

СЕЙФЕРТОВСКАЯ ГАЛАКТИКА NGC 1275 — СВЕРХТОНКАЯ СТРУКТУРА

© 2019 г. Л. И. Матвеев*, С. С. Сиваконь

Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

Поступила в редакцию 04.03.2019 г.; после доработки 28.05.2019 г.; принята к публикации 28.05.2019 г.

По данным наблюдений на VLBA (архив НРАО), $\lambda = 2$ см, построены радиокарты сейфертовской галактики NGC 1275 с разрешением 25 мкс, эпохи 1995–2015 и $\lambda = 7$ мм (архив Бостонского университета) эпохи 2000–2015 гг. с разрешением 20 мкс. Выделена кольцевая структура диаметром $\varphi \approx 2$ мс (1 пк), наклоненная под углом 60° к картинной плоскости, включающая три центра активности — вихря. Окружающая релятивистская плазма поступает по двум рукавам в основной северный центр и эжектируется в южном направлении $X \approx -10^\circ$ пустотелой трубкой-джетом диаметром ≈ 0.12 мс. В удаленной части джета на расстоянии $\rho \approx 2.5$ мс расположен второй центр активности — вихрь, плоскость которого ориентирована параллельно джету. Избыточный угловой момент уносится коаксиальным потоком, $\dot{\varphi}_{21} \approx 0.8$ и $\dot{\varphi}_{22} \approx 0.3$ мс, в восточном направлении $X \approx -90^\circ$, где формируется третий центр активности. Эжекция коаксиального потока $\dot{\varphi}_{31} \approx 0.7$ и $\dot{\varphi}_{32} \approx 0.35$ мс происходит в северном направлении. Проекция обоих коаксиальных потоков образуют на картинной плоскости узлы сетки. Раздвоение сопла в первой системе наблюдается при разрешении 3 мкс. Размеры двух последующих центров активности соответствуют 80×40 и 80×120 мкс. Результаты исследований тонкой структуры галактик в поляризованном излучении будут опубликованы в следующей работе, II.

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

DOI: 10.1134/S0320010819080060

ВВЕДЕНИЕ

Сейфертовская галактика NGC 1275 — известный радиисточник 3C 84, находится на расстоянии 110 Мпк, что соответствует линейным размерам 0.55 пк/мс. Несмотря на многолетние исследования установить детальную природу, протекающие в ней процессы не удалось. По одним представлениям, это сталкивающиеся галактики (Минковский, 1957), по другим — взрывающаяся галактика (Бербидж, Бербидж, 1965). В оптике наблюдаются две системы волокон, ориентированные под углами $\sim 60^\circ$ и -10° . Предполагается, что системы волокон относятся к галактике позднего типа (Рубин и др., 1977). Скорости волокон соответствуют ~ 5200 км/с. Считается, что расщепления спектральных линий в области ядра определяются относительной скоростью излучающих областей ~ 600 км/с, движущихся вокруг центра с периодом $\sim 10^4$ лет (Дибай, 1968). Масса меньшего ядра, $\sim 3 \times 10^8 M_{\text{Sun}}$, (Шкловский, 1978). Плотность электронов поглощающей среды, затеняющей центральную область галактики, соответству-

ет $N_e \approx 1.5 \times 10^6 \text{ см}^{-3}$, а в плотных вкраплениях, излучающих яркие эмиссионные линии, достигает $N_e \approx 8 \times 10^8 \text{ см}^{-3}$. Преобладает поглощение в восточной части экрана (Ромни, 1979). Скорость этой составляющей отличается от скорости волокон и соответствует ~ 8200 км/с. Радиоспектр источника 3C 84 имеет высокочастотный избыток, определяемый компактным ядром. Его излучение переменное и наблюдается в виде всплесков (Баррет и др., 1965; Дент, 1965; Костенко, Матвеев, 1966, 1968). Характерное время нарастания потока не превышает одного года, что свидетельствует о достаточно малых угловых размерах области излучения. Наблюдения со сверхдлинными базами (РСДБ) на длине волны $\lambda = 3$ см позволили выделить компактное ядро размерами ~ 0.3 мс дуги и две компоненты, удаленные на расстояния ~ 3 мс дуги в направлении 9° и 170° (Матвеев и др., 1973; Скилиции и др., 1975). Наблюдения на длине волны 1.35 см с разрешением 0.1 мс дуги в период спада высокой активности установили раздвоение структуры активной области (Паулини-Тос и др., 1978; Матвеев и др., 1979, 1980). Наши представления о галактике в основном ограничи-

*Электронный адрес: lmatveenko@gmail.com

вались уточнениями отдельных сторон моделей. Практически, это относится ко всем объектам с активными ядрами. Сколь бы ни были оригинальны модели, они не продвигали нас вперед, нужны были реальные представления о процессах, протекающих в 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 больших 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 и достигнуть предельного углового разрешения до мкс дуги, (Матвеевко и др., 1965; Матвеевко, 2007, 2018). Исследования сейфертовской галактики NGC 1275 подводят итог исследованиям сверхтонкой структуры объектов с активными ядрами: 3С 273, 3С345, 454.3, ОJ287, Леб А и Дева А, определению природы и связи протекающих процессов (Матвеевко, Сиваконь, 2013, 2017; Матвеевко, Селезнев, 2015, 2016, 2017; Матвеевко, Демичев, 2017). Исследования охватывают широкий временной интервал эпох периода 1995–2015 гг., $\lambda = 2$ см и 2010–2015 гг., $\lambda = 7$ мм, что позволяет установить кинематику процессов, протекающих в активных зонах, определить характерные особенности и их различия в рассматриваемой группе объектов. Получены радиокарты исследуемых объектов в широком спектре угловых разрешений до предельных значений — мкс дуги. В следующей работе предполагается провести анализ особенностей поляризованного излучения. Для общего представления об исследованиях тонкой структуры объектов рассмотрим, что измеряет, видит РСДБ-система, каков ее отклик.

ОТКЛИК РСДБ-СИСТЕМЫ — ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ

Исследования структуры объекта на РСДБ-сети определяются откликами интерферометров: откликом синтезированной диаграммы направленности сети от наблюдаемого объекта. Отклик синтезированной диаграммы направленности РСДБ-системы можно представить в упрощенном виде в виде гауссоиды — вещественной части отклика, и мнимой части — фазы, пунктирная линия рис. 1. Ширина диаграммы направленности вещественной части $\Delta\varphi$ — сечение гауссоиды, сужается по мере повышения уровня отсчета, но вблизи вершины происходит насыщение (сплошная линия). Однако изменение фазы достигает максимального значения $\sim 200^\circ$. Угловое разрешение в этом случае определяется чувствительностью. При точности измерения фазы $\sim 10\%$ разрешение достигает 5% вещественной части $\Delta\varphi$. Практически это

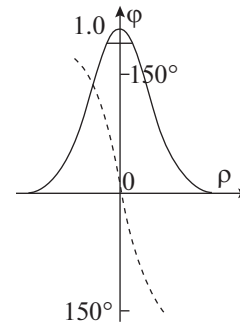


Рис. 1. Отклик РСДБ-сети.

позволило реализовать предельное угловое разрешение, определяемое рассеянием на неоднородностях межзвездной среды $\varphi_{sc} \approx \lambda_{cm}^2 / \sin b^{0.5}$ мкс, где b — галактическая широта источника. Яркость фрагментов исследуемого объекта 3С 84 в среднем соответствует оптимальному угловому разрешению 20–25 мкс (≈ 0.01 пк). Яркость потока на выходе сопла существенно выше, что позволяет достигнуть углового разрешения до микросекунд (≈ 1 мпк).

ТОНКАЯ СТРУКТУРА АКТИВНОЙ ОБЛАСТИ ГАЛАКТИКИ

Мы исследовали структуру активной области галактики NGC 1275 на волне $\lambda = 7$ мм, в том числе в поляризованном излучении, по архивным VLBA данным наблюдений Бостонского Университета для 40 эпох за период 2010–2015 гг. с угловым разрешением до 5 мкс (2.7 мпк). На волне 7 мм достаточно высока яркость фрагментов исследуемой структуры и мало влияние поглощения. В связи с ограничением объема публикации мы приводим наиболее характерные карты в рассматриваемом периоде, (Матвеевко, Сиваконь, 2019). Оптимальное разрешение для исследований тонкой структуры галактики соответствует 20–25 мкс.

Рассмотрим структуру активной зоны. Окружающее вещество поступает в активную зону по рукавам с двух противоположных направлений, эпохи (31.05.2013, 02.07.2015), и эжектируется в южном направлении, унося избыточный угловой момент (рис. 2). Две параллельные полосы соответствуют тангенциальным направлениям пустотелого потока — джета. Контрджет направлен в северном направлении, его размеры не превышают ≤ 0.3 мс, т.е. существенно меньше джета. Биполярный поток джет — контрджет эжектируется из сопла диаметром $\varnothing = 0.12$ мс (0.07 пк) и практически уносит весь избыточный угловой момент, не доходя до центра зоны, эпоха 02.11.2010. Это определяет низкое излучение центрального потока джета и предполагает незначительное количество вещества, выпадающего на формирующееся массивное центральное

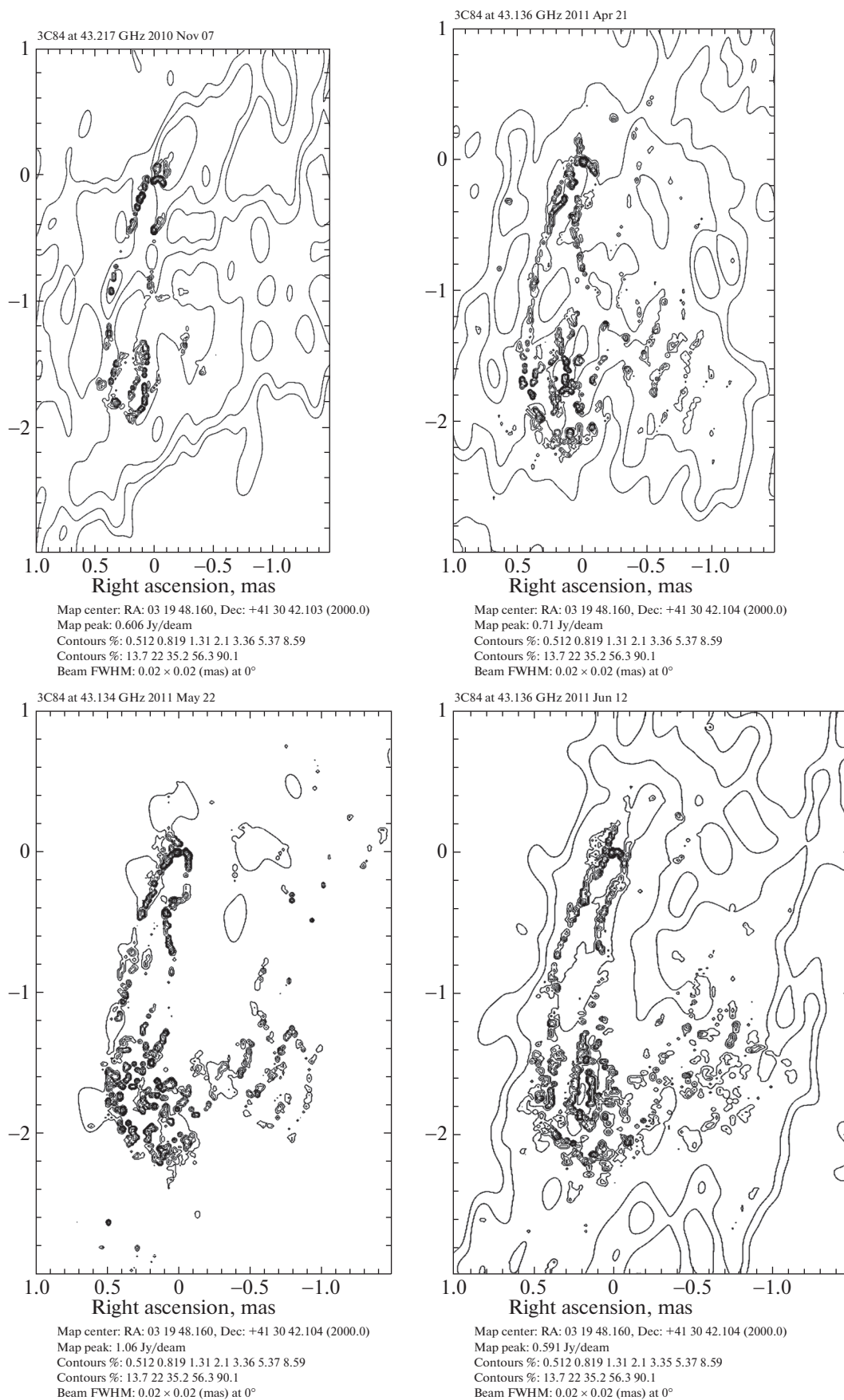


Рис. 2. Карты 3С 84, $\lambda = 7$ мм, $\varphi = 20$ мкс. Схема структуры (в конце рисунка). Эпоха 2.07.2015, $\varphi = 10$ и 5 мкс.

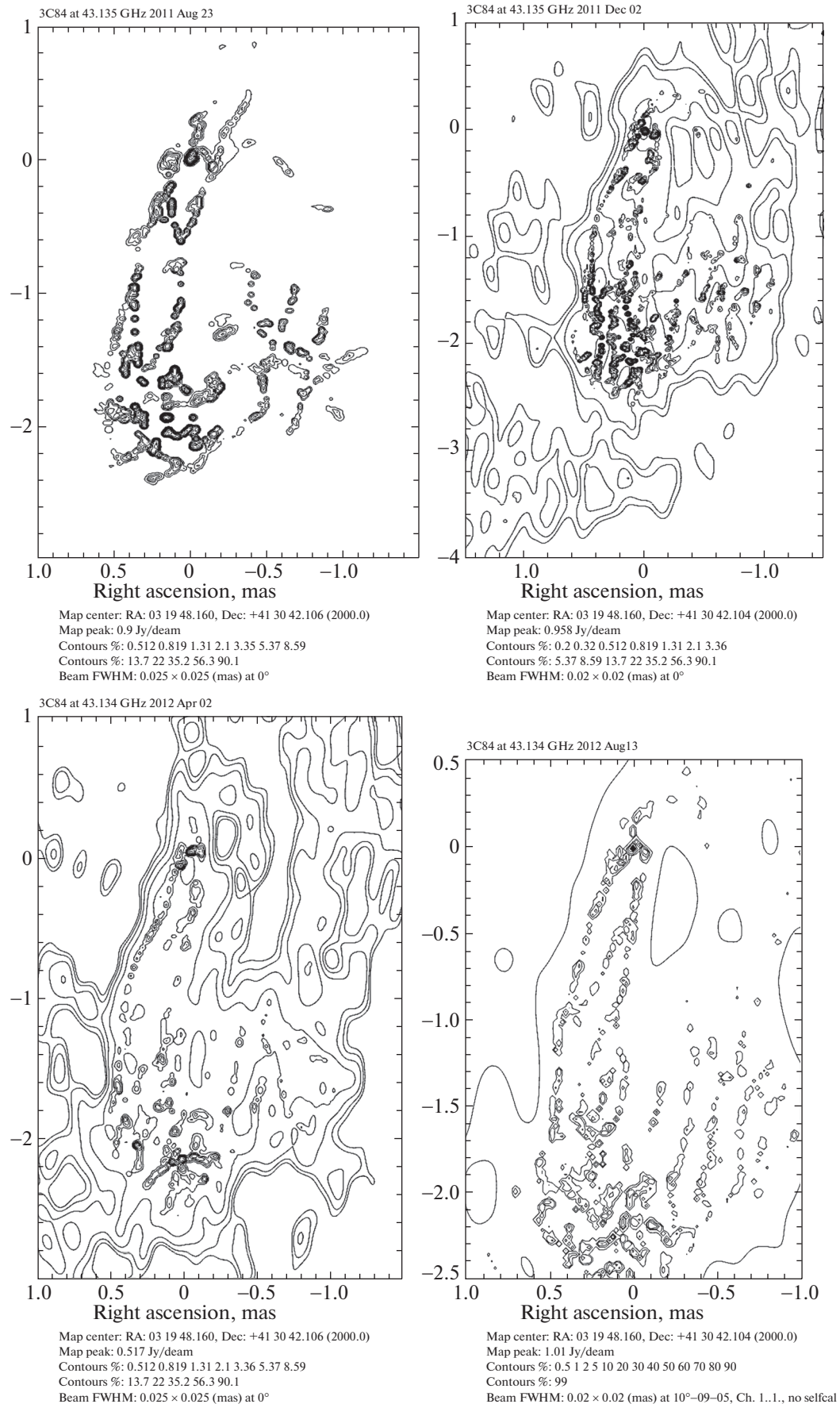


Рис. 2. Продолжение

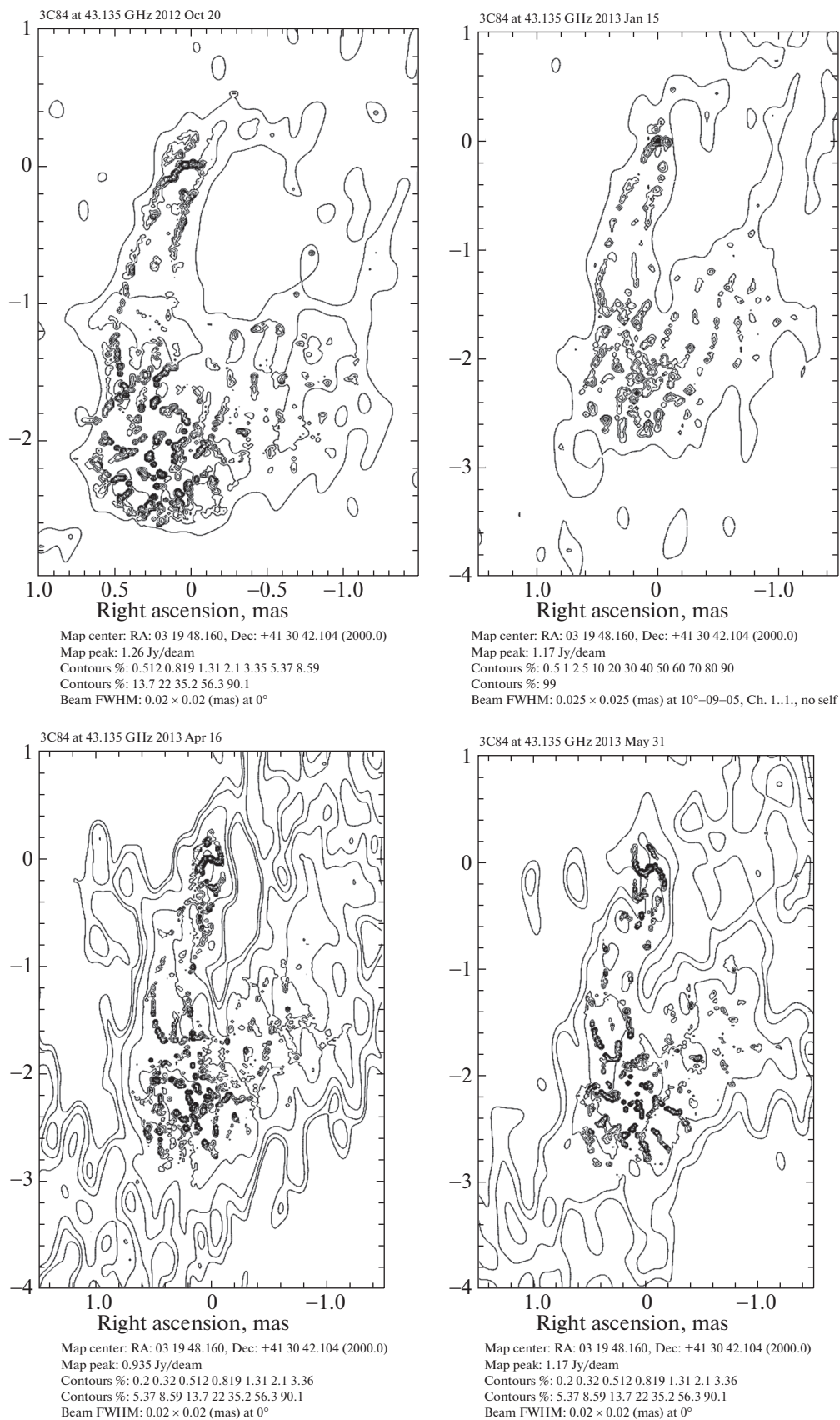


Рис. 2. Продолжение

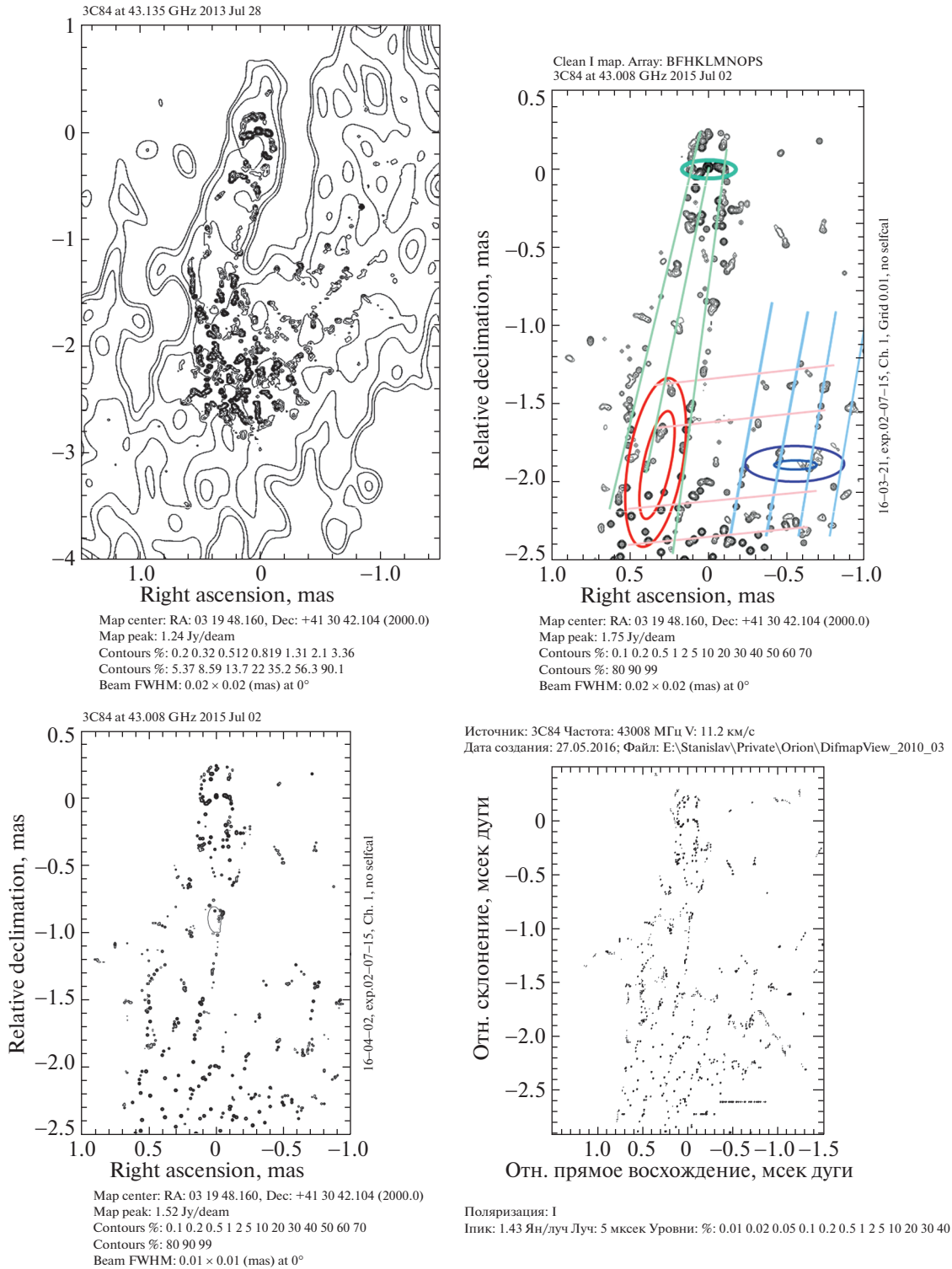


Рис. 2. Окончание

тело. Наблюдаемое увеличение диаметра сопла с $\dot{\varnothing} = 0.17$ мс в апреле до $\dot{\varnothing} = 0.23$ мс в августе 2011 г. свидетельствует о повышении скорости поступающего вещества — достижении критического углового момента на более удаленном расстоянии

от центра. Увеличение диаметра джета до $\dot{\varnothing} \approx 0.3$ мс на расстоянии $\rho = 1.5$ мс определяется аналогично — повышенной скоростью поступающего вещества в предшествующий период. Об этом

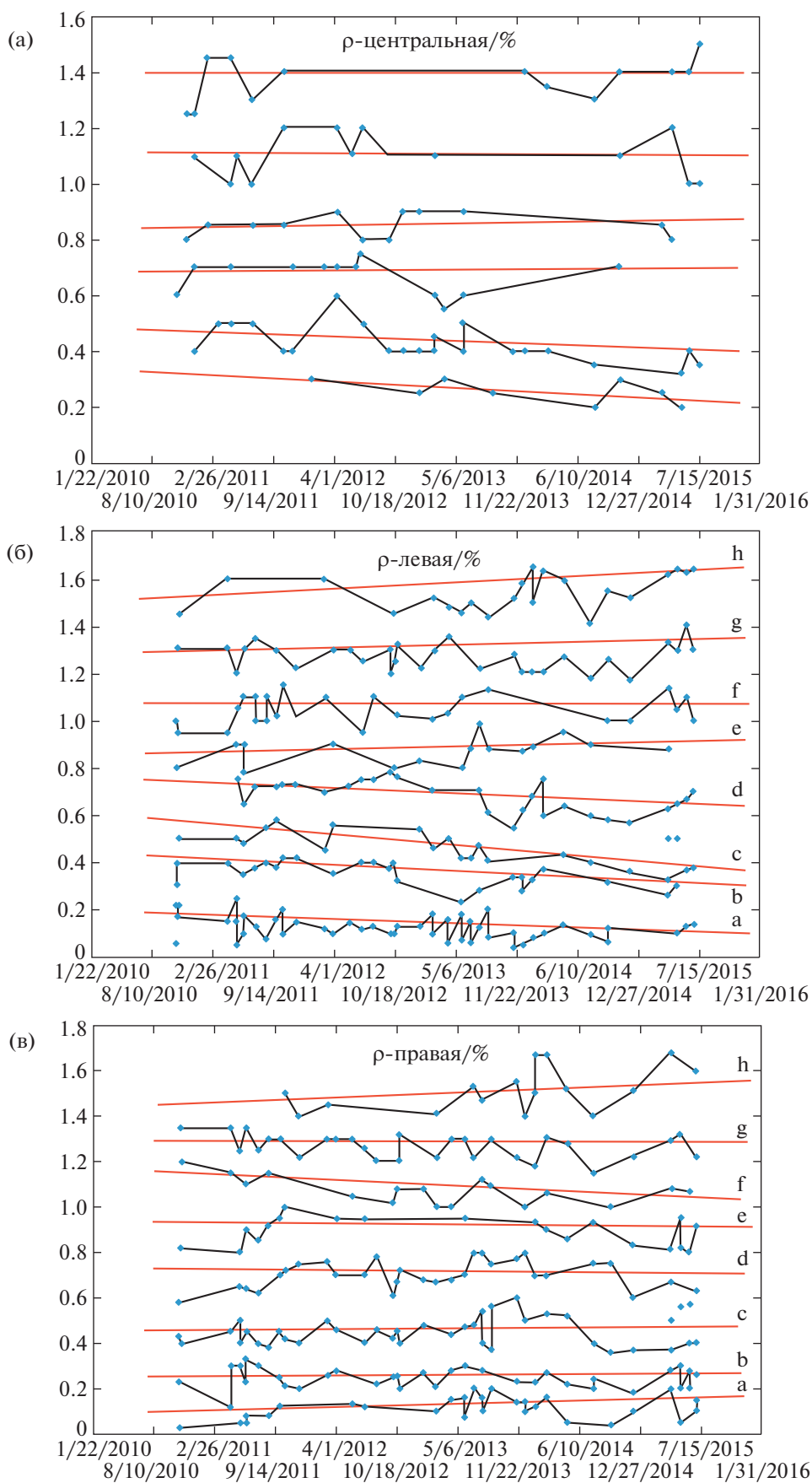


Рис. 3. Относительное положение фрагментов в левой (а), правой (б) и центральной (в), $\lambda = 7$ мм.

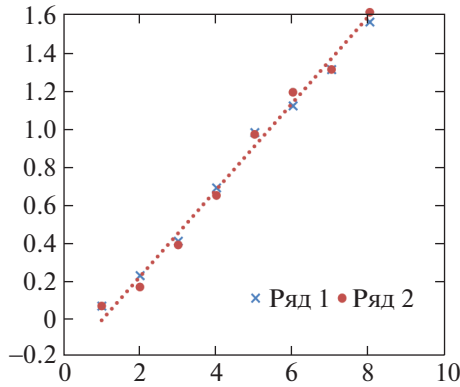


Рис. 4. Относительное положение тангенциальных составляющих колец джета левого и правого ряда.

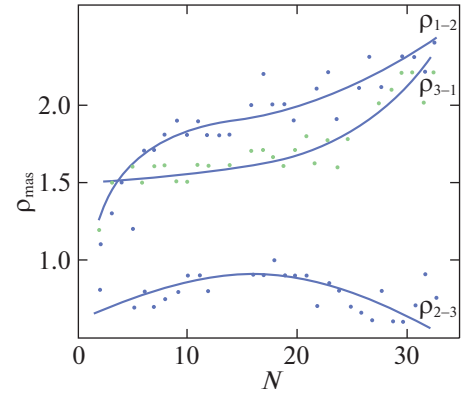


Рис. 5. Относительное положение центров активностей.

же свидетельствует начало формирования вихря № 2 в потоке джета.

Форма джета, прецессия

Анализ тонкой структуры галактики 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. Асимметрия может определяться различием скоростей и плотностью вещества потоков, поступающих по рукавам с противоположных направлений, эпоха 22.05.2011. Полупериод спирали $T/2$ по мере удаления потока от сопла увеличивается (с 0.25, 0.32 и до 0.34 мс), что свидетельствует об увеличении угловой скорости прецессии либо уменьшении скорости потока джета за рассматриваемое время в 1.5 раза.

Кольцевые структуры джета

В параллельных полосках джета наблюдаются симметричные цепочки фрагментов, соответствующие тангенциальным направлениям колец. Их яркость не превышает 2% пикового значения. Наиболее четко эти структуры — две параллельные цепочки компонент, левая и правая, проявляются в эпоху 17.10.2011. Положения фрагментов в стенках джета ρ , выраженные в мс, в течение рассматриваемого периода, их яркости T , в процентах относительно пикового значения (табл. 1, Матвеевко, Сиваконь, 2019), приведены на рис. За — левая сторона, Зб — правая и Зс — центрального потока. Среднее относительное положение фрагментов (а–h) соответствует линейной зависимости от расстояния (рис. 4). Расстояние между кольцами 0.18 ± 0.01 мс (0.1 пк). Скорости фрагментов — наклон прямых, не превышает $v \leq 0.08$ с.

Кольца центрального потока-джета

Как ранее уточнялось, яркость фрагментов центрального потока невелика — на пределе обнаружения. Отдельные фрагменты на уровне 2% проявляются к концу 2011 г., эпоха 02.11.2010. Общее распределение вкраплений в центральном потоке за рассматриваемый период представлено в табл. 1 (Матвеевко, Сиваконь, 2019) и показано на рис. Зв. Выделяются группы компонент (а–f). Исходя из наклона прямых, верхний предел скоростей фрагментов центрального джета не превышает $v \leq 0.01$ с. Средние значения положений номера колец левой (x) и правой стороны (•) в зависимости от расстояния ρ в мс приведены на рис. 4. Расстояние между кольцами растает по мере удаления от сопла с 0.15 мс в начале до 0.29 мс в конце рассматриваемого периода.

Анализ сверхтонкой структуры фрагментов на выходе сопла № 1 с разрешением до 3 мкс установил небольшое раздвоение компонент на 1.5 мпк в направлении джет–контрджет. Зоны сопел двух других активных центров размыты в пределах 80×40 и 80×120 мкс соответственно.

Относительное положение центров активности — сопел, в зависимости от эпох, $\lambda = 7$ мм, приведены в табл. 2 (Матвеевко, Сиваконь, 2019) и показаны на рис. 5. Расстояние между 1-й и 2-й зонами ρ_{12} за рассматриваемый период увеличивается с 1.7 до 2.4 мс и соответствует 0.7 ± 0.15 мс за 4.5 года. Если это изменение определяется удалением вихря, то его скорость соответствует $v = 0.25 \pm 0.06$ с. Но это может быть результатом внутренних изменений структуры активной зоны. Расстояние между второй и третьей зонами $\rho_{23} = 0.9 \pm 0.1$ мс в пределах ошибок не меняется. Предел скорости в этом случае не превышает $v \leq 0.04$ с.

Таблица 1. Яркости сопел. $\lambda = 7$ мкм. 1 колонка: I пиковое значение $Y_{\text{н}}/\text{луч}$, Яркость 2 и 3 сопла в % пикового значения и $0.01 Y_{\text{н}}/\text{луч}$, $\phi = 0.15$ мсек

№	Эпоха/№	I, $Y_{\text{н}}/\text{луч}$	2%, $0.01 Y_{\text{н}}$	3%, $0.01 Y_{\text{н}}$
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
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	График	30	1	10

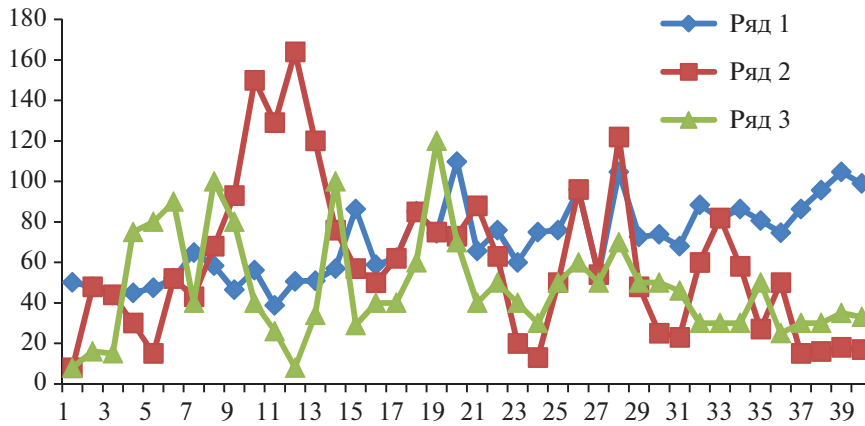


Рис. 6. Пиковые значения яркостей активных зон № 1–3.

Яркость сопел вихрей

Рассматриваемая структура содержит три активных центра. Окружающее вещество поступает по рукавам с двух противоположных сторон в активную зону № 1, северная, и эжектируется в южном направлении в зону № 2, из которой поступает в восточную зону № 3 и далее в северном направлении. При этом вещество частично возвращается в активную зону № 1, завершая полный цикл движения в крупномасштабном вихре диаметром $\dot{\varnothing} \approx 2$ мс (≈ 1 пк). По мере последовательного поступления в зоны яркости сопел должны снижаться. Однако такого снижения яркости либо корреляции в явном виде не наблюдается (рис. 6). Во многом это определяется существенным преобладанием яркости зоны № 1, относительно которой проводится отсчет яркости. Из табл. 1 и графика рис. 6 следует, что яркость первого сопла (ряд 1), плавно нарастает с 1.5 Ян/луч, разрешение $\varphi = 0.15$ мс в начале периода, до 3.5 Ян/луч в конце. На этом фоне в эпохи 7, 15, 20 и 28 порядка уровня самого фона. Яркость фона второго сопла (ряд 2), достигает 20–30% яркости сопла первой зоны, но всплески 11, 20, 28 и 33 в несколько раз превышают фоновое значение. При этом яркость первого всплеска достигает максимального пикового значения. Третий случай (ряд 3) — фоновый уровень сохраняется на уровне 1–2% пикового значения, на уровне которого наблюдаются всплески до 5%: 5, 9, 15, 19, 28. Корреляция по времени всплесков 19 и 28, вероятно, носит случайный характер.

Одна из особенностей джета первой активной зоны — образование в его удаленной части $\rho \approx 1.5$ мс структуры эллиптической формы, 02.11.2010, $\lambda = 7$ мм. Большая ось эллипса ориентирована параллельно потоку джета. Структура соответствует проекции окружности, диаметром $\dot{\varnothing} \approx 0.5$ мс (0.3 пк), наклоненной к картинной плос-

кости под углом 65° . Эта структура соответствует формирующемуся вихрю № 2. Эжекция коаксиального потока диаметрами $\dot{\varnothing}_{21} \approx 0.8$ мс и $\dot{\varnothing}_{22} \approx 0.3$ мс происходит в восточном направлении $X \approx -90^\circ$, эпохи 21.04.2011, 02.12.2011, 06.12.2014. Скорость потоков достаточно высока — формируется вихрь № 3, с коаксиальным джетом, $\dot{\varnothing}_{31} \approx 0.7$ мс и $\dot{\varnothing}_{32} \approx 0.35$ мс эжектируемым в северном направлении $X \approx -10^\circ$.

Изменение структуры в активной зоне галактики с разрешением 20 мкс в наиболее активные моменты приведено на рис. 2. Данные на все эпохи приведены в работе (Матвеевко, Сиваконь, 2019).

Тонкая структура, $\lambda = 2$ см. Рассмотрим особенности тонкой структуры и кинематики активной области в галактике NGC 1275 на длине волны 2 см с угловым разрешением 25 мкс (≈ 14 мпк), полученным по архивным данным наблюдений NRAO на VLBA в период 1995–2015 гг. (рис. 7). Несмотря на небольшое различие эпох по времени в астрономических масштабах, тонкая структура активной зоны галактики претерпевает существенные изменения. В начале периода 1995–1997 гг. структура имеет характерный вид “елочки” — изогнутой веточки с хвоей. Пиковая яркость сопла в этот период не превышает $I_0 \leq 0.8$ 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 нанизана на веточку. Воронки — фрагменты вращающегося пустотелого потока джета, эжектируемого из сжимающегося со временем сопла, 27.11.1995. В случае хвоя с противоположной ориентацией правой и левой составляющих это может определяться различием скоростей потоков, поступающих с противоположных рукавов. В эпоху 27.11.1995 меняется изгиб веточки — джета, на обратный и восстанавливается в следующую эпоху. Возможно, это определяется изменением наклона плоскости распо-

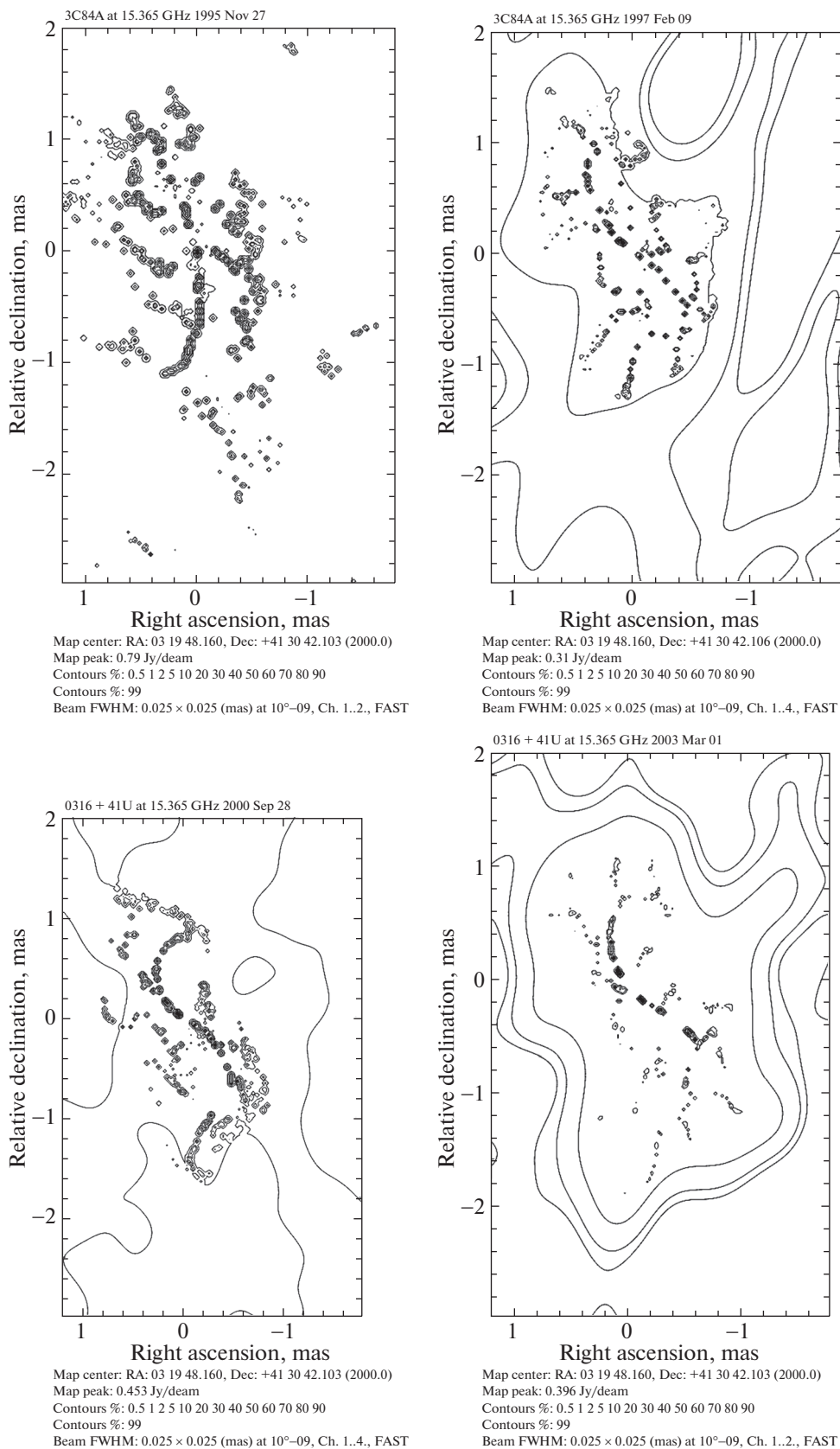


Рис. 7. Радиокарты сейфертовской галактики NGC 1275: $\lambda = 2$ см, $\varphi = 25$ мкс, 1995–2015 гг.

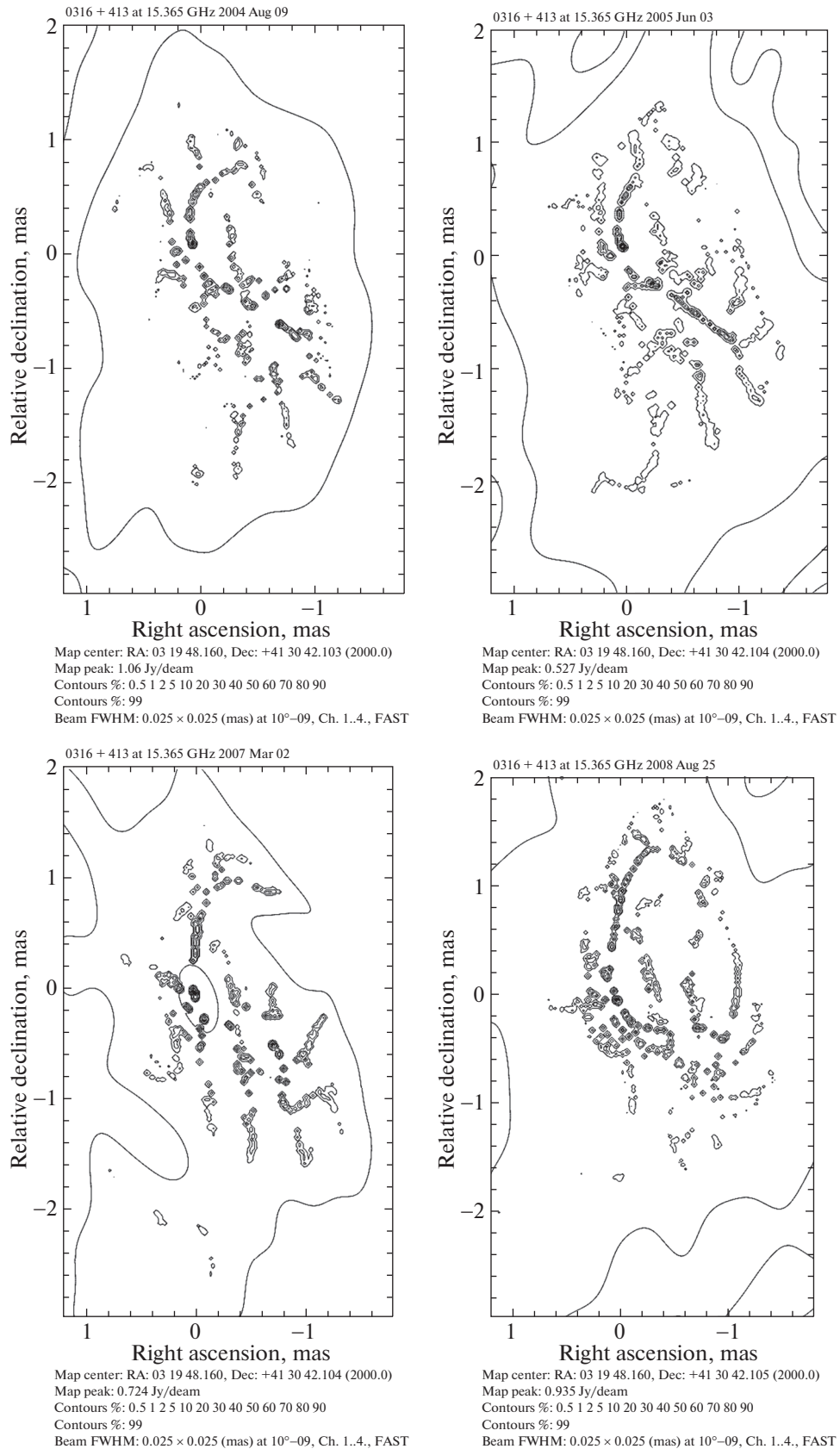


Рис. 7. Продолжение

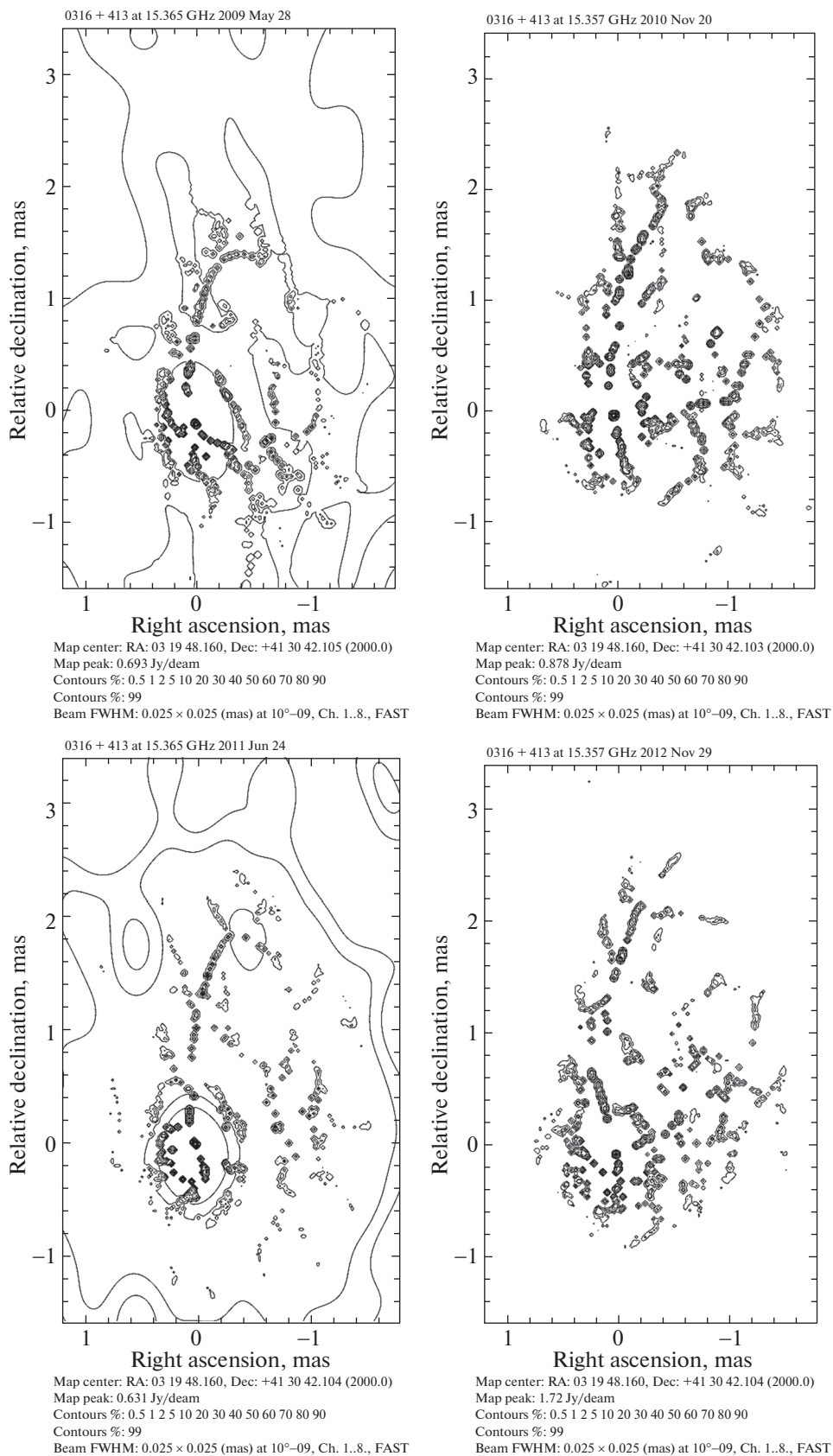


Рис. 7. Продолжение

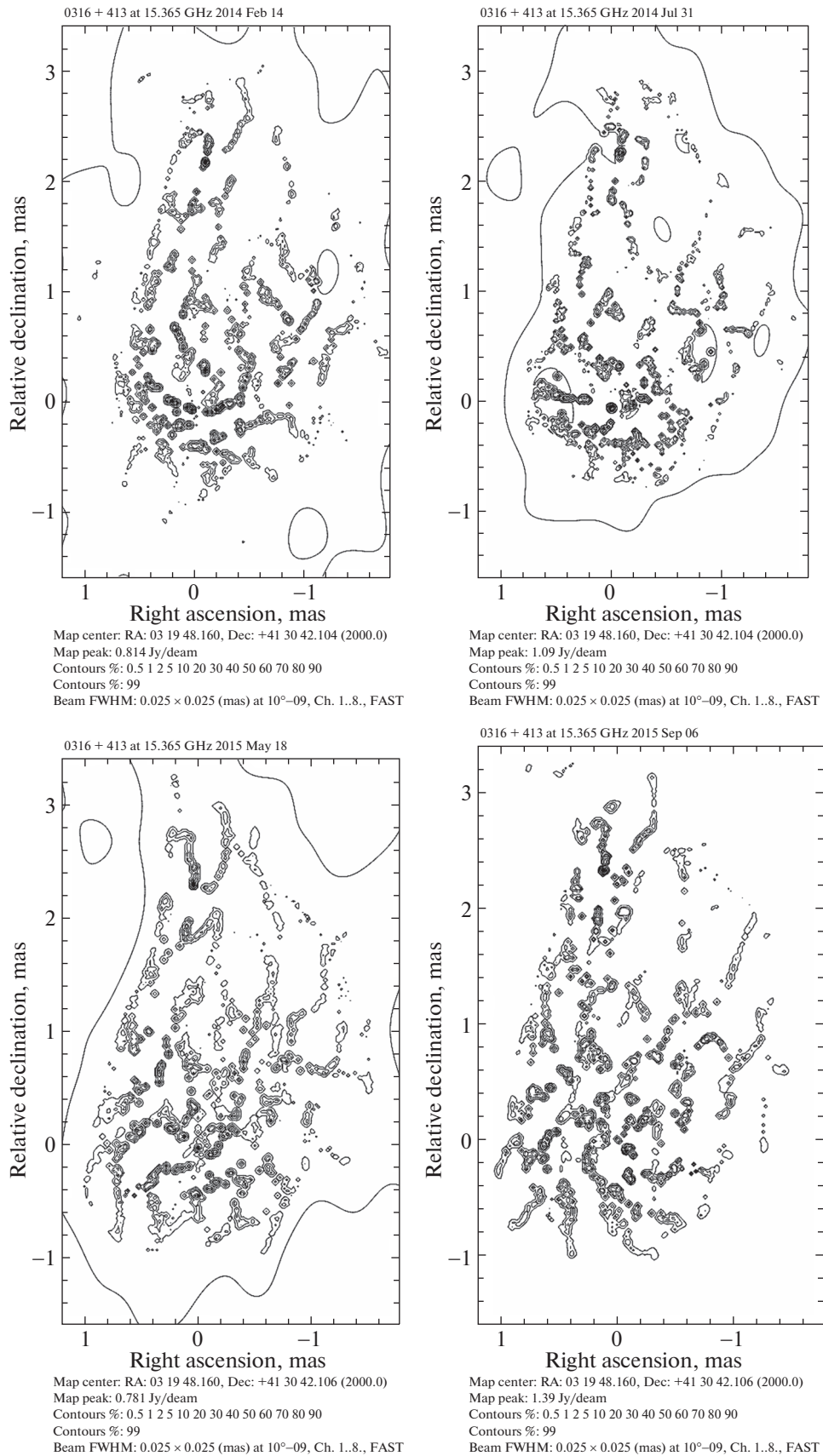


Рис. 7. Окончание

жения джета — проекции дугообразной структуры джета на картинную плоскость, наблюдаемую с ребра. В верхней части веточки расположен яркий компактный источник — сопло активной зоны № 1. Далее в джете на расстоянии 0.8 мс расположен вихрь зоны № 2. Его яркость достигает пикового значения. Восточнее вихря на расстоянии 0.3 мс от него расположен вихрь № 3. Видно, что в эпоху 12.07.1997 к первому соплу по спиральному рукаву поступает окружающее вещество. В начале 2000 г. верхняя часть веточки изгибается, дополняя стенку эллипса — части окружности, наклоненной к картинной плоскости. В 2008–2009 гг. эллипс практически виден полностью, его размеры равны 2×1 мс, а его большая ось ориентирована под углом 10° . Эллипс соответствует окружности диаметром $\varnothing \approx 2$ мс (≈ 1 пк), наклоненной под углом 60° к картинной плоскости. Левая часть стенки эллипса — центральный поток джета зоны № 1, окружена двумя параллельными полосками — тангенциальными направлениями стенок пустотелой составляющей диаметром $\varnothing \approx 0.4$ мс, эпоха 25.08.2008. Джет направлен в сторону вихря зоны № 2. В последнем случае джет — коаксиальный поток, эжектируется в направлении вихря активной зоны № 3, эпохи, предшествующие 2011 г. Коаксиальный поток из зоны № 3 эжектируется в северном направлении параллельно джету первой системы 12.12.2011. В эпохи 27.02.2011–24.06.2011 в зоне № 2 наблюдается повышенное поглощение, которое снижает яркостную температуру сопла в 2–4 раза по сравнению с соседними эпохами. Рассматриваемая структура сохраняется до конца периода 2015 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сейфертовская галактика NGC 1275 — сталкивающиеся галактики, взрывающаяся галактика или космический торнадо? Что следует из их изображений? Исследования тонкой структуры активной области галактики с угловым разрешением 20 мкс и сверхтонкой с разрешением несколько микросекунд на длинах волн 2 см и 7 мм установили наличие трех последовательных вихрей. Окружающее вещество повышенной плотности перетекает с высокой скоростью по двум рукавам в активную зону № 1. Избыточный угловой момент уносится джетом — трубкой диаметром ≈ 0.3 мс (0.2 пк) в южном направлении, где формируется второй вихрь с коаксиальным джетом, эжектируемым в западном направлении. На расстоянии 1 мс от него формируется третий вихрь с эжекцией джета в северном направлении параллельно первому джету. Частично эжектируемый поток возвращается в первую активную зону, замыкая кольцевую структуру диаметром 1.8 пк, наклоненную к картинной

плоскости под углом $X \approx 65^\circ$. Неравномерность поступающего вещества определяет изменение яркости сопел.

Природа структуры и кинематики активной зоны самосогласована и соответствует вихревой природе. Раздвоение сопла первой системы проявляется при разрешении 3 мкс. Размеры области двух последующих центров активности 80×40 и 80×120 мкс соответственно и вытянуты в направлении эжекции потоков. Вращение джетов автоколлимирует потоки и определяет продольную и круговую составляющие магнитных полей, ориентацию поляризации излучения.

Работа выполнена при поддержке Программы Президиума РАН № 28 “Космос: исследования фундаментальных процессов и их взаимосвязей. Раздел Управление”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баррет А.Х., Кутуза Б.Г., Матвеев Л.И. и др., *Астрон. журн.* **3**, 527 (1965).
2. Бербидж, Бербидж (E.M. Berbridge and G.R. Berbridge), *Astrophys. J.* **142**, 1351 (1965).
3. Дент (W.A. Dent), *Science* **148**, 1458 (1965).
4. Дибай Э.А., *Астрофизика* **46**, 725 (1968).
5. Костенко В.И., Матвеев Л.И., *Астрон. журн.* **43**, 280 (1966).
6. Костенко В.И., Матвеев Л.И., *Астрон. журн.* **45**, 1181 (1968).
7. Матвеев Л.И., *Astron. Nachr.* **328**, 411 (2007) (Early VLBI in the USSR).
8. Матвеев Л.И., ИКИ Препринт 2179 (2018).
9. Матвеев Л.И., ИКИ Препринт 2188 (2018).
10. Матвеев Л.И., Кардашов Н.С., Шоломицкий Г.Б., *Изв. вузов. Радиофизика* **4**, 651 (1965).
11. Матвеев Л.И., Коган Л.Р., Костенко В.И. и др., *Астрон. журн.* **50**, 1157 (1973).
12. Матвеев Л.И., Селезнев С.В., Письма в *Астрон. журн.* **41**, 774 (2015) [L.I. Matveyenko, S.V. Seleznev, *Astron. Lett.* **41**, 743 (2015)].
13. Матвеев Л.И., Селезнев С.В., Письма в *Астрон. журн.* **42**, 237 (2016) [L.I. Matveyenko, S.V. Seleznev, *Astron. Lett.* **42**, 207 (2016)].
14. Матвеев Л.И., Сиваконь С.С., Письма в *Астрон. журн.* **39**, 547 (2013) [L.I. Matveyenko, S.S. Sivakon', *Astron. Lett.* **39**, 481 (2013)].

15. Матвеевко и др. (L.I. Matveyenko, K.I. Kellermann, I.I.K. Pauliny-Toth, et al.), Preprint IKI № 536 (1979).
16. Минковский (R. Minkovsky), IAU Symp. № 4 (Radio Astron. Cambridge Univ. Press., 1957).
17. Матвеевко Л.И., Келлерманн К.И, Паулини-Тос И.И.К. и др., Письма в Астрон. журн. **6**, 77 (1980).
18. Паулини-Тос И.И.К., Пройс Е., Витцел А. и др., Письма в Астрон. журн. **4**, 64 (1978).
19. Ромни (J. Romney), Thesis of Ph. Deg. (Caltech, 1979).
20. Рубин и др. (V.C. Rubin, W.K. Fort, Ch.Jr. Peterson, and J.H. Oort), Astrophys. J. **211**, 693 (1977).
21. Скилицции др. (R.T. Schilizzi, M. Cohen, J.D. Romney, D.B. Shaffer, K.I. Kellerman, G.W. Swenson, Jr., J.L. Yen, and R. Rinehart), Astrophys. J. **201**, 263 (1975).
22. Шкловский И.С., Письма в Астрон. журн. **4**, 493 (1978).