

На правах рукописи

Морозова Дарья Адиковна

Анализ возмущений в джетах блазаров
с сильным гамма-излучением

Специальность 01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2014

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном университете.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук
Ларионов Валерий Михайлович.

Официальные оппоненты:

Мингалиев Марат Габдуллович,
доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник,
Специальная астрофизическая обсерватория РАН, зам. директора;

Левшаков Сергей Анатольевич,
доктор физико-математических наук,
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, ведущий научный
сотрудник.

Ведущая организация:

Пушчинская радиоастрономическая обсерватория АКЦ ФИАН

Защита состоится « 2 » декабря 2014 г. в 15 ч. 30 м. на заседании диссертационного совета Д 212.232.15 на базе Санкт-Петербургского государственного университета по адресу: 198504, Санкт-Петербург, Старый Петергоф, Университетский пр., 28, математико-механический факультет, ауд. 2143.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке им. М. Горького Санкт-Петербургского государственного университета по адресу: 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9 и на сайте

<http://spbu.ru/science/disser/soiskatelyu-uchjonoj-stepeni/dis-list/details/14/214>.

Автореферат разослан « _____ » _____ 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Миланова Ю.В.

Общая характеристика работы

Во Вселенной миллиарды галактик. Обычные галактики, такие как Млечный Путь, светят за счет суммы излучения всех звезд галактики. Однако существуют и другие галактики, большая часть излучения которых имеет нетепловую природу, такие галактики называются активными или галактиками с активными ядрами (АЯГ). Центральные области этих объектов имеют настолько высокую светимость, что доминируют над излучением подстилающей галактики. АЯГ составляют лишь небольшую долю от всех галактик, но они интенсивно изучаются во всех доступных диапазонах длин волн уже на протяжении 50 лет, поскольку физические процессы, происходящие в них, уникальны.

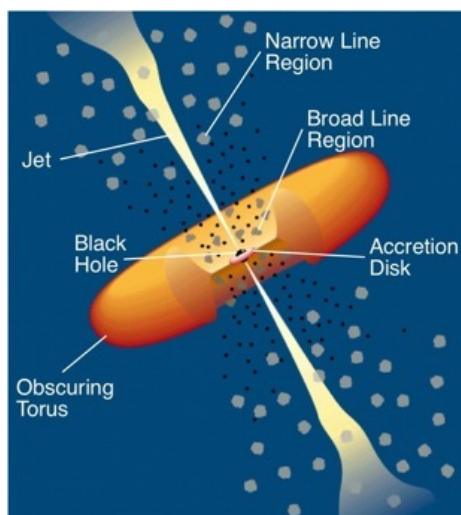


Рис. 1. Общая схема АЯГ [1]

На сегодняшний день основной моделью АЯГ является унифицированная схема [1]. Эта модель объясняет наблюдаемые различия в свойствах АЯГ (радиогалактики, сейфертовские галактики, блазары) разной ориентацией системы относительно наблюдателя. Основными структурными элементами этой модели являются черная дыра, аккреционный диск, пылевой тор, джеты, а также области широких и узких эмиссионных линий (см. Рис. 1).

Блазары составляют особенно интересный подкласс галактик с активными ядрами, поскольку их джет направлен под малым углом к лучу зрения наблю-

дателя и его излучение доминирует в диапазоне от радио до гамма-энергий. Блазары обладают переменностью блеска во всем наблюдаемом диапазоне и на различных временных масштабах от часов до десятков лет, кроме того наблюдается высокая и переменная поляризация излучения. Вариации блеска на различных длинах волн часто скоррелированы, что говорит об общей природе переменности. Как правило, блазары имеют односторонние радиоджеты, в которых наблюдаются видимые сверхсветовые движения. Движение плазмы джета с околосветовыми скоростями приводит к релятивистскому усилению излучения джета, что делает блазары источниками с наиболее выраженной активностью среди всех типов АЯГ.

Данная работа посвящена исследованию возмущений в джетах блазаров с сильным гамма-излучением на основании наблюдений в гамма-, оптическом и радиодиапазонах.

Актуальность работы

В последние годы благодаря улучшению качества и увеличению количества наблюдательных данных во всех доступных диапазонах достигнут значительный прогресс в выяснении природы АЯГ. Однако ряд вопросов до сих пор остаются нерешенными.

Как известно, блазары образуют самый многочисленный класс объектов, отождествленных с источниками гамма-излучения. В настоящее время одной из самых актуальных проблем остается вопрос о механизмах генерации гамма-излучения и определении областей, где оно производится. Предполагается, что гамма-излучение рождается в релятивистском джете. В настоящее время существуют два основных типа моделей генерации гамма-излучения: лептонные и адронные [2]. В лептонных моделях гамма-излучение генерируется при обратном комптоновском рассеянии фотонов на релятивистских электронах джета. В моделях другого типа (адронных) высокоэнергетическое излучение рождается в результате адронных и электромагнитных каскадов. Также открытым остается

ся и вопрос об областях генерации гамма-излучения, которые могут находиться на расстоянии от 0.1 пк до 10 пк от центральной машины. Согласно одним моделям гамма-излучение рождается на субпарсековых расстояниях от черной дыры за счёт рассеяния фотонов области широких эмиссионных линий. Такая модель объясняет наличие завалов в высокоэнергетической области спектрального распределения энергии, наблюдаемых у некоторых блазаров, и отсутствие корреляции между кривыми блеска в различных диапазонах длин волн [3]. Другие модели, наоборот, хорошо объясняют корреляцию между изменениями блеска в различных диапазонах и отсутствие завала в высокоэнергетической части спектра [4]. В таких моделях предполагается, что гамма-излучение рождается вблизи ядра джета на миллиметровых волнах.

Другим актуальным вопросом является вопрос о механизме формирования, коллимации и ускорения джетов. В некоторых моделях формирования и коллимации джета предполагается, что процесс коллимации и ускорения происходит в непосредственной близости от центральной машины, однако в других моделях этот процесс происходит на значительно больших масштабах. Таким образом, вопросы кинематики джета и его состава продолжают широко обсуждаться.

Наблюдения с помощью радиоинтерферометра со сверхдлинными базами (РСДБ) являются единственным способом, который позволяет непосредственно исследовать структуру и кинематику джетов. Совместный анализ РСДБ-изображений и результатов наблюдений в других диапазонах играет основополагающую роль в установлении деталей структуры АЯГ, особенно блазаров, в спектре которых доминирует излучение джета.

Цели работы

Основной целью данной работы является исследование кинематики джетов парсекового масштаба в блазарах с интенсивным γ -излучением и сопоставление поведения джетов с переменностью в оптическом и гамма-диапазонах, а

также установление области генерации оптического и гамма-излучения во время вспышек.

Для достижения поставленных целей решались следующие подзадачи: проведение многоцветных мониторинговых наблюдений блазаров на телескопах LX-200 и АЗТ-8; обработка результатов оптических наблюдений; обработка и моделирование наблюдательных данных в радиодиапазоне на частоте 43 ГГц; определение кинематических параметров джета источников.

Научная новизна

Для объектов S4 0954+658, S5 0716+71, PKS 1222+216 впервые проведено детальное изучение структуры и свойств джетов на частоте 43 ГГц за временной промежуток 2008-2012 гг. Для всех исследуемых объектов (S4 0954+658, S5 0716+71, PKS 1222+216, PKS 1510-089) проведен сравнительный анализ поведения источников в гамма-, оптическом и радиодиапазоне.

Научная и практическая ценность работы

Научная ценность работы состоит в получении новых сведений об изменении структуры джетов ряда блазаров с течением времени (выбросе релятивистских узлов), а также кривых блеска в радио-, оптическом и гамма-диапазонах, которые позволили определить механизм и область генерации гамма-излучения во время ряда вспышек.

Практическая ценность обусловлена тем, что в процессе работы был получен значительный объем новых наблюдательных данных для ряда блазаров (фотополяриметрические наблюдения в оптическом диапазоне, РСДБ-карты объектов на частоте 43 ГГц и их моделирование). Эти данные могут быть использованы для решения ряда задач, возникающих при исследовании АЯГ. Результаты данной работы могут использоваться во всех организациях, где занимаются изучением активных ядер галактик, исследованием фотометрической

переменности и кинематики джетов.

Результаты, выносимые на защиту

1. Наблюдательные данные ряда активных блазаров в оптическом диапазоне, полученные на телескопах LX-200 и АЗТ-8. Радиокарты этих же объектов на частоте 43 ГГц и результаты их моделирования.
2. Результаты определения параметров джетов блазаров S4 0954+658, S5 0716+71, PKS 1510-089, PKS 1222+216 на частоте 43 ГГц.
3. Результаты анализа наблюдательных данных для блазаров S4 0954+658, S5 0716+71, PKS 1510-089, PKS 1222+216 в гамма-, оптическом и радиодиапазоне и интерпретация ряда вспышек в гамма- и оптическом диапазонах как распространение возмущения в джете.
4. Вывод о том, что зона генерации гамма-излучения для ряда вспышек 2008-2012 гг. у исследуемых объектов локализована в парсековом радиоджете, а не в непосредственной близости от центральной машины.

Апробация работы

Основные результаты диссертации докладывались на следующих конференциях:

1. “III Пулковская молодежная конференция”, ГАО РАН, Санкт-Петербург, Россия, 25—30 сентября 2010 г.
2. AAS 217th Meeting 2011 Сиэтл, США, 9—13 января 2011 г.
3. XXVIII конференция “Актуальные проблемы внегалактической астрономии”, Пущино, Россия, 19 — 21 апреля 2011 г.
4. The 21st Annual New England Quasar (AGN Meeting), Нью-Хейвен, США, Йельский университет, 19 мая 2011 г.

5. “50 лет космической эры: реальные и виртуальные исследования неба”, Ереван, Армения, 25—30 сентября 2011 г.
6. Fermi Symposium, Рим, Италия, 9 — 12 мая 2011 г.
7. Fermi Symposium, Монтерей, США, 28 октября — 2 ноября 2012г.
8. The Innermost Regions of Relativistic jets and Their Magnetic Field, Гранада, Испания, 10—14 июня 2013
9. IAU S304: Multiwavelength AGN Surveys and Studies, Ереван, Армения, 7—11 октября 2013 г. Erevan, Armenia, 2013,
10. Всероссийская астрономическая конференция “Многоликая Вселенная” (ВАК-2013), Санкт-Петербург, Россия, 23—27 сентября 2013 г.
11. XXXI конференция “Актуальные проблемы внегалактической астрономии”, Пущино, Россия, 22—25 апреля 2014 г.

Публикации по теме диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Morozova, D. A., Larionov, V. M., Troitsky, I. S., ... (22 авт.) The Outburst of the Blazar S4 0954+658 in 2011 March-April // The Astronomical Journal. 2014. Vol. 148. P. 42
2. D.A. Morozova, S.G. Jorstad, A.P. Marscher, V.M. Larionov, I.S. Troitskiy, D.A. Blinov, I. Agudo and P.S. Smith Multiwavelength Observations of 6 BL Lac Objects in 2008-2012 // EPJ Web of Conferences 2013 Vol. 61
3. Larionov V. M., Jorstad S. G.; Marscher A. P., Morozova D. A., ... (11 авт.) The Outburst of the Blazar S5 0716+71 in 2011 October: Shock in a Helical Jet // The Astrophysical Journal. 2013. Vol. 768. P. L40

4. V.M.Larionov and D.A. Morozova, I.S. Troitsky, D.A. Blinov, E.N. Kopatskaya, E.G. Larionova, S.G. Jorstad, A.P. Marscher Optical Outburst of the Gamma-Ray Blazar S4 0954+658 in March-April 2011 // Proceedings of the 2011 Fermi Symposium, ArXiv e-prints. 2011. 1110.5861
5. Williamson, Karen E., Jorstad, Svetlana G., Marscher, Alan P., ..., Morozova D., ... (20 авт.) Comprehensive Monitoring of Gamma-Ray Bright Blazars. I. Statistical Study of Optical, X-Ray, and Gamma-Ray Spectral Slopes // The Astrophysical Journal. 2014. Vol. 789. P. 135.
6. Marscher A. P., Jorstad S. G., Larionov V. M., ..., Melnichuk D., ... (32 авт.) Probing the Inner Jet of the Quasar PKS 1510-089 with Multi-Waveband Monitoring During Strong Gamma-Ray Activity // The Astrophysical Journal Letters. 2010. Vol. 710. Pp. L126-L131.
7. Abdo A. A., Ackermann M., Agudo I., ..., Morozova D., ... (217 авт.) Fermi Large Area Telescope and multi-wavelength observations of the flaring activity of PKS 1510-089 between 2008 September and 2009 June // The Astrophysical Journal. 2010. Vol. 721. Pp. 1425-1447.
8. D'Ammando F., Raiteri C. M., Villata M. ..., Morozova D., ... (115 авт.) AGILE detection of extreme γ -ray activity from the blazar PKS 1510-089 during March 2009. Multifrequency analysis // A&A. 2011. Vol. 529. P A145.
9. D'Ammando F., Pucella, G., Raiteri, C. M., ... , Melnichuk D., ...(101 авт.) AGILE detection of a rapid γ -ray flare from the blazar PKS 1510-089 during the GASP-WEBT monitoring // A&A. 2009. Vol. 508, Pp.181-189

Личный вклад автора

В статьях 1, 2 обработка и анализ данных многоволновых наблюдений в гамма-, оптическом и радиодиапазоне, получение кинематических парамет-

ров джета источника принадлежат автору. В статье 3 обработка, моделирование РСДБ-данных и получение кинематических параметров джетов источников принадлежат автору, вклад соавторов в постановку задачи и обсуждение равнозначен; статьи 4 — 9 содержат результаты наблюдений, выполненных автором, вклад соавторов в обсуждение равнозначен.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка цитируемой литературы (128 наименований) и 4 приложений. Общий объем диссертации — 161 страница, из них 44 страницы приложений. Работа содержит 53 рисунка и 24 таблицы.

Содержание диссертации

Во **Введении** обосновывается актуальность работы, описываются основные цели и задачи диссертации, научная новизна, научная и практическая ценность исследования. Также в этой части сформулированы результаты, выносимые на защиту, приводится список конференций и работ, где были представлены результаты данного исследования, указан личный вклад автора.

В **Главе 1** в разделе 1.1 описывается методика наблюдений и процедура обработки данных в гамма-диапазоне, полученных с помощью космической гамма-обсерватории Ферми. В разделе 1.2 описывается методика оптических наблюдений с использованием ПЗС-камер, приводится описание пакета программ, используемых при фотометрии, описывается процесс обработки данных. В разделе 1.3 описываются общие принципы РСДБ-наблюдений. В разделе 1.3.3 описывается процесс обработки радиоинтерферометрических наблюдений и получение конечных карт.

В **Главе 2** описывается определение кинематики джетов на основе РСДБ-карт. В разделе 2.1 описывается модель джета. В разделе 2.2 описываются

сверхсветовые движения и релятивистское усиление - эффекты, которые наблюдаются в джетах блазаров. Методика вычислений собственных движений и параметров джетов блазаров описана в разделе 2.3 и 2.4.

Глава 3 посвящена изучению поведения блазара S4 0954+658 в радио, оптическом и гамма-диапазонах за 2008—2012 гг. В разделе 3.1 приводится обзор литературных данных по источнику. В разделе 3.2 производится анализ поляризации оптического излучения во время мощной вспышки в марте-апреле 2011 года. В разделе 3.3 исследованы свойства парсекового джета источника и показана взаимосвязь между выбросом новых сверхсветовых компонент из ядра джета на частоте 43 ГГц и активностью в оптическом и гамма-диапазонах. Получены кинематические параметры компонент, отождествленных в джете источника, произведена оценка параметров джета (угол раскрытия, угол к лучу зрения наблюдателя, лоренц- и доплер-фактор). График зависимости удаления компонент от ядра с течением времени представлен на Рис. 2. На Рис. 3 показана карта объекта на одной из эпох с наложенными траекториями всех компонент. Выводы к Главе 3 представлены в разделе 3.4.

Глава 4 посвящена изучению поведения блазара S5 0716+071 в радио, оптическом и гамма-диапазонах за 2008—2012 гг. В разделе 4.1 приводится обзор литературных данных по источнику. В разделе 4.2 изучены свойства парсекового джета источника. Получены кинематические параметры компонент, отождествленных в джете источника, произведена оценка параметров джета. График зависимости удаления компонент от ядра с течением времени представлен на Рис.2. На Рис. 3 показана карта объекта на одной из эпох с наложенными траекториями всех компонент. Исследовано поведение источника в оптическом и гамма-диапазоне в окрестностях выброса компонент. Показано наличие взаимосвязи между выбросом новых сверхсветовых компонент из ядра джета на частоте 43 ГГц и активностью в оптическом и гамма-диапазонах. В разделе 4.3. представлены выводы к Главе 4.

Глава 5 посвящена изучению поведения блазара PKS 1510-089 в радио,

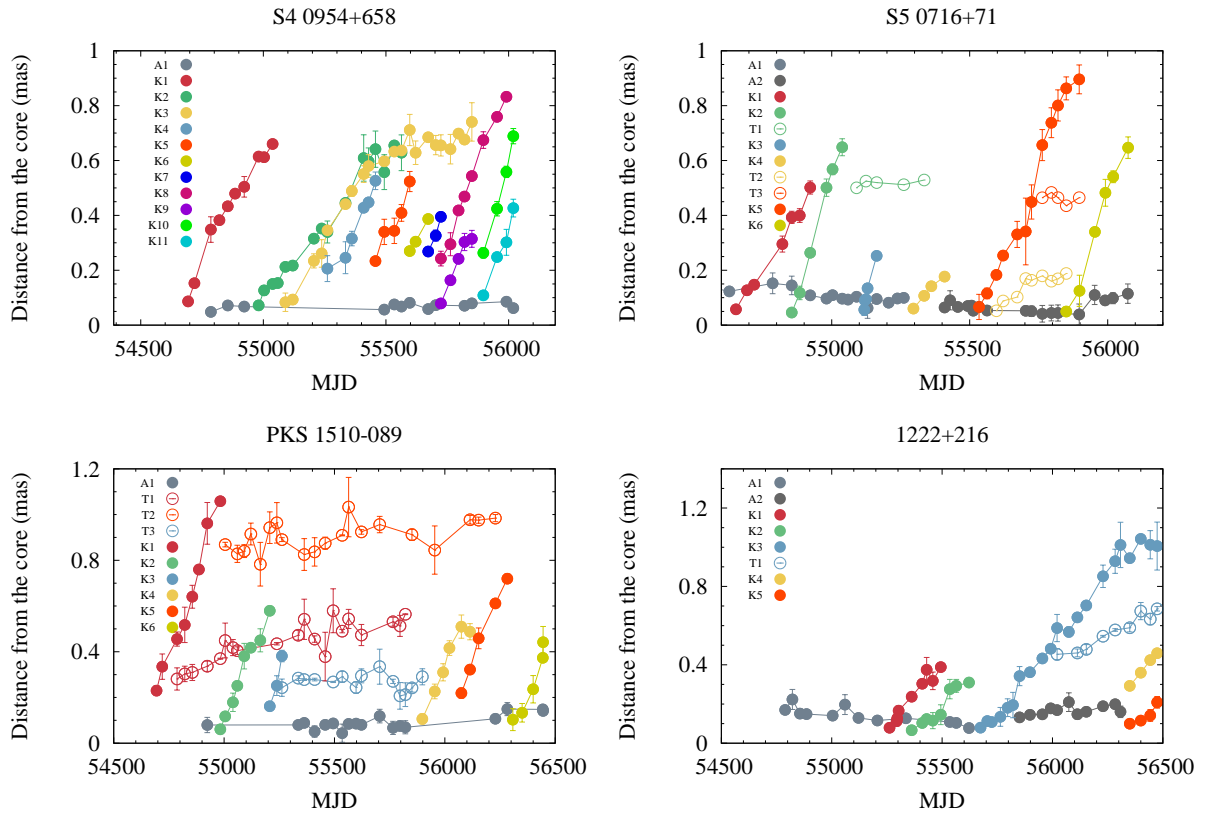


Рис. 2. Зависимость расстояния от ядра с течением времени для сверхсветовых компонент каждого из исследуемых источников.

оптическом и гамма-диапазонах за 2008—2012 гг. В разделе 5.1 приводится обзор литературных данных по источнику. Раздел 5.2 посвящен изучению свойств парсекового джета источника и сравнению изменений в структуре парсекового радиоджета с изменениями в других диапазонах. Получена оценка параметров джета и определены кинематические параметры сверхсветовых компонент. График зависимости удаления компонент от ядра с течением времени представлен на Рис.2. На Рис. 3 показана карта объекта на одной из эпох с наложенными траекториями всех компонент. Изучены два периода мощной активности объекта в оптическом и гамма-диапазоне в 2009 и 2012 гг., сопровождавшиеся регистрацией объекта в ТэВ-диапазоне. Обнаружена взаимосвязь между выбросом новых сверхсветовых компонент из ядра джета на частоте 43 ГГц и активностью в оптическом и гамма-диапазонах. Выводы к Главе 5 представлены в разделе 5.3.

Глава 6 посвящена изучению поведения блазара PKS 1222+216 в радио,

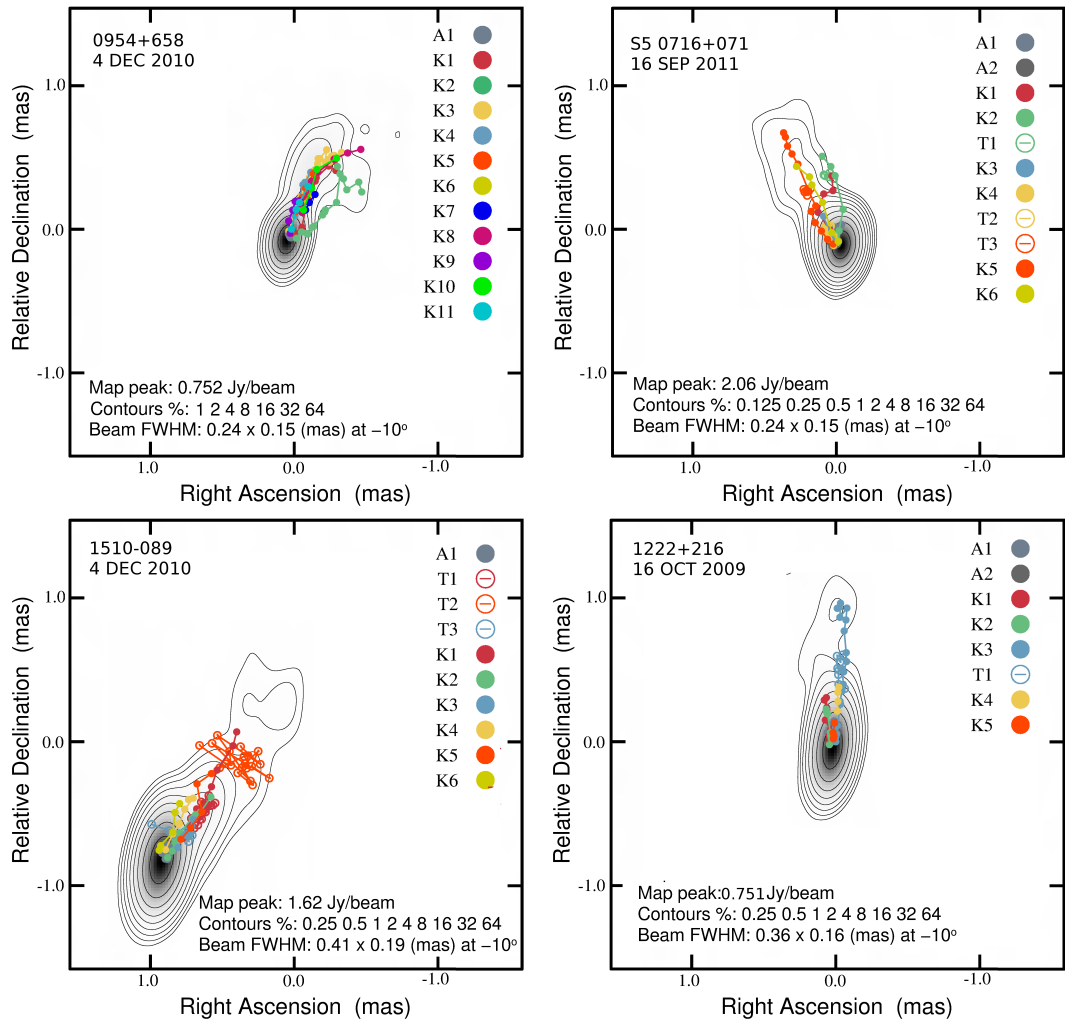


Рис. 3. Карты исследуемых объектов на частоте 43 ГГц с наложенными траекториями компонент.

оптическом и гамма-диапазонах за 2008–2012 гг. В разделе 6.1 приводится обзор литературных данных по источнику. В разделе 6.2 изучены свойства парсекового джета источника. Получены кинематические параметры компонент, отождествленных в джете источника, произведена оценка параметров джета (угол раскрытия, угол к лучу зрения наблюдателя, лоренц- и доплер-фактор). График зависимости удаления компонент от ядра с течением времени представлен на Рис.2. На Рис. 3 показана карта объекта на одной из эпох с наложенными траекториями всех компонент. Изучен период мощной активности объекта в июне-сентябре 2010 года, сопровождавшийся регистрацией объекта в ТэВ-диапазоне. Обнаружена связь между выбросом новых сверхсветовых компонент из

ядра джета на частоте 43 ГГц и активностью в оптическом и гамма-диапазонах. Выводы к Главе 6 даны в разделе 6.3.

В **Заключении** суммированы основные результаты работы.

В **Приложениях А-Г** для источников S4 0954+658, S5 0716+071, PKS 1510-089, PKS 1222+216, соответственно, приведены таблицы моделирования радиокарт источника за исследуемый период, карты с наложенным движением компонент для всех эпох наблюдений, дополнительные кривые блеска и графики.

Литература

1. Urry C. M., Padovani P. Unified Schemes for Radio-Loud Active Galactic Nuclei // [Publications of Astronomical Society of the Pacific](#).. 1995. Vol. 107. P. 803.
2. Böttcher M., Reimer A., Sweeney K., Prakash A. Leptonic and Hadronic Modeling of Fermi-detected Blazars // [Astrophysical Journal](#). 2013. Vol. 768. P. 54.
3. Poutanen J., Stern B. GeV Breaks in Blazars as a Result of Gamma-ray Absorption Within the Broad-line Region // [Astrophysical Journal Letters](#). 2010. Vol. 717. P. L118–L121.
4. Marscher A. P., Jorstad S. G., Larionov V. M. et al. Probing the Inner Jet of the Quasar PKS 1510-089 with Multi-Waveband Monitoring During Strong Gamma-Ray Activity // [Astrophysical Journal Letters](#). 2010. Vol. 710. P. L126–L131.