

**Л. И. Матвеевко, С. С. Сиваконь**

**КИНЕМАТИКА СВЕРХТОНКОЙ СТРУКТУРЫ  
АКТИВНОЙ ОБЛАСТИ СЕЙФЕРТОВСКОЙ  
ГАЛАКТИКИ NGC 1275.  
II. В ПОЛЯРИЗОВАННОМ ИЗЛУЧЕНИИ**

Представлено к печати  
директором ИКИ РАН  
А. А. Петруковичем

## The Super Fine Structure Kinematics of the Seyfert Galaxy NGC 1275.

### II. Polarized Emission

*L. I. Matveenko, S. S. Sivakon'*

lmatveenko@gmail.com

Space Research Institute

of Russian Academy of Sciences (IKI RAN), Moscow

Maps of Seyfert galaxy NGC 1275 at  $\lambda = 2$  cm of VLBA, NRAO observations (1995–2015) and  $\lambda = 7$  mm Boston University with optimum 20  $\mu$ as angular resolution received. The circular structure diameter  $\varnothing \approx 2$  mas (1 pc) opened, the inclination of which is to the sky plane is  $60^\circ$ . The three centers of activity – whirlwinds distributed along the structure. The surrounding relativistic plasma is coming along two arms into the north center activity and ejecting to south direction  $X = -10^\circ$  take out the extra angular momentum. The second center activity is located at  $\rho \approx 2.5$  mas, the orientation of which is parallel to jet. The coaxial jet  $\varnothing \approx 0.8$  and  $\varnothing \approx 0.3$  mas is ejecting into the east direction  $X \approx -90^\circ$  to the third center activity, then to the north direction  $\varnothing \approx 0.7$  and  $\varnothing \approx 0.35$  mas. The projects of the jets at the sky plane determined the knots of the net. The nozzle of the first whirlwinds begin divided into two part with resolution 3  $\mu$ as. The nozzles of other activity centers are more elongated  $80 \times 40$   $\mu$ as, and  $80 \times 120$   $\mu$ as to ejection direction.

*Keywords:* active galaxy nuclei, NGC 1275, active centers, jets, whirlwinds

## Кинематика сверхтонкой структуры активной области сейфертовской галактики NGC 1275.

### II. В поляризованном излучении

*Л. И. Матвееenko, С. С. Сиваконов'*

lmatveenko@gmail.com

Институт космических исследований

Российской академии наук (ИКИ РАН), Москва

По данным наблюдений на РСДБ-системе (радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами, англ. Very Long Baseline Interferometry, VLBI) VLBA (Very Long Baseline Array — антенная решётка со сверхдлинными базами) (архивные данные НРАО — Национальной радиоастрономической обсерватории, США) на длине волны  $\lambda = 2$  см (1995–2015) и Бостонского университета при  $\lambda = 7$  мм (2010–2015) построены карты в поляризованном излучении сейфертовской галактики NGC 1275 с оптимальным угловым разрешением, равным 20 мкс. Выделена кольцевая структура диаметром  $\varnothing \approx 2$  мс (1 пк), наклонённая под углом  $60^\circ$  к картинной плоскости, вдоль структуры расположены три центра активности — вихря. В основной северный центр по двум рукавам поступает релятивистская плазма и эжектируется в южном направлении  $X \approx -10^\circ$ , унося избыточный угловой момент. В удалённой части джета — пустотелой трубки, диаметром  $\varnothing \approx 0,12$  мс,  $\rho \approx 2,5$  мс расположен второй вихрь, ориентированный параллельно потоку. В этом случае вещество эжектируется в виде коаксиального потока, диаметры составляющих равны  $\varnothing_{21} \approx 0,8$  и  $\varnothing_{22} \approx 0,3$  мс, в восточном направлении  $X \approx -90^\circ$ , в направлении третьего центра активности с коаксиальным джетом, эжектированным в северном направлении, диаметры потоков равны  $\varnothing_{31} \approx 0,7$  и  $\varnothing_{32} \approx 0,35$  мс. Проекция обоих коаксиальных потоков на картинной плоскости, образуя узлы сетки. Раздвоенные фрагмента сопла первой системы наблюдается при разрешении 3 мкс. Размеры фрагментов двух последующих центров достигают  $80 \times 40$  и  $80 \times 120$  мкс. Большой размер соответствует направлению потока.

*Ключевые слова:* активные ядра галактик, сверхтонкая структура NGC 1275, вихревая природа, три центра активности, джеты

## ВВЕДЕНИЕ

Сейфертовская галактика NGC 1275 — известный радиоисточник 3С 84, находится на расстоянии 110 Мпк, что соответствует размерам 0,55 пк/мс. Многолетние исследования не определили её природы. По одним представлениям, это сталкивающиеся галактики (Minkovsky, 1957), по другим — взрывающаяся галактика (Burbidge, Burbidge, 1965). В оптике наблюдаются две системы волокон, ориентированные под углами  $\sim 60$  и  $-10^\circ$ . Предполагается, что системы волокон относятся к галактике позднего типа (Rubin et al., 1977). Скорости волокон достигают  $\sim 5200$  км/с. Расщепления спектральных линий в области ядра определяются относительной скоростью излучающих областей  $\sim 600$  км/с (Дибай, 1968). В случае орбитального движения вокруг центра с периодом  $\sim 10^4$  лет. Масса меньшего ядра равна  $\sim 3 \cdot 10^8 M_{Sun}$  (Шкловский, 1978). Плотность электронов поглощающей среды центральной области галактики, достигает  $N_e \approx 1,5 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$ , а в плотных вкраплениях, излучающих яркие эмиссионные линии,  $N_e \approx 8 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$ . Преобладает поглощение в восточной части экрана (Romney, 1979). Скорость этой составляющей отличается от скорости волокон и соответствует  $\sim 8200$  км/с. спектр радиоисточника 3С 84 имеет высокочастотный избыток, определяемый компактным ядром. Его излучение переменное и наблюдается в виде всплесков (Баррет и др., 1965; Костенко, Матвеевко, 1966, 1968; Dent, 1965). Характерное время нарастания потока не превышает 1 года, что свидетельствует о малых угловых размерах области излучения. Наблюдения системой радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ, *англ.* Very Long Baseline Interferometry, VLBI) на длине волны  $\lambda = 3$  см позволили выделить компактное ядро размерами  $\sim 0,3$  мс и две удалённые компоненты на расстоянии  $\sim 3$  мс в направлении  $9$  и  $170^\circ$  (Матвеевко и др., 1973; Schilizzi et al., 1975). Наблюдения на длине волны 1,35 см с разрешением 0,1 мс в период спада высокой активности установили раздвоенную структуру активной области (Матвеевко и др., 1980; Паулини-Тос и др., 1978).

Несмотря на многочисленные исследования, наши представления об объекте 3С 84 ограничивались лишь некоторым уточнением отдельных сторон понимания его природы — моделей. Практически, это относится ко всем объектам с активными ядрами. Сколь бы ни были оригинальны модели, они не продвигали нас вперёд, нужны были реальные представления о протекающих процессах в их ядрах — активных зонах. Не зря

говорят: «Лучше один раз увидеть, чем сто раз услышать». Угловые размеры зон чрезвычайно малы и менее всего можно было ожидать успехов в области в радиоизлучения. Однако развитие методов анализа радиоизлучения, в том числе на когерентном уровне, создание технических средств исследований типа РСДБ позволили преодолеть эту проблему (Матвеевко и др., 1965; Matveyenko, 2007). Особое внимание на значимость экспериментальных исследований обращал наше внимание выдающийся астроном С. Б. Пикельнер: «Сколько бы ни были яркие модели они остаются моделями пока не получат экспериментального подтверждения. При этом результаты наблюдений могут быть подтверждены или исправлены только экспериментально». Не пора ли нам напомнить об этом выдающемся, блистательном учёном из зарубежных высоко рейтинговых журналов? В частности, пончик для кофе — дырку от бублика в русском переводе. Это относится и к решению вопроса предельного углового разрешения микросекундного уровня, реализованного для VLBA и новой РСДБ-системы миллиметровых волн ALMA, оценки возможностей космической радиоинтерферометрии.

Нами исследована тонкая структура активных зон мазерных источников: Орион, W49, W3OH и континуума: 3C 273, 3C 345, Дева А, 454.3, Леб А, OJ 287, NGC 1275. Наблюдения проводились в широком спектре углового разрешения, в том числе в поляризованном излучении с предельным угловым разрешением (микросекунды дуги) с целью определения протекающих процессов, природы активных зон. В случае NGC 1275 (3C 84) привлекало внимание широкое перекрытие эпох 1995–2016 гг. Во всех случаях структуры имели вихревые особенности. Анализ данных наблюдений позволит определить характерные особенности протекающих процессов и дать обоснованную интерпретацию.

Отклик радиоинтерферометра, равно как и синтезированной диаграммы направленности РСДБ-сети, — комплексное число, вещественная часть которого определяет угловое разрешение, достигающее доли радиоинтерференционного лепестка, а мнимая — фазовая, существенно выше. Достаточно высокие отношения сигнал/шум позволили достигнуть предельного углового разрешения в несколько микросекунд, определяемого межзвёздной средой  $\varphi_{sc} \approx \lambda^2 / \sin b^{0.5}$  мкс, где  $b$  — галактическая широта.

Высокое угловое разрешение выявило процессы, протекающие в активных ядрах объектов, установило их вихревую природу. Яркостная температура тонкой структуры активной зоны исследуемого объекта 3C 84 достигает  $T_b \leq 10^{12}$  К, что соответствует оптимальному угловому разрешению  $\sim 20$  мкс или  $\sim 10$  мпк. Яркостная температура фрагментов в области сопла превышает  $T_b \geq 10^{12}$  К, что позволяет исследовать их особенности с угловым разрешением до нескольких микросекунд или  $\sim 1$  мпк.

Исследования сверхтонкой структуры активных зон галактик на волне 2 см, проведены по архивным данным наблюдений НРАО (Национальная радиоастрономическая обсерватория, США) на VLBA (Very Long Baseline Array — антенная решётка со сверхдлинными базами) за период 1995–2015 гг. с угловым разрешением до микросекунд. Подтверждено раз-

двоение структуры фрагмента сопла в картинной плоскости в восточном направлении на 0,5 пк (Матвеевко, Селезнев, 2016). Каждая из составляющих содержит яркий компактный источник — эжектор и биполярный коаксиальный джет. Эжекторы разнесены в направлении  $45^\circ$ . Диаметры коаксиальных потоков соответствуют  $\varnothing_1 \approx 0,3$  пк,  $\varnothing_2 \approx 0,8$  пк и  $\varnothing_3 \approx 1,4$  пк. Яркостная температура центрального потока нарастает по мере приближения к соплу и превышает  $T_b > 10^{12}$  К. Предполагается вихревая природа структуры — два параллельных вихря. Поступающее вещество перетекает по спиральным рукавам к центру системы и эжектируется по мере накопления избыточного углового момента. Остаточное вещество выпадает на формирующееся центральное массивное тело. В случае кеплеровского движения отличие скоростей двух систем, достигающее  $\sim 600$  км/с, соответствует периоду обращения  $T \approx 5 \cdot 10^3$  лет, а масса центральных тел  $M \approx 10^7 M_{Sun}$  и соответствует оценкам работы (Шкловский, 1978).

Центральная активная область галактики затенена достаточно плотной областью тепловой плазмы, наблюдаемой в спектральных линиях в оптике. Это ограничивает возможности исследований тонкой структуры в длинноволновой части сантиметрового диапазона радиоволн. В настоящей работе приведены результаты исследований структуры галактики в поляризованном излучении по архивным данным НРАО на длинах волн  $\lambda = 2$  см и Бостонского университета —  $\lambda = 7$  мм.

## ТОНКАЯ СТРУКТУРА АКТИВНОЙ ОБЛАСТИ ГАЛАКТИКИ

Как ранее отмечалось отклик синтезированной диаграммы радиоинтерферометра соответствуют комплексному числу — диаграмме направленности и фазовой характеристике составляющей. Угловое разрешение, определяемое вещественной частью, достигает доли ширины интерференционного лепестка минимального размера, мнимой части — существенно выше и определяется отношением сигнал/шум. Яркостная температура фрагментов структуры исследуемого объекта 3С 84 в среднем не превышает  $T_b < 10^{12}$  К, что соответствует оптимальному угловому разрешению около 20 мкс ( $\sim 10$  мпк). В области сопла  $T_b \geq 10^{12}$  К и угловое разрешение может достигать нескольких микросекунд ( $\sim 1$  мпк). Рассмотрим тонкую структуру галактики на длинах волн  $\lambda = 2$  см и  $\lambda = 7$  мм (Матвеевко, Сиваконь, 2019).

## ТОНКАЯ СТРУКТУРА ГАЛАКТИКИ

**$\lambda = 2$  см.** Рассмотрим особенности тонкой структуры и кинематику активной области галактики NGC 1275 на длине волны 2 см с угловым разрешением 20 мкс ( $\sim 10$  мпк), полученных в период 1995–2015 гг., рис. 1 (см. с. 15–18). Не смотря на небольшое отличие эпох по времени по астрономическим масштабам, тонкая структура галактики претерпевает определённые изменения в масштабах порядка 10 мпс. В начале

периода 1995–1997 гг. структура имеет характерный вид «ёлочки» — изогнутой веточки с хвоей. Пиковая яркость сопла в этот период не превышает  $I_o \leq 0,8$  Ян/луч, ( $T_b \leq 10^{12}$  К), а веточек — до 10 % пикового значения. Эта структура может быть представлена как тангенциальные направления стенок воронок — хвоя, нанизанных на веточку. Воронки — фрагменты вращающегося пустотелого потока джета, диаметр которого уменьшается по мере истечения вещества эпоха 1995.27.11. В случае хвои с противоположной ориентацией — это может определяться отличием скоростей потоков, поступающих с противоположных рукавов. Наблюдаемое изменение изгиба веточки восстанавливается в следующую эпоху. Возможно это связано с изменением наклона джета относительно картинной плоскости. В верхней части веточки расположен яркий компактный источник — сопло активной зоны № 1. Далее в джете на расстоянии 0,8 мс находится вихрь № 2. И наконец, восточнее на расстоянии 0,3 мс от него расположен вихрь № 3. Как видно в эпоху 1997.07.12 к соплу № 1 по спиральным рукавам поступает вещество из окружающего пространства. В начале 2000-го г. верхняя часть веточки изгибается, дополняя стенку эллипса. В 2008–2009 гг. эллипс практически виден полностью, его размеры равны  $2 \times 1$  мс, а его большая ось ориентирована под углом  $10^\circ$ . Эллипс соответствует окружности, диаметром  $\varnothing \approx 2$  мс ( $\sim 1$  пк), наклонённой под углом  $60^\circ$  к картинной плоскости. Центральный поток джета окружён двумя параллельными полосками — тангенциальными направлениями стенок пустотелой составляющей диаметром  $\varnothing \approx 0,4$  мс, направленными в сторону вихря № 2, эпоха 2008.25.08, коаксиальный поток которого направлен в сторону вихря активной зоны № 3, эпохи, предшествующие 2011 г. В последнем случае эжектирование коаксиального потока происходит в северном направлении, эпоха 2011.12.12. В этот период в зоне № 2 происходит повышение поглощения, понижающее яркостную температуру сопла в два-четыре раза по сравнению с соседними эпохами. Рассматриваемая структура сохраняется до конца 2015 г.

$\lambda = 7$  мм. Прозрачность тепловой плазмы — экрана в этом случае существенно выше по сравнению с предыдущим случаем  $\lambda = 2$  см, что повышает возможности исследований сверхтонкой структуры активной области. Радиокарты сейфертовской галактики NGC 1275 в поляризованном излучении, соответствующие 40 эпохам, исследованы с разрешением до 5 мкс (2,7 мпк). Оптимальное разрешение для исследований тонкой структуры галактики соответствует 20 мкс. Основные результаты приведены на рис. 2 (см. с. 19–23). Тонкая структура  $\lambda = 7$  мм близка данным на  $\lambda = 2$  см в близлежащие эпохи. Как и ранее выделяются три активных центра. Окружающее вещество поступает по рукавам в активную зону № 1, эжектируется в зоны № 2 и № 3 и далее в северном направлении с частичным возвратом в зону № 1, завершая полный цикл крупномасштабного вихря.

Рассмотрим особенности формирования тонкой структуры активной области галактики NGC 1275 на длине волны  $\lambda = 7$  мм. Наиболее полно тонкая структура проявляется в эпоху 2013.31.05 разрешение 20 мкс,

$I_{peak} = 1,85$  Ян/луч и 2015.02.07 (рис. 2а, см. с. 24). При разрешении 10 мкс пиковое значение яркости снижается до  $I_{peak} = 1,52$  Ян/луч и при 3 мкс до 1,43 Ян/луч (см. рис. 2а). Пиковое значение яркости соответствует компактной компоненте — соплу зоны № 1. Наблюдаемое снижение яркости свидетельствует о наличии компактной составляющей в эжектируемом потоке порядка 2 мкс пониженной яркости до 1,3 Ян/луч.

*Кольцевые структуры потоков.* В стенках джета наблюдаются симметричные цепочки фрагментов, соответствующие тангенциальным направлениям колец. Их яркость не превышает 2 % пикового значения. Наиболее чётко эти структуры: левая и правая цепочки компонент проявляются в эпоху 2011.17.10. Положения фрагментов в стенках джета  $\rho$  (в мс) в течение рассматриваемого периода, их яркость в процентах относительно пикового значения  $I_{peak}$  (в Ян/луч) приведены в табл. 1 и показаны на рис. 3а (см. с. 25) — левая сторона и 3б — правая. На графиках выделяются восемь групп фрагментов (а–h), относительное положение которых соответствует линейной зависимости от расстояния (рис. 4, см. с. 26). Средние значения положения фрагментов в стенках практически совпадают, расстояние между кольцами равно  $0,18 \pm 0,01$  мс (0,1 пк). Скорость фрагментов — наклон прямых не превышает  $v \leq 0,08$  с.

*Поступление вещества.* Окружающее вещество поступает в активную зону по двум рукавам с противоположных сторон, эпохи 2013.31.05, 2015.02.07 и эжектируется в южном направлении,  $\lambda = 7$  мм (см. рис. 2). Две параллельные полосы — тангенциальные направления пустотелого потока — джета. Контрджет направлен на север. Его размеры невелики и не превышают 0,3 мс, т.е. примерно в пять раз меньше джета. Биполярный поток джет — контрджет эжектируется из сопла диаметром  $\varnothing = 0,12$  мс (0,07 пк) и практически уносит избыточный угловой момент, эпоха 2010.02.11. Излучение центрального потока джета на пределе обнаружения, что предполагает отсутствие либо незначительное количество вещества, доходящего до центра вихря и тем более выпадение остатка на формирующееся центральное тело. Наблюдаемое увеличение диаметра сопла с  $\varnothing = 0,17$  мс в апреле до  $\varnothing = 0,23$  мс в августе 2011 г. свидетельствует о повышенной скорости поступающего вещества — достижения критического углового момента на более удалённом расстоянии от центра. Увеличенный диаметр удалённой части джета  $\varnothing \approx 0,3$  мс на расстоянии  $\rho = 1,5$  мс, может определяться аналогичной причиной — повышенной скоростью поступающего вещества в предшествующий период. Об этом же свидетельствует формирование в потоке джета вихря № 2.

*Форма джета.* Анализ данных показывает, что в отдельные эпохи форма джета имеет вид спирали, что предполагает прецессию оси вращения. При этом величина угла прецессии — амплитуда синусоиды в 1,5–2 раза выше у правой стенки, что определяется отличием скоростей потоков, поступающих по рукавам с противоположных направлений, эпоха 2011.22.05. Полупериод спирали  $T/2$  по мере удаления от сопла увеличивается с 0,25 до 0,34 мс, что свидетельствует об увеличении угловой скорости прецессии, либо снижении скорости потока джета за рассматриваемое время в 1,5 раза.

*Центральный поток джета.* Как ранее упоминалось, яркость фрагментов центрального потока невелика — на пределе обнаружения. Отдельные фрагменты на уровне 2 % проявляются к концу 2011 г. эпоха 2010.02.11. Общее распределение вкраплений в центральном потоке за рассматриваемый период представлено в табл. 1 и показано на рис. 3в. Выделяются четыре группы компонент (*a–d*). В среднем шаг фрагментов нарастает по мере удаления от сопла с 0,15 мс в начале и до 0,29 мс в конце соответственно. Исходя из наклона прямых, верхний предел скоростей фрагментов центрального джета не превышает  $v \leq 0,01$  с.

**Таблица 1.** Яркость сопел.  $\lambda = 7$  мм, пиковые значения (Ян/луч) — 1, 2 и 3 в процентах пикового значения и 0,01 Ян/луч,  $\varphi = 0,1$  мс

№	Эпоха/№	1 Ян/луч	2 %, 0,01 Ян	3 %, 0,01 Ян
1	2010.02.10	1,67	5//8	0,5//0,8
2	2010.07.10	1,6	30//48	1//1,6
3	2010.13.10	1,46	30//44	1//1,5
4	2011.21.04	1,5	20//30	5//7,5
5	2011.12.06	1,58	10//15	5//8
6	2011.21.07	1,74	30//52	5//9
7	2011.23.08	2,16	20//43	2//4
8	2011.17.10	1,95	35//68	5//10
9	2011.02.12	1,55	60//93	5//8
10	2012.27.01	1,87	80//150	2//4
11	2012.02.04	1,29	100//129	2//2,6
12	2012.05.03	1,64	100//164	5//8
13	2012.28.05	1,7	70//120	2//3,4
14	2012.05.07	1,9	40//76	5//10
15	2012.13.08	1,96	25//50	2//4
16	2012.28.07	2,88	20//57	1//2,9
17	2012.08.10	2,08	30//62	2//4
18	2012.20.10	2,84	30//85	2//6
19	2012.28.10	2,48	30//74	5//12
20	2012.28.10	3,66	20//73	2//7
21	2012.22.12	2,19	40//88	2//4
22	2013.15.01	2,53	25//63	2//5
23	2013.26.02	2,0	10//20	2//4
24	2013.16.04	2,5	5//13	1//3
25	2013.30.06	2,53	20//50	2//5
26	2013.28.07	3,2	30//96	2//6
27	2013.26.08	1,8	30//54	3//5
28	2013.18.10	3,49	35//122	2//7



№	Эпоха/№	1 Ян/луч	2 %, 0,01 Ян	3 %, 0,01 Ян
29	2013.16.12	2,42	20//48	2//5
30	2014.19.01	2,46	10//25	2//5
31	2014.24.02	2,27	10//23	2//4,6
32	2014.03.05	2,95	20//60	1//3
33	2014.21.06	2,72	30//82	1//3
34	2014.28.07	2,88	20//58	1//3
35	2014.23.09	2,69	10//27	2//5
36	2014.06.12	2,49	20//50	1//2,5
37	2015.11.04	2,88	5//15	1/3
38	2015.11.05	3,19	5//16	1//3
39	2015.09.06	3,49	5//18	1//3,5
40	2015.02.07	3,3	5//17	1//3,3
Множитель	Графика	30	1	10

Яркости сопел приведены в табл. 1 и показаны на рис. 6 (см. с. 27). Нормирующие коэффициенты приведены в конце таблицы. Корреляция яркости сопел в явном виде не наблюдается.

## ВИХРИ

Одной из особенностей тонкой структуры активной зоны — наличие нескольких завихрений. В первой активной зоне, его удалённой части на расстоянии  $\rho \approx 1,5$  мс к югу от сопла наблюдается структура эллиптической формы, 2010.02.11.  $\lambda = 7$  мм (см. рис. 2), большая ось которого ориентирована параллельно джету. Эллипс соответствует проекции окружности диаметром  $\varnothing \approx 0,5$  мс (0,3 пк), наклонённой к картинной плоскости под углом  $65^\circ$ . Кольцевая структура соответствует вихрю № 2, формирующемуся в потоке джета первой зоны, из которого эжектируются коаксиальные потоки в восточном направлении  $X \approx -90^\circ$ . Диаметры потоков равны  $\varnothing_{21} \approx 0,8$  мс и  $\varnothing_{22} \approx 0,3$  мс соответственно, эпохи 2011.21.04, 2011.02.12, 2014.06.12. Скорости потоков достаточно высоки, что приводит к формированию следующего вихря № 3 с коаксиальным джетом, эжектируемым в северном направлении  $X \approx -10^\circ$ . Большие диаметры потоков, равные  $\varnothing_{31} \approx 0,7$  и  $\varnothing_{32} \approx 0,35$  мс, свидетельствуют о достаточно высоких скоростях поступательного движения. Проекции потоков двух последних зон на картинную плоскость образуют узлы сетки эпохи 2011.21.04, 2012.05.07, 2012.20.10 (см. рис. 2). Структура этой области с разрешением 5 мкс в эпоху 2015.02.07 показана на карте (см. рис. 2а).

*Структура сопел.* Анализ сверхтонкой структуры активных зон галактики в широком спектре угловых разрешений до 3 мкс показал небольшое раздвоение сопла активной зоны № 1 в направлении джет-контрджет

до 1,5 мкс или  $\sim 1$  мпк. Зоны сопел двух других активных центров размыты в пределах  $80 \times 40$  и  $80 \times 120$  мкс соответственно. Это предполагает отсутствие чёрной дыры или только начало её формирования.

*Относительное положение вихрей* в разные эпохи, приведены в табл. 2 и показаны на рис. 5. Расстояние между соплами 1-й и 2-й зон  $\rho_{12}$  за рассматриваемый период увеличивается с 1,7 до 2,4 мс и соответствует  $(0,7 \pm 0,15)$  мс за 4,5 г. Если это изменение определяется удалением вихря, то его скорость  $v = (0,25 \pm 0,06)$  с. Но это может быть результатом внутренних изменений структуры активной зоны за рассматриваемый период. Расстояние между 2-й и 3-й зоной  $\rho_{23} = (0,9 \pm 0,1)$  мс практически не меняется.

**Таблица 2.** Данные уровня поляризации излучения сопла  $m_o$  пиковой яркости (%),  $I_o$  — уровень пиковой яркости (Ян/луч), разрешение 100 мкс, 2-го и 3-го сопла (%),  $X$  — ориентация поляризации в зависимости от эпохи, длина волны  $\lambda = 2$  см

Параметры	$m_o$ пикк/ $I_o$	$m_2/X$	$m_3/X$	$m_{jet}/X$	$m_{jet}/X$
1995.27.11	0,09/0,93	6/45	13/45	13/45	11/45
2000.28.09	0,4/0,72	0,06/45	0,01/60	2,5/10	12/45
2001.30.06	0,4/0,56	0,6/45	0,6/45	12/45	2/45
2002.07.01	0,1/0,95	0,2/90	0,1/—	2,8/45	2/45
2004.29.05	0,1/1,62	0,3/45	0,4/45	1/45	1/45
2005.18.11	0,01/1,6	0,15/45	0,08/—	0,6/30	0,3/5
2006.06.09	0,08/1,3	0,6/45	0,4/45	0,3/45	4/60
2007.02.03	0,1/1,3	0,08/—	1/45	3/45	3/45
2008.25.08	0,08/1,2	0,3/45	0,6/60	5/50	4/45
2009.28.05	0,1/1,2	0,8/45	0,1/35	2/80	12/45
2009.27.10	0,1/1,0	0,2/45	0,2/30	6/45	6/45
2010.06.06	0,01/2,1	0,1/20	0,6/45	4/45	1,2/45
2010.20.11	0,08/2	0,6/20	4/40	17/10	20/0
2011.27.02	0,04/2	0,8/50	0,3/—	3/10	4/45
2012.29.11	0,05/1,8	0,12/0	1,5/80	4,5/90	8/90
2013.22.07	0,08/2,5	0,5/45	1/90	0,5/45	1/90
2015.18.05	0,1/1,2	0,2/45	0,8/90	1,2/90	1,6/90

## ПОЛЯРИЗАЦИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ АКТИВНОЙ ЗОНЫ ГАЛАКТИКИ

Исследования тонкой структуры активной области галактики NGC 1275 в поляризованном излучении на двух длинах волн проведены для оценки влияния фарадеевского вращения в экранирующем экране и определения связи магнитных полей с процессами формирования тонкой структуры.

Угловое разрешение на обеих волнах идентичны и соответствует 20 мкс (см. рис. 1 и 2). Уровень и ориентация поляризации соответствуют отрезкам прямых линий, обозначены с левой стороны карт. Как ранее было установлено, тонкая структура галактики определяется тремя последовательными вихрями с джетами, образующими единую систему — крупномасштабный вихрь диаметром  $\varnothing \approx 2$  мс ( $\sim 1$  пк), наклонённый под углом  $60^\circ$  к ридинговой плоскости и эжектируемые потоками.

Рассмотрим зависимость поляризованного излучения с особенностями структуры активных зон. Ориентации поляризации фрагментов структуры на обеих длинах волн практически идентичны, что свидетельствует о незначительном фарадеевском вращении, низком уровне магнитного поля в поглощающем экране. То есть магнитные поля структур определяются самими структурами и не выходят далеко за их пределы. Рассмотрим особенности поляризации структур с начального момента. Окружающая плазма поступает по рукавам в первую активную зону и эжектируется в южном направлении. В отличие от большинства объектов с активными ядрами в рассматриваемом случае яркость центрального потока существенно ниже окружающих составляющих и не превышает нескольких процентов пикового значения (Матвеевко, 2013, 2016, 2018). В рассматриваемом случае преобладает ориентация поляризации излучения потоков под углами  $45^\circ$  и  $90^\circ$  относительно вытянутости фрагментов — направления поступательной скорости потоков. Это относится и к рукавам, по которым окружающее вещество поступает к соплу, эпоха 2013.31.05 (см. рис. 2). В левом рукаве ориентация перпендикулярна потоку — поступательной скорости, соответствует продольному магнитному полю и определяется преобладанием вращательной скорости над поступательным движением. В правом рукаве ориентация соответствует  $45^\circ$  и соответствует равным составляющим магнитного поля вращательного и поступательного движения. Ориентации поляризации в тангенциальных направлениях джета практически перпендикулярна поступательной скорости потока в рассматриваемые эпохи. Наблюдаемые магнитные поля — результат движения электропроводящей среды токов эффект динамо. Поступательное движение потока возбуждает магнитную силовую трубку — магнитное поле перпендикулярное скорости потока, а в случае вращения продольное поле. При равенстве составляющих скоростей ориентация поля соответствует  $45^\circ$ , что мы и наблюдаем в большинстве случаев джетов. В удалённых частях джетов поляризация ориентирована перпендикулярно потоку — скорости джета, что свидетельствует о снижении поступательной скорости и преобладании вращательной.

Рассмотрим распределения уровней поляризации структур. Уровень поляризации сопла структуры № 1 не превышает  $m_o \approx 0,4\%$ , на волне  $\lambda = 2$  см и  $m_o \approx 0,8\%$  на волне  $\lambda = 7$  мм (см. табл. 2, 3). В первом случае при повышении яркости  $I_o$  до  $2,5$  Ян/луч уровень поляризации снижается до  $m \approx 0,08\%$ , что свидетельствует о низком уровне поляризации излучения сопла, может определяться «хаотичностью» ориентации магнитного поля. Уровень поляризации сопел № 2, 3 достигает  $m \approx 0,6\%$ , а при снижении

яркости возрастает до нескольких процентов. В джете поляризация фрагментов достигает 3–5 %, а в отдельных случаях до 10–15 % (см. табл. 3).

**Таблица 3.** Параметры поляризации на длине волны  $\lambda = 7$  мм

Параметры	$m_{o \text{ пик}}/I_o$	$m_2$	$m_3$	$m_{jet}$	$m_{jet}$
2011.23.08	0,6/2,14	0,5	—	5	0,3
2011.29.09	0,1/1,6	0,15	2,4	10	2,4
2011.02.12	0,8/1,34	0,8	1,7	1,7	1,7
2012.02.04	0,07/1,05	0,2	1	2	2
2012.29.10	0,3/3,14	1,2	1	2,4	0,8
2015.01.08	0,6/2,18	5	5	14	17

Данные уровня поляризации излучения сопла  $m_o$  пиковой яркости (%),  $I_o$  — уровень пиковой яркости (Ян/луч), разрешение 100 мкс, 2-го и 3-го сопла (%),  $X$  — ориентация поляризации в зависимости от эпохи, длина волны  $\lambda = 2$  см. Следует обратить внимание и на совпадение ориентации джетов и волокон тепловой плазмы, что предполагает влияние общего магнитного поля.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сейфертовская галактика NGC 1275 — сталкивающиеся галактики или взрывающаяся галактика? По данным VLBA, полученным нами на длинах волн 2 см и 7 мм с предельным угловым разрешением, в том числе в поляризованном излучении, следует вихревая природа протекающих процессов. Структура включает три последовательных вихря с эжектируемыми коаксиальными потоками. Окружающее вещество поступает с противоположных направлений по двум рукавам в активную зону № 1. Диаметр джета — трубки, эжектируемого в южном направлении  $\varnothing \approx 0,3$  мс ( $\sim 0,2$  пк). В джете на расстоянии  $\rho \approx 1,5$  мс от сопла, формируется второй вихрь № 2 с коаксиальным джетом, эжектируемом в западном направлении. На расстоянии 1 мс от него формируется третий вихрь № 3 с коаксиальным джетом в северном направлении. Частично эжектируемый поток перетекает в первую активную зону, образуя кольцо диаметром 1,8 пк, наклонённое к картинной плоскости под углом  $X \approx 65^\circ$ . Структура каждой из зон самосогласована и соответствует вихревой природе. Сопло первой системы компактно и раздваивается при разрешении 3 мкс. Размеры областей двух последующих центров активности равны  $80 \times 40$  и  $80 \times 120$  мкс соответственно и вытянуты в направлении эжекции потоков. Наблюдаемое отличие размеров джета — контрджета определяются движением по и против магнитного поля.

Вращение и поступательное движение потоков коллимирует джеты и определяет продольную и круговую составляющую магнитных полей, ориентацию поляризации излучения. Наблюдаемые изменения ориентации поляризации относительно скорости потока лежат в пределах  $45^\circ$  вблизи сопла и  $90^\circ$  в удалённой части, что определяется снижением поступательной скорости движения. Уровень поляризации излучения сопел не превышает долей процента и возрастает до 10–15 % в удалённой джета.

В заключение авторы выражают благодарность Н. Ю. Комаровой за помощь в подготовке рукописи к публикации.

Работа выполнена при поддержке программы Президиума РАН № 28 «Космос: исследования фундаментальных процессов и их взаимосвязей. Раздел «Управление» и частично Институт прикладной астрономии РАН.

## ЛИТЕРАТУРА

- Баррет А. Х., Кутуза Б. Г., Матвеевко Л. И.* и др. Наблюдения источников радиоизлучения на волне 3,3 см и 0,8 см // *Астрон. журн.* 1965. Т. 42. № 3. С. 527–530.
- Дибай Э. А.* Свойства ядра NGC 1275 // *Астрофизика.* 1968. Т. 46. С. 725.
- Костенко В. И., Матвеевко Л. И.* Исследование спектров источников космического радиоизлучения 3С 273 и 3С 84 в миллиметровом и сантиметровом диапазонах волн // *Астроном. журн.* 1966. Т. 43. № 2. С. 280–283.
- Костенко В. И., Матвеевко Л. И.* Переменность плотностей потоков некоторых источников радиоизлучения на частоте 5760 МГц // *Астрон. журн.* 1968. Т. 45. № 6. С. 1181–1184.
- Матвеевко Л. И.* Многоликое единство: препринт. М.: ИКИ РАН, 2016. Пр-2179. 60 с.
- Матвеевко Л. И.* РСДБ — Кинематика активной области квазара 3С 345 // *Письма в Астрон. журн.* 2013. Т. 39. № 8. С. 547–579.
- Матвеевко Л. И.* РСДБ — Окно во Вселенную // *Всерос. радиоастрон. конф. (ВРК-2018).* 17–21 сент. 2018, Санкт-Петербург. 2018. С. 64.
- Матвеевко Л. И., Кардашов Н. С., Шоломицкий Г. Б.* О радиоинтерферометре с большой базой // *Изв. вузов. Радиофизика.* 1965. Т. 4. С. 651–654.
- Матвеевко Л. И., Келлерман К. И.* и др. Структура ядра сейфертовской галактики NGC 1275 // *Письма в Астрон. журн.* 1980. Т. 6. С. 77.
- Матвеевко Л. И., Коган Л. Р., Костенко В. И.* и др. Сверхтонкая структура некоторых компактных радиоисточников // *Астрон. журн.* 1973. Т. 50. № 6. С. 1157–1165.
- Матвеевко Л. И., Селезнев С. В.* Особенности тонкой структуры ядра галактики NGC 1275 // *Письма в Астрон. журн.* 2016. Т. 42. С. 237–245.
- Матвеевко Л. И., Сиваконь С. С.* Сейфертовская галактика NGC 1275 — сверхтонкая структура: препринт. ИКИ РАН, 2019. Пр-2189.
- Паулини-Тос И. И. К., Пройс Е., Витцел А.* и др. Наблюдения компактных радиоисточников на волне 1,35 см с высоким угловым разрешением // *Письма в Астрон. журн.* 1978. Т. 4. № 2. С. 64–69.
- Шкловский И. С.* О возможной двойственности ядра NGC 1275 // *Письма в Астрон. журн.* 1978. Т. 4. С. 493.
- Burbidge E. M., Burbidge G. R.* Optical Evidence Suggesting the currence of a Violent Outburst in NGC 1275 // *Astrophysical J.* 1965. V. 142. P. 1351.

- Dent W.A.* Quasi-Stellar Sources: Variation in the Radio Emission of 3C 273 // *Science*. 1965. V. 148. P. 1458.
- Matveyenko L. I.* Early VLBI in the USSR // *Astronomische Nachrichten*. 2007. V. 328. No. 5. P. 411–419.
- Minkovsky R.* Optical investigations of radio sources // *Proc. IAU Symp.* 1957. No. 4. P. 107.
- Romney J.* Fine-scale structure of the neutral hydrogen absorption in NGC1275: Thesis of Ph. Deg. 1979.
- Rubin V.C., Fort W.K., Peterson Ch.Jr.* et al. New observations of the NGC 1275 phenomenon // *Astrophysical J.* 1977. V. 211. P. 693–696.
- Schilizzi R. T., Cohen M., Romney J.D.* et al. Observations with a VLB array. III — The sources 3C 120, 3C 273B, 2134+004, and 3C 84 // *Astrophysical J.* 1975. V. 201. P. 263–274.

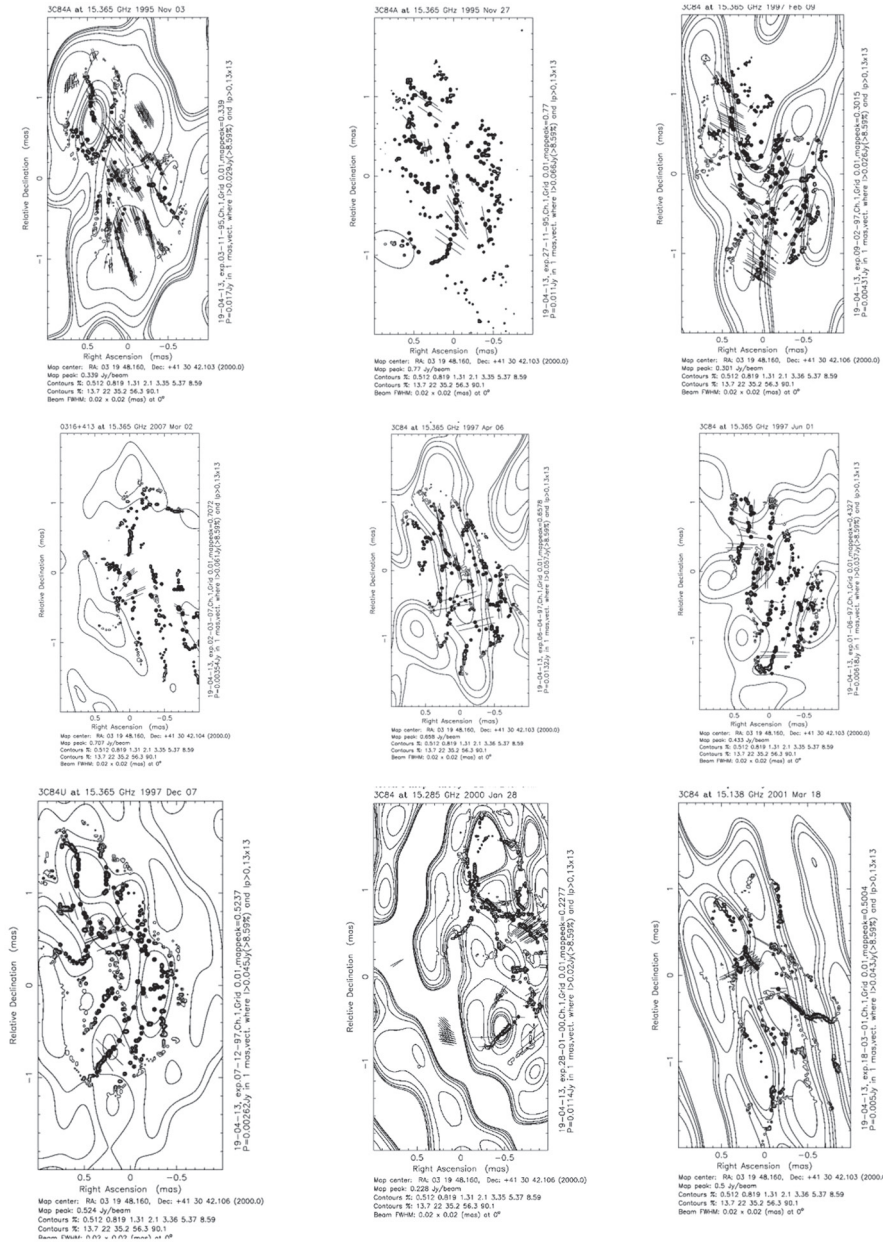


Рис. 1. Карты распределения яркости сейфертовской галактики NGC 1275,  $\lambda = 2$  см, в поляризованном излучении, разрешение  $\phi = 20$  мкс дуги, эпохи 1995–2015 гг. (продолжение и окончание см. на с. 16–18)

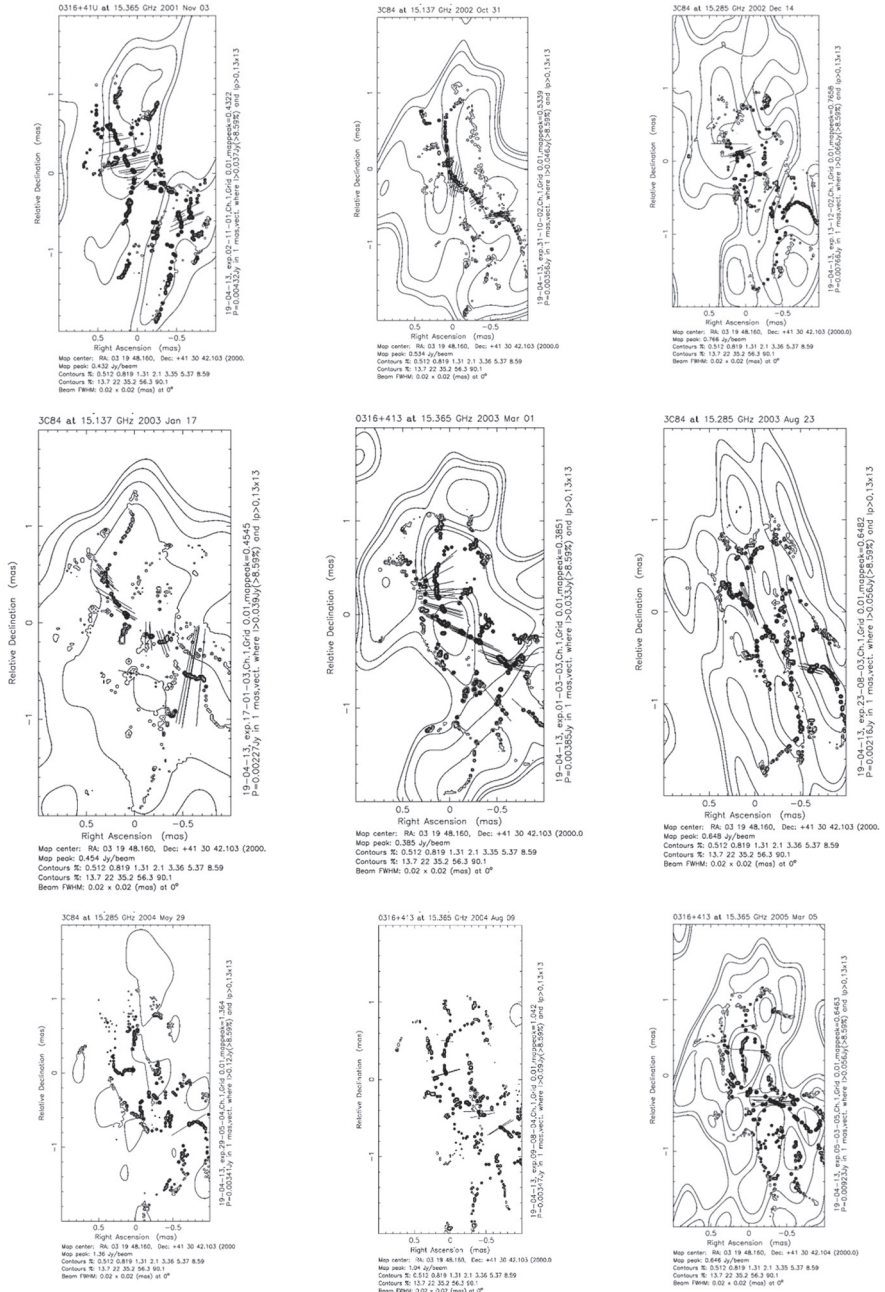


Рис. 1. Продолжение (начало см. на с. 15, окончание — на с. 18)



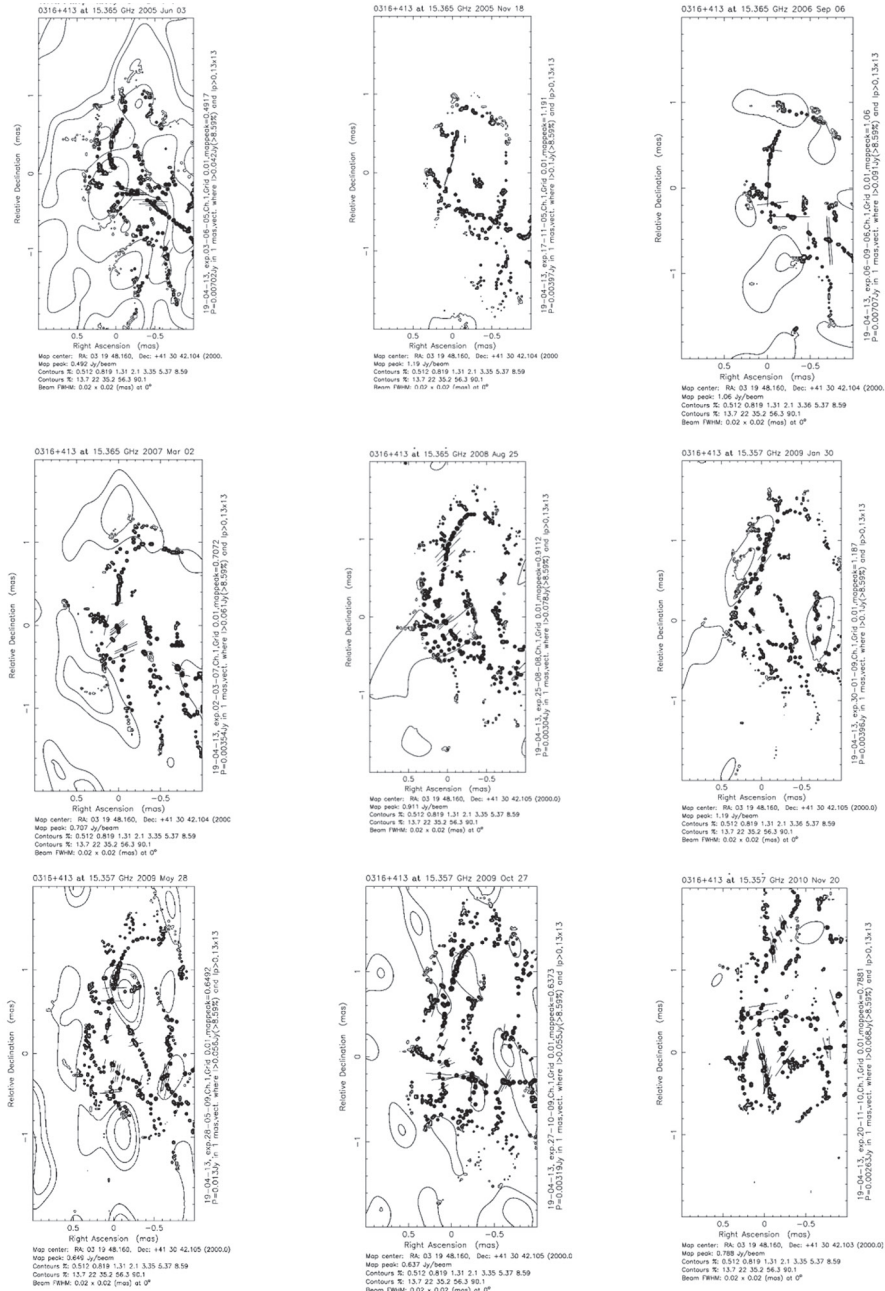


Рис. 1. Продолжение (начало см. на с. 15, окончание — на с. 18)

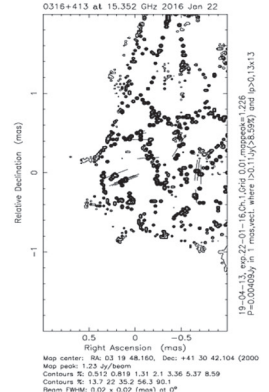
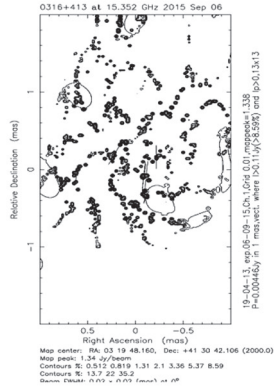
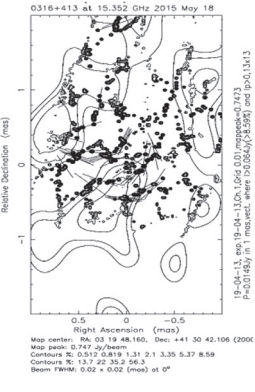
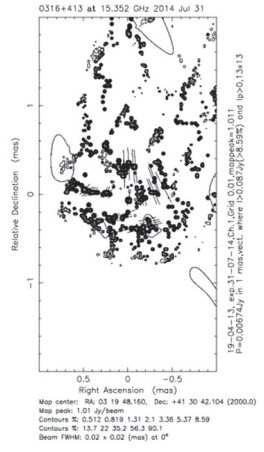
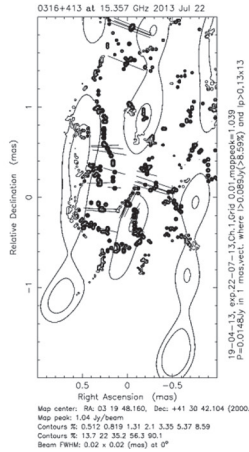
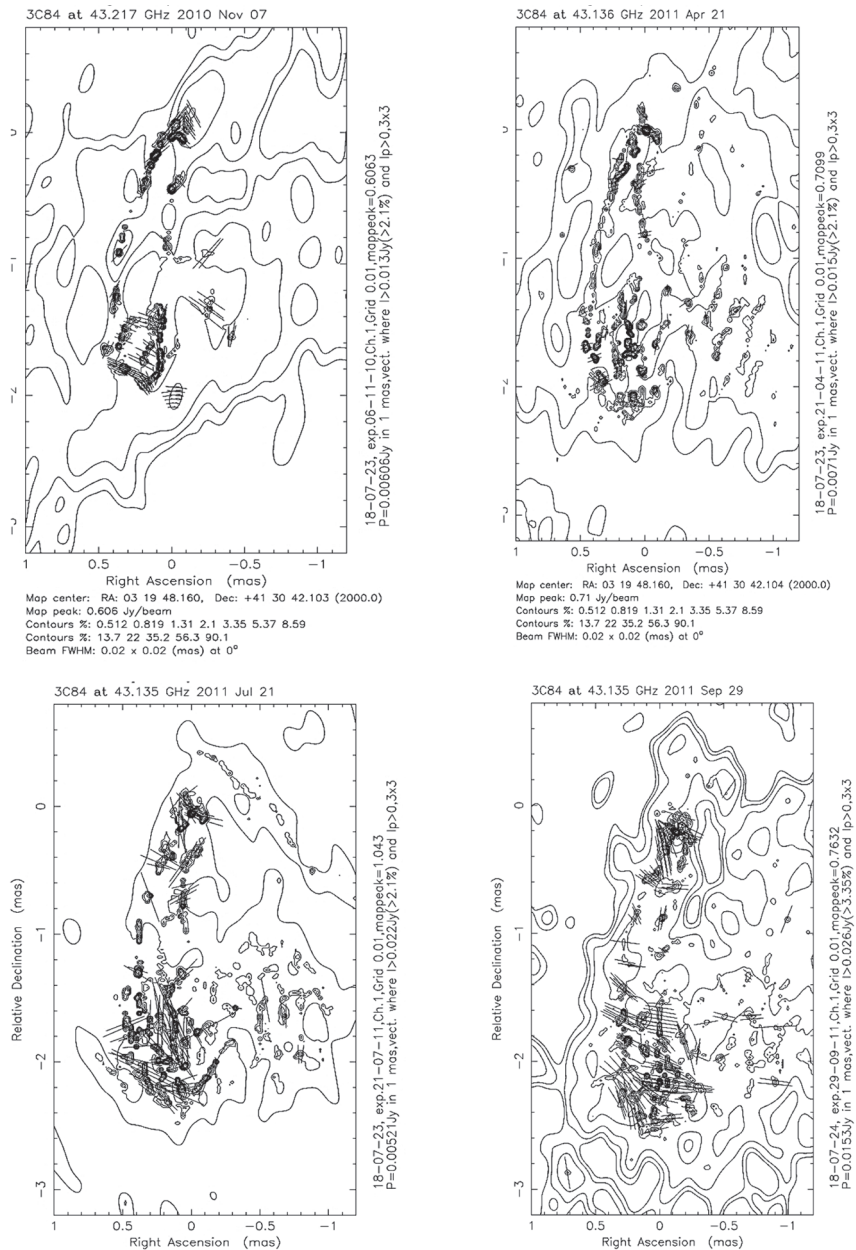


Рис. 1. Окончание (начало см. на с. 15)



**Рис. 2.** Карты распределения яркости сейфертовской галактики NGC 1275,  $\lambda = 7$  мм, в поляризованном излучении, разрешение  $\phi = 20$  мкс дуги, эпохи 2010–2015 гг. (продолжение и окончание см. на с. 20–23)

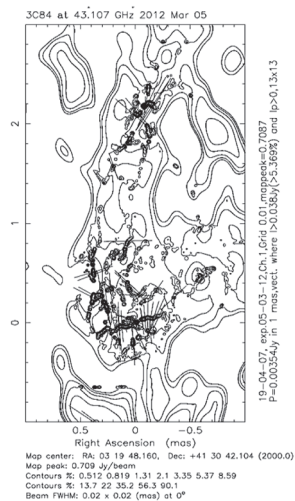
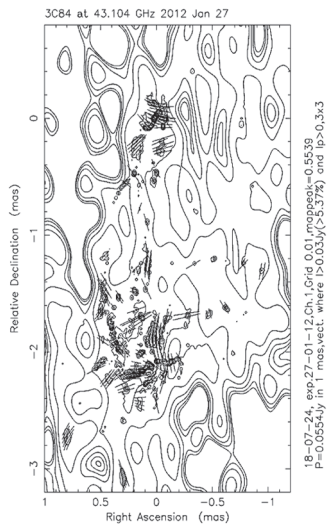
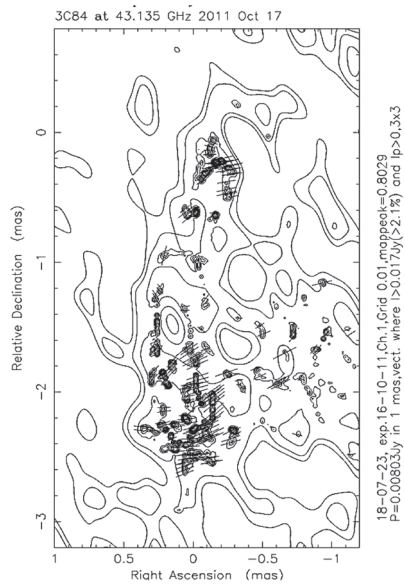
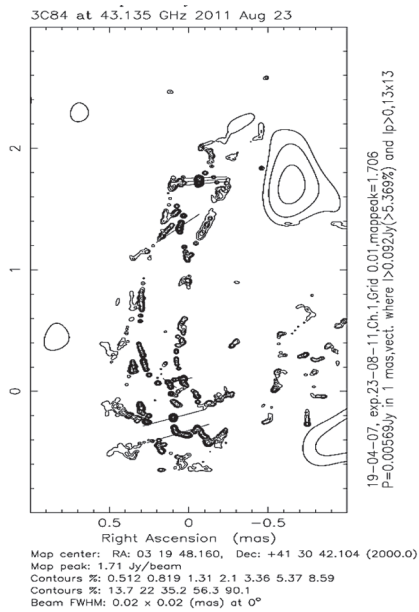


Рис. 2. Продолжение (начало см. на с. 19, окончание — на с. 23)

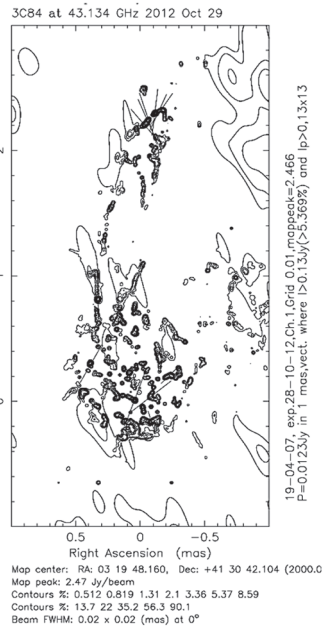
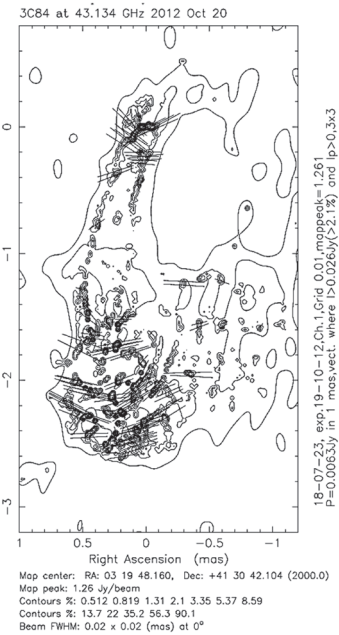
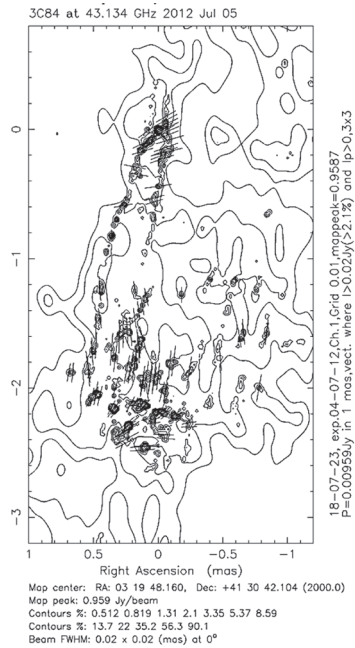
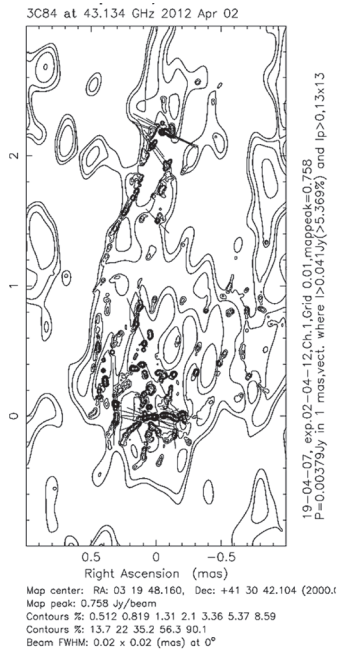


Рис. 2. Продолжение (начало см. на с. 19, окончание — на с. 23)

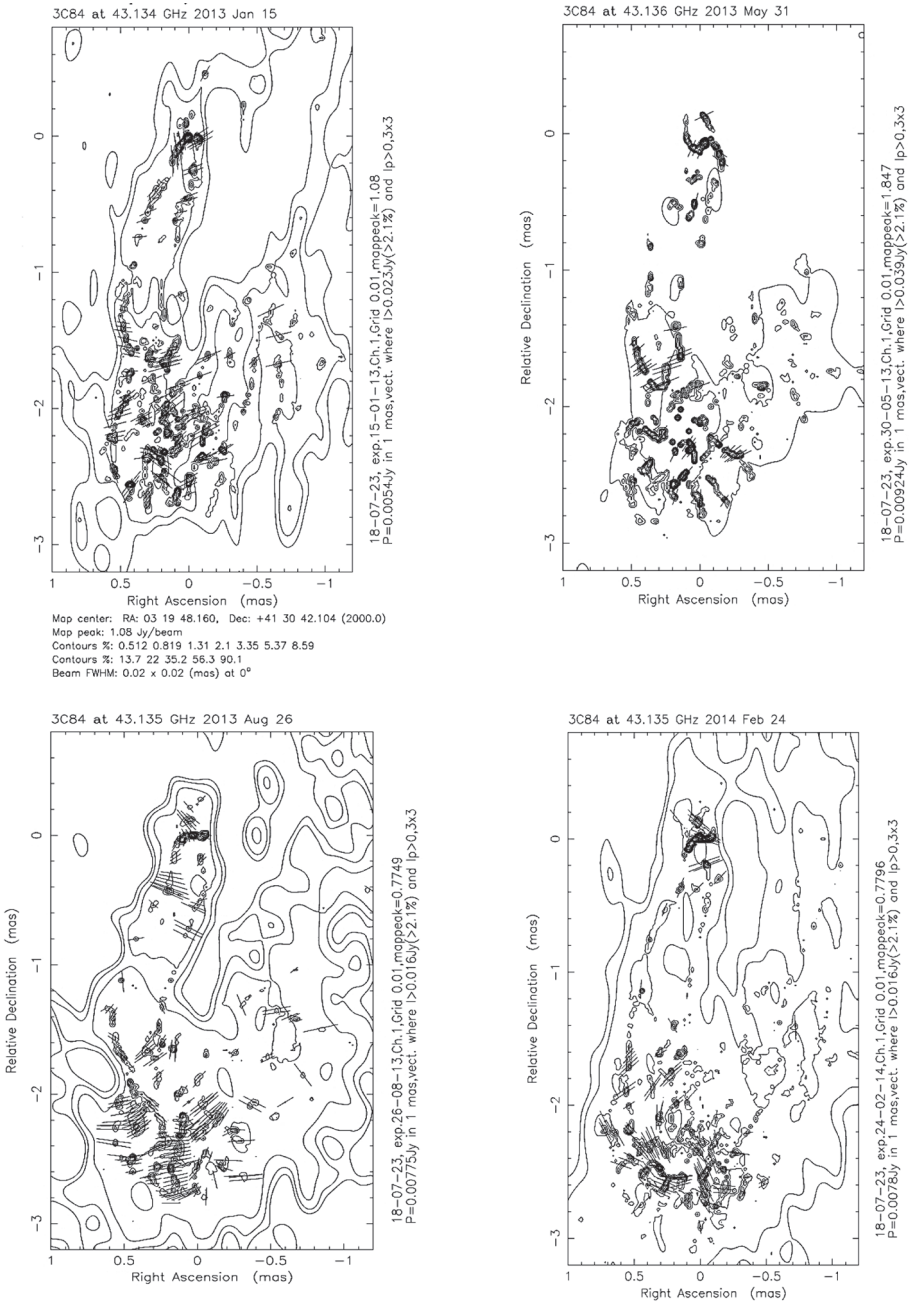


Рис. 2. Продолжение (начало см. на с. 19, окончание — на с. 23)

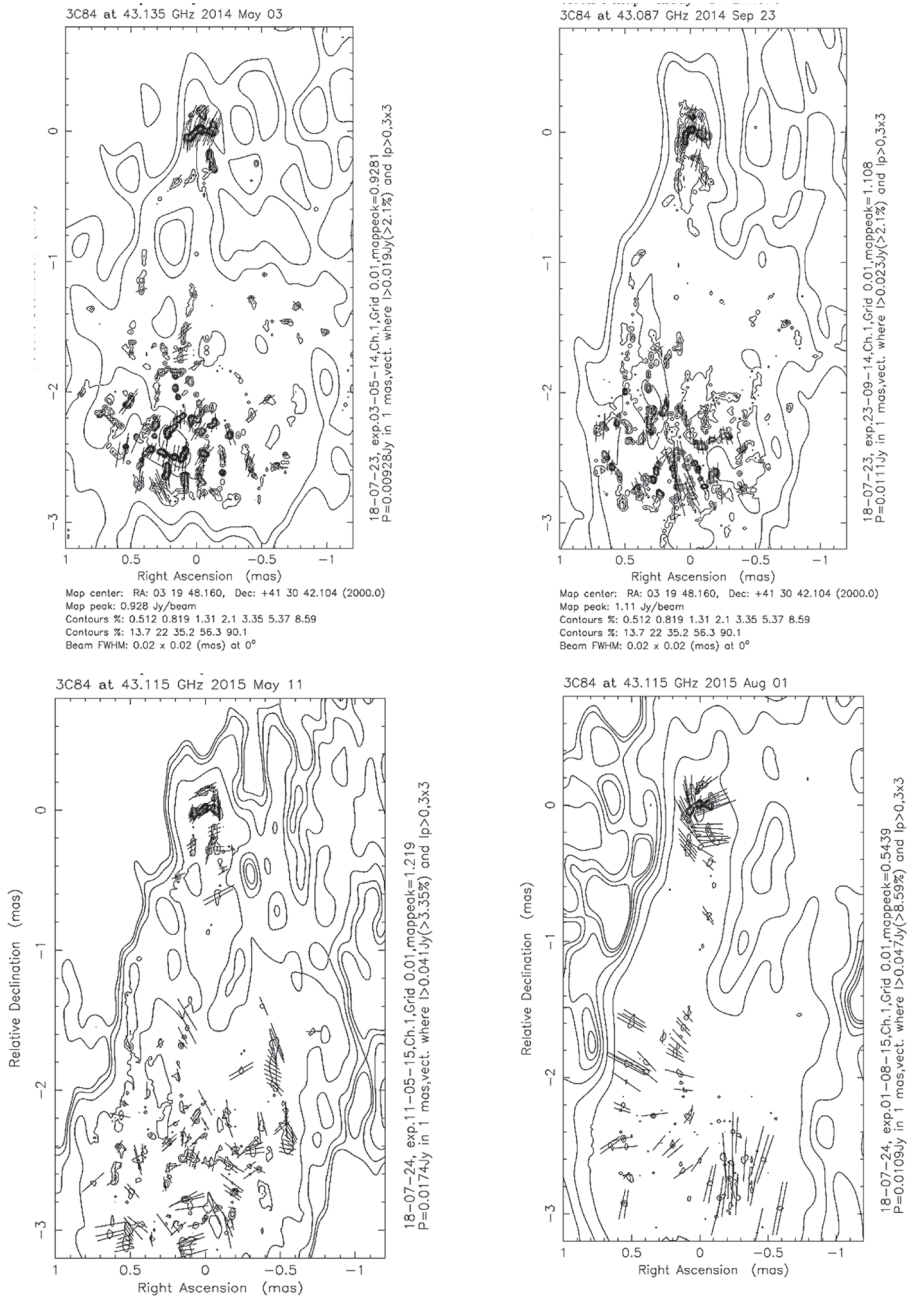
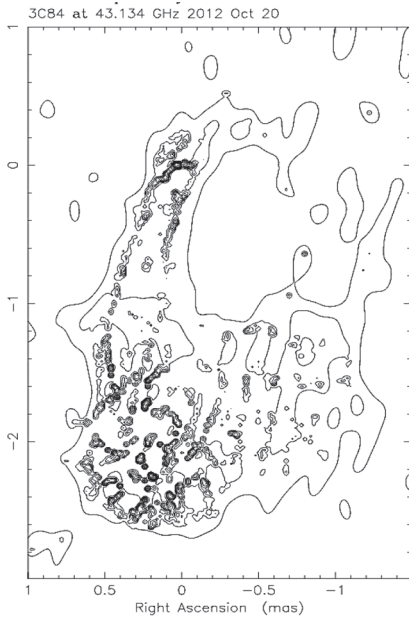
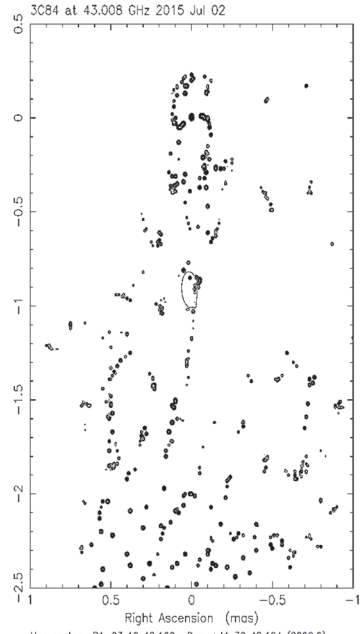


Рис. 2. Окончание (начало см. на с. 23)

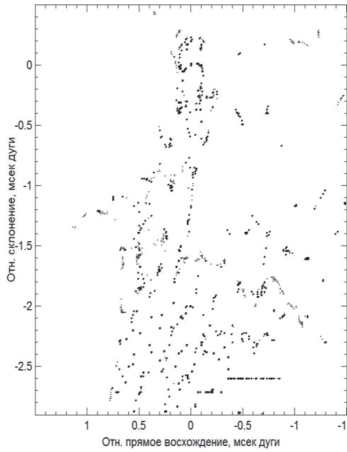


3C84 at 43.134 GHz 2012 Oct 20  
 Map center: RA: 03 19 48.160, Dec: +41 30 42.104 (2000.0)  
 Map peak: 1.26 Jy/beam  
 Contours %: 0.512 0.819 1.31 2.1 3.35 5.37 8.59  
 Contours #: 13.7 22 35.2 56.3 90.1  
 Beam FWHM: 0.02 x 0.02 (mas) at 0°

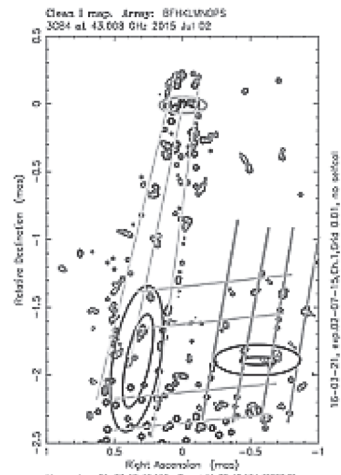


3C84 at 43.008 GHz 2015 Jul 02  
 Map center: RA: 03 19 48.160, Dec: +41 30 42.104 (2000.0)  
 Map peak: 1.52 Jy/beam  
 Contours %: 0.1 0.2 0.5 1 2 5 10 20 30 40 50 60 70  
 Contours #: 80 90 99  
 Beam FWHM: 0.01 x 0.01 (mas) at 0°

Источник: 3C84 Частота: 43008 МГц V: 11.2 км/с  
 Дата создания: 27.05.2016, Файл: E:\Stanislav\Private\Orion\DiffmapView\_2010\_03\_...



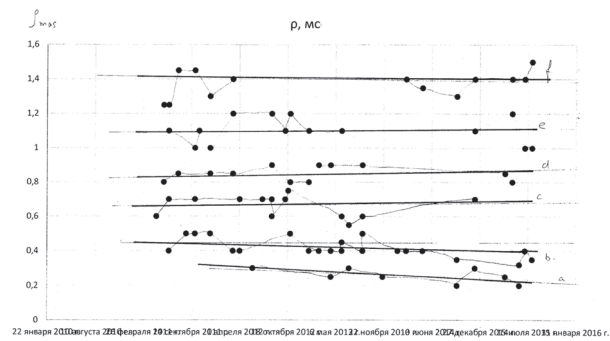
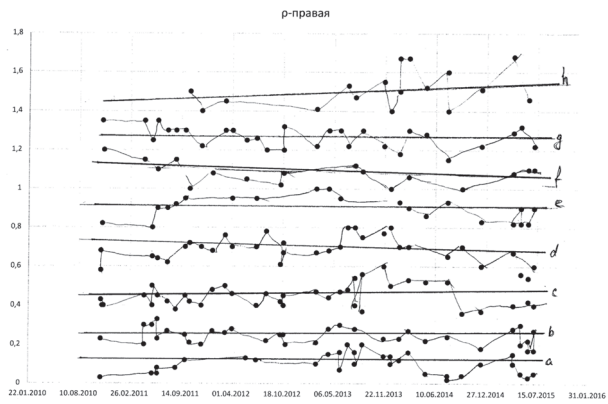
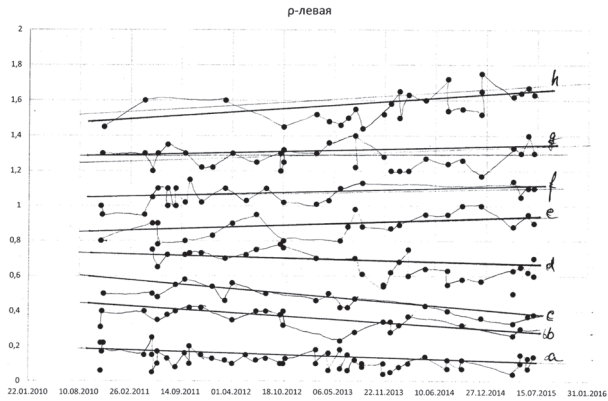
Поларизация : I  
 Ирис: 1.43 Ян/луч:5 мсек Уровни: % : 0.01 0.02 0.05 0.1 0.2 0.5 1 2 5 10 20 30 40



Clean 1 map, Army: BFHCLUN05  
 3C84 at 43.008 GHz 2015 Jul 02  
 Map center: RA: 03 19 48.160, Dec: +41 30 42.104 (2000.0)  
 Map peak: 1.75 Jy/beam  
 Contours %: 0.1 0.2 0.5 1 2 5 10 20 30 40 50 60 70  
 Contours #: 80 90 99  
 Beam FWHM: 0.02 x 0.02 (mas) at 0°

**Рис. 2а.** Карты сверхтонкой структуры сейфертовской галактики NGC 1275,  $\lambda = 7$  мм, с разрешением до  $\phi = 5$  мкс дуги, эпоха 2015.02.07. Эллипсы соответствуют положению вихрей





**Рис. 3.** Положение цепочек компонент составляющей потоков в разные эпохи,  $\lambda = 7$  мм: *a* — левой; *б* — правой; *в* — центральной

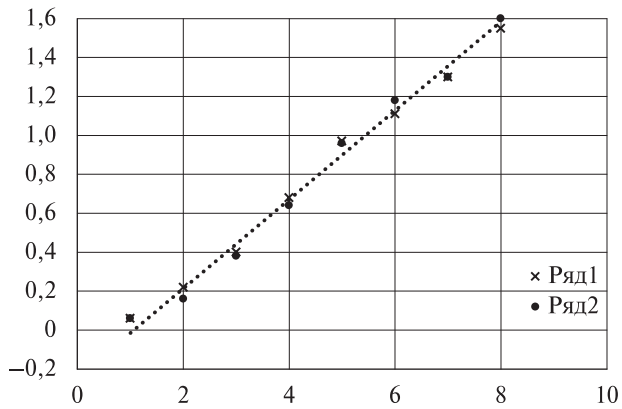


Рис. 4. Относительное положение колец левой и правой сторон

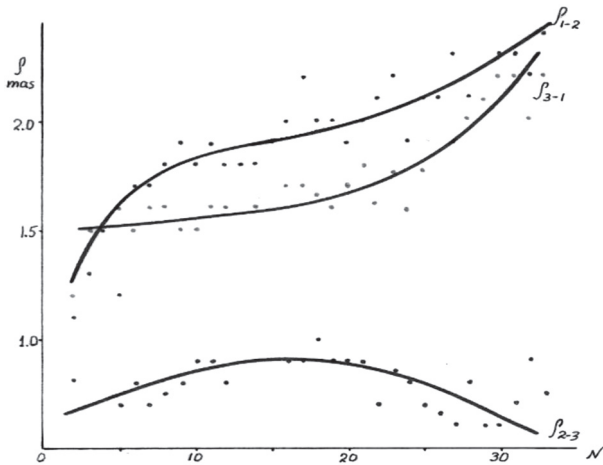
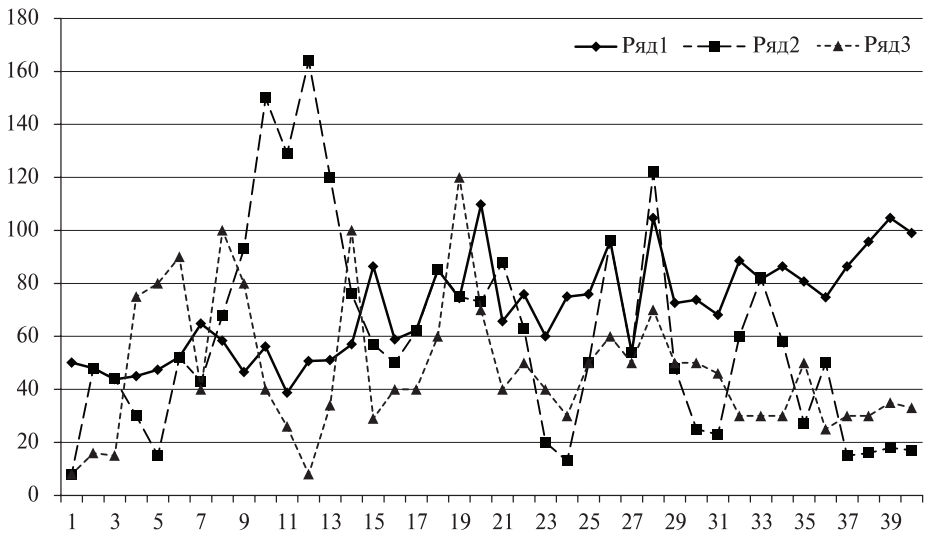


Рис. 5. Относительное положение сопел вихрей в разные эпохи



**Рис. 6.** Яркость сопел активных зон (Ян/луч),  $\lambda = 7$  мм,  $\phi = 0,15$  мс, множители приведены в конце табл. 1

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	3
Тонкая структура активной области галактики .....	5
Тонкая структура галактики .....	5
Вихри .....	9
Поляризация излучения активной зоны галактики .....	10
Заключение .....	12
Литература .....	13