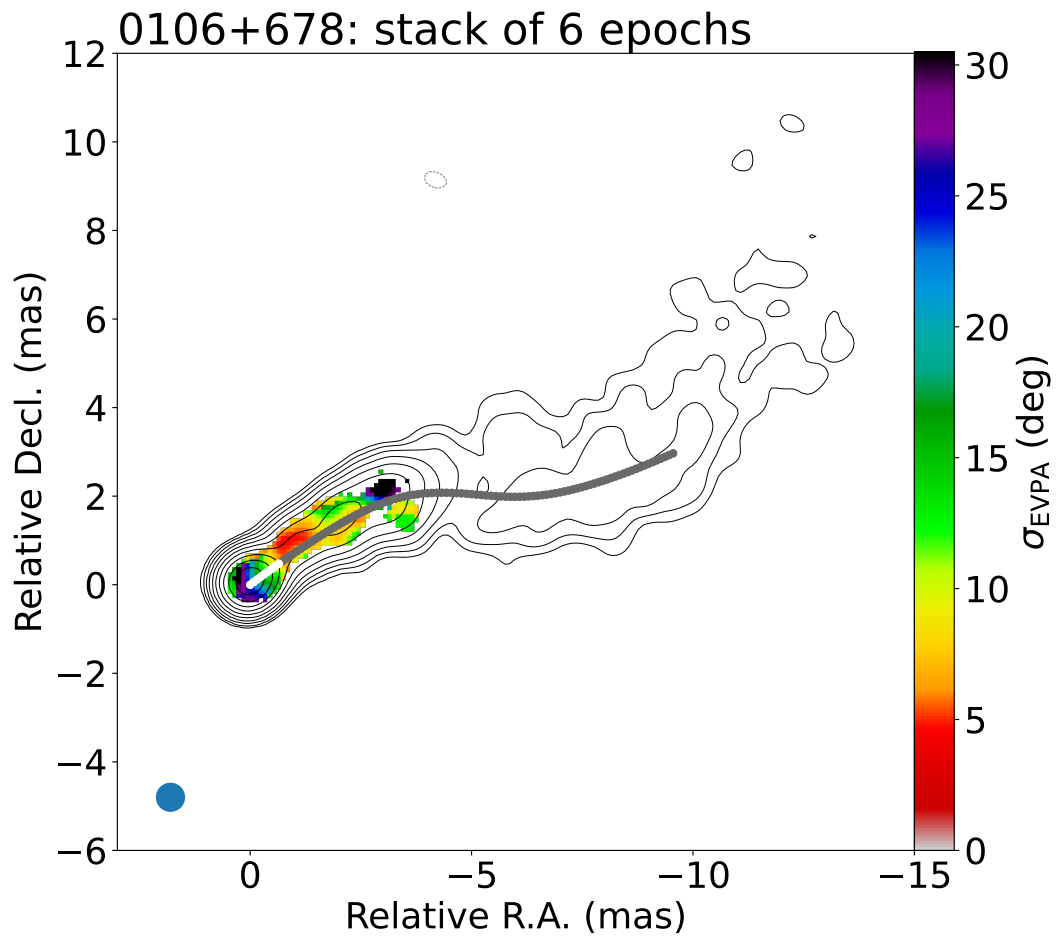


Рисунок 2.27 — Карты переменности EVPA для лацертид 0106+678 (6 эпох, сверху) и 0118-272 (5 эпох, снизу). Белая и серая линии обозначают участки хребтовой линии в областях РСДБ-ядра и джета, соответственно. Обозначения на картах такие же, как на Рисунке 2.11.

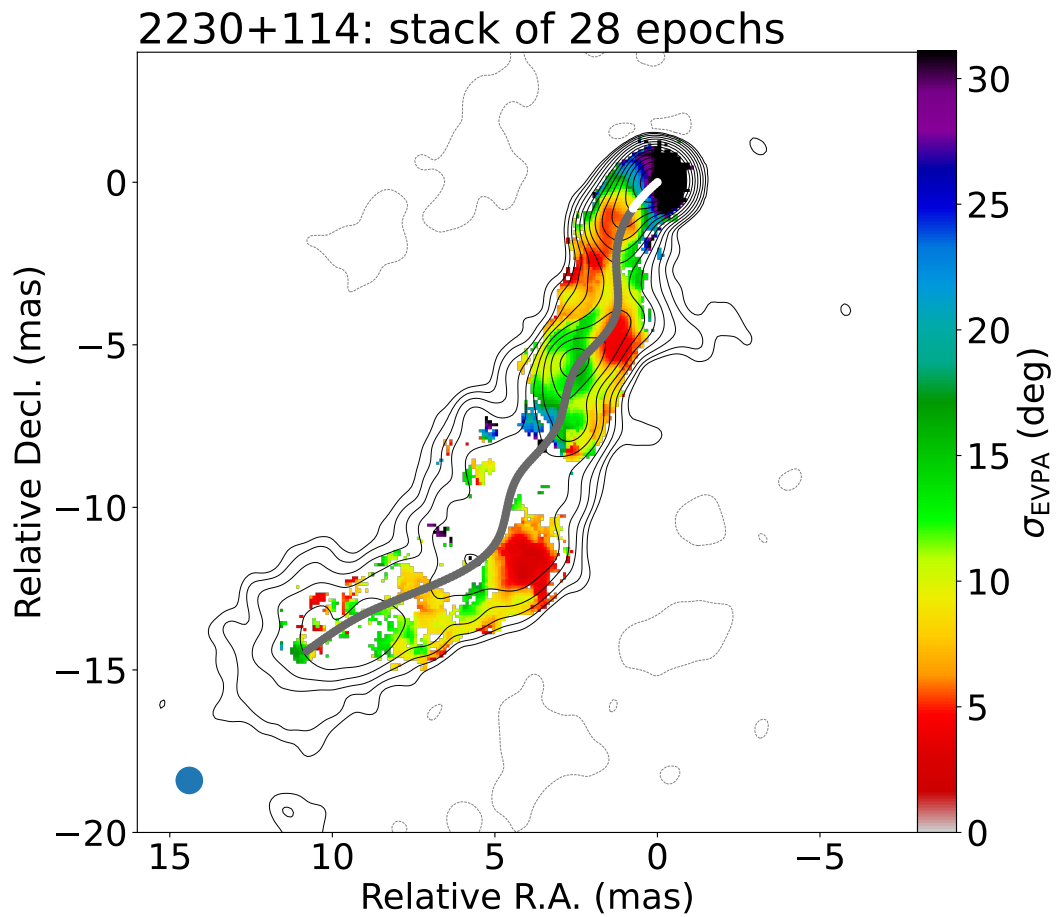


Рисунок 2.28 — Карты переменности EVPA для квазара 2230+114 (28 эпох). Белая и серая линии обозначают участки хребтовой линии в областях РСДБ-ядра и джета, соответственно. Обозначения такие же, как на Рисунке 2.11.

Построенные карты стандартного отклонения направления поляризации, свернутые с диаграммой направленности, отражают распределение направления магнитного поля на масштабах, соответствующих размеру диаграммы направленности. Таким образом, возрастание σ_{EVPA} с r_{along} является свидетельством увеличения стабильности направления магнитного поля вниз по струе. Переменность во времени меры фарадеевского вращения RM приводит к вариациям EVPA, $\sigma_{EVPA} \sim \sigma_{RM} \lambda^2$, где σ_{RM} — стандартное отклонение меры вращения, λ — длина волны. Для уменьшения σ_{EVPA} с 28° до 8° , которое является типичным для исследуемых АЯГ, мера вращения должна спадать с 1225 рад м^{-2} до 350 рад м^{-2} . Однако наблюдаемые изменения RM со временем составляют несколько сотен рад м^{-2} (например, [147; 162; 164]), это соответствует переменности EVPA около 10° на частоте 15 ГГц.

2.5.2 Стековая и медианная степень поляризации и ее переменность

Увеличение степени поляризации компонент джета с их удалением от РСДБ-ядра впервые было обнаружено в работе [117], в которой проводился анализ РСДБ-данных на частоте 5 ГГц. Этот тренд также проявляется на частоте 22 ГГц и 43 ГГц [76; 165] для 18 и 32 АЯГ, соответственно. Анализ полной по потоку выборки программы MOJAVE, включающей 133 источника, показал, что на частоте 15 ГГц возрастание степени поляризации вниз по струе тоже наблюдается [119]. В данном исследовании эволюция степени поляризации вниз по выбросу была изучена на бóльшем количестве источников с использованием более чувствительных за счет усреднения по эпохам (Раздел 2.3) данных.

Распределение коэффициентов корреляции Кендалла для m_{stack} с расстоянием от РСДБ-ядра вдоль хребтовой линии r_{along} изображено на Рисунке 2.29. Полное количество АЯГ, для которых вычислялась корреляция, составляет 215 объектов, для 85 источников был обнаружен значимый положительный тренд. Лишь у двух АЯГ (0509+406 и 0603+476) стековая степень поляризации значительно уменьшается вниз по струе. Их карты m_{stack} показаны на Рисунке 2.30.

На Рисунке 2.31 показаны коэффициенты корреляции между m_{med} и r_{along} . Зависимость исследовалась для 123 АЯГ с профилями, удовлетворяющими требованиям, применяемым при анализе корреляций, описанным выше в данном Разделе. Для 38 источников корреляция оказалась значимой. Почти все корреляции с $p\text{-value} > 0.05$ положительные, то есть m_{med} возрастает вниз по струе. Значимая антикорреляция между m_{med} и r_{along} наблюдается только у квазара 2128–123 (Рисунок 2.32): медианная степень поляризации уменьшается, а переменность EVPA возрастает в области 6 мсек дуги от РСДБ-ядра.

Хотя большинство трендов m_{stack} и m_{med} с r_{along} незначимые, почти все корреляции с $p\text{-value} < 0.05$ положительные. Следовательно, возрастание степени поляризации типично для джетов АЯГ. В противном случае, количество значимых положительных и отрицательных корреляций было бы сравнимым.

Увеличение степени поляризации вниз по джету может быть обусловлено довольно большим числом разных физических эффектов, среди которых можно выделить уменьшение деполяризации внутри диаграммы направленности и

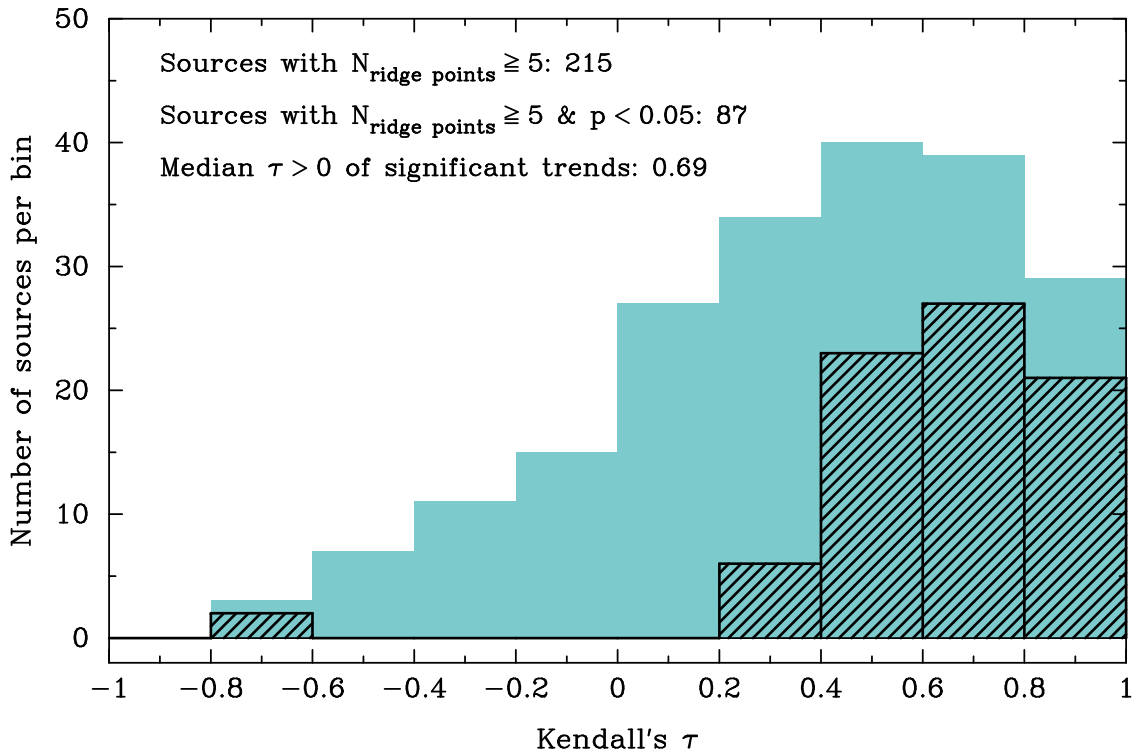


Рисунок 2.29 — Гистограмма распределения коэффициентов корреляции Кендалла между стековой степенью поляризации и расстоянием от РСДБ-ядра вдоль хребтовой линии. Закрашенные бины показывают коэффициенты корреляции для всех 215 источников, у которых имеется по крайней мере пять независимых пикселей с детектируемой поляризацией на хребтовой линии за пределами РСДБ-ядра. Подвыборка из 87 АЯГ, для которых корреляция оказалась значимой, обозначена заштрихованными бинами. Медиана коэффициентов корреляции с p -value < 0.05 равняется 0.69.

фарадеевского вращения [126; 147], ослабление ударных волн и, следовательно, турбулентности излучающей плазмы [40]. Таким образом, возрастание степени поляризации указывает на рост упорядоченности магнитного поля с удалением от РСДБ-ядра. Также на увеличение степени поляризации может влиять эффект старения спектрального индекса [166], согласно которому электроны с высокой энергией теряют ее быстрее благодаря синхротронному излучению. Это приводит к укрупнению спектров энергии и плотности потока в более далеких частях выброса. РСДБ-наблюдения показывают, что старение способствует изменению спектрального индекса на $\cong -0.6$ в парсековых джетах АЯГ [121; 122]. Результатом этого является возрастание степени поляризации на ~ 0.1 , поскольку в случае оптически тонкого синхротронного излучения из области с упорядоченным магнитным полем и релятивистских электронов со случайными питч-углами максимальная степень поляризации ограничена величиной $(p + 1)/(p + 7/3)$ [87], где $p = 1 - 2\alpha$ — показатель степени в спектре энергии

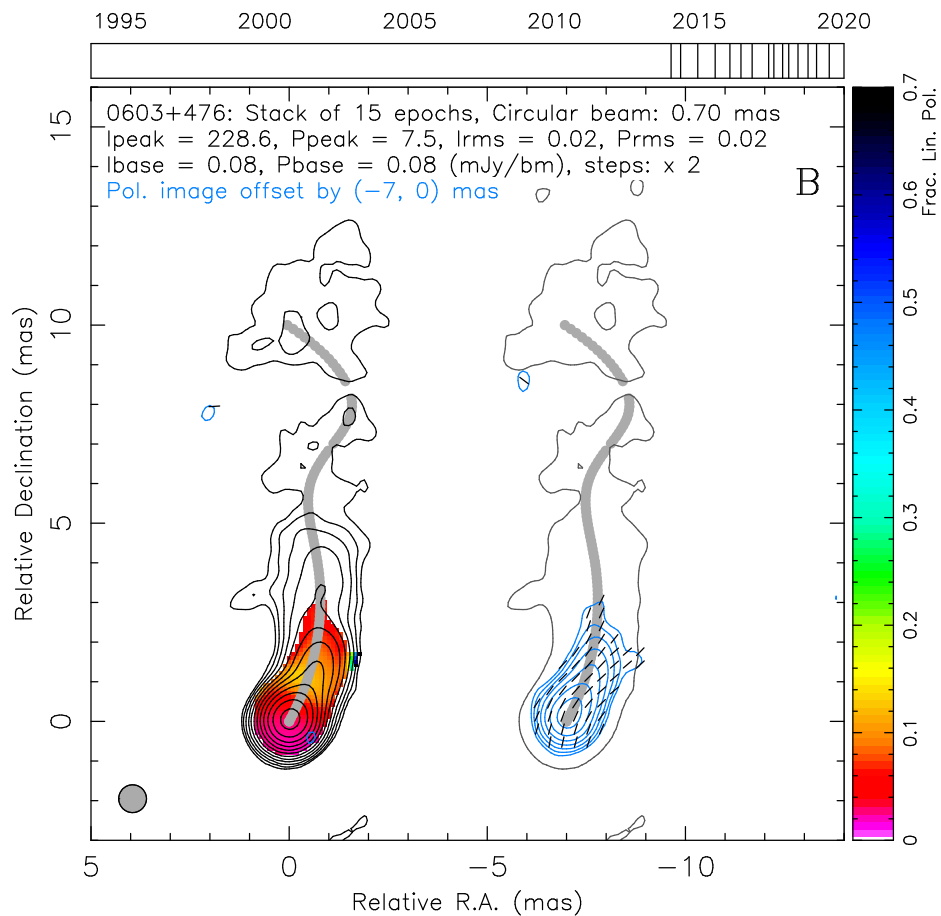
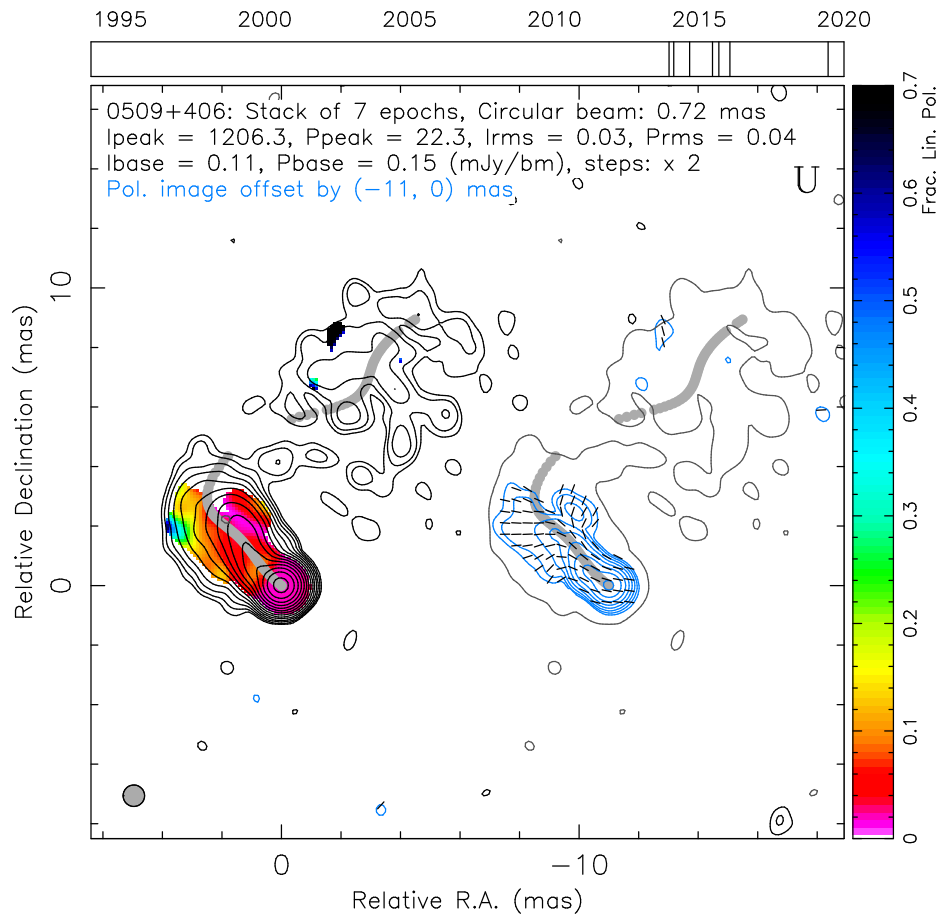


Рисунок 2.30 — Стековые карты линейной поляризации для источника с неопределенным оптическим классом 0509+406 (сверху) и лацертиды 0603+476 (снизу). Обозначения на картах такие же, как на Рисунке 2.7.

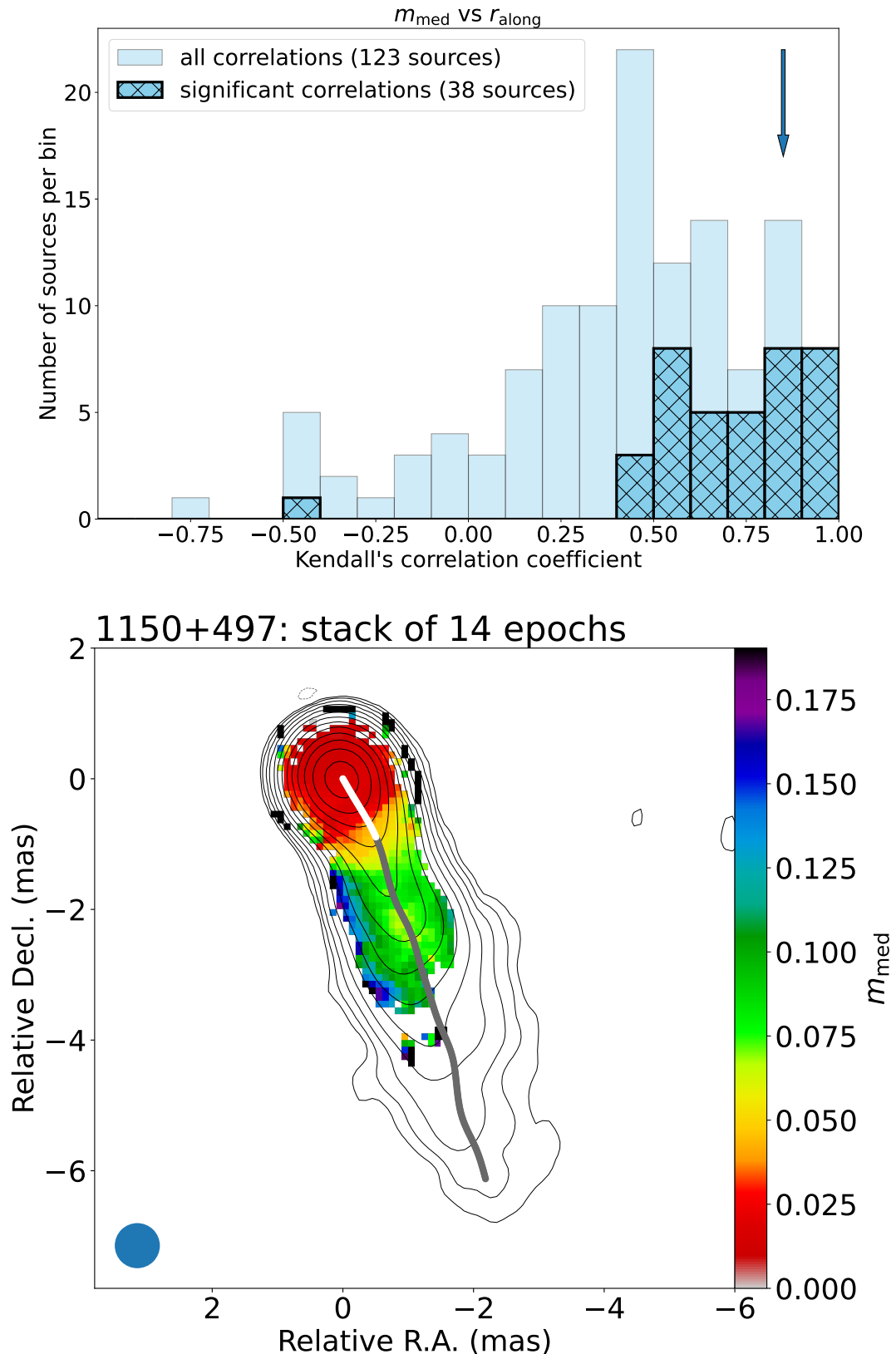


Рисунок 2.31 — Сверху: гистограмма распределения коэффициентов корреляции Кендалла для зависимости медианной степени поляризации m_{med} от r_{along} . Закрашенные бины соответствуют коэффициентам для всех 123 АЯГ, для которых оценивалась корреляция, заштрихованные — только для 38 источников со значимой корреляцией. Стрелкой обозначен бин, в котором лежит коэффициент для квазара 1150+497. Снизу: карта m_{med} для источника 1150+497 (14 эпох наблюдений), как примера объекта со значимой положительной корреляцией между m_{med} и r_{along} . Белая и серая линии обозначают участки хребтовой линии в областях РСДБ-ядра и джета, соответственно. Обозначения на карте такие же, как на Рисунке 2.11.

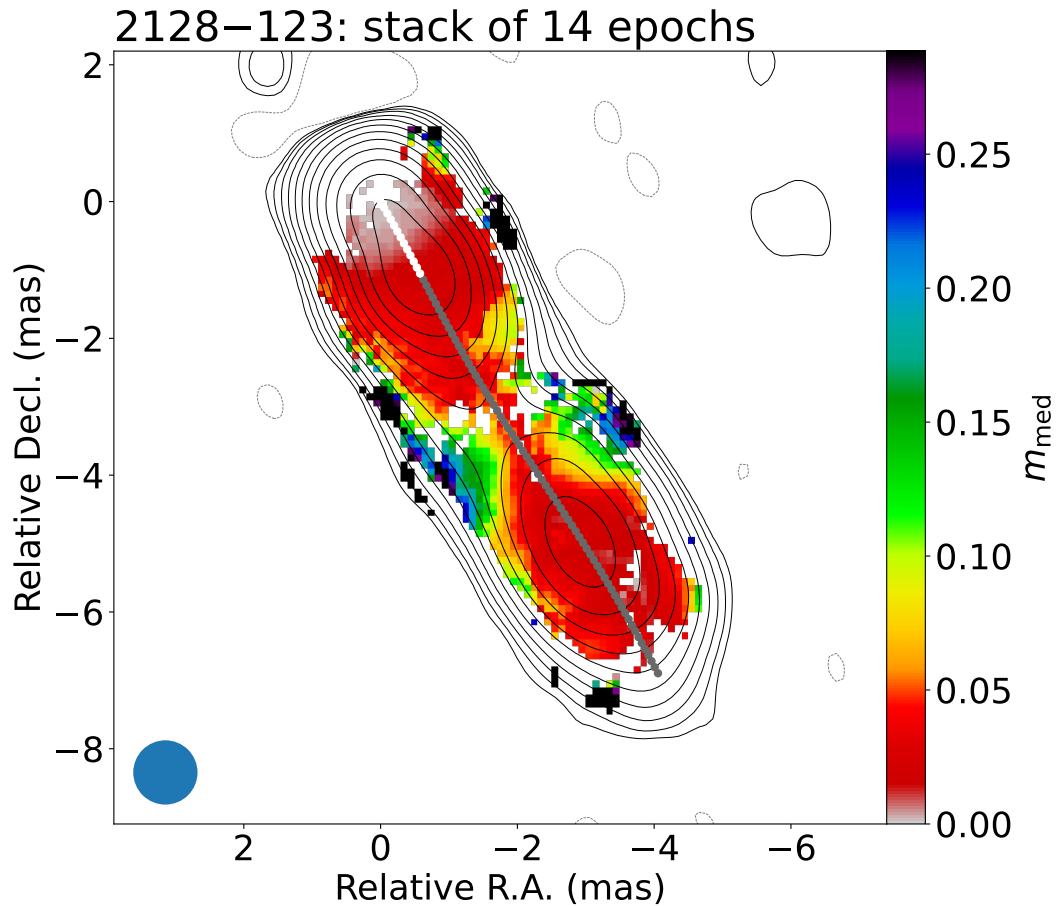


Рисунок 2.32 — Карта медианной степени поляризации для квазара 2128–123. Белая и серая линии обозначают участки хребтовой линии в областях РСДБ-ядра и джета, соответственно. Обозначения такие же, как на Рисунке 2.11.

излучающих частиц $N(E) \propto E^{-p}$, α — спектральный индекс, который определяется как $S_\nu \propto \nu^\alpha$, S_ν — плотность потока, измеряемая на частоте ν .

Возрастание степени поляризации вниз по струе может быть связано с уменьшением угла закрутки спирального магнитного поля с увеличением расстояния от РСДБ-ядра [167]. Как показано в работе [168], степень поляризации вдоль оси струи возрастает, если угол закрутки уменьшается, начиная с 55° . Этот результат был получен при моделировании профиля степени поляризации поперек джета для широкого диапазона геометрических и кинематических параметров, например, при угле к лучу зрения 2° – 10° в системе отсчета наблюдателя и доплер-факторе 4–15. Описанный механизм может вносить значительный вклад в возрастание степени поляризации в областях, находящихся далеко от РСДБ-ядра. Рост этой величины вниз по струе и сонаправленность EVPA с локальным направлением джета, которая типично наблюдается у лацертид [A2; 61; 118; 119], указывают на существование скорее крупномасштабного спирального магнитного поля, чем большого числа ударных волн (например, [169]).

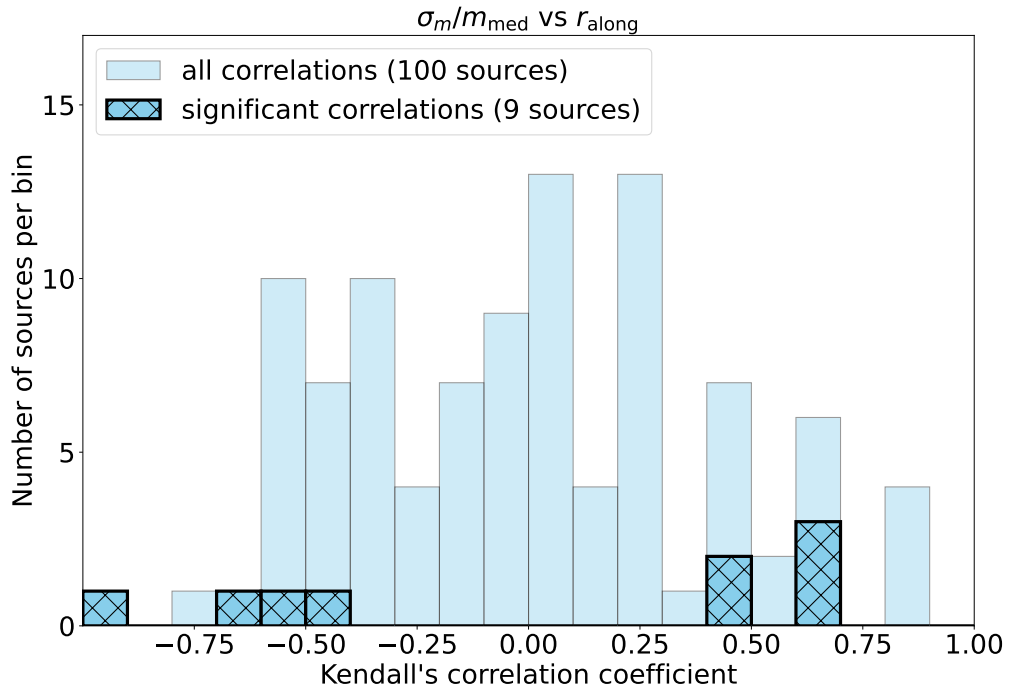


Рисунок 2.33 — Гистограмма распределения коэффициентов корреляции Кенделла для зависимости относительной переменности степени поляризации $\sigma_m/m_{\text{median}}$ от расстояния от РСДБ-ядра вдоль хребтовой линии r_{along} . Закрашенные бины показывают коэффициенты корреляции для всех отображенных 100 источников, заштрихованные — только для девяти источников, корреляция в которых значима.

В случае относительной переменности степени поляризации σ_m/m_{med} (Рисунок 2.33) только у девяти из 100 АЯГ джеты имеют значимую зависимость от r_{along} : у пяти источников (0106+678, 0316+413, 0430+052, 0738+313, 1803+784) переменность возрастает с расстоянием от РСДБ-ядра, у четырех (0415+379, 0923+392, 1253–055, 1926+611) — спадает. Сравнимое количество положительных и отрицательных корреляций указывает на то, что типично в АЯГ σ_m/m_{med} значимо не меняется вдоль струи.

При рассмотрении отдельно квазаров, лацертид, радиогалактик, источников классов LSP, ISP и HSP, а также подвыборки MOJAVE 1.5JyQC результаты анализа зависимости m_{stack} , m_{med} и $\sigma_m/m_{\text{median}}$ от r_{along} остаются качественно такими же.

2.6 Распределение стекового направления поляризации по струе, эволюция переменности и усредненной по эпохам поляризации поперек выброса

Самые ранние РСДБ-наблюдения показывают, что направление поляризации в радиодиапазоне в выбросе на масштабах парсек типично перпендикулярно или параллельно струе, причем сонаправленность в основном наблюдается у объектов типа BL Lac, а перпендикулярность — у квазаров. В работе [114] у лацертиды OJ 287, а в [115] у лацертид 0454+844, 1823+568 и BL Lacertae (2200+420) наблюдалось направление поляризации параллельное выбросу на 5 ГГц. У 19 из 22 квазаров, рассматриваемых в [75], EVPA оказался перпендикулярен РСДБ-структуре. В квазаре 3C 454.3 (2251+158) ортогональность направления поляризации и джета была обнаружена на нескольких частотах в диапазоне 5–15 ГГц на двух эпохах [164]. Исследование большого количества АЯГ (344 квазара и 97 лацертид) на частоте 15 ГГц подтвердило сонаправленность EVPA компонент выброса и локального его направления у объектов типа BL Lac, а у квазаров предпочтительного направления поляризации обнаружено не было [90]. Стековые карты позволяют восстановить распределение направления поляризации на более высоком уровне чувствительности в более заполненном канале выброса, чем одноэпоховые карты (Раздел 2.3.1), которые использовались в исследованиях, описанных выше. Эти особенности стековых изображений совместно с выборкой в несколько сотен источников дают возможность изучать конфигурацию стабильной компоненты магнитного поля струи более глубоко, чем это было сделано ранее.

На картах $EVPA_{stack}$ видно три характерных распределения: направление поляризации совпадает с локальным направлением выброса, перпендикулярно ему или совпадает с ним в центральных частях струи и становится перпендикулярным около ее краев. Стековая степень поляризации поперек хребтовой линии либо остается примерно постоянной, либо имеет U- или W-образный профиль. У примерно 30% АЯГ в выборке m_{stack} имеет минимальное значение на оси джета и возрастает к его краям (U-образное распределение). При этом стековый EVPA направлен либо перпендикулярно струе (например, в АЯГ 0214+083, 0333+321, 0430+052 и 0836+710) или совпадает с джетом во внутрен-

них и становится перпендикулярным во внешних его частях, как в источниках 1150+812, 1641+399, 1920–211 и 2155–152. Примеры объектов с такими распределениями m_{stack} и $\text{EVPA}_{\text{stack}}$ представлены на Рисунках 2.34 и 2.35. У квазара 1150+812, как и у других источников с $\text{EVPA}_{\text{stack}}$, изменяющим направление с параллельного хребтовой линии во внутренних частях струи на перпендикулярное во внешних ее областях, профиль P_{stack} является асимметричным и имеет два пика (Рисунок 2.35 снизу). Такие сочетания стековых направления и степени поляризации типично наблюдаются в тех квазарах, у которых поляризованное излучение детектируется по всей ширине выброса на стековых картах. Изменение направления магнитного поля и возрастание m_{stack} при движении от центральных областей джета к его краям возможно в случае, если во внутренних частях струи магнитное поле неупорядоченно или направлено под наклоном к хребтовой линии из-за, например, прохождения ударной волны, а во внешних — поле становится полоидальным из-за взаимодействия с внешней средой. Также спиральное магнитное поле может способствовать таким поперечным профилям m_{stack} и $\text{EVPA}_{\text{stack}}$, так как суперпозиция линейно-поляризованного излучения из областей с разным EVPA наиболее эффективно деполаризуется около оси джета. Однако, при некоторых редких сочетаниях питч-угла поля и угла к лучу зрения, при которых в проекции на небесную плоскость на одной стороне струи поле в системе отсчета наблюдателя параллельное, а на другой — перпендикулярное, степень поляризации на хребтовой линии не будет минимальной [110]. Асимметрия поперечных профилей m_{stack} и P_{stack} также указывает на наличие спирального магнитного поля (например, [110; 164; 170–173]). Срезы P_{stack} часто имеют два неодинаковых пика. Также оказалось, что в случае, когда стековый EVPA меняется с параллельного оси струи на перпендикулярный при движении от центральных частей выброса к его краям, центральный минимум поперечного профиля стековой степени поляризации меньше, чем при усредненном EVPA преимущественно перпендикулярном хребтовой линии, и иногда m_{stack} принимает значения близкие к нулю. Похожее распределение направления поляризации поперек выброса было получено в работе [174] для модели со спиральным магнитным полем с относительно большим питч-углом $\gtrsim 60^\circ$.

Интересно отметить, что для случаев, когда направление поляризации совпадает с локальным направлением струи, поперечные профили m_{stack} не показывают значимых зависимостей (Рисунок 2.36). Такие случаи примерно в 2.5 раза чаще встречаются в лацертидах (например, источники 0303+490, 1717+178

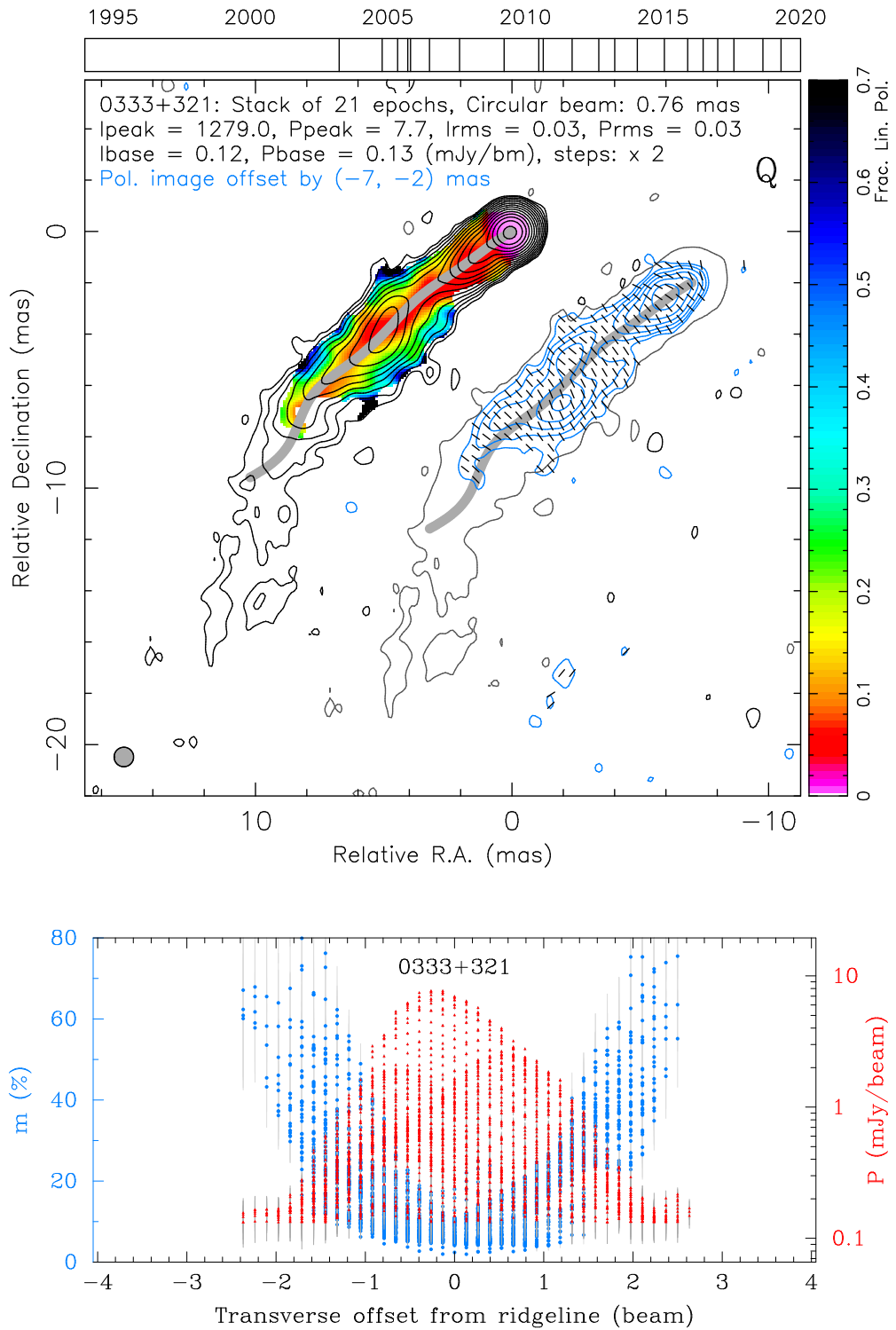


Рисунок 2.34 — Сверху: стековая карта линейной поляризации для квазара 0333+321. Обозначения такие же, как на Рисунке 2.7. Снизу: поперечные профили m_{stack} (синие точки) в процентах и P_{stack} (красные точки) в мЯн/луч за пределами области РСДБ-ядра. По оси абсцисс отложено расстояние от хребтовой линии в диаграммах направленности.

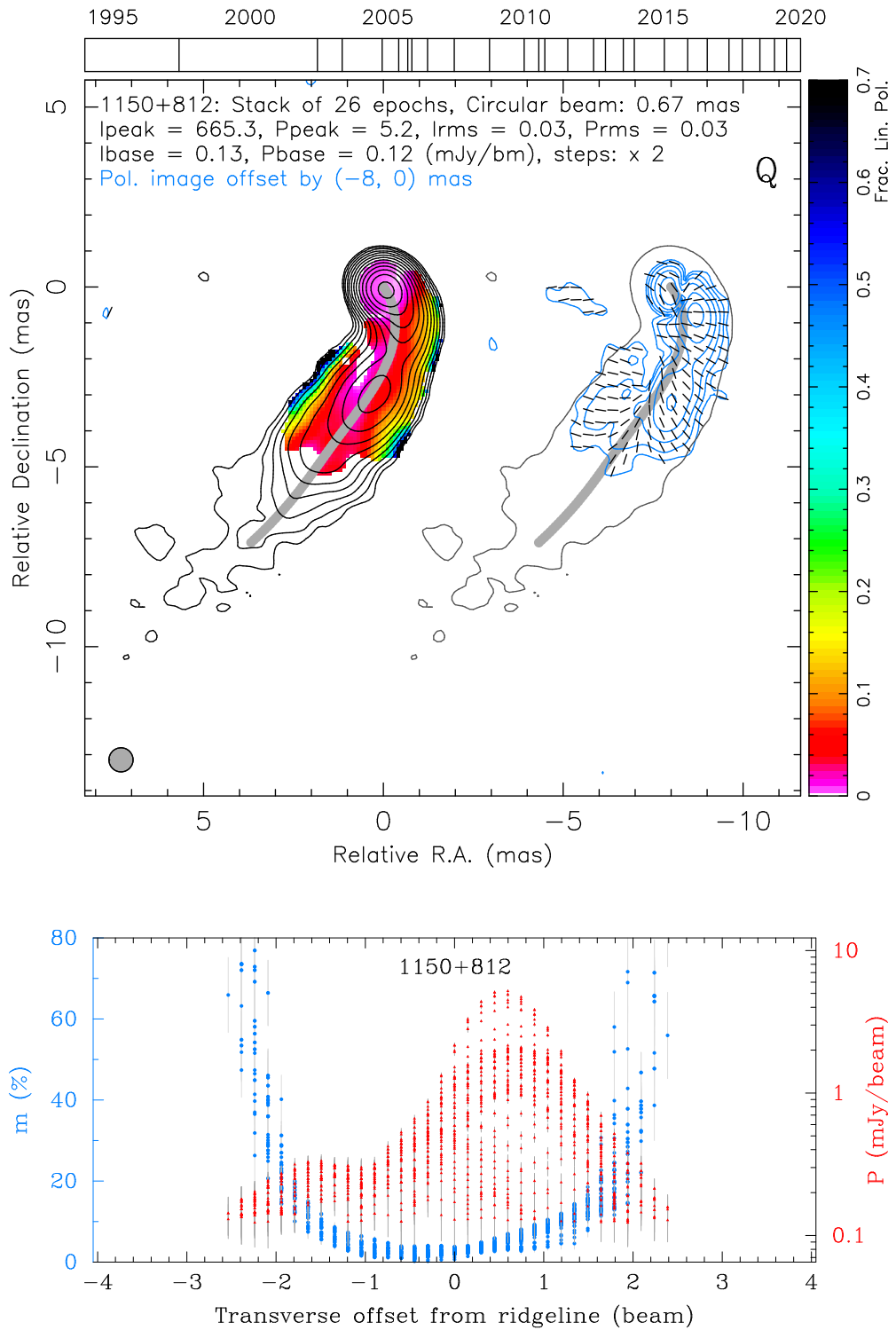


Рисунок 2.35 — Сверху: стековая карта линейной поляризации для квазара 1150+812. Обозначения такие же, как на Рисунке 2.7. Снизу: поперечные профили m_{stack} (синие точки) в процентах и P_{stack} (красные точки) в мЯн/луч за пределами области РСДБ-ядра. По оси абсцисс отложено расстояние от хребтовой линии в диаграммах направленности.

и 2157+213), чем в квазарах (например, 1253–055, 1441+252, 1754+155). В этих источниках поперечный профиль стековой поляризационной интенсивности достаточно симметричный и имеет один пик на оси струи. В АЯГ, у которых m_{stack} в срезе почти постоянная, P_{stack} имеет узкое распределение поперек выброса, его ширина типично составляет около двух диаграмм направленности. Единственным объектом, имеющим плоский поперечный профиль m_{stack} и перпендикулярный джету EVPA, является квазар 1700+685.

Третий тип распределения стековой степени поляризации поперек джета — это W-образный профиль (Рисунок 2.37 снизу). Он является промежуточным между U-образным профилем и почти постоянной m_{stack} и встречается редко. Были обнаружены только несколько лацертид (например, АЯГ 1307+121 и 2200+420) и квазаров, как например 1611+343, 2308+341, с такими поперечными распределениями. Стековое направление поляризации в источниках с W-образным профилем m_{stack} сонаправлено с джетом в области хребтовой линии и становится перпендикулярным ему на краях выброса, если там детектируется поляризация. Также ширина джетов этих объектов может достигать десяти диаграмм направленности в полной интенсивности и линейной поляризации. Такое сочетание поперечных распределений степени и направления поляризации может быть обусловлено тороидальным или сильно закрученным магнитным полем [175].

Поперечные профили m_{stack} за пределами РСДБ-ядра для 307 АЯГ, у которых степень поляризации не квазипостоянна поперек струи, показаны на Рисунке 2.38. Срезы были взяты в каждой точке хребтовой линии. При этом длина среза составляла 10 мсек дуги с серединой на хребтовой линии, а его позиционный угол был равен $PA_{\text{jet}} - 90^\circ$, где PA_{jet} — позиционный угол выброса. Отрицательное расстояние соответствует части среза до его пересечения с хребтовой линией. На распределении видно, что в рассматриваемых нами объектах m_{stack} растет к краям струи. Подобное возрастание с удалением от оси выброса наблюдается и для m_{med} . Пример такого поперечного среза приведен на Рисунке 2.39. В среднем, медианная степень поляризации возрастает за пределами РСДБ-ядра с 0.04 на хребтовой линии до 0.18 в периферийных областях. Было обнаружено, что у семи АЯГ (0430+052, 0735+178, 1226+023, 1611+343, 2037+511, 2200+420 и 2230 +114) со значимым поперечным градиентом фарадеевской меры вращения [125; 127; 147; 176–178] детектируется и увеличение медианной степени поляризации к краям джета. Градиент меры вращения по-

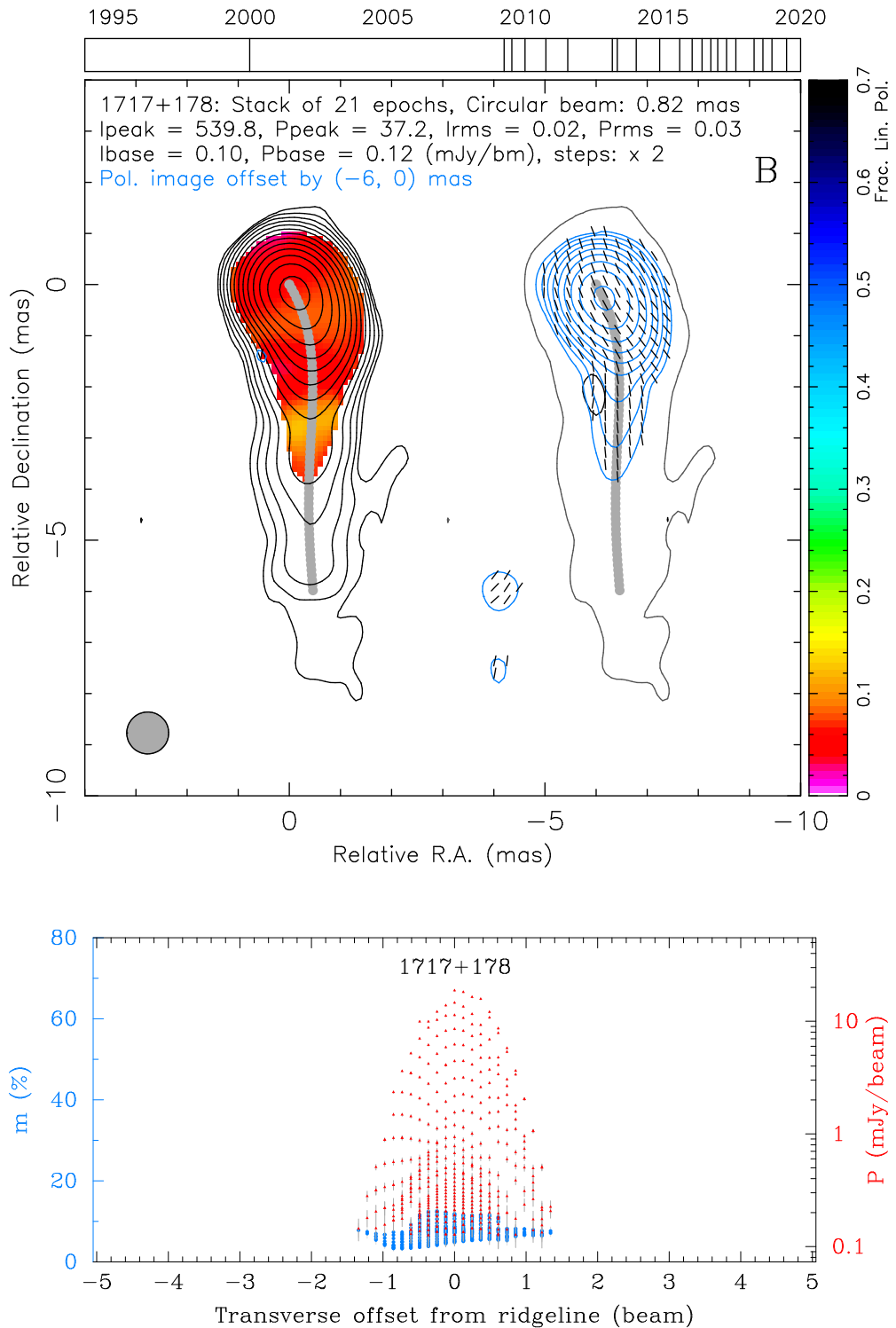


Рисунок 2.36 — Сверху: стековая карта линейной поляризации для лацертиды 1717+178. Обозначения такие же, как на Рисунке 2.7. Снизу: поперечные профили m_{stack} (синие точки) в процентах и P_{stack} (красные точки) в мЯн/луч за пределами области РСДБ-ядра. По оси абсцисс отложено расстояние от хребтовой линии в диаграммах направленности.

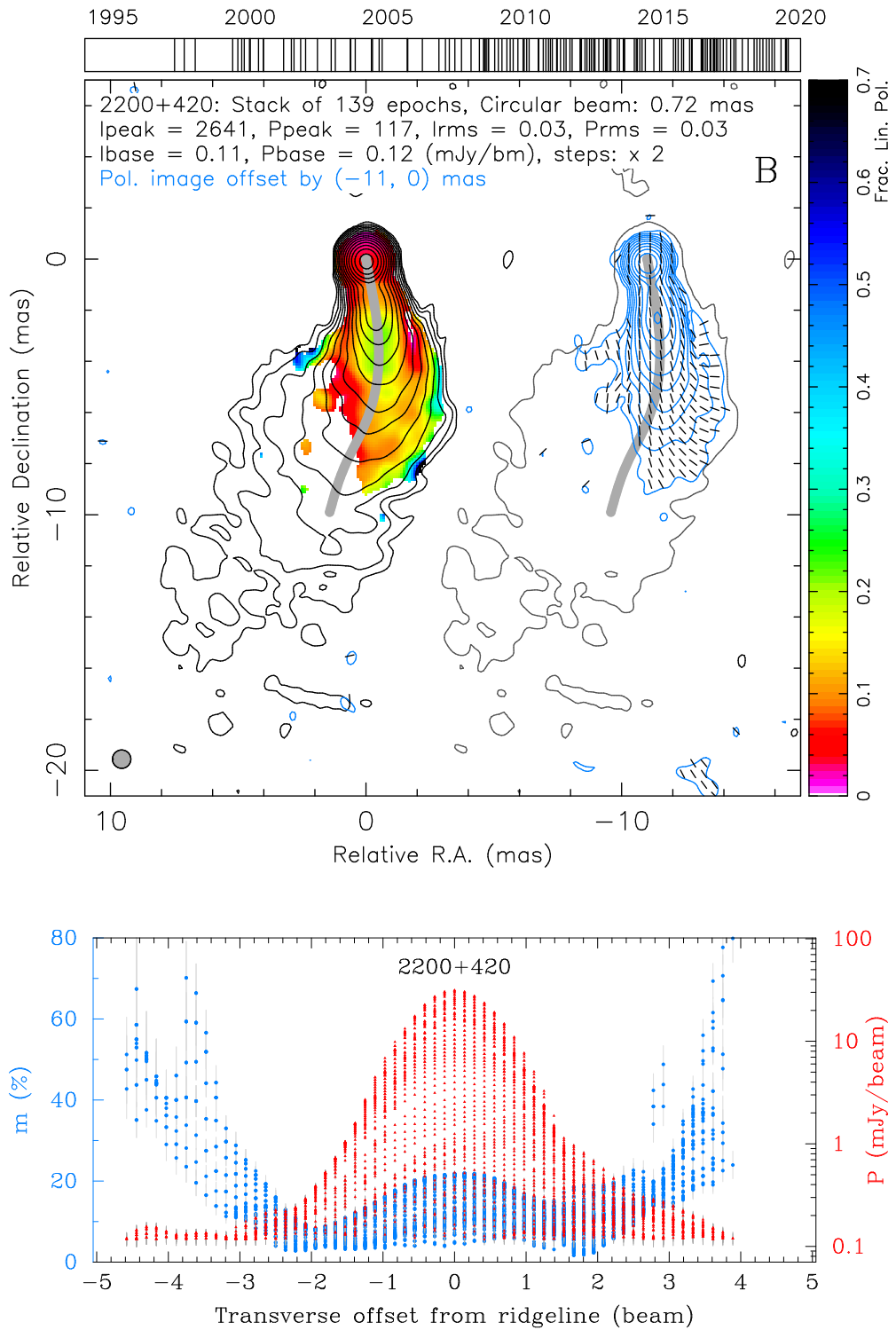


Рисунок 2.37 — Сверху: стековая карта линейной поляризации для BL Lacertae (2200+420). Обозначения такие же, как на Рисунке 2.7. Снизу: поперечные профили m_{stack} (синие точки) в процентах и P_{stack} (красные точки) в мЯн/луч за пределами области РСДБ-ядра. По оси абсцисс отложено расстояние от хребтовой линии в диаграммах направленности.

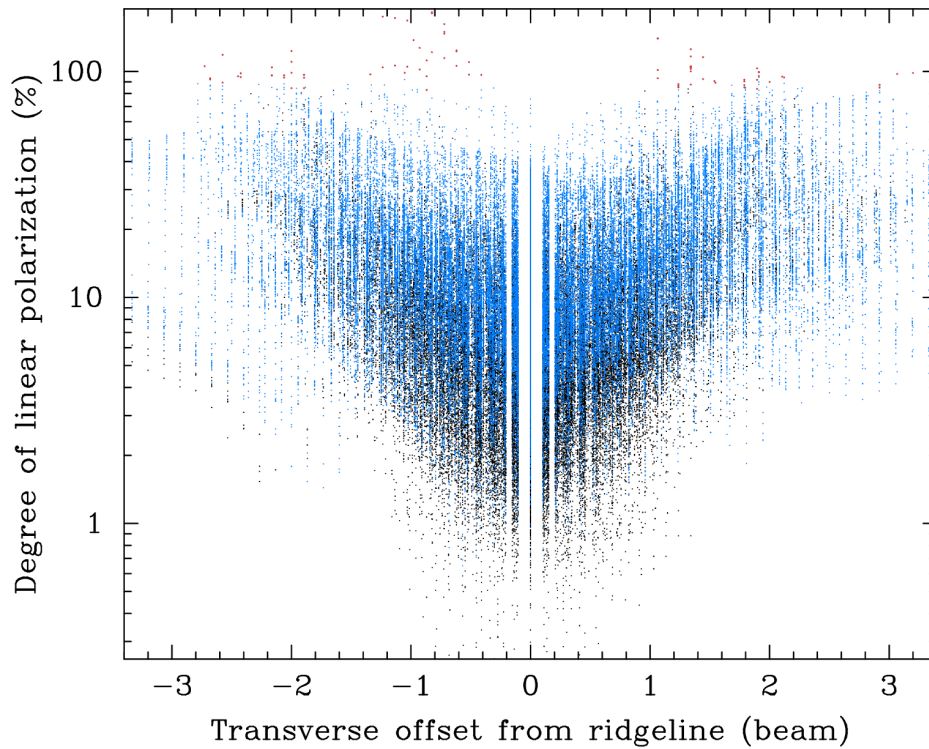


Рисунок 2.38 — Поперечные профили m_{stack} в процентах для 307 АЯГ после исключения 58 источников с квазиплоской зависимостью степени поляризации вдоль среза. По оси абсцисс отложено расстояние от хребтовой линии в диаграммах направленности. Черные точки соответствуют $r_{\text{along}} < 3$ мсек дуги от РСДБ-ядра, синие точки — бóльшим значениям r_{along} , красные точки ($< 0.1\%$) — значениям $m_{\text{stack}} - m_{\text{stack,uncertain.}} > 75\%$, то есть которые выше теоретического предела степени поляризации оптически тонкого излучения для однородного магнитного поля [87].

перек струи вместе с возрастанием степени поляризации по мере удаления от хребтовой линии являются прямым указанием на тороидальное или спиральное магнитное поле (например, [32]).

В Таблице 2.6 приводятся типично наблюдаемые сочетания распределений $EVPA_{\text{stack}}$ с типами поперечных профилей m_{stack} и P_{stack} . Распределение угла между стековым направлением поляризации и направлением струи в зависимости от расстояния от хребтовой линии вдоль нормали к ней для исследуемых источников показано на Рисунке 2.40. На нем видно, что $EVPA_{\text{stack}}$ в основном либо сонаправлен с джетом в узком центральном канале, как у лацертид, либо перпендикулярен выбросу по всей его ширине. Последний случай наблюдается преимущественно в квазарах и радиогалактиках.

Разнообразие наблюдаемых профилей стековой степени поляризации (Таблица 2.6) может порождаться спиральным магнитным полем с разными питч-углами при определенных геометрических и кинематических параметрах

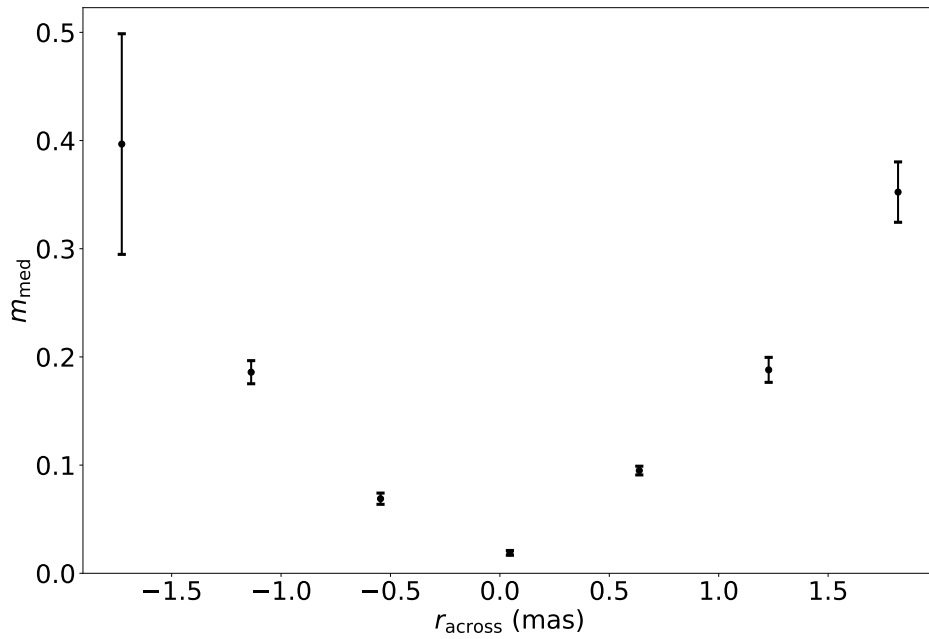


Рисунок 2.39 — Распределение m_{med} поперек джета для квазара 0336–019 на $r_{\text{along}} = 3$ мсек дуги от видимого начала выброса. По оси абсцисс показано расстояние от хребтовой линии поперек струи r_{across} в мсек дуги. Коэффициент корреляции Кендалла между m_{med} и r_{across} равен 0.9, p -value = 0.003. При оценивании корреляции пиксели по обе стороны от хребтовой линии анализировались совместно.

струи, окруженной оболочкой, толщина и скорость плазмы в которой тоже варьируются [168]. Например, в АЯГ, в которых $\text{EVPA}_{\text{stack}}$ параллельно локальному направлению джета, детектируется линейно-поляризованное излучение только в узкой полосе около его оси, поскольку излучение идет из центральных областей выброса, а оболочка либо геометрически тонкая, либо ее излучение довольно слабое. Случай, при котором поляризация наблюдается по всей ширине струи и $\text{EVPA}_{\text{stack}}$ перпендикулярен выбросу, может соответствовать тому, что оболочка доминирует в полном излучении источника, если она, например, является геометрически толстой. Оболочка с полоидальным магнитным полем вокруг джета может образовываться из-за его взаимодействия с окружающей средой с образованием сдвигового слоя [179].

Искривление выброса также указывает на взаимодействие струи с окружающей средой. Прямые джеты обычно имеют почти симметричные поперечные профили I_{stack} и P_{stack} (например, Рисунок 2.34), в то время как у искривленных выбросов стековая поляризация распределена, в среднем, асимметрично поперек джета, как у квазара 1150+812 (Рисунок 2.35).

Для подавляющего большинства источников поперечные профили σ_m/m_{med} и σ_{EVPA} не показывают значимых зависимостей от расстояния от

хребтовой линии. Это объясняется недостаточным угловым разрешением и немонотонным распределением переменности поляризации поперек джета.

Таблица 2.6 — Типично наблюдаемые распределения $EVPA_{\text{stack}}$ и виды поперечных профилей m_{stack} и P_{stack} .

| Поперечный профиль m_{stack} (1) | Распределение $EVPA_{\text{stack}}$ (2) | Поперечный профиль P_{stack} (3) | Распределение P_{stack} (4) | В основном наблюдается в ¹ (5) | Примеры АЯГ (6) |
|--|--|--|--|--|--|
| U-образный | γ^2 Перпендикулярно струе | Два пика, асимметричный Один пик, асимметричный | По всей ширине струи По всей ширине струи | Квзарах Квзарах | 1150+812, 1641+399 0333+321, 1226+023 |
| Плоский | Параллельно струе | Один пик, симметричный | Только около оси струи | Лацертидах | 1717+178, 2157+213 |
| W-образный | Параллельно струе или γ^2 | ³ | ³ | Лацертидах / квазарах | 1611+343, 2200+420 |

¹Источники отбирались визуально.

² $EVPA_{\text{stack}}$ сонаправлен со струей около хребтовой линии и становится перпендикулярным ей около краев струи.

³Источники с W-образным поперечным профилем m_{stack} имеют распределения P_{stack} , которые похожи на распределения этой величины у объектов с U-образным или плоским поперечным срезом m_{stack} .

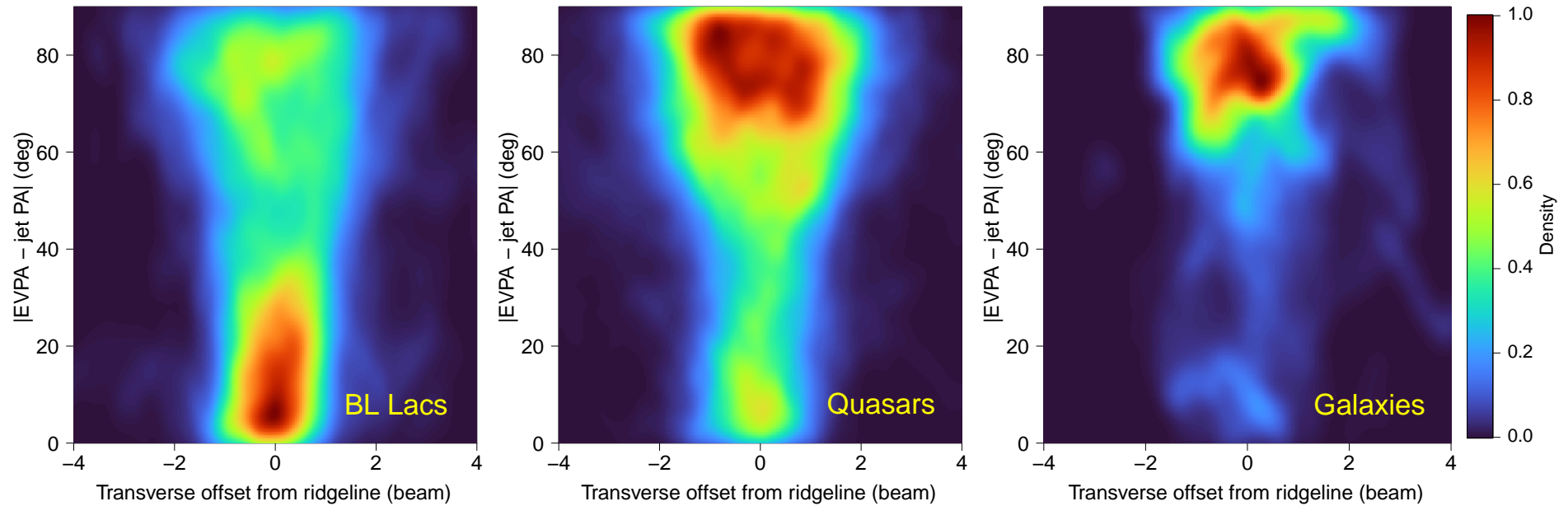


Рисунок 2.40 — Распределение плотности модуля разности позиционных углов стекового электрического вектора и локальной области струи в градусах в зависимости от расстояния от хребтовой линии поперек джета в диаграммах направленности за пределами РСДБ-ядра для 378 АЯГ: 126 лацертид (слева), 250 квазаров (посередине) и 12 радиогалактик (справа).

2.7 Выводы

Используя многоэпоховые РСДБ-данные, мы построили и провели анализ стековых карт I_{stack} , P_{stack} , m_{stack} , $EVPA_{\text{stack}}$, медианных карт P_{med} и m_{med} , а также карт переменности линейной поляризации σ_{EVPA} и $\sigma_m/m_{\text{median}}$ для 436 радиогромких АЯГ на парсековых масштабах на частоте 15 ГГц. Медиана времени между первой и последней эпохами наблюдений источников выборки составляет около 7 лет, медианной число эпох — девять. Карты были поправлены за баис Райса и систематический сдвиг, порожденный алгоритмом CLEAN, которые приводят к возрастанию степени поляризации в областях с малым отношением сигнал-шум. Неопределенности полученных изображений были оценены, используя Монте-Карло моделирование (Раздел 2.3.4).

Получены следующие результаты:

1. Переменность EVPA в РСДБ-ядре значимо выше, чем в джете как для всей выборки, так и для отдельных оптических и спектральных классов. Основной причиной могут служить неразрешенные поляризованные компоненты в ядерной области. Искривление джета в РСДБ-ядре также способствует этому эффекту. В РСДБ-ядрах лацертид направление поляризации более стабильное, чем в квазарах. Это подтверждает полученный ранее вывод в работе [34].
2. У 19 из 106 АЯГ переменность направления поляризации уменьшается вниз по струе. Эта зависимость типична для источников, поскольку большинство значимых зависимостей имеют коэффициенты корреляции одного знака. Увеличение стабильности EVPA вниз по выбросу также подтверждается наблюдаемой зависимостью σ_{EVPA} от m_{med} : переменность направления поляризации уменьшается с увеличением m_{med} . Уменьшение σ_{EVPA} с расстоянием от РСДБ-ядра в основном наблюдается у объектов с временным интервалом наблюдения более 12 лет и более чем 15 эпохами наблюдений. Причиной высокой переменности EVPA в окооядерной области является большая мера фарадеевского вращения. Наблюдаемое спадание σ_{EVPA} вдоль джета может указывать на увеличение стабильности направления магнитного поля вниз по струе, чему способствует возрастание доли упорядоченного магнитного поля.

3. Стековая и медианная степени поляризации значимо возрастают с расстоянием от РСДБ-ядра. Это может быть обусловлено сочетанием нескольких эффектов таких, как уменьшение деполяризации внутри диаграммы направленности, фарадеевского вращения и питч-угла магнитного поля, старение спектрального индекса, ослабление ударных волн вниз по выбросу.
4. Стековое направление поляризации в основном либо сонаправлено с хребтовой линией выброса, либо перпендикулярно ей, либо параллельно ей во внутренних частях выброса и становится перпендикулярным на краях струи. Поперечное распределение стековой степени поляризации тесно связано с $EVPA_{stack}$. Так, у лацертид типично наблюдается параллельность стекового $EVPA$ и оси джета, а m_{stack} слабопеременен поперек струи. В случае квазаров $EVPA_{stack}$ в основном направлено перпендикулярно выбросу или сонаправлено с ним около его оси и перпендикулярно на его краях, в то время как m_{stack} имеет U- или W-образный поперечный профиль. Такие наблюдаемые распределения поляризации указывают на спиральное магнитное поле в парсековой струе и возможное наличие оболочки вокруг нее, порожденной взаимодействием джета с окружающим веществом. Этот вывод также согласуется с наблюдаемыми асимметричными поперечными профилями P_{stack} в искривленных выбросах, поскольку у них наблюдается возрастание стековой поляризационной интенсивности и перпендикулярность $EVPA_{stack}$ локальному направлению струи на внешнем краю изгиба.

При этом все основные результаты сохраняются, если рассматривать отдельные оптические и спектральные классы или статистически полную по потоку подвыборку MOJAVE 1.5JyQC.

Заключение

В данном исследовании изучаются свойства линейной поляризации излучения АЯГ на парсековых и субпарсековых масштабах, на которых находятся аккреционный диск и релятивистская струя. Эти внутренние области удалось прозондировать с помощью совместного использования радиоинтерферометрии и космического оптического телескопа *Gaia*, а также РСДБ-наблюдений больших выборок активных ядер галактик, состоящих из сотен источников.

Основные результаты работы заключаются в следующем:

- Использование данных об оптической поляризации дало возможность разделить вклады аккреционного диска и парсекового джета в полное оптическое излучение АЯГ. Установлено, что источники со значимыми радио-оптическими сдвигами положений вниз по выбросу имеют большую степень поляризации, чем объекты, у которых положение в оптическом диапазоне ближе к центральной машине. Этот результат подтверждает гипотезу о том, что аккреционный диск, доминирующий в полном оптическом излучении, смещает центроид *Gaia*-изображения ближе к началу джета и порождает сдвиг РСДБ–*Gaia* в этом направлении, а оптический протяженный выброс — наоборот, что способствует возникновению сдвига вниз по струе. Направление оптической поляризации сонаправлено с джетом у источников с радио-оптическими смещениями по течению выброса. Это может говорить о крупномасштабном тороидальном магнитном поле или ударных волнах в джете АЯГ.
- Направление поляризации в парсековом выбросе на частоте наблюдения 15 ГГц более стабильно, чем в РСДБ-ядре. Причиной более высокой переменности EVPA в РСДБ-ядре могут быть неразрешенные поляризованные компоненты и/или изгиб выброса. Также было показано, что направление поляризации в РСДБ-ядрах квазаров более переменное, чем в лацертидах.
- Анализ медианной и стековой степени поляризации, а также переменности направления поляризации на 15 ГГц вдоль парсекового выброса АЯГ показал, что с удалением от РСДБ-ядра степень поляризации увеличивается до значений 20% – 30%, а EVPA становится более стабильным.

Вклад в эти тренды могут давать уменьшение фарадеевского вращения и угла закрутки магнитного поля, ослабление ударных волн и старение спектрального индекса вниз по струе. Также такие зависимости m и EVPA вдоль джета указывают на увеличение упорядоченности и стабильности направления магнитного поля с увеличением расстояния от РСДБ-ядра.

- Распределения усредненной по эпохам степени и направления поляризации на 15 ГГц поперек парсековой струи оказались связаны. В квазарах степень поляризации имеет U- или W-образный профиль, а EVPA — либо перпендикулярен оси джета, либо сонаправлен с ней в центральном канале выброса и перпендикулярен ей на его краях. В лацеридах направление поляризации в основном параллельно джету, а поперечный профиль m — квазиплоский. Такие распределения указывают на существование спирального магнитного поля в струе и оболочку с полоидальным полем вокруг парсекового выброса, образующуюся в результате взаимодействия джета с окружающей средой.

Эти результаты способствуют углублению знаний о физической природе центральных областей АЯГ. Они являются значимыми для исследования крупномасштабного магнитного поля в этих объектах, для моделирования процессов в джетах и аккреционных дисках и указывают на то, что поляризационные исследования существенно дополняют и расширяют анализ источников в полной интенсивности. Также полученные выводы подчеркивают важность долгосрочного мониторинга активных ядер в полной интенсивности и линейной поляризации, поскольку с помощью многоэпоховых наблюдений можно изучать характеристики синхротронного излучения, а значит магнитное поле и релятивистскую плазму, с гораздо большей чувствительностью по сравнению с одноэпоховыми наблюдениями.

В заключение автор выражает огромную благодарность своему научному руководителю Александру Борисовичу Пушкареву, а также Юрию Юрьевичу Ковалеву за руководство исследованием, ценные советы по проекту и возможность работы в международном коллективе, соавторам статей — за ценные комментарии и обсуждения и коллегам — за помощь в работе.

Список литературы

1. *Засов А. В., Постнов К. А.* Общая АСТРОФИЗИКА. — 3-е изд, исправл. — М. : ВЕК 2, 2015. — 576 с.
2. *Plavin A., Kovalev Y. Y., Kovalev Y. A., [et al.]*. Observational Evidence for the Origin of High-energy Neutrinos in Parsec-scale Nuclei of Radio-bright Active Galaxies // *The Astrophysical Journal*. — 2020. — Vol. 894, no. 2. — P. 101. — DOI: [10.3847/1538-4357/ab86bd](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab86bd).
3. *Hovatta T., Lindfors E., Kiehlmann S., [et al.]*. Association of IceCube neutrinos with radio sources observed at Owens Valley and Metsähovi Radio Observatories // *Astronomy & Astrophysics*. — 2021. — Vol. 650. — A83. — DOI: [10.1051/0004-6361/202039481](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202039481).
4. *Plavin A. V., Kovalev Y. Y., Kovalev Y. A., [et al.]*. Directional Association of TeV to PeV Astrophysical Neutrinos with Radio Blazars // *The Astrophysical Journal*. — 2021. — Vol. 908, no. 2. — P. 157. — DOI: [10.3847/1538-4357/abceb8](https://doi.org/10.3847/1538-4357/abceb8).
5. *Buson S., Tramacere A., Pfeiffer L., [et al.]*. Beginning a Journey Across the Universe: The Discovery of Extragalactic Neutrino Factories // *The Astrophysical Journal*. — 2022. — Vol. 933, no. 2. — P. L43. — DOI: [10.3847/2041-8213/ac7d5b](https://doi.org/10.3847/2041-8213/ac7d5b).
6. *Abdo A. A., Ackermann M., Agudo I., [et al.]*. The Spectral Energy Distribution of Fermi Bright Blazars // *The Astrophysical Journal*. — 2010. — Vol. 716, no. 1. — P. 30–70. — DOI: [10.1088/0004-637X/716/1/30](https://doi.org/10.1088/0004-637X/716/1/30).
7. *Kellermann K. I., Condon J. J., Kimball A. E., [et al.]*. Radio-loud and Radio-quiet QSOs // *The Astrophysical Journal*. — 2016. — Vol. 831, no. 2. — P. 168. — DOI: [10.3847/0004-637X/831/2/168](https://doi.org/10.3847/0004-637X/831/2/168).
8. *Urry C. M., Padovani P.* Unified Schemes for Radio-Loud Active Galactic Nuclei // *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*. — 1995. — Vol. 107. — P. 803. — DOI: [10.1086/133630](https://doi.org/10.1086/133630).
9. *Seielstad G. A., Cohen M. H., Linfield R. P., [et al.]*. Further monitoring of the structure of superluminal radio sources. // *The Astrophysical Journal*. — 1979. — Vol. 229. — P. 53–72. — DOI: [10.1086/156929](https://doi.org/10.1086/156929).

10. *Jorstad S. G., Marscher A. P., Morozova D. A., [et al.]*. Kinematics of Parsec-scale Jets of Gamma-Ray Blazars at 43 GHz within the VLBA-BU-BLAZAR Program // *The Astrophysical Journal*. — 2017. — Vol. 846, no. 2. — P. 98. — DOI: [10.3847/1538-4357/aa8407](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa8407).
11. *Lioudakis I., Hovatta T., Huppenkothen D., [et al.]*. Constraining the Limiting Brightness Temperature and Doppler Factors for the Largest Sample of Radio-bright Blazars // *The Astrophysical Journal*. — 2018. — Vol. 866, no. 2. — P. 137. — DOI: [10.3847/1538-4357/aae2b7](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aae2b7).
12. *Homan D. C., Cohen M. H., Hovatta T., [et al.]*. MOJAVE. XIX. Brightness Temperatures and Intrinsic Properties of Blazar Jets // *The Astrophysical Journal*. — 2021. — Vol. 923, no. 1. — P. 67. — DOI: [10.3847/1538-4357/ac27af](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac27af).
13. *Gómez J. L., Lobanov A. P., Bruni G., [et al.]*. Probing the Innermost Regions of AGN Jets and Their Magnetic Fields with RadioAstron. I. Imaging BL Lacertae at 21 Microarcsecond Resolution // *The Astrophysical Journal*. — 2016. — Vol. 817, no. 2. — P. 96. — DOI: [10.3847/0004-637X/817/2/96](https://doi.org/10.3847/0004-637X/817/2/96).
14. *Kovalev Y. Y., Kardashev N. S., Kellermann K. I., [et al.]*. RadioAstron Observations of the Quasar 3C273: A Challenge to the Brightness Temperature Limit // *The Astrophysical Journal*. — 2016. — Vol. 820, no. 1. — P. L9. — DOI: [10.3847/2041-8205/820/1/L9](https://doi.org/10.3847/2041-8205/820/1/L9).
15. *Pushkarev A. B., Kovalev Y. Y., Lister M. L., [et al.]*. MOJAVE - XIV. Shapes and opening angles of AGN jets // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2017. — Vol. 468, no. 4. — P. 4992–5003. — DOI: [10.1093/mnras/stx854](https://doi.org/10.1093/mnras/stx854).
16. *Blandford R. D., Znajek R. L.* Electromagnetic extraction of energy from Kerr black holes. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 1977. — Vol. 179. — P. 433–456. — DOI: [10.1093/mnras/179.3.433](https://doi.org/10.1093/mnras/179.3.433).
17. *Blandford R. D., Payne D. G.* Hydromagnetic flows from accretion disks and the production of radio jets. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 1982. — Vol. 199. — P. 883–903. — DOI: [10.1093/mnras/199.4.883](https://doi.org/10.1093/mnras/199.4.883).
18. *Stickel M., Fried J. W., Kuehr H.* The complete sample of 1 Jy BL Lac objects. II. Observational data. // *Astronomy and Astrophysics, Suppl. Ser.* — 1993. — Vol. 98. — P. 393–442.

19. *Hovatta T., Valtaoja E., Tornikoski M., [et al.]*. Doppler factors, Lorentz factors and viewing angles for quasars, BL Lacertae objects and radio galaxies // *Astronomy & Astrophysics*. — 2009. — Vol. 494, no. 2. — P. 527–537. — DOI: [10.1051/0004-6361:200811150](https://doi.org/10.1051/0004-6361/200811150).
20. *Schneider D. P., Richards G. T., Hall P. B., [et al.]*. The Sloan Digital Sky Survey Quasar Catalog. V. Seventh Data Release // *The Astronomical Journal*. — 2010. — Vol. 139, no. 6. — P. 2360. — DOI: [10.1088/0004-6256/139/6/2360](https://doi.org/10.1088/0004-6256/139/6/2360).
21. *Charlot P., Jacobs C. S., Gordon D., [et al.]*. The third realization of the International Celestial Reference Frame by very long baseline interferometry // *Astronomy & Astrophysics*. — 2020. — Vol. 644. — A159. — DOI: [10.1051/0004-6361/202038368](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202038368).
22. *Матвеев Л. И., Кардашев Н. С., Шоломицкий Г. Б.* О радиоинтерферометре с большой базой // *Известия ВУЗов. Радиофизика*. — 1965. — Т. 8, № 4. — С. 651–654.
23. *Gaia Collaboration, Mignard F., Klioner S. A., [et al.]*. Gaia Data Release 2. The celestial reference frame (Gaia-CRF2) // *Astronomy & Astrophysics*. — 2018. — Vol. 616. — A14. — DOI: [10.1051/0004-6361/201832916](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201832916).
24. *Gaia Collaboration, Prusti T., de Bruijne J. H. J., [et al.]*. The Gaia mission // *Astronomy & Astrophysics*. — 2016. — Vol. 595. — A1. — DOI: [10.1051/0004-6361/201629272](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201629272).
25. *Mignard F., Klioner S., Lindegren L., [et al.]*. Gaia Data Release 1. Reference frame and optical properties of ICRF sources // *Astronomy & Astrophysics*. — 2016. — Vol. 595. — A5. — DOI: [10.1051/0004-6361/201629534](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201629534).
26. *Petrov L., Kovalev Y. Y.* On significance of VLBI/Gaia position offsets // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2017. — Vol. 467, no. 1. — P. L71–L75. — DOI: [10.1093/mnras/slx001](https://doi.org/10.1093/mnras/slx001).
27. *Gaia Collaboration, Brown A. G. A., Vallenari A., [et al.]*. Gaia Data Release 2. Summary of the contents and survey properties // *Astronomy & Astrophysics*. — 2018. — Vol. 616. — A1. — DOI: [10.1051/0004-6361/201833051](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833051).

28. *Petrov L., Kovalev Y. Y., Plavin A. V.* A quantitative analysis of systematic differences in the positions and proper motions of Gaia DR2 with respect to VLBI // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2019. — Vol. 482. — P. 3023–3031. — DOI: [10.1093/mnras/sty2807](https://doi.org/10.1093/mnras/sty2807).
29. *Kovalev Y. Y., Pushkarev A. B., Nokhrina E. E., [et al.]*. A transition from parabolic to conical shape as a common effect in nearby AGN jets // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2020. — Vol. 495, no. 4. — P. 3576–3591. — DOI: [10.1093/mnras/staa1121](https://doi.org/10.1093/mnras/staa1121).
30. *Baczko A.-K., Ros E., Kadler M., [et al.]*. Ambilateral collimation study of the twin-jets in NGC 1052 // *Astronomy & Astrophysics*. — 2022. — Vol. 658. — A119. — DOI: [10.1051/0004-6361/202141897](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202141897).
31. *Prior C., Gourgouliatos K. N.* Observational signatures of magnetic field structure in relativistic AGN jets // *Astronomy & Astrophysics*. — 2019. — Vol. 622. — A122. — DOI: [10.1051/0004-6361/201834469](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201834469).
32. *Gabuzda D. C.* Inherent and Local Magnetic Field Structures in Jets from Active Galactic Nuclei // *Galaxies*. — 2021. — Vol. 9, no. 3. — P. 58. — DOI: [10.3390/galaxies9030058](https://doi.org/10.3390/galaxies9030058).
33. *Marscher A. P., Jorstad S. G., D’Arcangelo F. D., [et al.]*. The inner jet of an active galactic nucleus as revealed by a radio-to- γ -ray outburst // *Nature*. — 2008. — Vol. 452, no. 7190. — P. 966–969. — DOI: [10.1038/nature06895](https://doi.org/10.1038/nature06895).
34. *Hodge M. A., Lister M. L., Aller M. F., [et al.]*. MOJAVE XVI: Multi-epoch Linear Polarization Properties of Parsec-scale AGN Jet Cores // *The Astrophysical Journal*. — 2018. — Vol. 862, no. 2. — P. 151. — DOI: [10.3847/1538-4357/aacb2f](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aacb2f).
35. *Gomez J. L., Alberdi A., Marcaide J. M.* Synchrotron emission from bent shocked relativistic jets. II. Shock waves in helical jets. // *Astronomy & Astrophysics*. — 1994. — Vol. 284. — P. 51–64.
36. *Myserlis I., Komossa S., Angelakis E., [et al.]*. High cadence, linear, and circular polarization monitoring of OJ 287. Helical magnetic field in a bent jet // *Astronomy & Astrophysics*. — 2018. — Vol. 619. — A88. — DOI: [10.1051/0004-6361/201732273](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201732273).

37. *Cohen M. H., Aller H. D., Aller M. F., [et al.]*. Reversals in the Direction of Polarization Rotation in OJ 287 // *The Astrophysical Journal*. — 2018. — Vol. 862, no. 1. — P. 1. — DOI: [10.3847/1538-4357/aacb31](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aacb31).
38. *Zhang H., Chen X., Böttcher M.* Synchrotron Polarization in Blazars // *The Astrophysical Journal*. — 2014. — Vol. 789, no. 1. — P. 66. — DOI: [10.1088/0004-637X/789/1/66](https://doi.org/10.1088/0004-637X/789/1/66).
39. *Zhang H., Chen X., Böttcher M., [et al.]*. Polarization Swings Reveal Magnetic Energy Dissipation in Blazars // *The Astrophysical Journal*. — 2015. — Vol. 804, no. 1. — P. 58. — DOI: [10.1088/0004-637X/804/1/58](https://doi.org/10.1088/0004-637X/804/1/58).
40. *Marscher A. P.* Turbulent, Extreme Multi-zone Model for Simulating Flux and Polarization Variability in Blazars // *The Astrophysical Journal*. — 2014. — Vol. 780, no. 1. — P. 87. — DOI: [10.1088/0004-637X/780/1/87](https://doi.org/10.1088/0004-637X/780/1/87).
41. *Plavin A. V., Kovalev Y. Y., Petrov L. Y.* Dissecting the AGN Disk-Jet System with Joint VLBI-Gaia Analysis // *The Astrophysical Journal*. — 2019. — Vol. 871. — P. 143. — DOI: [10.3847/1538-4357/aaf650](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aaf650).
42. *Lister M. L., Aller M. F., Aller H. D., [et al.]*. MOJAVE. XV. VLBA 15 GHz Total Intensity and Polarization Maps of 437 Parsec-scale AGN Jets from 1996 to 2017 // *The Astrophysical Journals*. — 2018. — Vol. 234, no. 1. — P. 12. — DOI: [10.3847/1538-4365/aa9c44](https://doi.org/10.3847/1538-4365/aa9c44).
43. *Edgington E. S.* Randomization Tests // *International Encyclopedia of Statistical Science* / ed. by M. Lovric. — Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2011. — P. 1182–1183. — DOI: [10.1007/978-3-642-04898-2_56](https://doi.org/10.1007/978-3-642-04898-2_56).
44. *Press W. H., Teukolsky S. A., Vetterling W. T., [et al.]*. Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing, Section 15.6.2. — 3rd ed. — New York, NY, USA : Cambridge University Press, 2007.
45. *Högbom J. A.* Aperture Synthesis with a Non-Regular Distribution of Interferometer Baselines // *Astronomy & Astrophysics, Suppl. Ser.* — 1974. — Vol. 15. — P. 417.
46. *Shepherd M. C.* Difmap: an Interactive Program for Synthesis Imaging // *Astronomical Data Analysis Software and Systems VI*. Vol. 125 / ed. by G. Hunt, H. Payne. — 1997. — P. 77. — (Astronomical Society of the Pacific Conference Series).

47. *Blinov D., Pavlidou V., Papadakis I. E., [et al.]*. RoboPol: optical polarization-plane rotations and flaring activity in blazars // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2016. — Vol. 457, no. 2. — P. 2252–2262. — DOI: [10.1093/mnras/stw158](https://doi.org/10.1093/mnras/stw158).
48. *Kendall M.* RANK CORRELATION METHODS. — Second Edition. — London : Charles Griffin Co. Ltd., 1955.
49. *Scholz F. W., Stephens M. A.* K-Sample Anderson-Darling Tests // *Journal of the American Statistical Association*. — 1987. — Vol. 82, no. 399. — P. 918–924. — DOI: [10.2307/2288805](https://doi.org/10.2307/2288805).
50. *Hawkins M. R. S.* Timescale of variation and the size of the accretion disc in active galactic nuclei // *Astronomy & Astrophysics*. — 2007. — Vol. 462, no. 2. — P. 581–589. — DOI: [10.1051/0004-6361:20066283](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20066283).
51. *Guo W.-J., Li Y.-R., Zhang Z.-X., [et al.]*. Accretion Disk Size Measurements of Active Galactic Nuclei Monitored by the Zwicky Transient Facility // *The Astrophysical Journal*. — 2022. — Vol. 929, no. 1. — P. 19. — DOI: [10.3847/1538-4357/ac4e84](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac4e84).
52. *Kovalev Y. Y., Petrov L., Plavin A. V.* VLBI-Gaia offsets favor parsec-scale jet direction in active galactic nuclei // *Astronomy & Astrophysics*. — 2017. — Vol. 598. — P. L1. — DOI: [10.1051/0004-6361/201630031](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201630031).
53. *Petrov L., Kovalev Y. Y.* Observational consequences of optical band milliarcsec-scale structure in active galactic nuclei discovered by Gaia // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2017. — Vol. 471, no. 4. — P. 3775–3787. — DOI: [10.1093/mnras/stx1747](https://doi.org/10.1093/mnras/stx1747).
54. *Fey A. L., Gordon D., Jacobs C. S., [et al.]*. The Second Realization of the International Celestial Reference Frame by Very Long Baseline Interferometry // *The Astronomical Journal*. — 2015. — Vol. 150, no. 2. — P. 58. — DOI: [10.1088/0004-6256/150/2/58](https://doi.org/10.1088/0004-6256/150/2/58).
55. *Lindgren L., Lammers U., Bastian U., [et al.]*. Gaia Data Release 1. Astrometry: one billion positions, two million proper motions and parallaxes // *Astronomy & Astrophysics*. — 2016. — Vol. 595. — A4. — DOI: [10.1051/0004-6361/201628714](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201628714).

56. *Falomo R., Scarpa R., Treves A., [et al.]*. The Hubble Space Telescope Survey of BL Lacertae Objects. III. Morphological Properties of Low-Redshift Host Galaxies // *The Astrophysical Journal*. — 2000. — Vol. 542, no. 2. — P. 731–739. — DOI: [10.1086/317044](https://doi.org/10.1086/317044).
57. *Prieto M. A., Fernández-Ontiveros J. A., Markoff S., [et al.]*. The central parsecs of M87: jet emission and an elusive accretion disc // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2016. — Vol. 457, no. 4. — P. 3801–3816. — DOI: [10.1093/mnras/stw166](https://doi.org/10.1093/mnras/stw166).
58. *Blandford R. D., Königl A.* Relativistic jets as compact radio sources. // *The Astrophysical Journal*. — 1979. — Vol. 232. — P. 34–48. — DOI: [10.1086/157262](https://doi.org/10.1086/157262).
59. *Lobanov A. P.* Ultracompact jets in active galactic nuclei // *Astronomy & Astrophysics*. — 1998. — Vol. 330. — P. 79–89. — DOI: [10.48550/arXiv.astro-ph/9712132](https://doi.org/10.48550/arXiv.astro-ph/9712132).
60. *Kovalev Y. Y., Lobanov A. P., Pushkarev A. B., [et al.]*. Opacity in compact extragalactic radio sources and its effect on astrophysical and astrometric studies // *Astronomy & Astrophysics*. — 2008. — Vol. 483, no. 3. — P. 759–768. — DOI: [10.1051/0004-6361:20078679](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20078679).
61. *O’Sullivan S. P., Gabuzda D. C.* Three-dimensional magnetic field structure of six parsec-scale active galactic nuclei jets // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2009. — Vol. 393, no. 2. — P. 429–456. — DOI: [10.1111/j.1365-2966.2008.14213.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2008.14213.x).
62. *Sokolovsky K. V., Kovalev Y. Y., Pushkarev A. B., [et al.]*. A VLBA survey of the core shift effect in AGN jets. I. Evidence of dominating synchrotron opacity // *Astronomy & Astrophysics*. — 2011. — Vol. 532. — A38. — DOI: [10.1051/0004-6361/201016072](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201016072).
63. *Pushkarev A. B., Hovatta T., Kovalev Y. Y., [et al.]*. MOJAVE: Monitoring of Jets in Active galactic nuclei with VLBA Experiments. IX. Nuclear opacity // *Astronomy & Astrophysics*. — 2012. — Vol. 545. — A113. — DOI: [10.1051/0004-6361/201219173](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201219173).
64. *Fromm C. M., Ros E., Perucho M., [et al.]*. Catching the radio flare in CTA 102. III. Core-shift and spectral analysis // *Astronomy & Astrophysics*. — 2013. — Vol. 557. — A105. — DOI: [10.1051/0004-6361/201321784](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201321784).

65. *Kutkin A. M., Sokolovsky K. V., Lisakov M. M., [et al.]*. The core shift effect in the blazar 3C 454.3 // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2014. — Vol. 437, no. 4. — P. 3396–3404. — DOI: [10.1093/mnras/stt2133](https://doi.org/10.1093/mnras/stt2133).
66. *Porcas R. W.* Radio astrometry with chromatic AGN core positions // *Astronomy & Astrophysics*. — 2009. — Vol. 505, no. 1. — P. L1–L4. — DOI: [10.1051/0004-6361/200912846](https://doi.org/10.1051/0004-6361/200912846).
67. *Pushkarev A. B., Kovalev Y. Y., Lister M. L., [et al.]*. VLBA observations of a rare multiple quasar imaging event caused by refraction in the interstellar medium // *Astronomy & Astrophysics*. — 2013. — Vol. 555. — A80. — DOI: [10.1051/0004-6361/201321484](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201321484).
68. *Padovani P., Alexander D. M., Assef R. J., [et al.]*. Active galactic nuclei: what's in a name? // *Astronomy & Astrophysics*. — 2017. — Vol. 25, no. 1. — P. 2. — DOI: [10.1007/s00159-017-0102-9](https://doi.org/10.1007/s00159-017-0102-9).
69. *Hutsemékers D., Cabanac R., Lamy H., [et al.]*. Mapping extreme-scale alignments of quasar polarization vectors // *Astronomy & Astrophysics*. — 2005. — Vol. 441. — P. 915–930. — DOI: [10.1051/0004-6361:20053337](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20053337).
70. *Hutsemékers D., Borguet B., Sluse D., [et al.]*. Optical linear polarization measurements of quasars obtained with the Very Large Telescope at Paranal Observatory* // *Astronomy & Astrophysics*. — 2018. — Vol. 620. — A68. — DOI: [10.1051/0004-6361/201833797](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833797).
71. *Itoh R., Uemura M., Fukazawa Y., [et al.]*. Polarimetric Monitoring of Jets with Kanata Telescope // *Galaxies*. — 2018. — Vol. 6, no. 1. — P. 16. — DOI: [10.3390/galaxies6010016](https://doi.org/10.3390/galaxies6010016).
72. *Blinov D., Pavlidou V.* The RoboPol Program: Optical Polarimetric Monitoring of Blazars // *Galaxies*. — 2019. — Vol. 7, no. 2. — P. 46. — DOI: [10.3390/galaxies7020046](https://doi.org/10.3390/galaxies7020046).
73. *Angelakis E., Hovatta T., Blinov D., [et al.]*. RoboPol: the optical polarization of gamma-ray-loud and gamma-ray-quiet blazars // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2016. — Vol. 463. — P. 3365–3380. — DOI: [10.1093/mnras/stw2217](https://doi.org/10.1093/mnras/stw2217).

74. *Tommasi L., Palazzi E., Pian E., [et al.]*. Multiband optical polarimetry of BL Lacertae objects with the Nordic Optical Telescope // *Astronomy & Astrophysics*. — 2001. — Vol. 376. — P. 51–58. — DOI: [10.1051/0004-6361:20010940](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20010940).
75. *Rusk R., Seaquist E. R.* Alignment of radio and optical polarization with VLBI structure // *The Astronomical Journal*. — 1985. — Vol. 90. — P. 30–38. — DOI: [10.1086/113704](https://doi.org/10.1086/113704).
76. *Lister M. L., Smith P. S.* Intrinsic Differences in the Inner Jets of High and Low Optically Polarized Radio Quasars // *The Astrophysical Journal*. — 2000. — Vol. 541, no. 1. — P. 66–87. — DOI: [10.1086/309413](https://doi.org/10.1086/309413).
77. *Gabuzda D. C.* VLBI Polarisation Properties of a Complete Sample of Radio-Loud BL Lacs // *Astrophysics and Space Science*. — 2003. — Vol. 288, no. 1. — P. 39–50. — DOI: [10.1023/B:ASTR.0000004992.80545.3a](https://doi.org/10.1023/B:ASTR.0000004992.80545.3a).
78. *Hovatta T., Lindfors E., Blinov D., [et al.]*. Optical polarization of high-energy BL Lacertae objects // *Astronomy & Astrophysics*. — 2016. — Vol. 596. — A78. — DOI: [10.1051/0004-6361/201628974](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201628974).
79. *Angelakis E., RoboPol Collaboration, Blinov D. A., [et al.]*. The dependence of optical polarisation of blazars on the synchrotron peak frequency // *Proceedings of the 7th International Fermi Symposium*. — 2017. — P. 19. — DOI: [10.22323/1.312.0019](https://doi.org/10.22323/1.312.0019).
80. *Stockman H. S., Angel J. R. P., Miley G. K.* Alignment of the optical polarization with the radio structure of QSOs. // *The Astrophysical Journal*. — 1979. — Vol. 227. — P. L55–L58. — DOI: [10.1086/182866](https://doi.org/10.1086/182866).
81. *Antonucci R. R. J.* Optical polarization position angle versus radio structure axis in Seyfert galaxies // *Nature*. — 1983. — Vol. 303, no. 5913. — P. 158–159. — DOI: [10.1038/303158a0](https://doi.org/10.1038/303158a0).
82. *Antonucci R. R. J.* Optical polarization position angle versus radio source axis in radio galaxies // *Nature*. — 1982. — Vol. 299, no. 5884. — P. 605–606. — DOI: [10.1038/299605a0](https://doi.org/10.1038/299605a0).
83. *Impey C. D., Tapia S.* The Optical Polarization Properties of Quasars // *The Astrophysical Journal*. — 1990. — Vol. 354. — P. 124. — DOI: [10.1086/168672](https://doi.org/10.1086/168672).

84. *Pavlidou V., Angelakis E., Myserlis I., [et al.]*. The RoboPol optical polarization survey of gamma-ray-loud blazars // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2014. — Vol. 442, no. 2. — P. 1693–1705. — DOI: [10.1093/mnras/stu904](https://doi.org/10.1093/mnras/stu904).
85. *Kovalev Y. Y., Aller H. D., Aller M. F., [et al.]*. The Relation Between AGN Gamma-Ray Emission and Parsec-Scale Radio Jets // *The Astrophysical Journal*. — 2009. — Vol. 696, no. 1. — P. L17–L21. — DOI: [10.1088/0004-637X/696/1/L17](https://doi.org/10.1088/0004-637X/696/1/L17).
86. *Lister M. L., Homan D. C., Kadler M., [et al.]*. A Connection Between Apparent VLBA Jet Speeds and Initial Active Galactic Nucleus Detections Made by the Fermi Gamma-Ray Observatory // *The Astrophysical Journal*. — 2009. — Vol. 696, no. 1. — P. L22–L26. — DOI: [10.1088/0004-637X/696/1/L22](https://doi.org/10.1088/0004-637X/696/1/L22).
87. *Pacholczyk A. G.* Radio astrophysics. Nonthermal processes in galactic and extragalactic sources. — 1970.
88. *Ginzburg V. L.* Theoretical physics and astrophysics. — International Series in Natural Philosophy, Oxford: Pergamon, 1979.
89. *Lister M. L., Aller M. F., Aller H. D., [et al.]*. MOJAVE. XV. VLBA 15 GHz Total Intensity and Polarization Maps of 437 Parsec-scale AGN Jets from 1996 to 2017 // *The Astrophysical Journals*. — 2018. — Vol. 234. — P. 12. — DOI: [10.3847/1538-4365/aa9c44](https://doi.org/10.3847/1538-4365/aa9c44).
90. *Pushkarev A., Kovalev Y., Lister M., [et al.]*. Linear Polarization Properties of Parsec-Scale AGN Jets // *Galaxies*. — 2017. — Vol. 5, no. 4. — P. 93. — DOI: [10.3390/galaxies5040093](https://doi.org/10.3390/galaxies5040093).
91. *Kovalev Y. Y., Kellermann K. I., Lister M. L., [et al.]*. Sub-Milliarcsecond Imaging of Quasars and Active Galactic Nuclei. IV. Fine-Scale Structure // *The Astronomical Journal*. — 2005. — Vol. 130, no. 6. — P. 2473–2505. — DOI: [10.1086/497430](https://doi.org/10.1086/497430).
92. *Mead A. R. G., Ballard K. R., Brand P. W. J. L., [et al.]*. Optical and infrared polarimetry and photometry of blazars. // *Astronomy & Astrophysics, Suppl. Ser.* — 1990. — Vol. 83. — P. 183–204.
93. *Chandrasekhar S.* Radiative transfer. — New York: Dover, 1960.

94. *Sobolev V. V.* A treatise on radiative transfer. — Princeton, N.J., Van Nostrand, 1963.
95. *Beloborodov A. M.* Polarization Change Due to Fast Winds from Accretion Disks // *The Astrophysical Journal*. — 1998. — Vol. 496, no. 2. — P. L105–L108. — DOI: [10.1086/311260](https://doi.org/10.1086/311260).
96. *Goodrich R. W., Miller J. S.* Spectropolarimetry of High-Polarization Seyfert 1 Galaxies: Geometry and Kinematics of the Scattering Regions // *The Astrophysical Journal*. — 1994. — Vol. 434. — P. 82. — DOI: [10.1086/174706](https://doi.org/10.1086/174706).
97. *Goosmann R. W., Gaskell C. M.* Modeling optical and UV polarization of AGNs. I. Imprints of individual scattering regions // *Astronomy & Astrophysics*. — 2007. — Vol. 465. — P. 129–145. — DOI: [10.1051/0004-6361:20053555](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20053555).
98. *Barvainis R.* Hot Dust and the Near-Infrared Bump in the Continuum Spectra of Quasars and Active Galactic Nuclei // *The Astrophysical Journal*. — 1987. — Vol. 320. — P. 537. — DOI: [10.1086/165571](https://doi.org/10.1086/165571).
99. *Pier E. A., Krolik J. H.* Infrared Spectra of Obscuring Dust Tori around Active Galactic Nuclei. II. Comparison with Observations // *The Astrophysical Journal*. — 1993. — Vol. 418. — P. 673. — DOI: [10.1086/173427](https://doi.org/10.1086/173427).
100. *Fritz J., Franceschini A., Hatziminaoglou E.* Revisiting the infrared spectra of active galactic nuclei with a new torus emission model // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2006. — Vol. 366, no. 3. — P. 767–786. — DOI: [10.1111/j.1365-2966.2006.09866.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2006.09866.x).
101. *Nenkova M., Sirocky M. M., Ivezić Ž., [et al.]*. AGN Dusty Tori. I. Handling of Clumpy Media // *The Astrophysical Journal*. — 2008. — Vol. 685, no. 1. — P. 147–159. — DOI: [10.1086/590482](https://doi.org/10.1086/590482).
102. *Nenkova M., Sirocky M. M., Nikutta R., [et al.]*. AGN Dusty Tori. II. Observational Implications of Clumpiness // *The Astrophysical Journal*. — 2008. — Vol. 685, no. 1. — P. 160–180. — DOI: [10.1086/590483](https://doi.org/10.1086/590483).
103. *Hönig S. F., Kishimoto M.* The dusty heart of nearby active galaxies. II. From clumpy torus models to physical properties of dust around AGN // *Astronomy & Astrophysics*. — 2010. — Vol. 523. — A27. — DOI: [10.1051/0004-6361/200912676](https://doi.org/10.1051/0004-6361/200912676).

104. *Risaliti G., Elvis M., Nicastro F.* Ubiquitous Variability of X-Ray-absorbing Column Densities in Seyfert 2 Galaxies // *The Astrophysical Journal*. — 2002. — Vol. 571, no. 1. — P. 234–246. — DOI: [10.1086/324146](https://doi.org/10.1086/324146).
105. *Tristram K. R. W., Meisenheimer K., Jaffe W., [et al.]*. Resolving the complex structure of the dust torus in the active nucleus of the Circinus galaxy // *Astronomy & Astrophysics*. — 2007. — Vol. 474, no. 3. — P. 837–850. — DOI: [10.1051/0004-6361:20078369](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20078369).
106. *Zhao X., Marchesi S., Ajello M., [et al.]*. The properties of the AGN torus as revealed from a set of unbiased NuSTAR observations // *Astronomy & Astrophysics*. — 2021. — Vol. 650. — A57. — DOI: [10.1051/0004-6361/202140297](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140297).
107. *Tovmassian H. M.* On the relative number of Seyfert 1 and Seyfert 2 galaxies and the opening angle of dust torus // *Astronomische Nachrichten*. — 2001. — Vol. 322, no. 2. — P. 87–91. — DOI: [10.1002/1521-3994\(200106\)322:2<87::AID-ASNA87>3.0.CO;2-S](https://doi.org/10.1002/1521-3994(200106)322:2<87::AID-ASNA87>3.0.CO;2-S).
108. *Schmitt H. R., Antonucci R. R. J., Ulvestad J. S., [et al.]*. Testing the Unified Model with an Infrared-selected Sample of Seyfert Galaxies // *The Astrophysical Journal*. — 2001. — Vol. 555, no. 2. — P. 663–672. — DOI: [10.1086/321505](https://doi.org/10.1086/321505).
109. *Wolf S., Henning T.* AGN polarization models // *Astronomy & Astrophysics*. — 1999. — Vol. 341. — P. 675–682.
110. *Lyutikov M., Pariev V. I., Gabuzda D. C.* Polarization and structure of relativistic parsec-scale AGN jets // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2005. — Vol. 360, no. 3. — P. 869–891. — DOI: [10.1111/j.1365-2966.2005.08954.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2005.08954.x).
111. *Hughes P. A., Aller H. D., Aller M. F.* Polarized radio outbursts in BL Lacertae. II. The flux and polarization of a piston-driven shock. // *The Astrophysical Journal*. — 1985. — Vol. 298. — P. 301–315. — DOI: [10.1086/163611](https://doi.org/10.1086/163611).
112. *Li Y.-R., Zhang Z.-X., Jin C., [et al.]*. Untangling Optical Emissions of the Jet and Accretion Disk in the Flat-spectrum Radio Quasar 3C 273 with Reverberation Mapping Data // *The Astrophysical Journal*. — 2020. — Vol. 897, no. 1. — P. 18. — DOI: [10.3847/1538-4357/ab95a3](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab95a3).

113. *Benn C. R., Vigotti M., Carballo R., [et al.]*. Red quasars not so dusty. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 1998. — Vol. 295. — P. 451–456. — DOI: [10.1046/j.1365-8711.1998.t01-2-01327.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.1998.t01-2-01327.x).
114. *Roberts D. H., Gabuzda D. C., Wardle J. F. C.* Linear Polarization Structure of the BL Lacertae Object OJ 287 at Milliarcsecond Resolution // *The Astrophysical Journal*. — 1987. — Vol. 323. — P. 536. — DOI: [10.1086/165849](https://doi.org/10.1086/165849).
115. *Gabuzda D. C., Cawthorne T. V., Roberts D. H., [et al.]*. The Milliarcsecond Polarization Structure of Six BL Lacertae Objects // *The Astrophysical Journal*. — 1989. — Vol. 347. — P. 701. — DOI: [10.1086/168162](https://doi.org/10.1086/168162).
116. *Cawthorne T. V., Wardle J. F. C., Roberts D. H., [et al.]*. Milliarcsecond Polarization Structure of 24 Objects from the Pearson-Readhead Sample of Bright Extragalactic Radio Sources. I. The Images // *The Astrophysical Journal*. — 1993. — Vol. 416. — P. 496. — DOI: [10.1086/173253](https://doi.org/10.1086/173253).
117. *Cawthorne T. V., Wardle J. F. C., Roberts D. H., [et al.]*. Milliarcsecond Polarization Structure of 24 Objects from the Pearson-Readhead Sample of Bright Extragalactic Radio Sources. II. Discussion // *The Astrophysical Journal*. — 1993. — Vol. 416. — P. 519. — DOI: [10.1086/173254](https://doi.org/10.1086/173254).
118. *Gabuzda D. C., Kochenov P. Y., Cawthorne T. V.* Serendipitous VLBI observations of polarization intraday variability in three BL Lacertae objects // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2000. — Vol. 319, no. 4. — P. 1125–1135. — DOI: [10.1046/j.1365-8711.2000.03933.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.2000.03933.x).
119. *Lister M. L., Homan D. C.* MOJAVE: Monitoring of Jets in Active Galactic Nuclei with VLBA Experiments. I. First-Epoch 15 GHz Linear Polarization Images // *The Astronomical Journal*. — 2005. — Vol. 130, no. 4. — P. 1389–1417. — DOI: [10.1086/432969](https://doi.org/10.1086/432969).
120. *Aller M., Aller H., Hughes P.* The University of Michigan Centimeter-Band All Stokes Blazar Monitoring Program: Single-Dish Polarimetry as a Probe of Parsec-Scale Magnetic Fields // *Galaxies*. — 2017. — Vol. 5, no. 4. — P. 75. — DOI: [10.3390/galaxies5040075](https://doi.org/10.3390/galaxies5040075).
121. *Pushkarev A. B., Kovalev Y. Y.* Single-epoch VLBI imaging study of bright active galactic nuclei at 2 GHz and 8 GHz // *Astronomy & Astrophysics*. — 2012. — Vol. 544. — A34. — DOI: [10.1051/0004-6361/201219352](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201219352).

122. *Hovatta T., Aller M. F., Aller H. D., [et al.]*. MOJAVE: Monitoring of Jets in Active Galactic Nuclei with VLBA Experiments. XI. Spectral Distributions // *The Astronomical Journal*. — 2014. — Vol. 147, no. 6. — P. 143. — DOI: [10.1088/0004-6256/147/6/143](https://doi.org/10.1088/0004-6256/147/6/143).
123. *Lovelace R. V. E., Wang J. C. L., Sulkanen M. E.* Self-collimated Electromagnetic Jets from Magnetized Accretion Disks // *The Astrophysical Journal*. — 1987. — Vol. 315. — P. 504. — DOI: [10.1086/165156](https://doi.org/10.1086/165156).
124. *Vlahakis N., Königl A.* Relativistic Magnetohydrodynamics with Application to Gamma-Ray Burst Outflows. I. Theory and Semianalytic Trans-Alfvénic Solutions // *The Astrophysical Journal*. — 2003. — Vol. 596, no. 2. — P. 1080–1103. — DOI: [10.1086/378226](https://doi.org/10.1086/378226).
125. *Gabuzda D. C., Knuettel S., Reardon B.* Transverse Faraday-rotation gradients across the jets of 15 active galactic nuclei // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2015. — Vol. 450, no. 3. — P. 2441–2450. — DOI: [10.1093/mnras/stv555](https://doi.org/10.1093/mnras/stv555).
126. *Kravchenko E. V., Kovalev Y. Y., Sokolovsky K. V.* Parsec-scale Faraday rotation and polarization of 20 active galactic nuclei jets // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2017. — Vol. 467, no. 1. — P. 83–101. — DOI: [10.1093/mnras/stx021](https://doi.org/10.1093/mnras/stx021).
127. *Gabuzda D. C., Nagle M., Roche N.* The jets of AGN as giant coaxial cables // *Astronomy & Astrophysics*. — 2018. — Vol. 612. — A67. — DOI: [10.1051/0004-6361/201732136](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201732136).
128. *Benford G.* Current-carrying beams in astrophysics: models for double radio sources and jets. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 1978. — Vol. 183. — P. 29–48. — DOI: [10.1093/mnras/183.1.29](https://doi.org/10.1093/mnras/183.1.29).
129. *Chan K. L., Henriksen R. N.* On the supersonic dynamics of magnetized jets of thermal gas in radio galaxies // *The Astrophysical Journal*. — 1980. — Vol. 241. — P. 534–551. — DOI: [10.1086/158368](https://doi.org/10.1086/158368).
130. *Abdo A. A., Ackermann M., Ajello M., [et al.]*. A change in the optical polarization associated with a γ -ray flare in the blazar 3C279 // *Nature*. — 2010. — Vol. 463, no. 7283. — P. 919–923. — DOI: [10.1038/nature08841](https://doi.org/10.1038/nature08841).

131. *Jones D. H., Saunders W., Read M., [et al.]*. Second Data Release of the 6dF Galaxy Survey // Publications of the Astronomical Society of Australia. — 2005. — Vol. 22, no. 3. — P. 277–286. — DOI: [10.1071/AS05018](https://doi.org/10.1071/AS05018).
132. *Stickel M., Kuehr H.* An update of the optical identification status of the S4 radio source catalogue // Astronomy & Astrophysics, Suppl. Ser. — 1994. — Vol. 103. — P. 349–363.
133. *Rau A., Schady P., Greiner J., [et al.]*. BL Lacertae objects beyond redshift 1.3 - UV-to-NIR photometry and photometric redshift for Fermi/LAT blazars // Astronomy & Astrophysics. — 2012. — Vol. 538. — A26. — DOI: [10.1051/0004-6361/201118159](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201118159).
134. *Sargent W. L. W.* A Spectroscopic Survey of Compact and Peculiar Galaxies // The Astrophysical Journal. — 1970. — Vol. 160. — P. 405. — DOI: [10.1086/150443](https://doi.org/10.1086/150443).
135. *Thompson D. J., Djorgovski S., Vigotti M., [et al.]*. Identification and Spectroscopy of Radio Sources from the Third Bologna Survey // The Astrophysical Journals. — 1992. — Vol. 81. — P. 1. — DOI: [10.1086/191683](https://doi.org/10.1086/191683).
136. *Shaw M. S., Romani R. W., Cotter G., [et al.]*. Spectroscopy of the Largest Ever γ -Ray-selected BL Lac Sample // The Astrophysical Journal. — 2013. — Vol. 764, no. 2. — P. 135. — DOI: [10.1088/0004-637X/764/2/135](https://doi.org/10.1088/0004-637X/764/2/135).
137. *Varshalovich D. A., Levshakov S. A., Nazarov E. A., [et al.]*. Spectral observations of the quasar S5 0014+81. an analysis of the emission-line spectrum. // Astronomicheskii Zhurnal. — 1987. — Vol. 64. — P. 262–270.
138. *Shaw M. S., Romani R. W., Cotter G., [et al.]*. Spectroscopy of Broad-line Blazars from 1LAC // The Astrophysical Journal. — 2012. — Vol. 748, no. 1. — P. 49. — DOI: [10.1088/0004-637X/748/1/49](https://doi.org/10.1088/0004-637X/748/1/49).
139. *Lawrence C. R., Pearson T. J., Readhead A. C. S., [et al.]*. New redshifts of strong radio sources. // The Astronomical Journal. — 1986. — Vol. 91. — P. 494–495. — DOI: [10.1086/114027](https://doi.org/10.1086/114027).
140. *Kellermann K. I., Vermeulen R. C., Zensus J. A., [et al.]*. Sub-Milliarcsecond Imaging of Quasars and Active Galactic Nuclei // The Astronomical Journal. — 1998. — Vol. 115, no. 4. — P. 1295–1318. — DOI: [10.1086/300308](https://doi.org/10.1086/300308).

141. *Zensus J. A., Ros E., Kellermann K. I., [et al.]*. Sub-milliarcsecond Imaging of Quasars and Active Galactic Nuclei. II. Additional Sources // *The Astronomical Journal*. — 2002. — Vol. 124, no. 2. — P. 662–674. — DOI: [10.1086/341585](https://doi.org/10.1086/341585).
142. *Acero F., Ackermann M., Ajello M., [et al.]*. Fermi Large Area Telescope Third Source Catalog // *The Astrophysical Journals*. — 2015. — Vol. 218, no. 2. — P. 23. — DOI: [10.1088/0067-0049/218/2/23](https://doi.org/10.1088/0067-0049/218/2/23).
143. *Lister M. L., Aller M. F., Aller H. D., [et al.]*. MOJAVE. X. Parsec-scale Jet Orientation Variations and Superluminal Motion in Active Galactic Nuclei // *The Astronomical Journal*. — 2013. — Vol. 146, no. 5. — P. 120. — DOI: [10.1088/0004-6256/146/5/120](https://doi.org/10.1088/0004-6256/146/5/120).
144. *Lister M. L., Homan D. C., Kellermann K. I., [et al.]*. Monitoring Of Jets in Active Galactic Nuclei with VLBA Experiments. XVIII. Kinematics and Inner Jet Evolution of Bright Radio-loud Active Galaxies // *The Astrophysical Journal*. — 2021. — Vol. 923, no. 1. — P. 30. — DOI: [10.3847/1538-4357/ac230f](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac230f).
145. *Lister M. L., Aller H. D., Aller M. F., [et al.]*. MOJAVE: Monitoring of Jets in Active Galactic Nuclei with VLBA Experiments. V. Multi-Epoch VLBA Images // *The Astronomical Journal*. — 2009. — Vol. 137, no. 3. — P. 3718–3729. — DOI: [10.1088/0004-6256/137/3/3718](https://doi.org/10.1088/0004-6256/137/3/3718).
146. *Wardle J. F. C., Kronberg P. P.* The linear polarization of quasi-stellar radio sources at 3.71 and 11.1 centimeters. // *The Astrophysical Journal*. — 1974. — Vol. 194. — P. 249–255. — DOI: [10.1086/153240](https://doi.org/10.1086/153240).
147. *Hovatta T., Lister M. L., Aller M. F., [et al.]*. MOJAVE: Monitoring of Jets in Active Galactic Nuclei with VLBA Experiments. VIII. Faraday Rotation in Parsec-scale AGN Jets // *The Astronomical Journal*. — 2012. — Vol. 144, no. 4. — P. 105. — DOI: [10.1088/0004-6256/144/4/105](https://doi.org/10.1088/0004-6256/144/4/105).
148. *Aller M. F., Aller H. D., Hughes P. A.* Pearson-Readhead Survey Sources. II. The Long-Term Centimeter-Band Total Flux and Linear Polarization Properties of a Complete Radio Sample // *The Astrophysical Journal*. — 2003. — Vol. 586, no. 1. — P. 33–51. — DOI: [10.1086/367538](https://doi.org/10.1086/367538).

149. *Middelberg E., Roy A. L., Bach U., [et al.]*. Where Has All the Polarization Gone? // *Future Directions in High Resolution Astronomy*. Vol. 340 / ed. by J. Romney, M. Reid. — 2005. — P. 189. — (Astronomical Society of the Pacific Conference Series). — DOI: [10.48550/arXiv.astro-ph/0309385](https://doi.org/10.48550/arXiv.astro-ph/0309385).
150. *Laing R. A.* A model for the magnetic-field structure in extended radio sources. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 1980. — Vol. 193. — P. 439–449. — DOI: [10.1093/mnras/193.3.439](https://doi.org/10.1093/mnras/193.3.439).
151. *Berens P.* CircStat: A MATLAB Toolbox for Circular Statistics // *Journal of Statistical Software*. — 2009. — T. 31, № 10. — C. 1–21. — DOI: [10.18637/jss.v031.i10](https://doi.org/10.18637/jss.v031.i10).
152. *Virtanen P., Gommers R., Oliphant T. E., [et al.]*. SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python // *Nature Methods*. — 2020. — Vol. 17. — P. 261–272. — DOI: [10.1038/s41592-019-0686-2](https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2).
153. *Pashchenko I. N.* Using the bootstrap to assess uncertainties of VLBI results - I. The method and image-based errors // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2019. — Vol. 482, no. 2. — P. 1955–1965. — DOI: [10.1093/mnras/sty2654](https://doi.org/10.1093/mnras/sty2654).
154. *Briggs D. S.* High Fidelity Deconvolution of Moderately Resolved Sources : PhD thesis / Briggs D. S. — Socorro, New Mexico : The New Mexico Institute of Mining, Technology, 1995.
155. *Roberts D. H., Wardle J. F. C., Brown L. F.* Linear Polarization Radio Imaging at Milliarsecond Resolution // *The Astrophysical Journal*. — 1994. — Vol. 427. — P. 718. — DOI: [10.1086/174180](https://doi.org/10.1086/174180).
156. *Larionov V. M., Jorstad S. G., Marscher A. P. [и др.]*. The Outburst of the Blazar S5 0716+71 in 2011 October: Shock in a Helical Jet // *The Astrophysical Journal*. — 2013. — T. 768, № 1. — C. 40. — DOI: [10.1088/0004-637X/768/1/40](https://doi.org/10.1088/0004-637X/768/1/40).
157. *Cohen M. H., Savolainen T.* 180° rotations in the polarization angle for blazars // *Astronomy & Astrophysics*. — 2020. — Vol. 636. — A79. — DOI: [10.1051/0004-6361/201936907](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201936907).
158. *Kendall M. G.* A NEW MEASURE OF RANK CORRELATION // *Biometrika*. — 1938. — Vol. 30, no. 1/2. — P. 81–93. — DOI: [10.1093/biomet/30.1-2.81](https://doi.org/10.1093/biomet/30.1-2.81).

159. *Lister M. L., Homan D. C., Hovatta T., [et al.].* MOJAVE. XVII. Jet Kinematics and Parent Population Properties of Relativistically Beamed Radio-loud Blazars // *The Astrophysical Journal*. — 2019. — Vol. 874, no. 1. — P. 43. — DOI: [10.3847/1538-4357/ab08ee](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab08ee).
160. *Helmboldt J. F., Taylor G. B., Tremblay S., [et al.].* The VLBA Imaging and Polarimetry Survey at 5 GHz // *The Astrophysical Journal*. — 2007. — Vol. 658, no. 1. — P. 203–216. — DOI: [10.1086/511005](https://doi.org/10.1086/511005).
161. *Wardle J.* The Variable Rotation Measure Distribution in 3C 273 on Parsec Scales // *Galaxies*. — 2018. — Vol. 6, no. 1. — P. 5. — DOI: [10.3390/galaxies6010005](https://doi.org/10.3390/galaxies6010005).
162. *Zavala R. T., Taylor G. B.* Time-Variable Faraday Rotation Measures of 3C 273 and 3C 279 // *The Astrophysical Journal*. — 2001. — Vol. 550, no. 2. — P. L147–L150. — DOI: [10.1086/319653](https://doi.org/10.1086/319653).
163. *Lisakov M. M., Kravchenko E. V., Pushkarev A. B., [et al.].* An Oversized Magnetic Sheath Wrapping around the Parsec-scale Jet in 3C 273 // *The Astrophysical Journal*. — 2021. — Vol. 910, no. 1. — P. 35. — DOI: [10.3847/1538-4357/abe1bd](https://doi.org/10.3847/1538-4357/abe1bd).
164. *Zamaninasab M., Savolainen T., Clausen-Brown E., [et al.].* Evidence for a large-scale helical magnetic field in the quasar 3C 454.3 // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2013. — Vol. 436, no. 4. — P. 3341–3356. — DOI: [10.1093/mnras/stt1816](https://doi.org/10.1093/mnras/stt1816).
165. *Lister M. L.* Parsec-Scale Jet Polarization Properties of a Complete Sample of Active Galactic Nuclei at 43 GHz // *The Astrophysical Journal*. — 2001. — Vol. 562, no. 1. — P. 208–232. — DOI: [10.1086/323522](https://doi.org/10.1086/323522).
166. *Kardashev N. S.* Nonstationarity of Spectra of Young Sources of Nonthermal Radio Emission // *Soviet Astronomy*. — 1962. — Vol. 6. — P. 317.
167. *Porth O., Fendt C., Meliani Z., [et al.].* Synchrotron Radiation of Self-collimating Relativistic Magnetohydrodynamic Jets // *The Astrophysical Journal*. — 2011. — Vol. 737, no. 1. — P. 42. — DOI: [10.1088/0004-637X/737/1/42](https://doi.org/10.1088/0004-637X/737/1/42).

168. *Butuzova M. S., Pushkarev A. B.* Configuration of the global magnetic field in AGN parsec-scale jets // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2023. — Vol. 520, no. 4. — P. 6335–6349. — DOI: [10.1093/mnras/stad121](https://doi.org/10.1093/mnras/stad121).
169. *Pushkarev A., Gabuzda D. C.* Transverse magnetic field structures in BL Lacertae objects // *EVN Symposium 2000, Proceedings of the 5th european VLBI Network Symposium* / ed. by J. E. Conway, A. G. Polatidis, R. S. Booth, [et al.]. — 2000. — P. 63.
170. *Aloy M.-A., Gómez J.-L., Ibáñez J.-M., [et al.]*. Radio Emission from Three-dimensional Relativistic Hydrodynamic Jets: Observational Evidence of Jet Stratification // *The Astrophysical Journal, Letters*. — 2000. — Vol. 528, no. 2. — P. L85–L88. — DOI: [10.1086/312436](https://doi.org/10.1086/312436).
171. *Clausen-Brown E., Lyutikov M., Kharb P.* Signatures of large-scale magnetic fields in active galactic nuclei jets: transverse asymmetries // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2011. — Vol. 415, no. 3. — P. 2081–2092. — DOI: [10.1111/j.1365-2966.2011.18757.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2011.18757.x).
172. *Fuentes A., Gómez J. L., Martí J. M., [et al.]*. Total and Linearly Polarized Synchrotron Emission from Overpressured Magnetized Relativistic Jets // *The Astrophysical Journal*. — 2018. — Vol. 860, no. 2. — P. 121. — DOI: [10.3847/1538-4357/aac091](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aac091).
173. *Kramer J. A., MacDonald N. R.* Ray-tracing in relativistic jet simulations: A polarimetric study of magnetic field morphology and electron scaling relations // *Astronomy & Astrophysics*. — 2021. — Vol. 656. — A143. — DOI: [10.1051/0004-6361/202141454](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202141454).
174. *Murphy E., Cawthorne T. V., Gabuzda D. C.* Analysing the transverse structure of the relativistic jets of active galactic nuclei // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2013. — Vol. 430, no. 3. — P. 1504–1515. — DOI: [10.1093/mnras/sts561](https://doi.org/10.1093/mnras/sts561).
175. *Zakamska N. L., Begelman M. C., Blandford R. D.* Hot Self-Similar Relativistic Magnetohydrodynamic Flows // *The Astrophysical Journal*. — 2008. — Vol. 679, no. 2. — P. 990–999. — DOI: [10.1086/587870](https://doi.org/10.1086/587870).

176. *Gómez J. L., Roca-Sogorb M., Agudo I., [et al.].* On the Source of Faraday Rotation in the Jet of the Radio Galaxy 3C 120 // *The Astrophysical Journal*. — 2011. — Vol. 733, no. 1. — P. 11. — DOI: [10.1088/0004-637X/733/1/11](https://doi.org/10.1088/0004-637X/733/1/11).
177. *Gabuzda D. C., Reichstein A. R., O'Neill E. L.* Are spine-sheath polarization structures in the jets of active galactic nuclei associated with helical magnetic fields? // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2014. — Vol. 444, no. 1. — P. 172–184. — DOI: [10.1093/mnras/stu1381](https://doi.org/10.1093/mnras/stu1381).
178. *Gabuzda D. C., Roche N., Kirwan A., [et al.].* Parsec scale Faraday-rotation structure across the jets of nine active galactic nuclei // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2017. — Vol. 472, no. 2. — P. 1792–1801. — DOI: [10.1093/mnras/stx2127](https://doi.org/10.1093/mnras/stx2127).
179. *Laing R. A., Bridle A. H.* Systematic properties of decelerating relativistic jets in low-luminosity radio galaxies // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2014. — Vol. 437, no. 4. — P. 3405–3441. — DOI: [10.1093/mnras/stt2138](https://doi.org/10.1093/mnras/stt2138).

Приложение А

Стековые и медианные изображения, распределения переменности линейной поляризации на частоте 15 ГГц для 15 АЯГ

В этом Приложении приведены стековые, медианные изображения и карты переменности степени и направления линейной поляризации на частоте 15 ГГц для 15 источников выборки с наиболее богатой/протяженной структурой в линейной поляризации. Все Рисунки опубликованы в статьях [A2; A3].

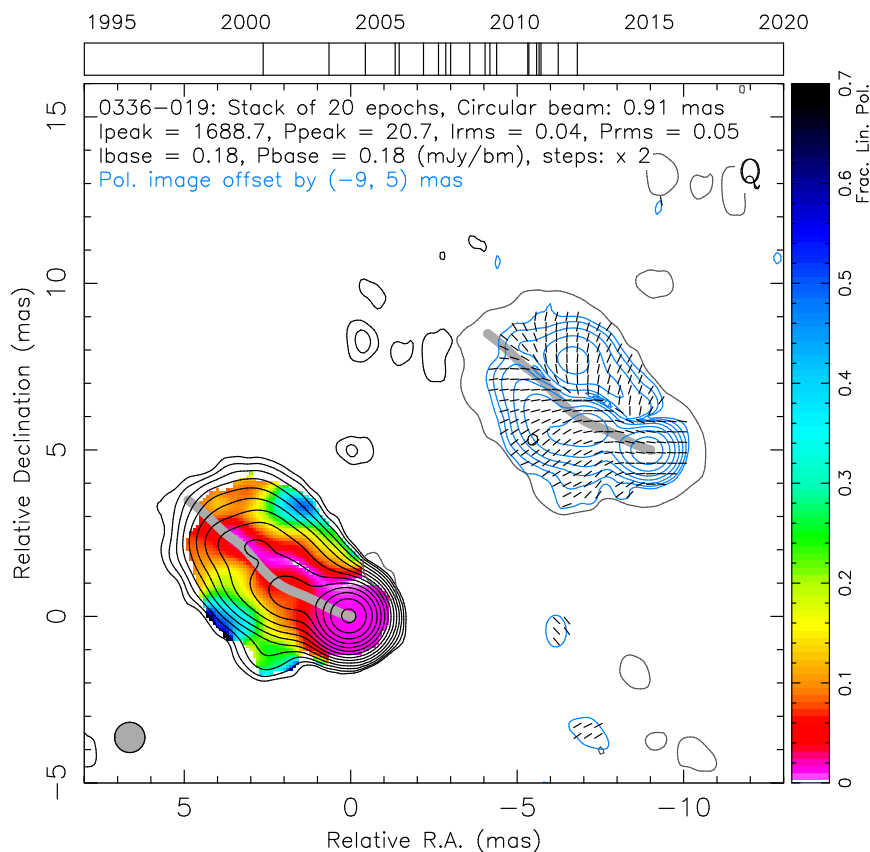


Рисунок А.1 — Стековая карта линейной поляризации для квазара 0336-019. Обозначения такие же, как на Рисунке 2.7.

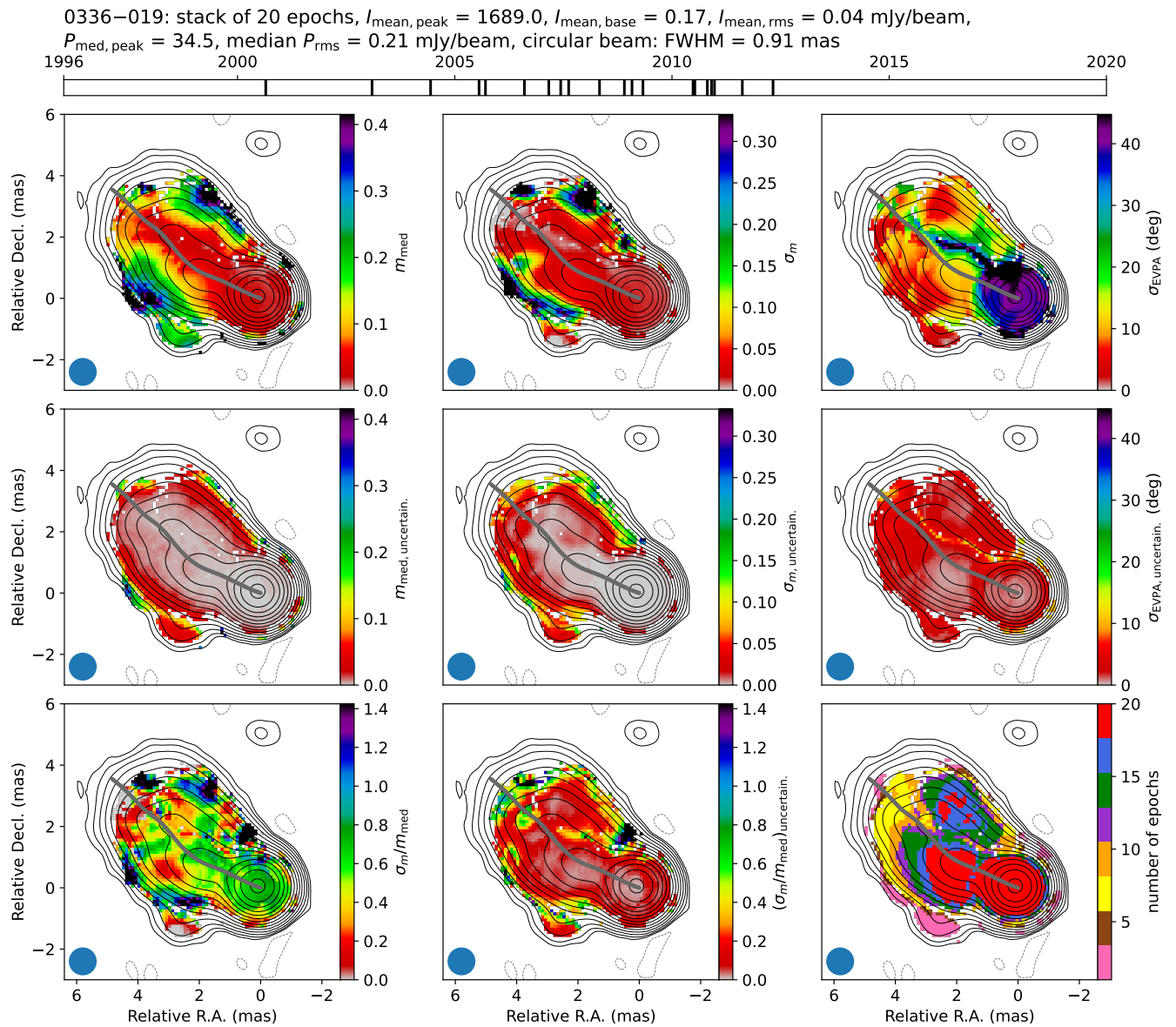


Рисунок А.2 — Карты переменности линейной поляризации и m_{median} для квазара 0336–019. Обозначения такие же, как на Рисунке 2.11.

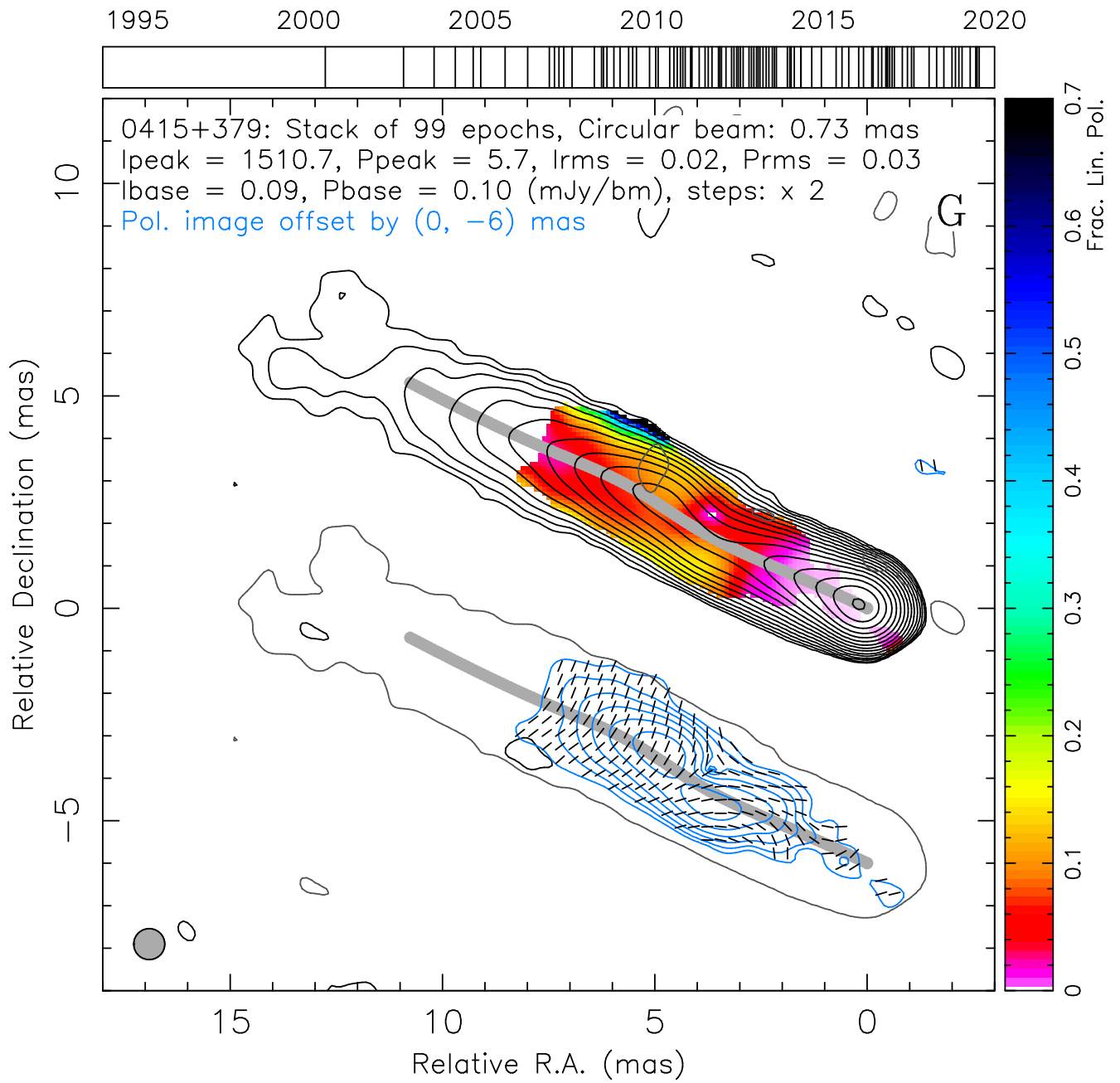


Рисунок А.3 — Стековая карта линейной поляризации для радиогалактики 0415+379. Обозначения такие же, как на Рисунке 2.7.

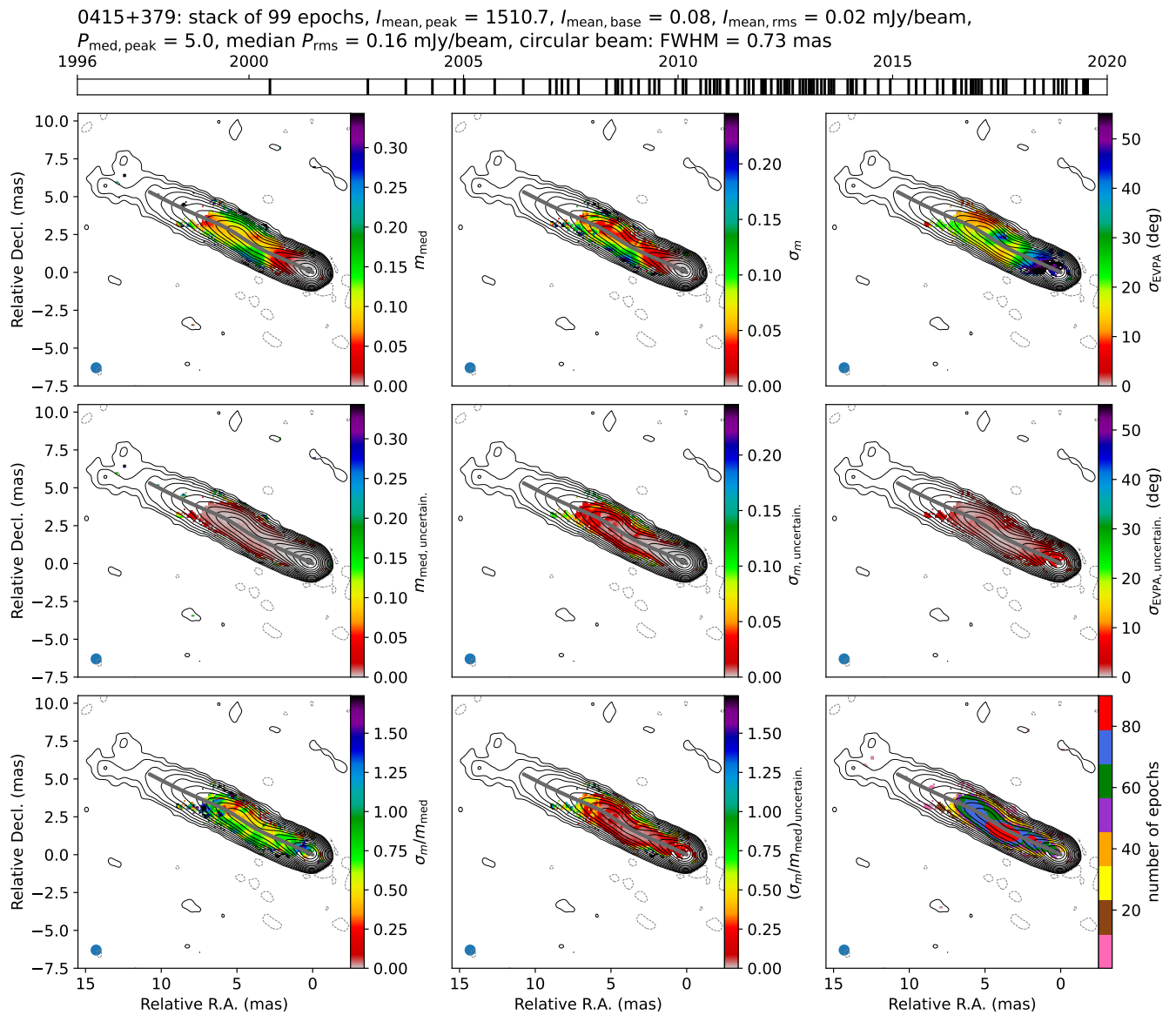


Рисунок А.4 — Карты переменности линейной поляризации и m_{median} для радиогалактики 0415+379. Обозначения такие же, как на Рисунке 2.11.

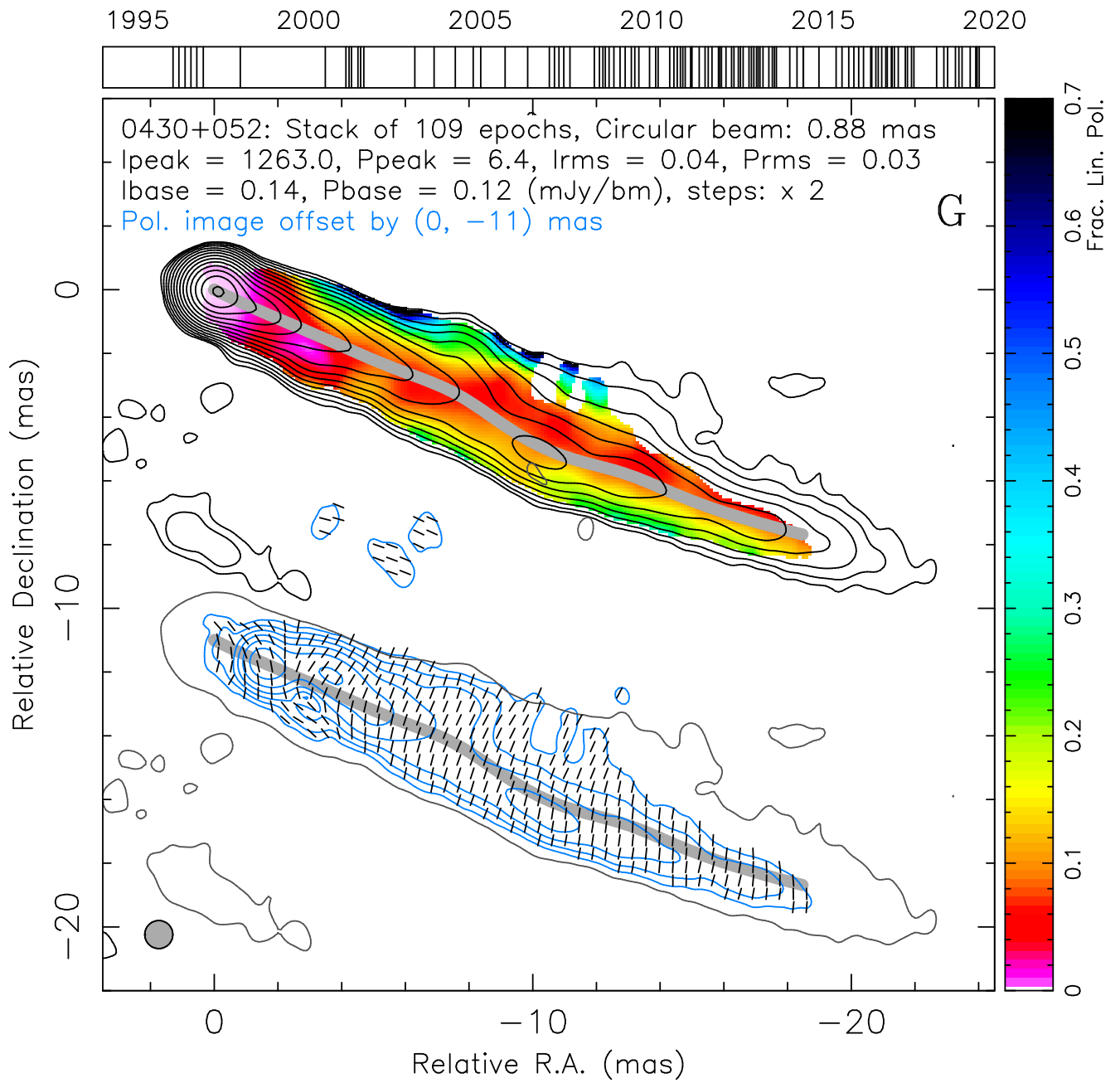


Рисунок А.5 — Стековая карта линейной поляризации для радиогалактики 0430+052. Обозначения такие же, как на Рисунке 2.7.

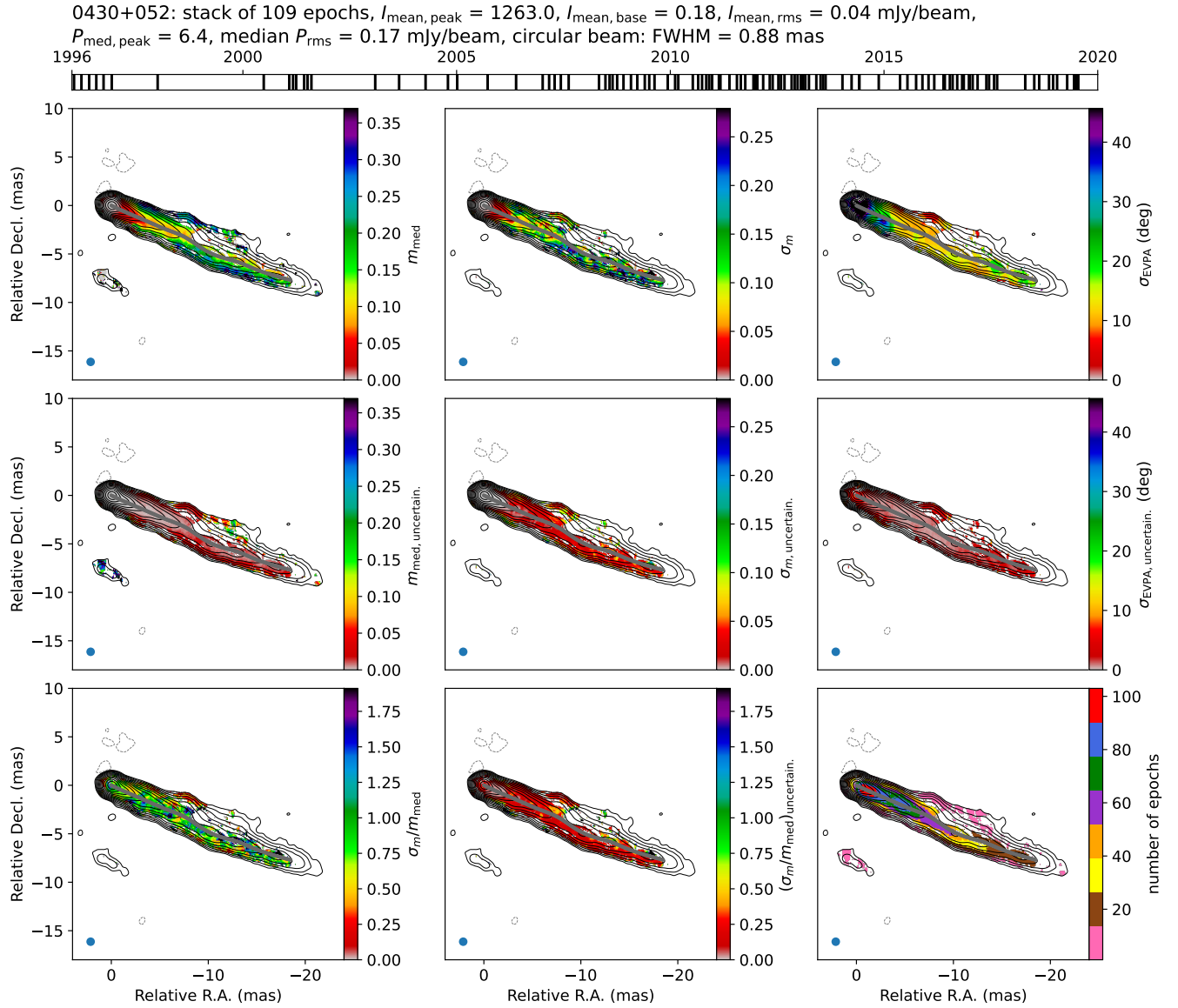


Рисунок А.6 — Карты переменности линейной поляризации и m_{median} для радиогалактики 0430+052. Обозначения такие же, как на Рисунке 2.11.

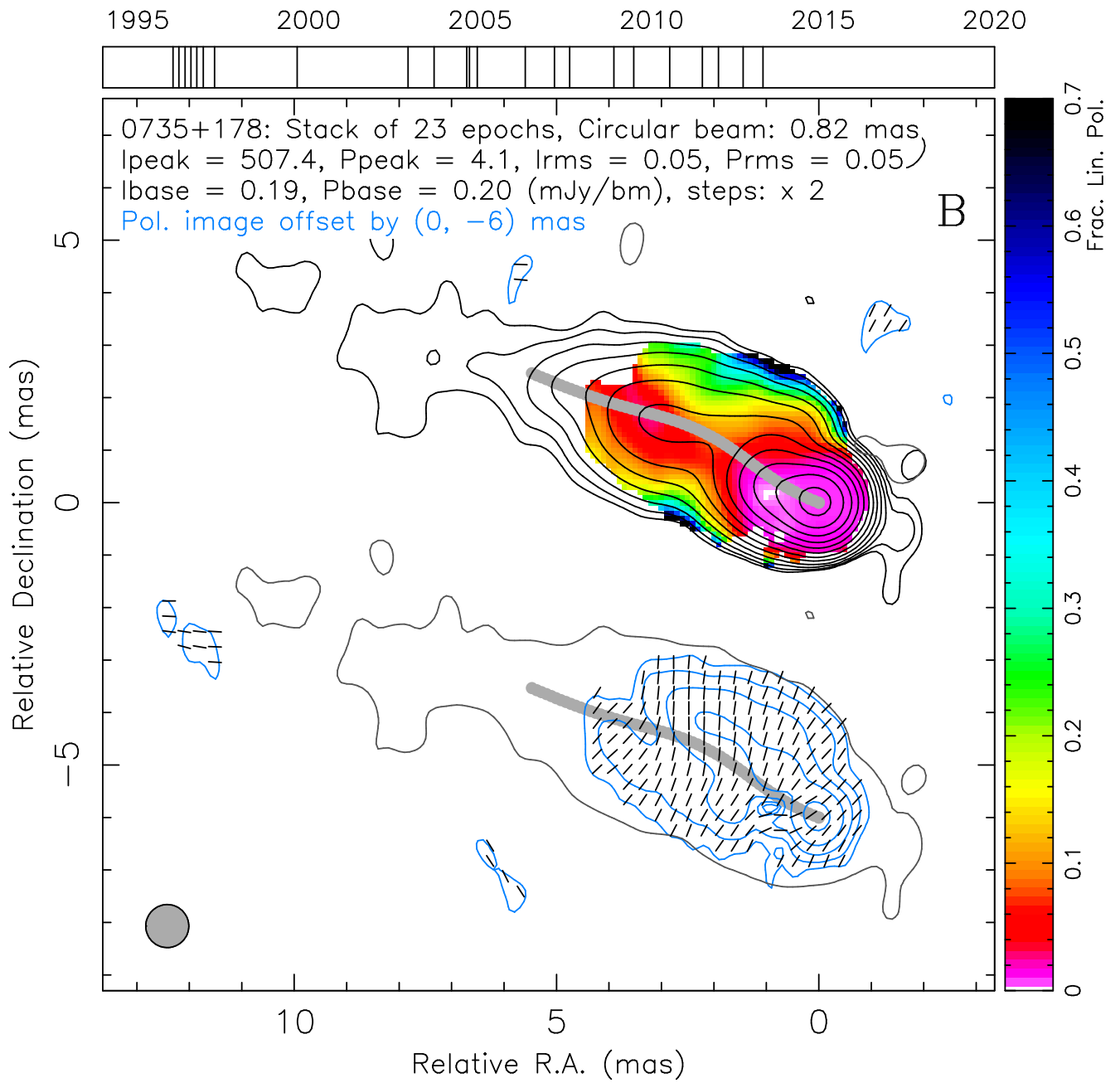


Рисунок А.7 — Стековая карта линейной поляризации для лацертиды 0735+178. Обозначения такие же, как на Рисунке 2.7.

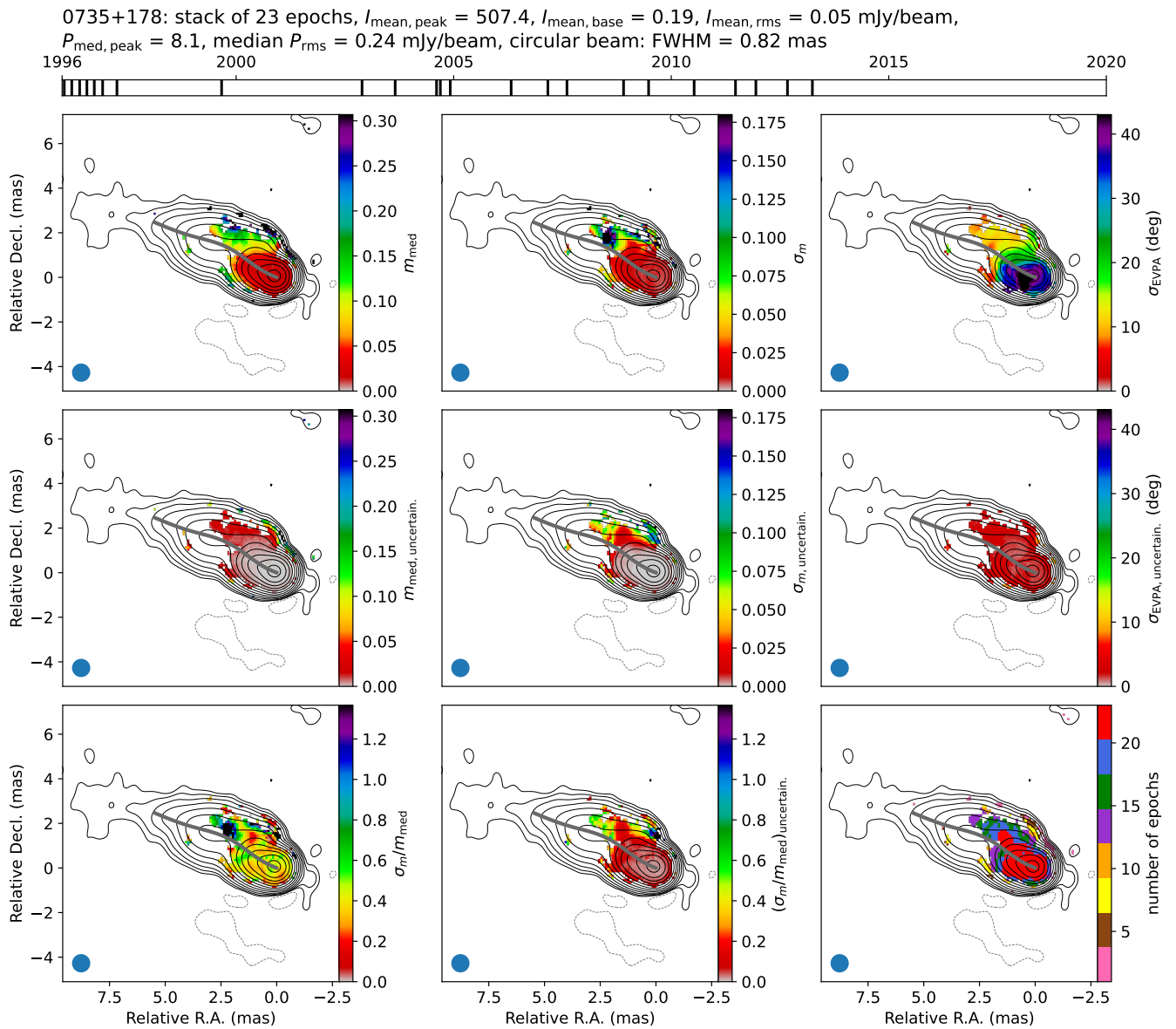


Рисунок А.8 — Карты переменности линейной поляризации и m_{median} для лацериды 0735+178. Обозначения такие же, как на Рисунке 2.11.

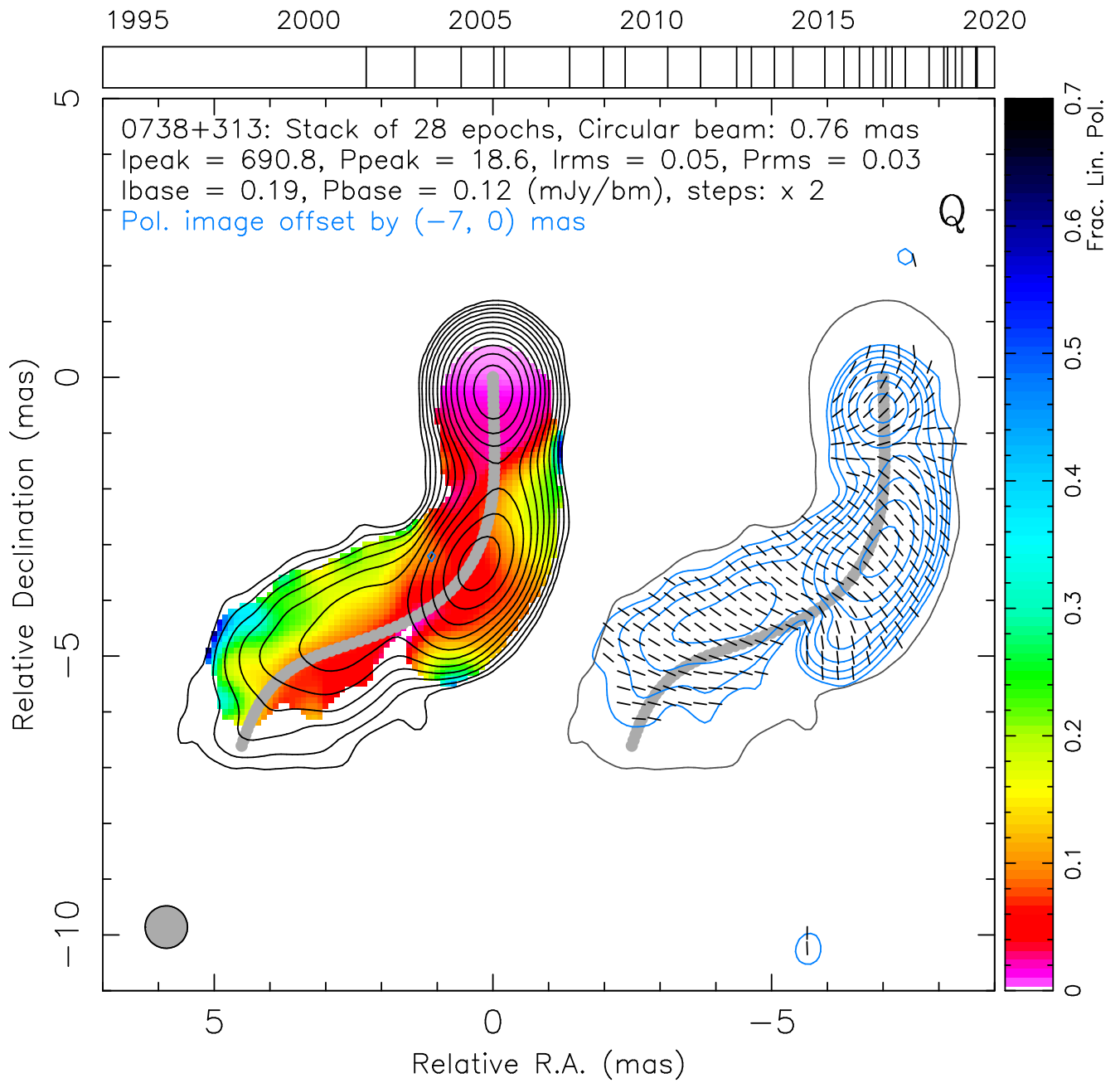


Рисунок А.9 — Стековая карта линейной поляризации для квазара 0738+313. Обозначения такие же, как на Рисунке 2.7.

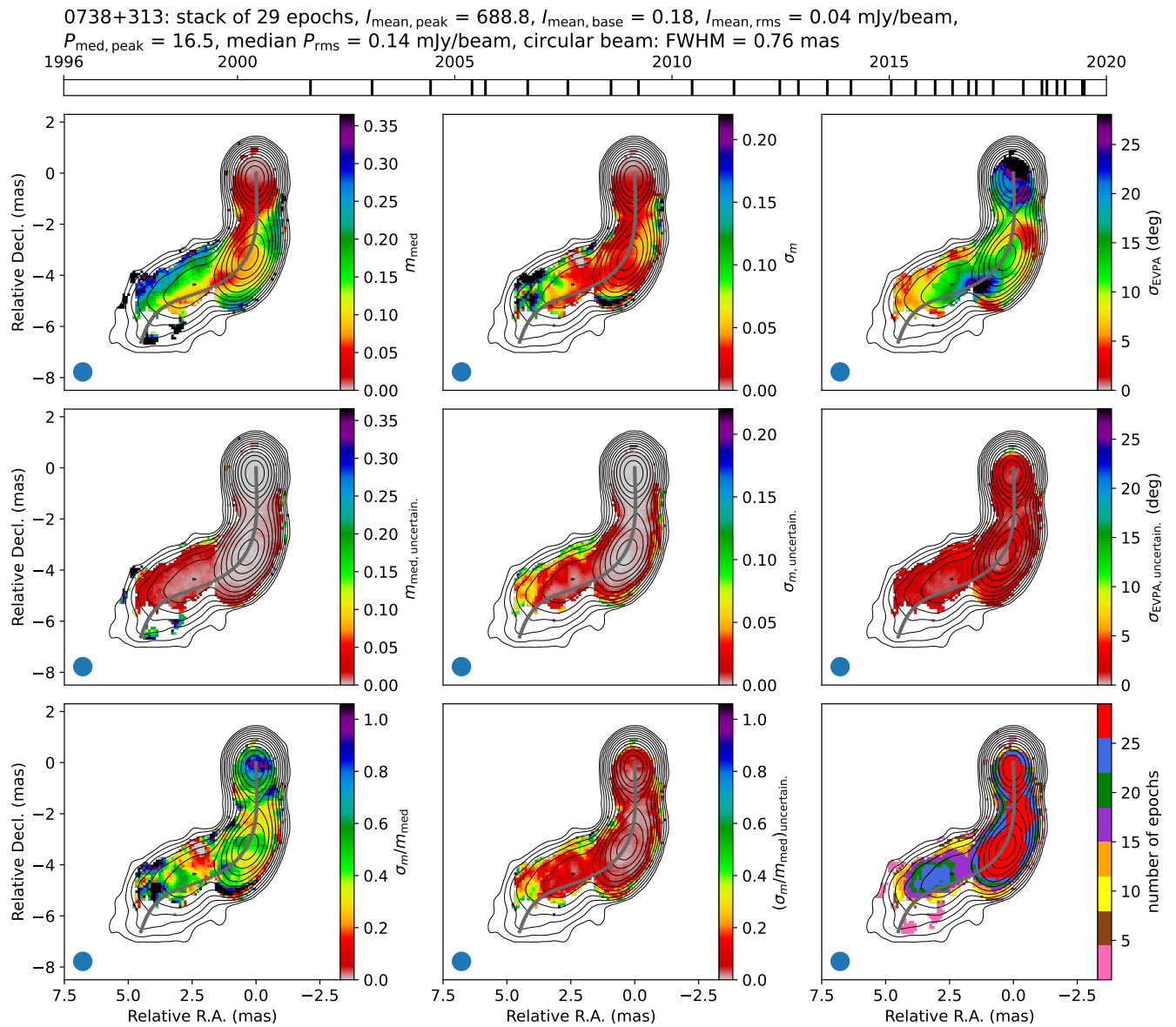


Рисунок А.10 — Карты переменности линейной поляризации и m_{median} для квазара 0738+313. Обозначения такие же, как на Рисунке 2.11.

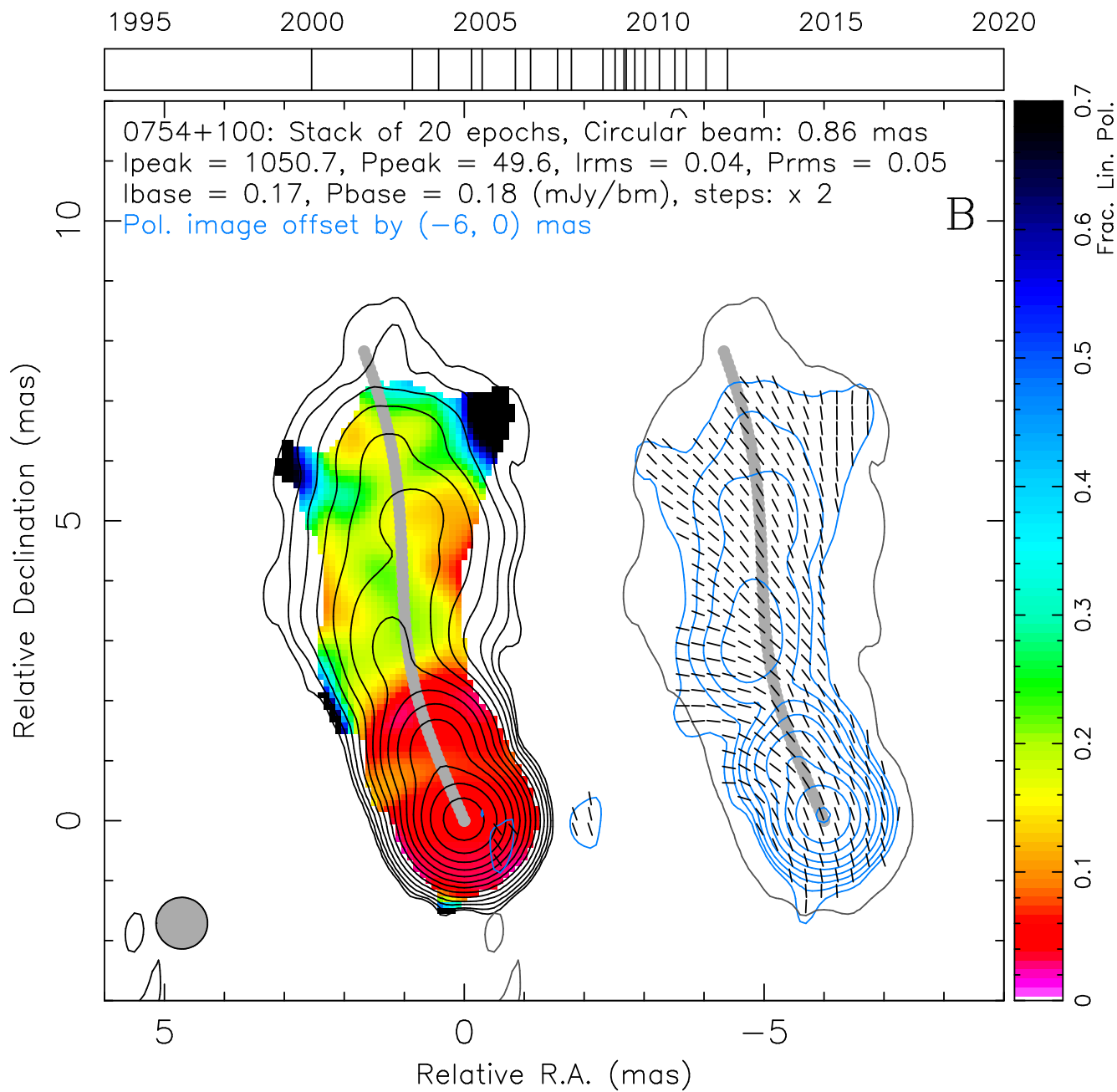


Рисунок А.11 — Стековая карта линейной поляризации для лацертиды 0754+100. Обозначения такие же, как на Рисунке 2.7.

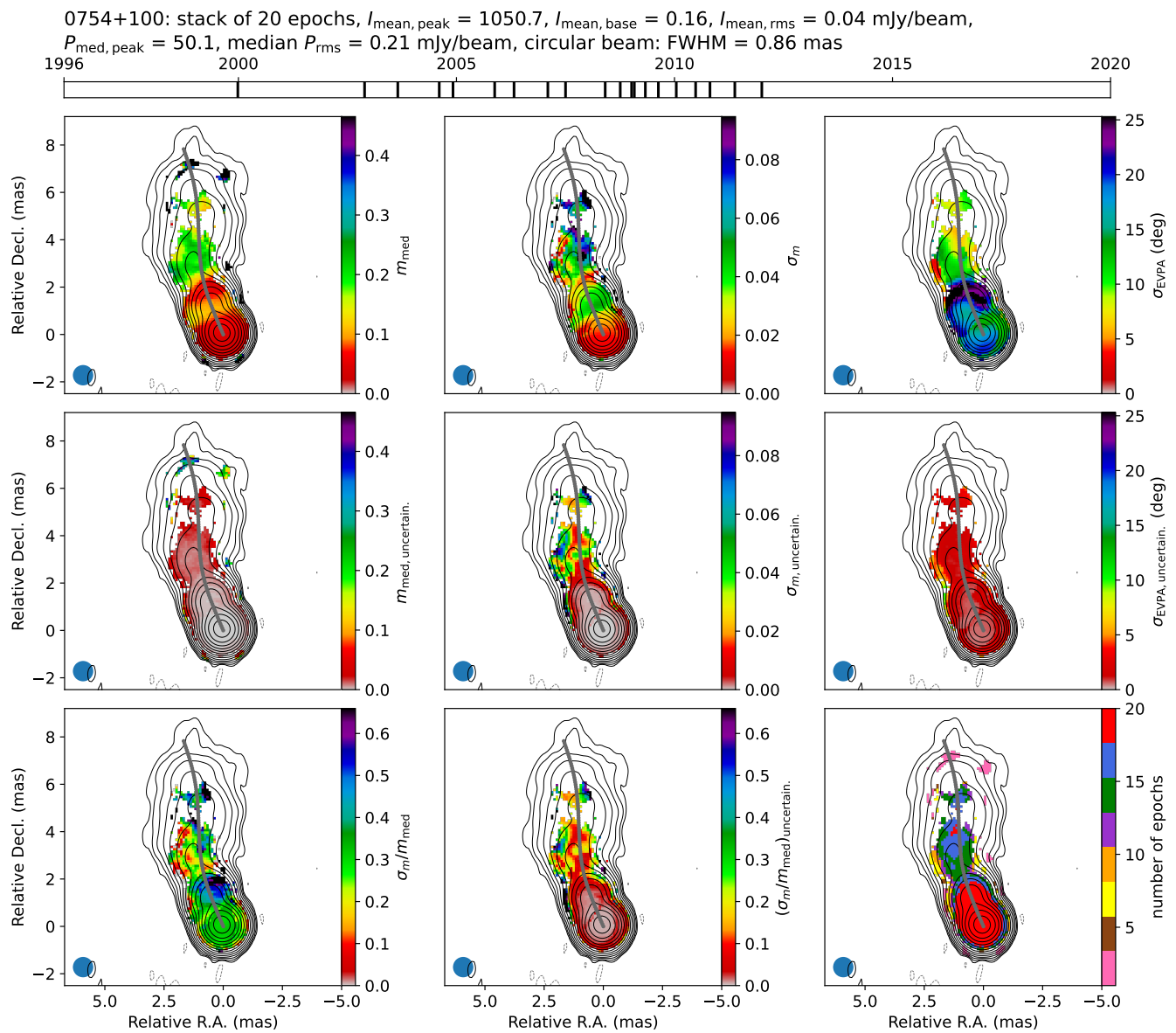


Рисунок А.12 — Карты переменности линейной поляризации и m_{median} для лацертиды 0754+100. Обозначения такие же, как на Рисунке 2.11.

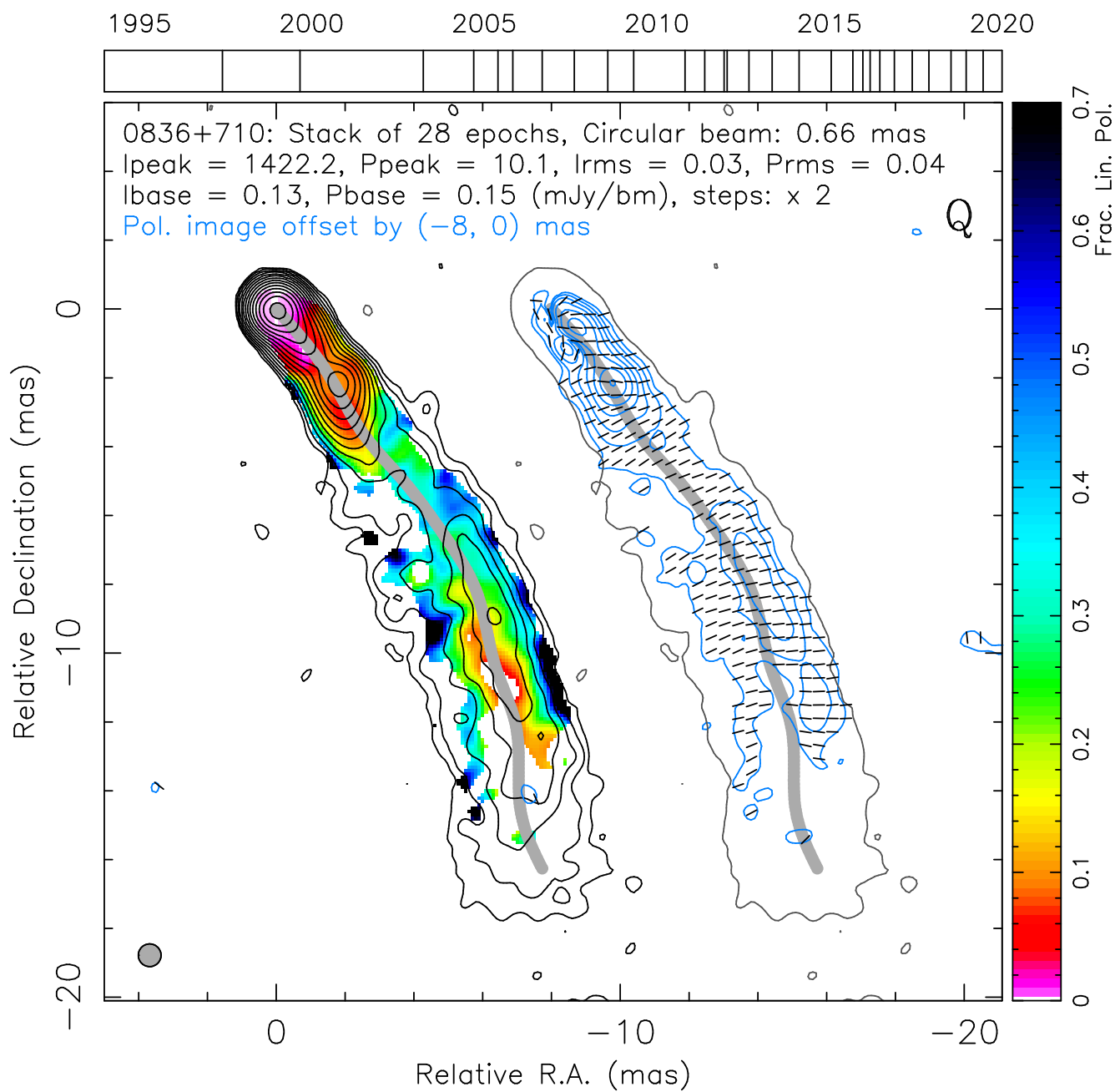


Рисунок А.13 — Стековая карта линейной поляризации для квазара 0836+710. Обозначения такие же, как на Рисунке 2.7.

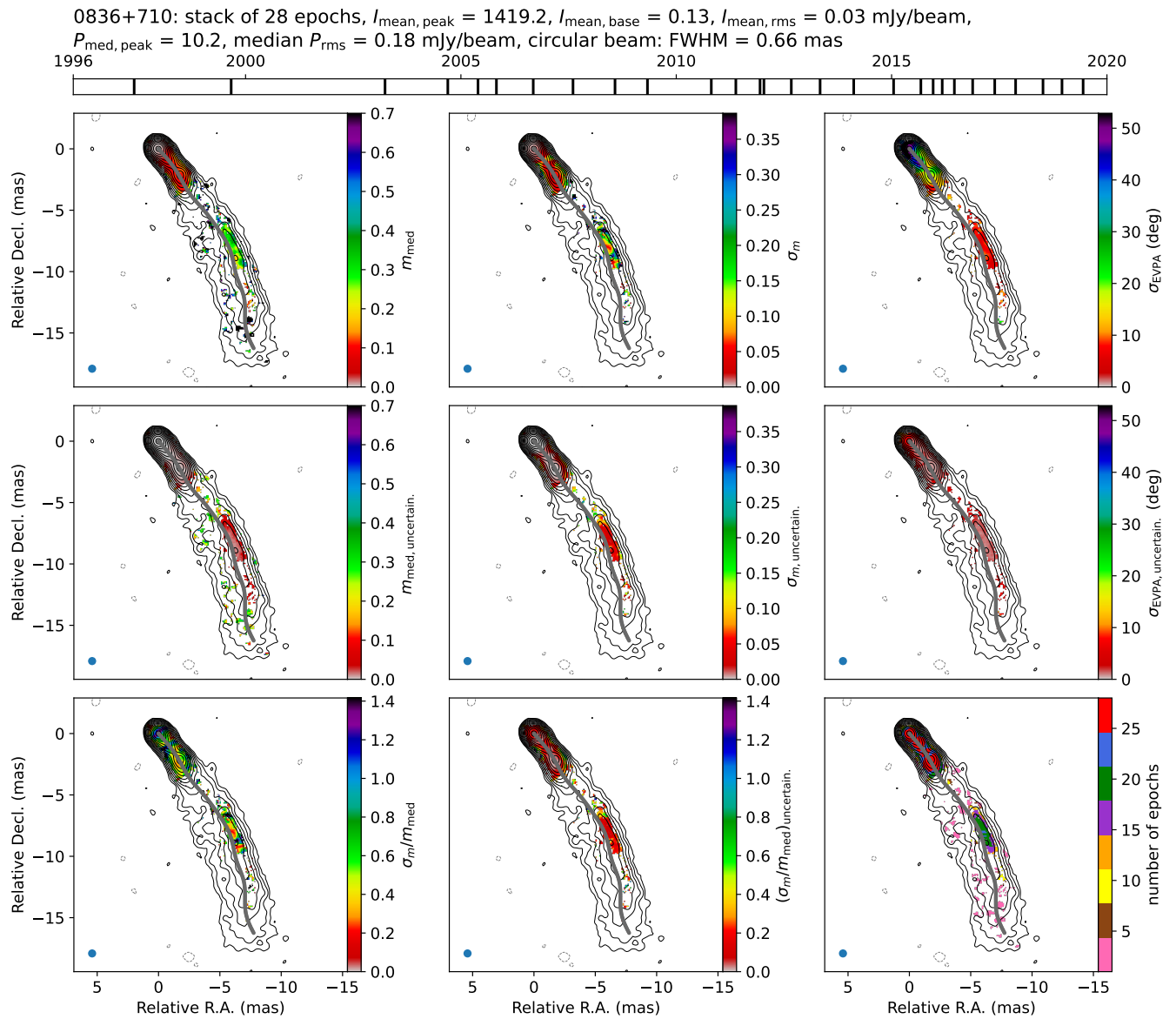


Рисунок А.14 — Карты переменности линейной поляризации и m_{median} для квазара 0836+710. Обозначения такие же, как на Рисунке 2.11.

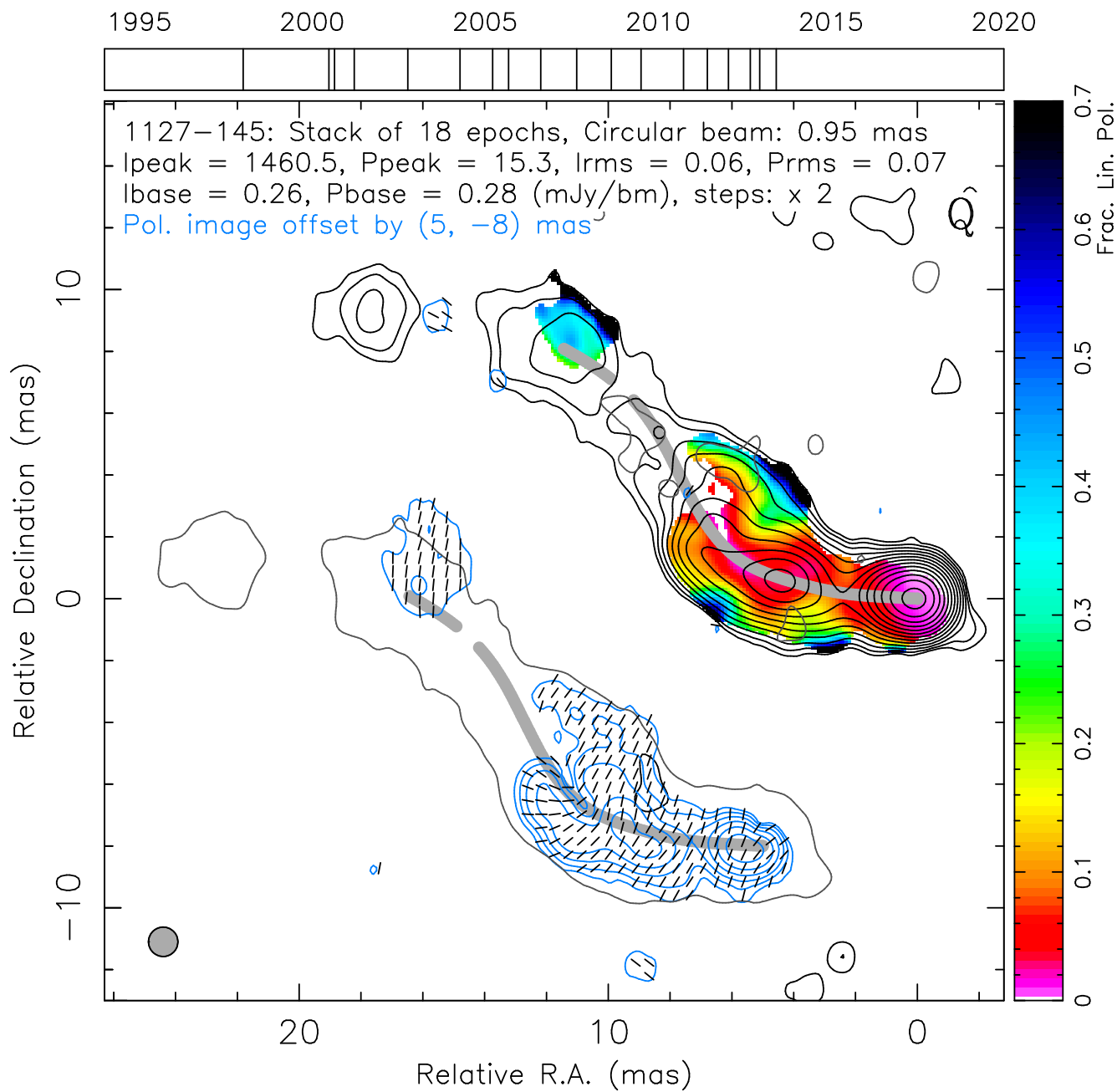


Рисунок А.15 — Стековая карта линейной поляризации для квазара 1127–145. Обозначения такие же, как на Рисунке 2.7.

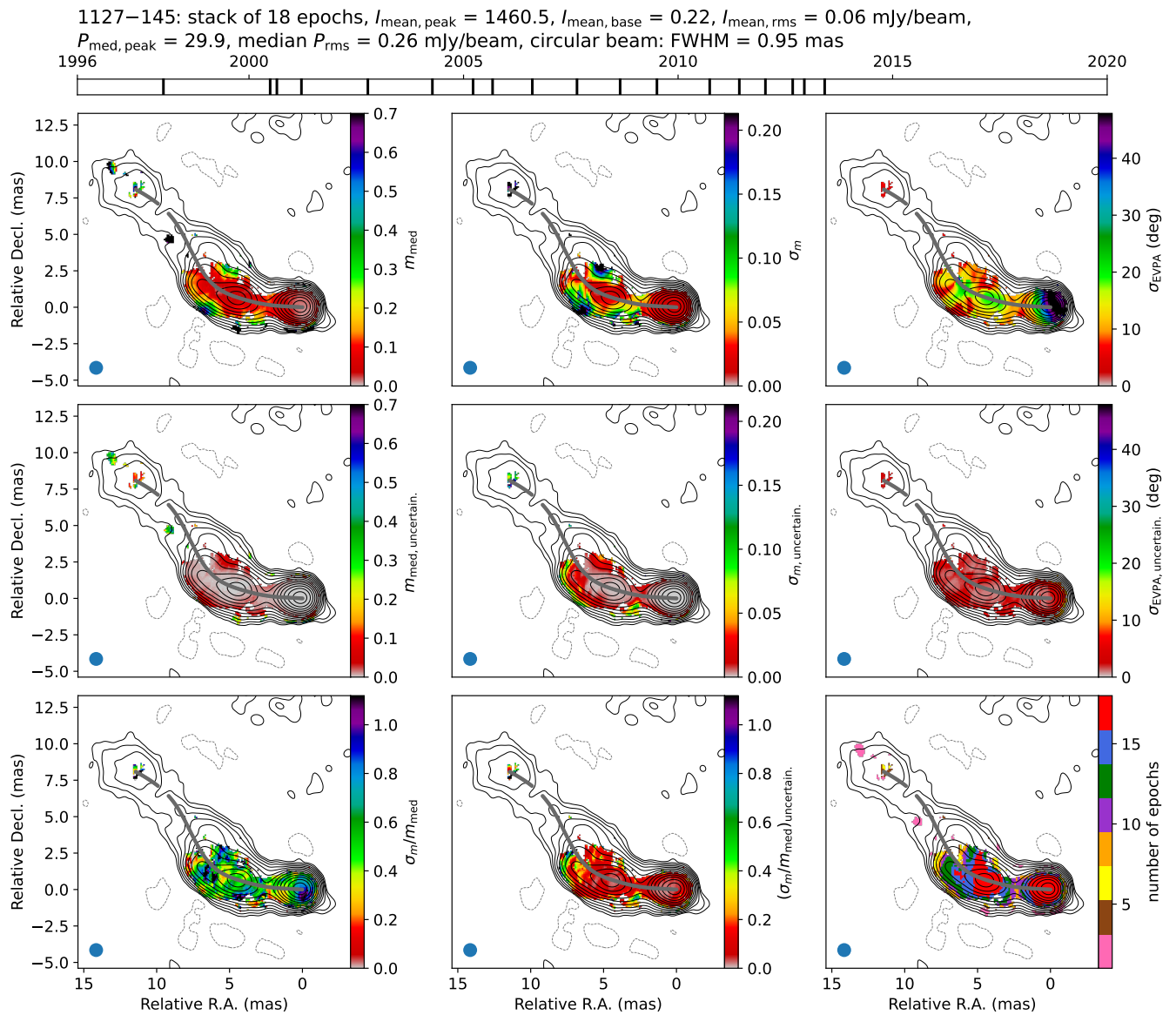


Рисунок А.16 — Карты переменности линейной поляризации и m_{median} для квазара 1127–145. Обозначения такие же, как на Рисунке 2.11.

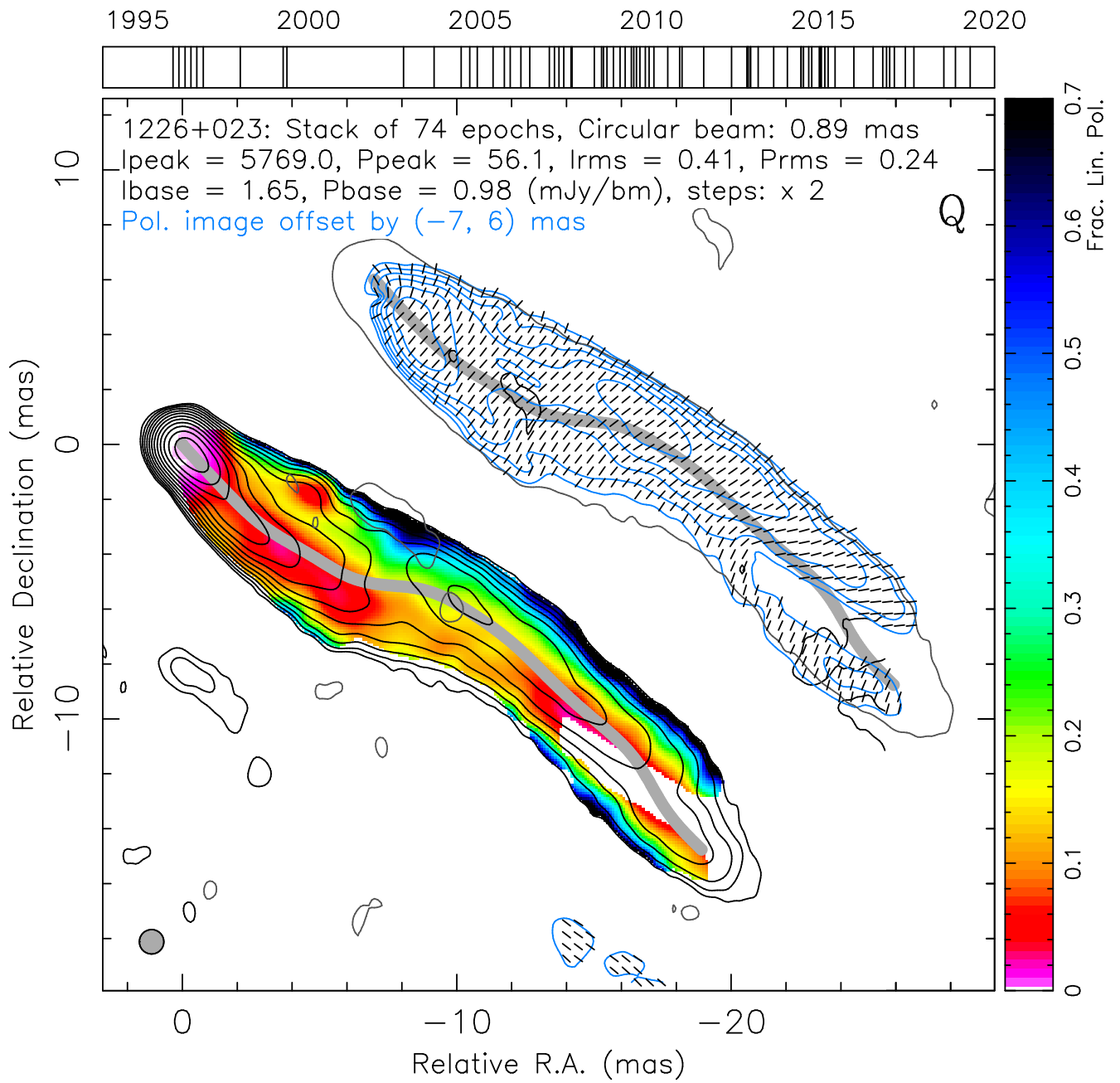


Рисунок А.17 — Стековая карта линейной поляризации для квазара 1226+023. Обозначения такие же, как на Рисунке 2.7.

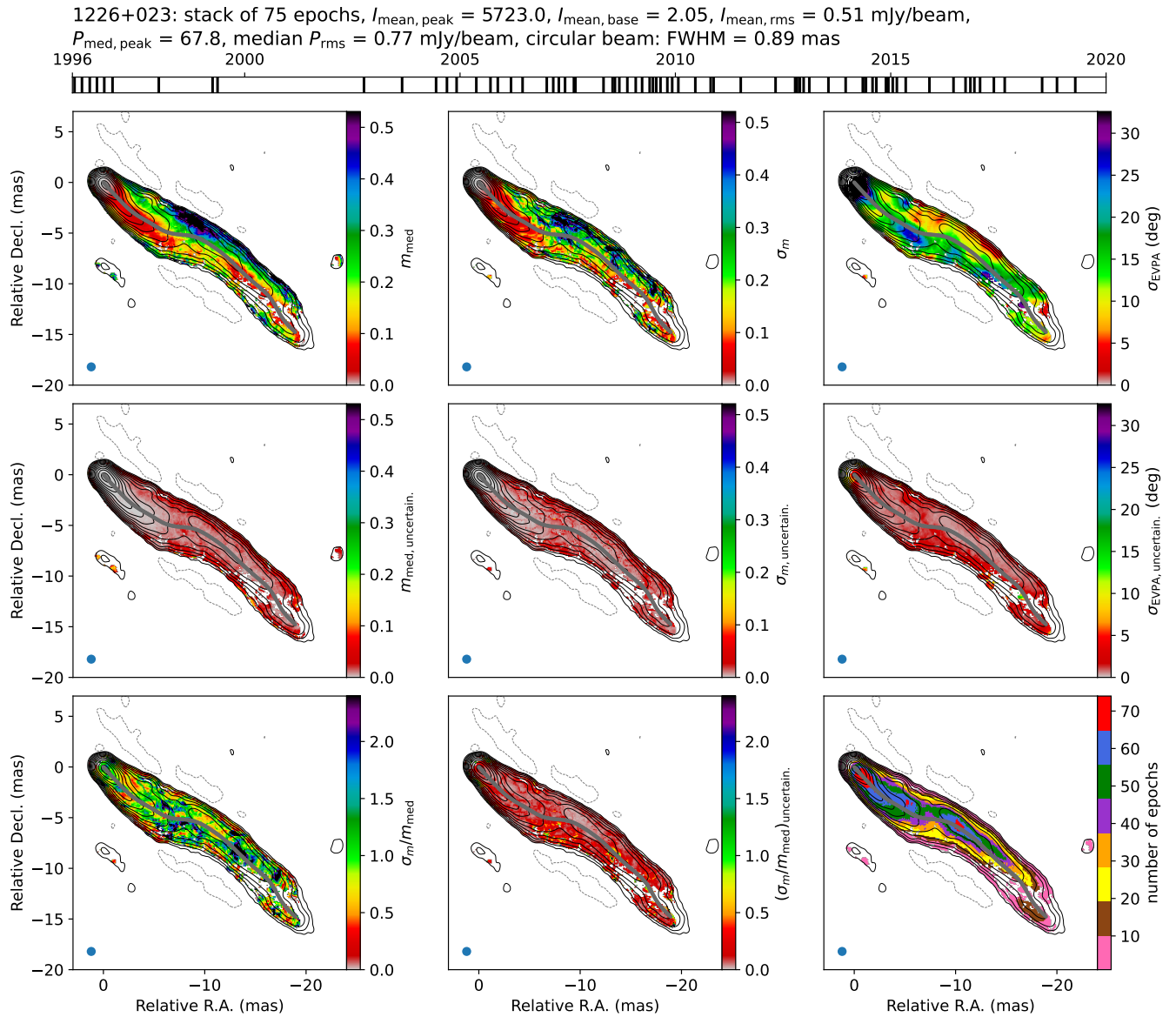


Рисунок А.18 — Карты переменности линейной поляризации и m_{median} для квазара 1226+023. Обозначения такие же, как на Рисунке 2.11.

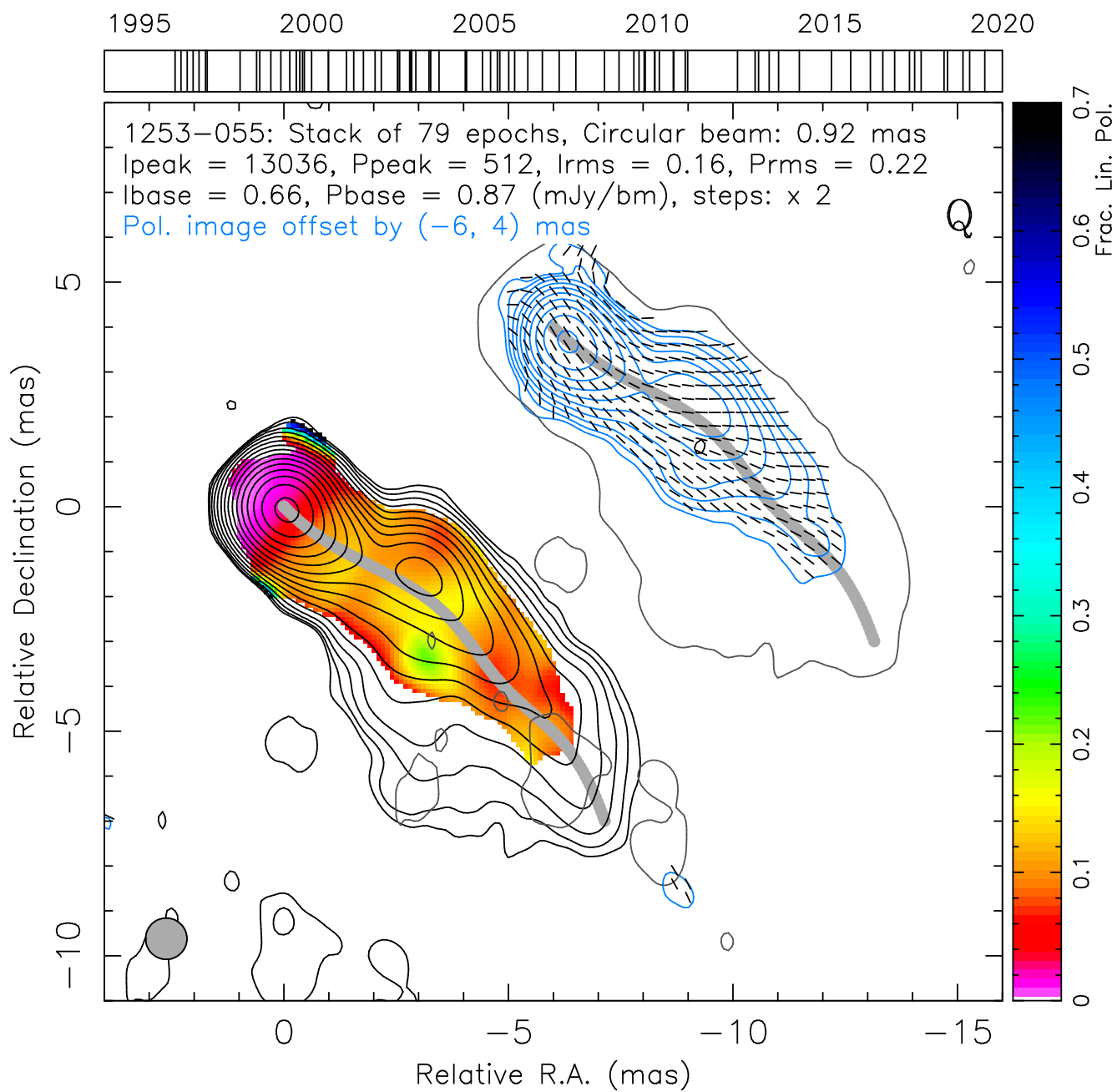


Рисунок А.19 — Стековая карта линейной поляризации для квазара 1253–055. Обозначения такие же, как на Рисунке 2.7.

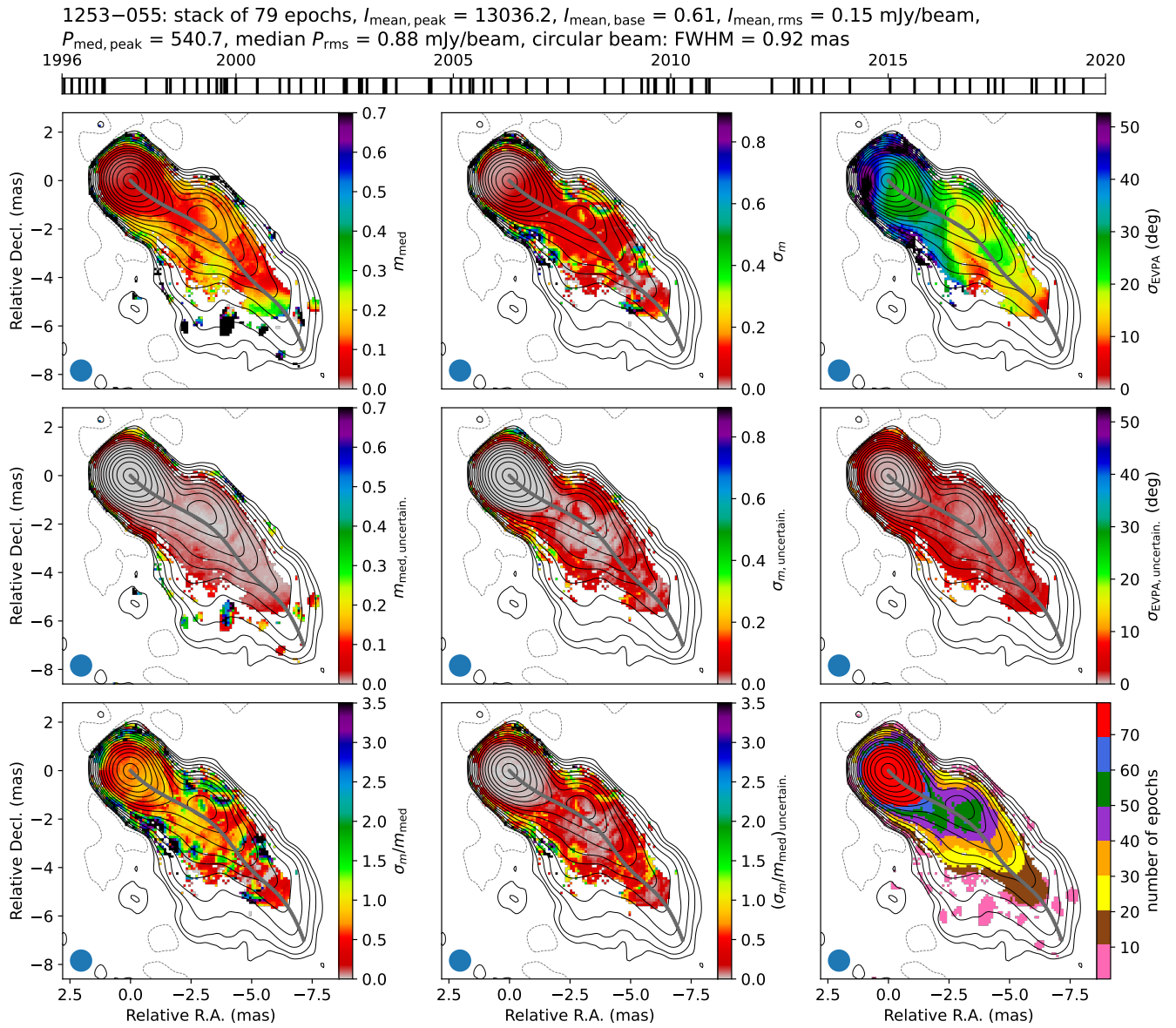


Рисунок А.20 — Карты переменности линейной поляризации и m_{median} для квазара 1253–055. Обозначения такие же, как на Рисунке 2.11.

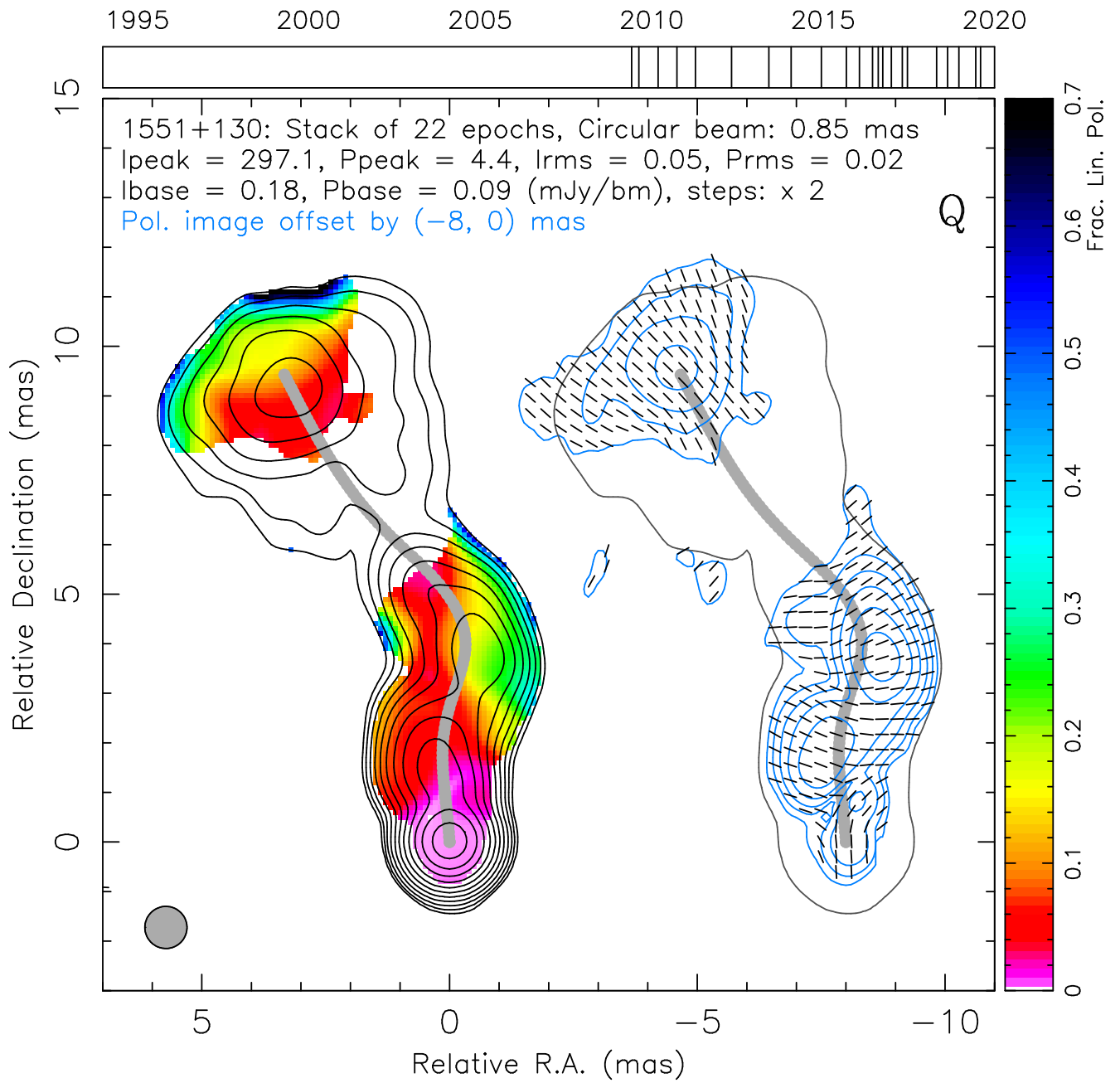


Рисунок А.21 — Стековая карта линейной поляризации для квазара 1551+130. Обозначения такие же, как на Рисунке 2.7.

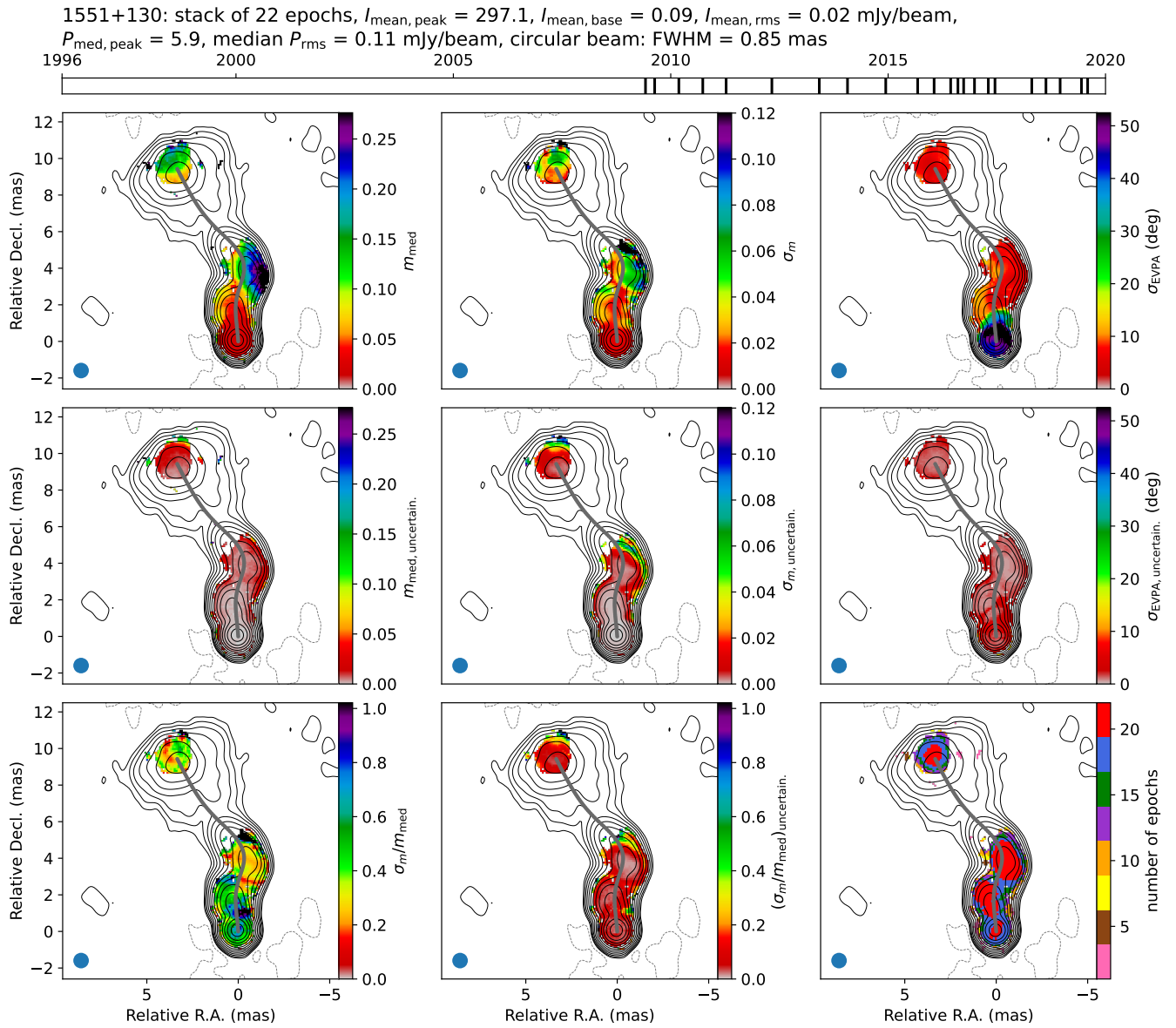


Рисунок А.22 — Карты переменности линейной поляризации и m_{median} для квазара 1551+130. Обозначения такие же, как на Рисунке 2.11.

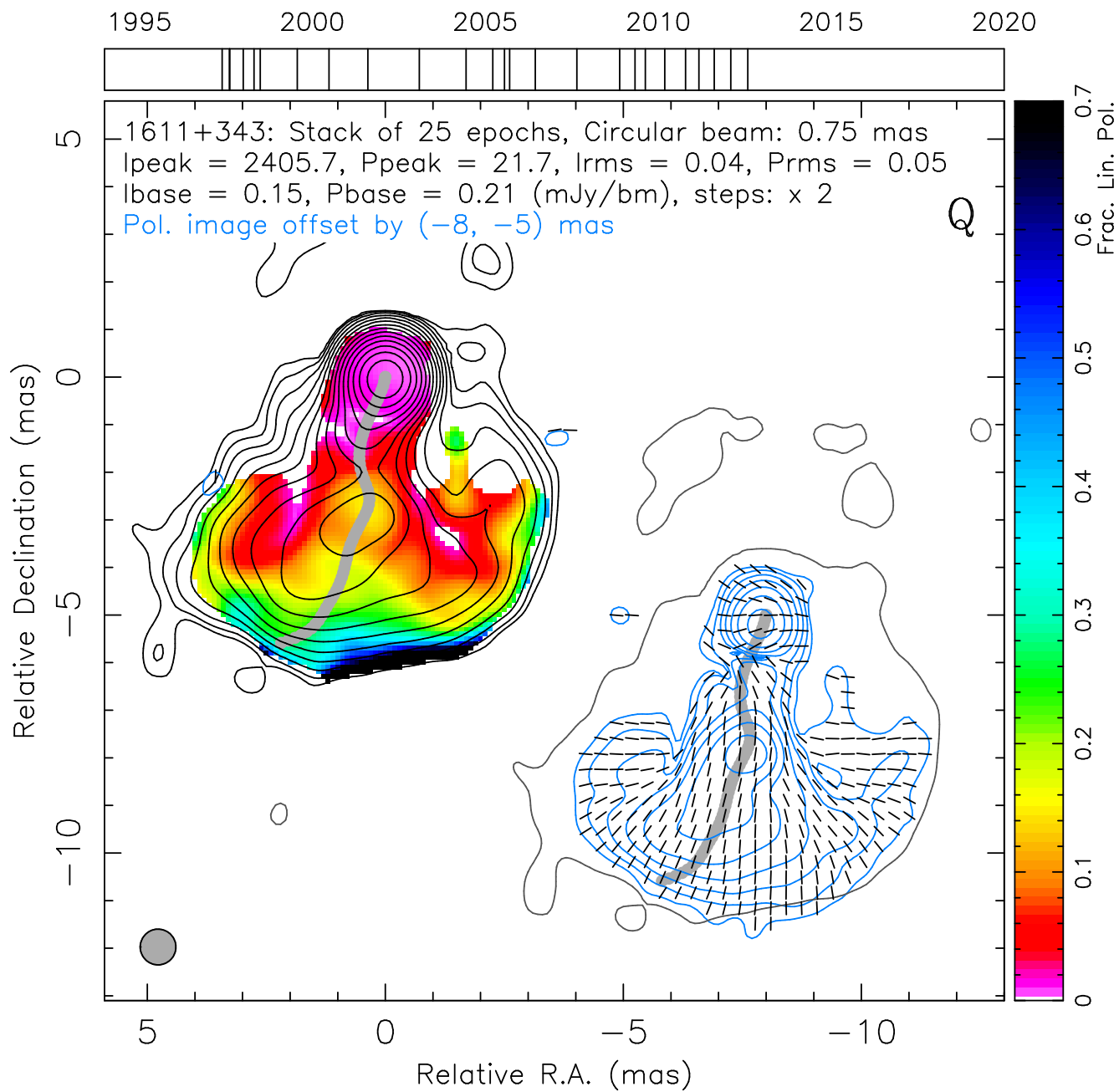


Рисунок А.23 — Стековая карта линейной поляризации для квазара 1611+343. Обозначения такие же, как на Рисунке 2.7.

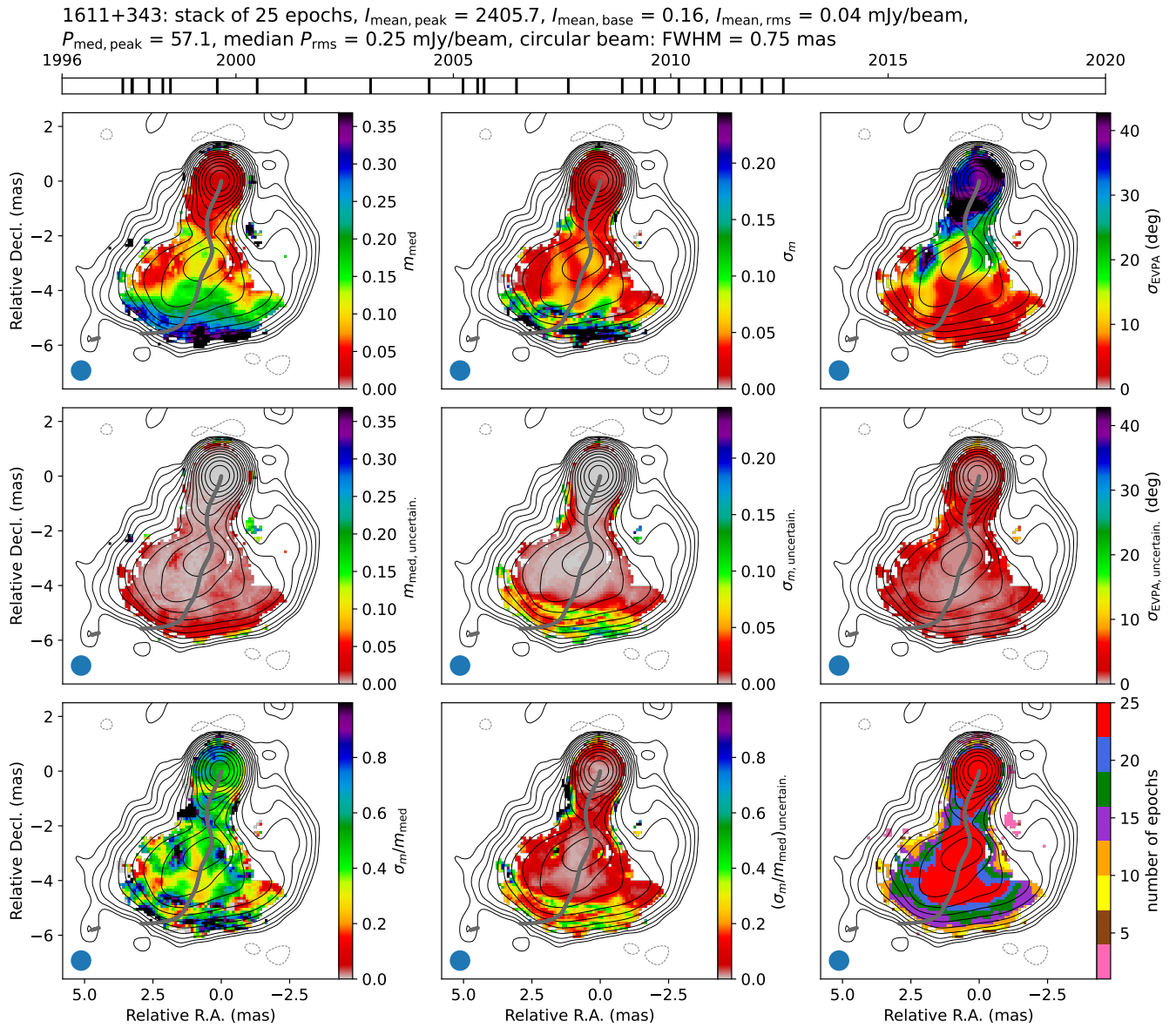


Рисунок А.24 — Карты переменности линейной поляризации и m_{median} для квазара 1611+343. Обозначения такие же, как на Рисунке 2.11.

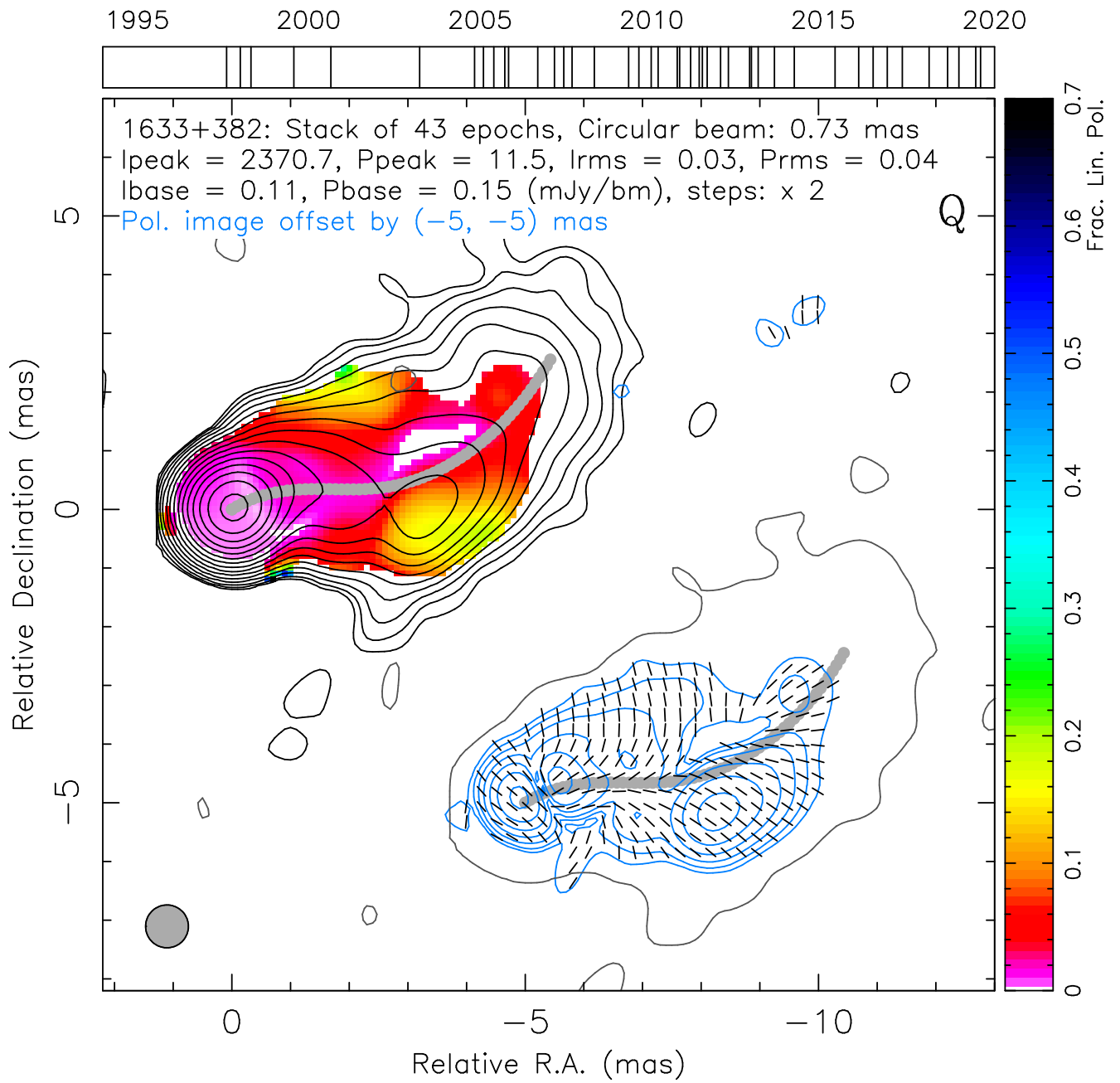


Рисунок А.25 — Стековая карта линейной поляризации для квазара 1633+382. Обозначения такие же, как на Рисунке 2.7.

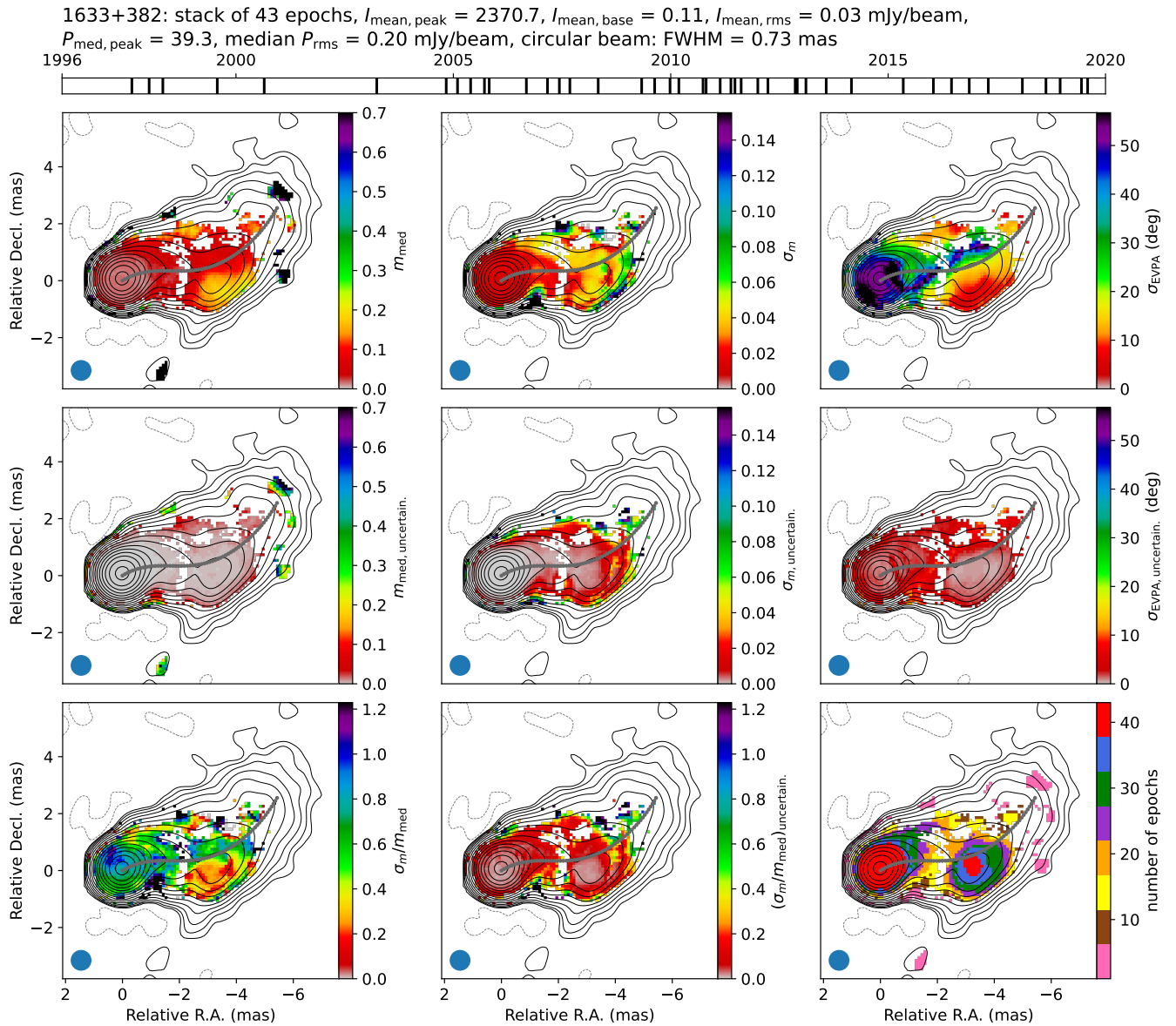


Рисунок А.26 — Карты переменности линейной поляризации и m_{median} для квазара 1633+382. Обозначения такие же, как на Рисунке 2.11.

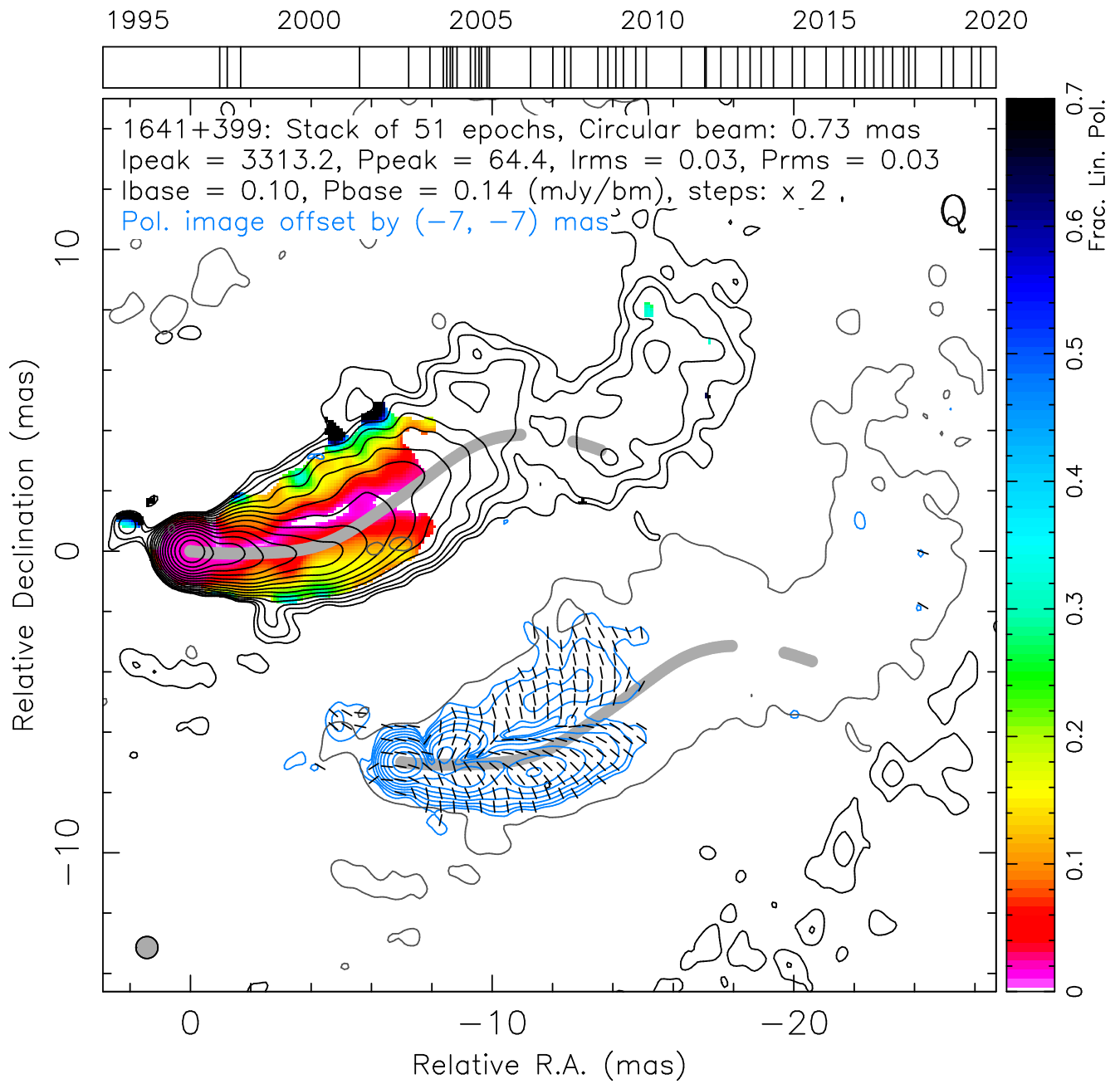


Рисунок А.27 – Стековая карта линейной поляризации для квазара 1641+399. Обозначения такие же, как на Рисунке 2.7.

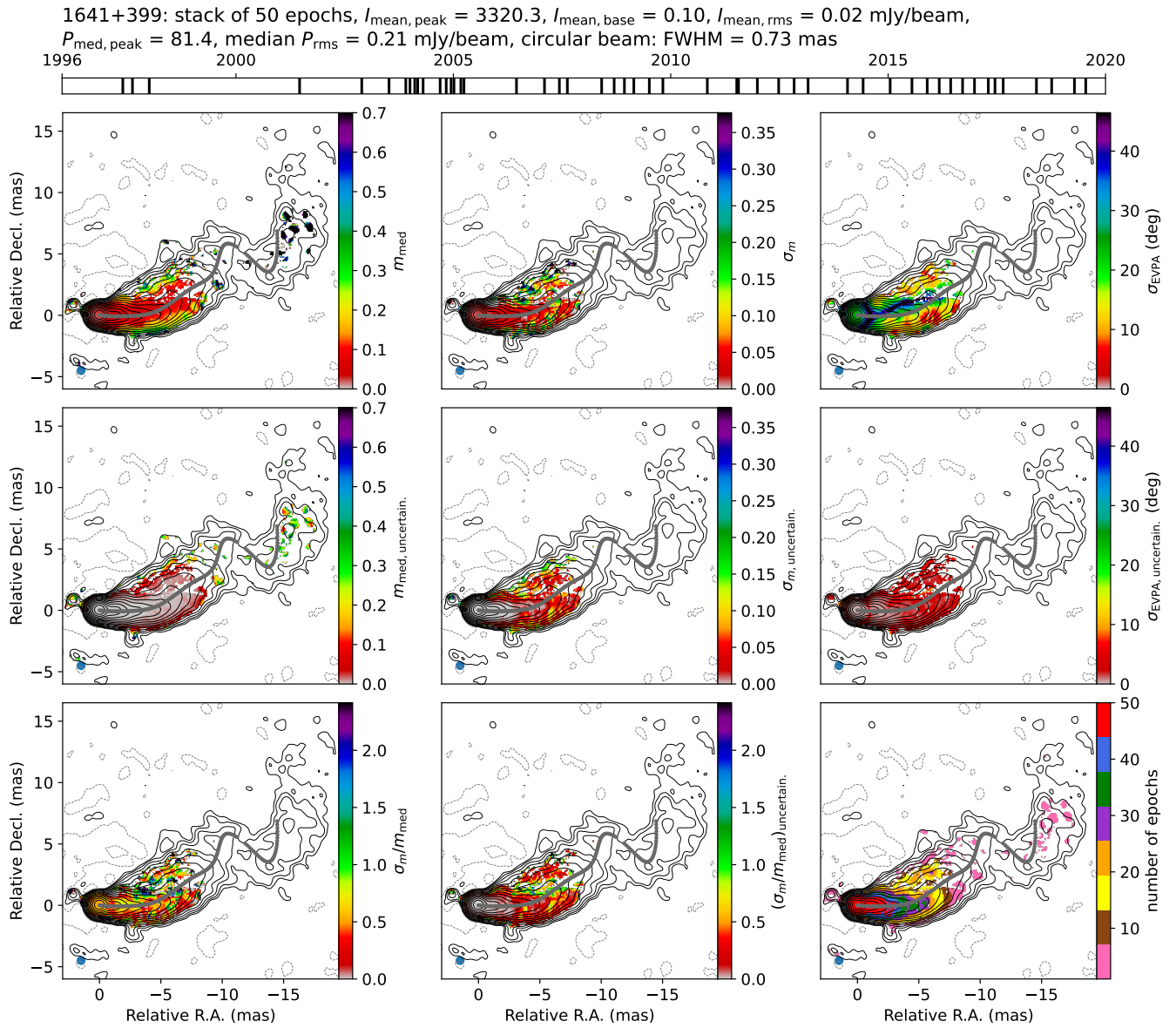


Рисунок А.28 — Карты переменности линейной поляризации и m_{median} для квазара 1641+399. Обозначения такие же, как на Рисунке 2.11.

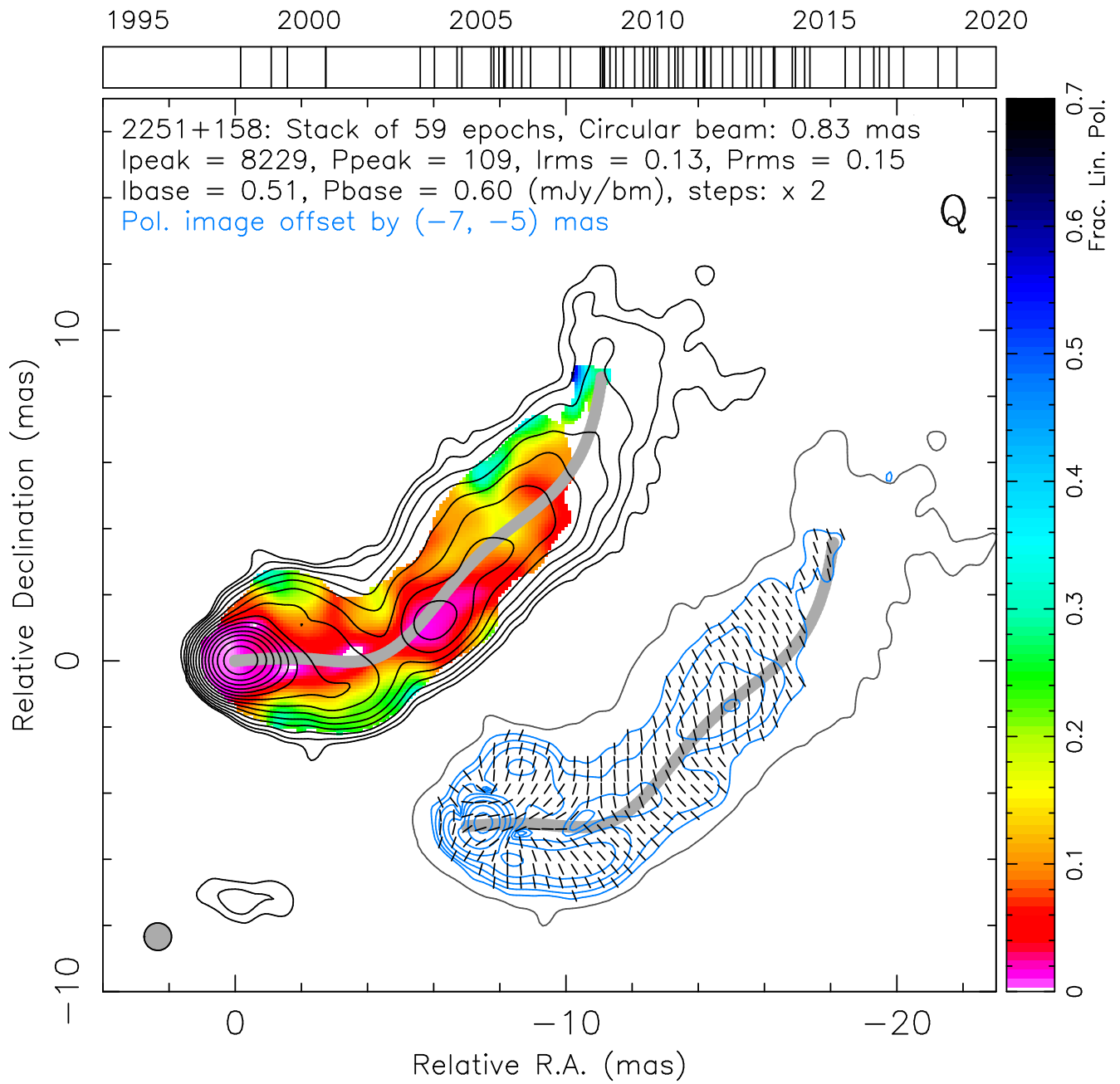


Рисунок А.29 — Стековая карта линейной поляризации для квазара 2251+158. Обозначения такие же, как на Рисунке 2.7.

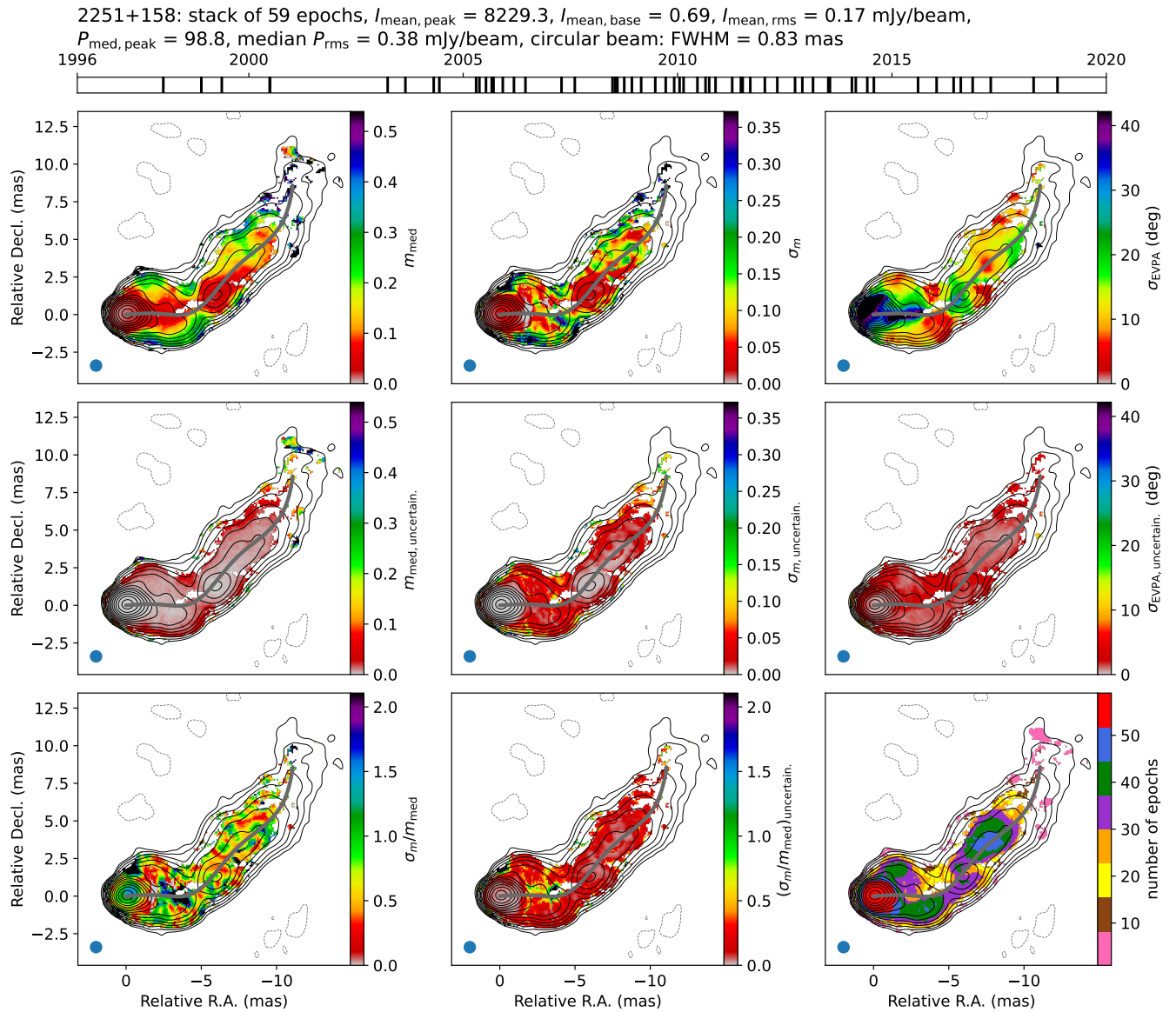


Рисунок А.30 — Карты переменности линейной поляризации и m_{median} для квазара 2251+158. Обозначения такие же, как на Рисунке 2.11.