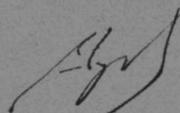


0-779442

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи



ЛАРИОНОВ
Валерий Михайлович

ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ БЛАЗАРОВ ПО
РЕЗУЛЬТАТАМ ФОТОМЕТРИЧЕСКОГО И
ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА

специальность 01.03.02 – Астрофизика и радиоастрономия

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2009

СРБЕР

Работа выполнена в Научно-исследовательском астрономическом институте им. В.В.Соболева математико-механического факультета Санкт-Петербургского государственного университета

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор
Бочкарев Николай Геннадиевич,
Государственный астрономический институт им. П.К.Штернберга МГУ

доктор физико-математических наук, профессор
Гнедин Юрий Николаевич,
Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН

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

Ведущая организация:

Пушкинская радиоастрономическая обсерватория АКЦ ФИАН

Защита состоится 15 декабря 2009 г. в 15 часов 30 минут на заседании совета Д 212.232.15 по защите докторских и кандидатских диссертаций при Санкт-Петербургском государственном университете по адресу: 198504, г. Санкт-Петербург, Старый Петергоф, Университетский пр., д.28, ауд.2143 (Математико-механический факультет)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского государственного университета.

Автореферат разослан "21" октября 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА КГУ



0000643183

Орлов В.В.

Общая характеристика работы

Активные ядра галактик (AGN, АЯГ) являются одними из самых интригующих объектов во Вселенной. Предполагается, что огромная энергия, излучаемая AGN, рождается в результате аккреции на сверхмассивные черные дыры ($M_{BH} \sim 10^{8 \pm 2} M_{\odot}$), находящиеся в центрах подстилающих галактик. Угловой момент аккрецирующего газа уплощает его в дифференциально вращающийся диск, окружающий черную дыру. Во многих из этих объектов потоки намагниченной ультрарелятивистской плазмы выбрасываются со скоростью, близкой к скорости света, вдоль оси вращения диска. В наиболее обсуждаемой модели этого выдающегося явления магнитные поля, опутывающие аккреционный диск и/или эргосферу черной дыры, выталкивают поток энергии, который фокусируется и ускоряется вдоль полюсов, формируя джеты, наблюдаемые на парсековых и килопарсековых расстояниях от центральной машины.

Ударные волны и турбулентность плазмы ускоряют отдельные электроны до ультрарелятивистских энергий. Эти электроны, двигаясь в магнитных полях, производят синхротронное излучение в радио, инфракрасном, оптическом и – в некоторых объектах – в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах. Они также рассеивают фотоны, рождающиеся внутри и вне джета, до рентгеновских и гамма энергий. Как и в случае любых теоретических моделей, вышеуказанный механизм формирования джета и ускорения частиц должен рассматриваться предварительным до тех пор, пока он не будет подтвержден наблюдениями.

В последнее десятилетие значительный прогресс достигнут в наблюдательной астрофизике активных ядер галактик благодаря 1) работе космических обсерваторий, исследующих Вселенную на разных длинах волн, например, космический телескоп Хаббла (HST), космический телескоп Спитцера (SST), рентгеновская обсерватория Чандра (Chandra), рентгеновская многозеркальная миссия (XMM), рентгеновский исследователь Росси (RXTE), экспериментальный телескоп гамма энергий (EGRET), телескоп высоких энергий INTEGRAL, Свифт обсерватория

гамма энергий (Swift), недавно вступившие в строй спутниковые телескопы AGILE и Enrico Fermi (первоначально GLAST); 2) благодаря высокой разрешающей способности радиоинтерферометрических систем: VLA, VLBA, EVN, MERLIN и VSOP, и 3) благодаря крупным обзорам неба, таким как SDSS и 2MASS.

Актуальность темы

Несмотря на столь мощную наблюдательную базу, многие детали структуры активных ядер еще неясны, тем более, что наблюдательные проявления активности ядер меняются как от объекта к объекту, так и с течением времени у конкретного объекта. При этом сложно разделить эффекты, относящиеся к собственно энерговыделению в непосредственных окрестностях центрального объекта — черной дыры и ее эргосферы — от геометрических факторов, в частности, возможной переменности угла между лучом зрения и осью джета, приводящей к переменности доплер-фактора и, соответственно, коэффициента усиления излучения. Важную роль в решении проблемы играют радиоинтерферометрические наблюдения со сверхдлинной базой, позволяющие достигнуть миллисекундного разрешения. Наземные оптические наблюдения не в состоянии добиться такого пространственного разрешения, но анализ фотометрической и поляризационной переменности позволяет дать сведения о структуре и эволюции активных областей на еще меньших пространственных масштабах и со значительно лучшим временным разрешением. Наибольшую активность среди внегалактических объектов демонстрируют блазары, наблюдательное исследование которых является предметом данной работы.

Важность получения как можно более продолжительных и плотных рядов наблюдений такого рода объектов изначально не вызывала сомнения у исследователей. Однако реализация полноценного мониторинга стала возможна лишь в последнее десятилетие, не в последнюю очередь благодаря распространению интернета и оперативному обмену данными.

К числу наиболее успешных международных программ мониторинга активных ядер галактик относится “Всемирный блазарный телескоп”



(Whole Earth Blazar Telescope - WEBT). Первые попытки создать такой международный коллектив, объединенный задачей сбора высококачественных и однородных массивов оптических данных, относятся к началу 1990-х годов (отметим, например, международный проект OJ-94), но полноценная координированная работа по этой программе началась в ноябре 1997 г. В настоящее время в числе постоянных или временных участников этой программы более 30 групп наблюдателей, телескопы которых почти равномерно распределены по долготе. Об эффективности работы программы WEBT можно судить по числу публикаций – около 90 за 11 лет работы – и высокому уровню цитирования (около 600 по неполной базе данных ADS). Одно из условий работы по программе WEBT – выделение значительного (не менее 30%) наблюдательного времени на мониторинг активных внегалактических объектов. Тем самым, разумеется, получают приоритет относительно небольшие (до 1 метра) телескопы, где такое распределение наблюдательного времени в принципе возможно. К сожалению, в России до последнего времени в этой программе участвуют лишь группы из НИАИ СПбГУ, ГАО РАН (оптический и инфракрасный диапазон) и САО РАН (радионаблюдения). Наша группа участвует в этом проекте с 1999 года, используя результаты, полученные на телескопах АЗТ-8 и LX-200 в оптическом диапазоне, а также, совместно с ГАО РАН, на инфракрасном телескопе АЗТ-24. В число постоянно наблюдаемых объектов включено около 30 активных блазаров, список которых приведен на сайте программы <http://www.oato.inaf.it/blazars/webt/>. Почти все эти объекты видны в северном полушарии и входят в нашу программу наблюдений, которая также доступна в интернете, вместе с предварительными кривыми блеска, обновляемыми (в основном, автором данной работы), как правило, после каждой наблюдательной ночи:

<http://www.astro.spbu.ru/staff/vlar/OPTlist.html>; в инфракрасном диапазоне

<http://www.astro.spbu.ru/staff/vlar/NIRlist.html>.

Анализ результатов мониторинговых наблюдений блазаров позволяет пролить свет на некоторые нерешенные вопросы их структуры, что

и определяет актуальность данной диссертационной работы.

Цели и задачи работы

Основная цель настоящей работы – исследование структуры и свойств блазаров на основании анализа наблюдательных данных об их фотометрической и поляризационной переменности в оптическом и ИК диапазонах и сопоставления этих результатов с данными для радио, УФ, рентгеновского и гамма диапазонов.

Это подразумевает решение следующих задач: создание аппаратуры, разработку методики и проведение многоцветных фотометрических и поляризационных мониторинговых наблюдений избранных блазаров в ИК и оптическом диапазонах; определение на основе этих наблюдений фундаментальных характеристик (относительного распределения энергии в спектрах и состояния поляризации) переменных источников, ответственных за активность блазаров; изучение эволюции этих характеристик; сопоставление с данными для других диапазонов для выяснения структуры блазаров и причин их переменности.

Научная новизна

Впервые найдены относительные распределения энергии в спектрах переменных источников у блазаров 3C 279, S5 0716+714, АО 0235+16 и 3C 454.3; они оказались неизменными в пределах исследуемых временных интервалов и представляются степенным законом; это служит аргументом в пользу их синхротронной природы, что подтверждается наблюдаемой у них высокой степенью поляризации излучения в оптическом диапазоне..

Впервые найдено распределение энергии в спектрах источников, ответственных за микропеременность блазаров (S5 0716+714 и BL Lac); оказалось, что оно не отличается от такового для медленно меняющегося компонента, так что источник сверхбыстрых изменений, скорее всего, локализован в джете, а не в аккреционном диске.

Для АО 0235+16 *впервые* найдены степень и направление поляризации переменного источника во время вспышки. Проведена интерпретация результатов фотометрического и поляризационного поведения АО 0235+16 во время вспышки в рамках модели прохождения ударной вол-

ны по джете. Это первый случай, когда поведение объекта в оптической области спектра допускает интерпретацию в рамках модели ударной волны (результат отмечен Научным Советом по астрономии при Отделении Общей Физики и Астрономии РАН в перечне достижений за 2007 год).

Впервые проведенный инфракрасный спектральный мониторинг блазара 3C 454.3 обнаружил стабильность его излучения в линии H_α и позволил сделать вывод о том, что переменность в синхротронном континууме не отражается на характеристиках области, ответственной за излучение в широких эмиссионных линиях.

Впервые надежно установлено наличие периодических изменений в блеске и поляризации BL Lac в 1980 -1991 гг. и их отсутствие в предыдущие годы. Сделан важный вывод о том, что периодичность является преходящим явлением, что объясняет разноречивые результаты исследований на периодичность кривых блеска ряда активных ядер галактик.

Анализ результатов фотометрического мониторинга BL Lac за 1997-2008 годы показал, что наблюдаемая картина переменности на всех временных масштабах может быть объяснена вариациями доплеровского усиления излучения компактных излучающих областей. *Впервые* показано, что при объяснении деталей фотометрического поведения этого объекта необходимо учитывать релятивистское сжатие времени.

Одним из важных *новых* результатов является обнаружение в ходе поляриметрического мониторинга 3C 279, BL Lac, S5 0716-71 и PKS 1510-089 систематического вращения плоскости поляризации, происходящего вблизи фазы повышенной фотометрической активности (связанной с выбросом сверхсветовых компонент); это указывает на существование геликоидального магнитного поля в области коллимации и ускорения в джете. (Результаты наблюдений BL Lac опубликованы в *Nature* и отмечены Научным Советом по астрономии при Отделении Общей Физики и Астрономии РАН в перечне достижений за 2008 год).

Научная и практическая ценность

Научная ценность состоит в получении обширных рядов фотометрических и поляризационных наблюдений ряда блазаров в оптическом

и ИК диапазонах; в определении на основе этих наблюдений фундаментальных характеристик переменных источников, ответственных за их активность (относительного распределения энергии в спектрах и состояния поляризации); в изучении эволюции этих характеристик; в выяснении структуры блазаров и причин их переменности на основании сопоставления данных, полученных в разных диапазонах.

Практическая ценность обусловлена тем, что полученный богатый наблюдательный материал, содержащий большой объем информации, может использоваться для решения ряда иных задач, возникающих при исследовании АЯГ (например, при исследованиях на периодичность). Результаты анализа могут дать важные ограничения на параметры теоретических моделей АЯГ. Результаты диссертации могут использоваться во всех организациях, где занимаются изучением активности внегалактических объектов.

Важным практическим результатом мониторинговых наблюдений является возможность оперативно информировать об изменениях уровня активности наблюдаемых объектов. В качестве примера приведем некоторые из наших телеграмм, посланных в "The Astronomer's Telegram":

Carosati, D., Larionov, V. M., Larionova, L. GASP detection of a high optical state of the blazar PKS 1510-08, The Astronomer's Telegram. 2007, 1204

Larionov, V., Konstantinova, T., Kopatskaya, E.,... S5 0716+71: polarimetric activity during outburst. The Astronomer's Telegram, 2008, 1502

Larionov, V. M., Villata, M., Raiteri, C. M., ... Optical historical maximum of the blazar PKS 1510-08 observed by the GASP, The Astronomer's Telegram, 2009, 1990

Larionov, V. M., Konstantinova, T. S., and Blinov, D. A. Optical unprecedented high brightness level of blazar PKS 1510-08. The Astronomer's Telegram, 2009, 2045

Larionov, V. M., Villata, M., Raiteri, C. M., ... Optical outburst and mm activity of 3C 345 observed by the GASP, The Astronomer's Telegram, 2009, 2222

Апробация работы

Основные результаты данной работы докладывались на следующих конференциях:

1. Коллоквиум MAC 184, "AGN Surveys" Byurakan, Armenia, June 18-22, 2001.

2. Международная конференция «AGN Variability From X-rays to Radio Waves», Научный, Украина, 14 – 16 июня 2004 г.

3. Международная конференция «Астрономия-2005: состояние и перспективы развития», Москва, Россия, 1 – 6 июня 2005 г.

4. "Blazar Variability Workshop II: Entering the GLAST Era", Майами, США, 10 – 12 апреля 2005 г.

5. «Физика небесных тел», КраО, Украина, 11-16 сентября 2005 г.

6. Конференция, приуроченная к заседанию КТБТ 22-24 апреля 2006 г., CAO РАН.

7. Конференция «Астрономия 2006: традиции, настоящее и будущее», Санкт-Петербург, июнь 2006 г.

8. XXIII конференция «Актуальные проблемы внегалактической астрономии», Пушкино, Россия, 25-27 апреля 2006 г.

9. XXV конференция «Актуальные проблемы внегалактической астрономии», Пушкино, Россия, 22 – 24 апреля 2008 г.

10. «Evolution of Cosmic Objects through Their Physical Activity», Byurakan, Armenia, 15-18 September 2008.

11-13. Ежегодные съезды Американского астрономического общества 2007, 2008, 2009 гг.

14. Международная конференция "Accretion and Ejection in AGN", Comu, Turkey, июнь 2009

Результаты работы докладывались на семинарах НИИИ СПбГУ, ГАО РАН, CAO РАН, КраО НАНУ.

Структура работы

Диссертация состоит из Введения, 7 глав, Заключения, списка литературы (133 наименования) и Приложений; содержит 92 рисунка и 29 таблиц (из них 13 – в Приложениях). Общий объем диссертации – 253 страницы.

Содержание работы.

Во **Введении** описывается самая общая принятая сейчас модель активного ядра галактики (АЯГ), подчеркивается необходимость расширения наблюдательных исследований АЯГ и отмечается, что блазары, демонстрирующие наибольшую среди АЯГ активность, являются самыми подходящими объектами для такого исследования. Это определяет актуальность диссертационной работы. Указаны цели и задачи исследования, дается краткое содержание диссертации, подчеркивается новизна основных результатов и их научная и практическая ценность. Приведены основные положения, выносимые на защиту, список публикаций по теме диссертации и личный вклад автора, а также апробация результатов.

Первая глава посвящена описанию аппаратуры и методики наблюдений и обработки. В пункте 1.1 дается описание телескопов и фотометров, использовавшихся при проведении оптического и инфракрасного мониторинга блазаров. Наблюдения велись на трех телескопах: АЗТ-8 диаметром 70 см Крымской обсерватории (подпункт 1.1.1), LX-200 диаметром 40 см СПбГУ (подпункт 1.1.2) и АЗТ-24 диаметром 1.1 м Пулковской обсерватории, установленном в Кампо Императоре, Италия (подпункт 1.1.3). Первые два телескопа использовались для оптического мониторинга, третий - для инфракрасного. АЗТ-8 и LX-200 оснащены идентичными ПЗС фотометрами-поляриметрами со стандартными фильтрами *B, V, R, I* - системы (*B, V* Джонсона, *R, I* Казинса). При поляризационных наблюдениях в качестве анализатора использовалась пара пластин Савара, ориентированных под углом 45° друг к другу. На АЗТ-24 установлена инфракрасная камера SWIRCAM, позволяющая проводить как фотометрические, так и спектральные наблюдения в диапазоне $1 \div 2.5$ мкм.

Пункт 1.2 посвящен описанию ПЗС-приемников излучения. Подробно описано их устройство, достоинства и ограничения их использования. Пункт 1.3 содержит описание методики получения изображений и обработки данных. Подпункт 1.3.1 посвящен описанию методики на-

блюдений с фотометрами-поляриметрами. Приводится четкая схема использования наблюдательной ночи, сводящая к минимуму непроеизводительные затраты времени. Принято, что время экспонирования одного кадра не должно превышать 60 сек. Для достижения необходимой точности каждый объект экспонируется от 5 до 15 раз. Вся обработка производится с помощью пакета программ РНОТ0703, созданного автором на основе пакета SExtractor (подпункт 1.3.2). Описаны алгоритм его работы и определение ошибок фотометрических оценок блеска объекта в ходе дифференциального сравнения со звездами-стандартами, имеющимися в кадре. В подпункте 1.3.3 изложена методика определения параметров поляризации. Используются формулы Пиккеринга. Инструментальная и межзвездная поляризация исключаются дифференциальным сравнением со звездами-стандартами, имеющимися в кадре. Показано, что при панорамной поляриметрии нет необходимости в наблюдениях стандартов для определения нуля-пункта позиционного угла. Дается алгоритм определения ошибок поляриметрических наблюдений. Подпункт 1.3.4 содержит описание методики обработки спектральных наблюдений на АЗТ-24.

Вторая глава посвящена изучению блазара ЗС 279. После краткого обзора литературы, содержащего основные сведения об объекте и данные последних работ по изучению его переменности, сообщается об организованной в рамках программы WEBT кампании по изучению ЗС 279 в 2006-2007 гг., координатором которой был автор диссертации (п.2.1). В ходе кампании были получены данные в оптическом, ближнем ИК, радио, УФ и рентгеновском диапазонах; в п.2.2 дается описание этих данных и их редукции с целью сведения в одну систему данных разных наблюдателей.

В п.2.3 приводятся оптические B, V, R, I , инфракрасные J, H, R и рентгеновская кривые блеска, полученные за время проведения кампании. Отмечается, что сверхбыстрой переменности обнаружено не было, отмечена зависимость наблюдаемого цвета объекта от блеска. В п.2.3.1 описана разработанная в СПбГУ методика анализа цветовой переменности, позволяющая в предположении о наличии одного переменного

источника с неизменным распределением энергии в спектре (SED) на основании диаграмм “поток-поток”, построенных по одновременным наблюдениям в двух полосах, определить относительное распределение энергии в спектре переменного источника без предварительного определения его вклада в суммарное наблюдаемое излучение. Результаты ее применения для ЗС 279 показали, что SED переменного источника оставалось неизменным (точки на диаграммах “поток-поток” располагаются строго вдоль прямых линий) и степенным в интервале от полосы K до заатмосферного ультрафиолета. Такое распределение, показанное на рис. 1, характерно для синхротронного излучения. Высокая степень поляризации подтверждает синхротронную природу переменного компонента.

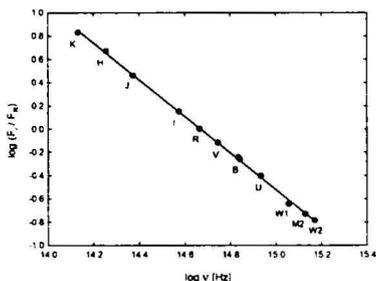


Рис. 1: Относительное распределение энергии в спектре ЗС 279 в инфракрасном, оптическом и ультрафиолетовом диапазоне, нормализованное к потоку в полосе R .

В п.2.3.2 отмечается, что в рентгеновской области флуктуации потока больше, чем в оптике. Результаты VLBA наблюдений описаны в п.2.4. За время кампании дважды произошло отделение сверхсветовых компонентов, определены их характеристики. в частности, изучена переменность поляризации в радиодиапазоне. Сопоставление изменений в разных диапазонах показывает, что оба события связаны с прохождением по джету ударной волны.

Пункт 2.5 дает результаты оптической поляриметрии. Наиболее впечатляющей особенностью поляризационной переменности является плавный поворот плоскости поляризации на $\sim 300^\circ$ за два месяца: этот поворот наблюдается и в радиодиапазоне (см. рис. 2).

Пункт 2.6 посвящен определению временных задержек между изменениями потока в разных диапазонах методом DCF. Как обычно, в радиодиапазоне события запаздывают на более длинных волнах и сле-

дуют за событиями в оптическом и рентгеновском диапазонах.

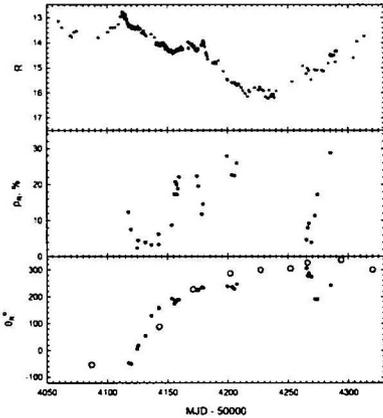


Рис. 2: Результаты оптической поляриметрии 3С 279, полученные за время кампании 2007 года. (Красными) кружками в нижней части рисунка нанесены результаты поляриметрии ядра на 43 ГГц.

стици. Нарастающее запаздывание деталей кривых блеска с уменьшением частоты может быть объяснено эффектом изменения непрозрачности – вспышка проявляется тогда, когда возмущение достигает области в джете, где оптическая толщина меньше единицы. В подпункте 2.8.2 обсуждается модель, обеспечивающая наблюдаемое вращение плоскости поляризации в течение двух месяцев. Вращение объясняется движением излучающей области вдоль спиральной траектории, отслеживающей направление спиралевидного магнитного поля. Продолжительность поворота указывает на наличие такого поля на расстоянии примерно 20 пк от центральной машины, то есть уже вне зоны коллимации и ускорения частиц во внутренней части джета. Вышеизложенные результаты исследования блазара 3С 279 в сжатой форме собраны в разделе 2.9.

Третья глава посвящена изучению прототипа блазаров - объекту

В п.2.7 построены спектры объекта во всем диапазоне частот от радио до рентгена при разных уровнях блеска. Уверенная корреляция между кривыми указывает на то, что за переменность несет ответственность один и тот же синхротронный источник.

Обсуждению результатов посвящен п.2.8. В подпункте 2.8.1 речь идет о переменности потока в непрерывном спектре. Отмечается, что переменность спектрального индекса в рентгеновской области (в минимуме спектр круче) при неизменном его значении в оптико-инфракрасной области связана с большими потерями на излучение на больших частотах при постоянном темпе инъекции частиц.

VL Lacertae. В п.3.1 излагаются результаты исследования на периодичность кривых блеска и изменений параметров поляризации у этого объекта по данным фотометрического и поляризационного мониторинга в 1968-1991 гг. Поляризационные и фотометрические ряды были получены совершенно независимо на двух разных телескопах Бюраканской станции Санкт-Петербургского университета. Ряды содержат данные для 451 ночи. Для исследования на периодичность использовался метод Диминга, предложенный им для неравномерно заполненных рядов. Вычисление спектра мощности и спектрального окна позволяет отличить истинные максимумы от ложных. В спектрах мощности для всего ряда, хотя и есть максимумы на уровне значимости 0.05, но у всех трех рядов они разные. Однако если взять только вторую половину ряда, содержащую примерно половину наблюдаемых точек, то в спектре мощности и для потока, и для одного из параметров Стокса присутствует максимум на одной и той же частоте (соответствующей периоду 308 дней). Для проверки надежности периода были построены модельные ряды с теми же датами, но случайным образом перемешанными значениями потоков и параметров Стокса. Ни в одном случае в их спектрах мощности не оказалось значимых максимумов. Учитывая независимость рядов наблюдений, найденный период можно считать реально существующим. Примечательно, что в спектрах мощности, полученных для первой половины ряда, нет никаких значимых максимумов. Сделан вывод о том, что появление периодичности является преходящим явлением - это объясняет разные результаты, полученные разными авторами для разных фрагментов кривых блеска одного и того же объекта.

Пункт 3.2 посвящен результатам фотометрического мониторинга VL Lac. В подпункте 3.2.1 описана методика наблюдений и обработки и приведены полученные в оптическом диапазоне кривые блеска по данным WEBT, на которых выделены многочисленные точки, полученные в СПбГУ, а также кривые блеска в ИК области, полностью полученные в СПбГУ и ГАО РАН. В подпункте 3.2.2 приводятся результаты анализа наблюдательных данных. Данные WEBT были критически пересмотрены и сведены в одну систему. В отличие от ЗС 279, на двухпоточковых

диаграммах для BL Lac были обнаружены систематические отклонения от линейности. Представление их квадратичной зависимостью позволило для любого значения базового потока (в данном случае это поток в полосе R) найти потоки во всех остальных полосах и построить наблюдаемое распределение энергии переменного компонента (после вычитания вклада галактической подложки). Отмечается, что цветовые характеристики компонента, ответственного за сверхбыструю переменность такие же, как у медленно меняющегося компонента.

Построение наблюдаемых спектров для разных уровней потока подтвердило возможность объяснения переменности изменением доплер-фактора в том случае, когда излучение приходит от фронта ударной волны, проходящей по джету. Доплер-фактор, в свою очередь, зависит от угла между лучом зрения и вектором скорости излучающей области - "угла видности". Знание лоренц-фактора (из видимой скорости сверхсветовых компонент) и доплер-фактора (из отношения потока к потоку в максимуме) позволяет, задав разумное значение угла видности в максимуме, определить значение угла видности для любого наблюдения. Распределение этих углов оказалось асимметричным (максимум гистограммы смещен в сторону больших значений углов) и бимодальным.

Для объяснения этих особенностей привлечено внимание к необходимости учета релятивистских факторов (п.3.3): (1) доплеровского усиления сигнала при уменьшении угла видности (что общепризнано); (2) доплеровского сдвига частоты (редко принимается во внимание) и (3) сокращения шкалы времени (прежде не учитывалось для данного класса объектов). Совместное действие этих трех факторов позволяет объяснить как цветовую переменность распределений энергии (связанную со смещением спектра по шкале частот), так и относительно меньшую продолжительность вспышек по сравнению с межвспышечными состояниями, отчетливо видную на кривых блеска.

Сделан вывод, что переменность BL Lac в 1997-2008 гг. на разных характерных временах объясняется изменениями доплер-фактора, вызванного изменением угла видности при движении по джету излучающих областей.

Пункт 3.4 содержит результаты поляризационного мониторинга BL Lac осенью 2005 года, когда объект находился в активном состоянии во всех диапазонах от радио до гамма. Наиболее примечательной особенностью является быстрое и значительное вращение плоскости поляризации (240° за 5 дней). Сопоставление с данными для других диапазонов позволило предложить модель, в которой вращение плоскости поляризации объясняется движением излучающей области в спиралевидном магнитном поле в непосредственной близости от черной дыры в области коллимации и ускорения частиц. Вышеизложенные результаты исследования BL Lac в сжатой форме собраны в разделе 3.5.

В Четвертой главе анализируются результаты, полученные для блазара S5 0716+714. В п.4.1 дается краткий обзор литературы, содержащий основные сведения об объекте и данные последних работ по изучению его переменности. Пункт 4.2 посвящен результатам фотометрического мониторинга объекта в 2001-2009 гг. в НИАИ СПбГУ. Приведены кривые блеска в оптической B, V, R, I и ближней ИК J, H, K областях спектра. Анализ данных проведен так же, как для 3C 279. На двухпотоковых диаграммах точки идеально располагаются вдоль прямых линий, указывая на неизменность SED переменного источника, ответственного за активность объекта. Во всем диапазоне от 0.4 до 2.2 мкм спектр степенной, что, в сочетании с данными поляриметрии (см. п.4.4), свидетельствует о его синхротронной природе. Наблюдение сверхбыстрой переменности в течение ночи (IDV) показывает, что SED у источника IDV такое же, как у медленно меняющегося компонента, так что IDV - это, скорее всего, просто флуктуации потока медленно меняющегося компонента.

В п.4.3 излагаются результаты фотометрического мониторинга, полученные в рамках трехдневной кампании WEBT по наблюдениям с максимальным временным разрешением в феврале 2009 г. Всего было получено около 180 оценок блеска в полосах R и J . Приведены данные синхронных наблюдений для одной из ночей и впервые надежно установлена задержка ИК кривой относительно оптической - 4 минуты.

В п.4.4 сообщаются результаты поляриметрического мониторинга

блазара во время вспышки в апреле 2008 г. Обнаружено плавное вращение плоскости поляризации (360° за 6 суток; см. рис. 3), которое стабилизировалось вблизи значения, совпадающего с направлением парсекового джета этого блазара. Это событие, наблюдавшееся у S5 0716+71 впервые, служит подтверждением существования спиралевидного магнитного поля в джете. Пункт 4.5 содержит в сжатой форме полученные основные результаты исследования объекта.

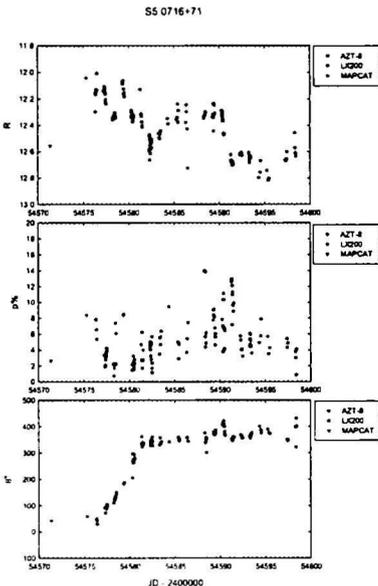


Рис. 3: Поведение оптического блеска и поляризации S5 0716 - 71 в период вспышки в апреле-мае 2008 года.

37 ГГц и 22 ГГц относительно изменений в полосе R : 22-23 дня, 56-58 дней и 70-72 дня, соответственно. В п.5.5 установлено наличие переменного избыточного (за вычетом синхротронного) излучения в ультрафиолетовой области спектра. Положительная корреляция между потоком

Пятая глава посвящена изучению блазара АО 0235+164. В п.5.1 даются данные последних работ по изучению его переменности. В п.5.2 дается описание и редукция наблюдательных данных, полученных в ходе кампании WEBT 2006-2007 гг. в оптическом, инфракрасном и радио диапазонах (п.5.2.1) и в заатмосферном ультрафиолете (п.5.2.2.). В подпункте 5.2.3 описаны детали внесения поправки в фотометрические данные за излучение близлежащей галактики ELISA. В п.5.3 описываются детали кривых блеска в разных диапазонах, полученных в ходе кампании. Проведено их визуальное сопоставление. Пункт 5.4 посвящен кросс-корреляционному анализу кривых блеска в оптическом и радио диапазонах. DCF-анализ позволил надежно зафиксировать задержки в изменениях потока на 1 мм.

этого излучения и потоком синхротронного излучения, возникающего, очевидно, в джете, заставляет отказаться от гипотезы о возникновении избыточного излучения в аккреционном диске.

В п.5.6 исследуется цветовая переменность АО 0235+164 по результатам наблюдений в рамках программы WEBT в интервале JD2445000-2453000. Анализ цветовой переменности с использованием уже излагавшейся методики проведен отдельно для восьми временных интервалов, содержащих вспышки объекта. Установлено, что для каждого из событий расположение точек на двухпоточковых диаграммах указывает на неизменность SED переменного компонента, а само распределение следует степенному закону. Обсуждению полученных результатов посвящен п.5.6.1. Отмечено, что полученные для разных временных интервалов спектральные индексы, найденные для переменного компонента существенно различны. Это означает, что время жизни переменных источников не превышает года.

Пункт 5.7 посвящен анализу поляризационных и фотометрических наблюдений объекта во вспышке в декабре 2006 года. Приведены кривые блеска в четырех оптических и трех ИК полосах за весь период наблюдений и кривые изменения блеска и параметров поляризации в полосе R в три ночи вблизи максимума блеска, когда была зафиксирована сверхбыстрая переменность (IDV). В п.5.7.1 изучен общий характер переменности АО 0235+164 во время вспышки. В п.5.7.2 определено характерное время переменности в разных полосах – оно оказалось большим для ИК диапазона. DCF-анализ показал, что в оптической области между изменениями в разных полосах и изменением степени поляризации задержки нет, но для ИК области имеется задержка относительно оптической в 3.5 часа. В п.5.7.3 приводится связь между потоком и параметрами поляризации, отмечена прямая корреляция между степенью поляризации и блеском и то, что при максимальной поляризации ее направление близко к направлению джета, найденного по данным VLBA.

В пункте 5.7.4 с помощью описанной ранее методики выяснены свойства переменного источника, ответственного за вспышку (относитель-

ное SED и параметры поляризации). Степень поляризации у переменного компонента за три ночи изменилась от 50% до 30%, а спектральный индекс был неизменным. Пункт 5.7.5 посвящен обсуждению этих результатов. Показано, что все результаты анализа переменности во вспышке объясняются в модели ударной волны, проходящей по джету. Результаты исследования АО 0235+164 суммированы в сжатой форме в п.5.8.

В **Шестой** главе приводятся результаты фотометрического и поляризационного мониторинга блазара PKS 1510-08. В п.6.1 коротко перечислены основные сведения об объекте, приводятся кривые блеска объекта в оптических полосах, полученные в ходе его мониторинговых наблюдений в НИАИ СПбГУ. Указано, что весной 2009 года автором была зафиксирована мощная вспышка блазара, что привело к интенсификации его наблюдений не только в оптической области, но и в радио и гамма диапазонах. В п.6.2 дается совместный анализ этих наблюдений. Максимум блеска и максимальная степень поляризации совпали по времени с прохождением сверхсветового сгустка через радиоядро на 7 мм. Вспышке предшествовало систематическое вращение плоскости поляризации в активной двухмесячной стадии, когда наблюдались оптические и гамма-вспышки меньшей интенсивности. Таким образом, вращение наблюдалось при движении сгустка в области ускорения и коллимации, что свидетельствует о наличии там спиралевидного магнитного поля. В п.6.3 отмечается, что в связи со сложной картиной переменности вышеуказанная интерпретация является предварительной, однако вращение плоскости поляризации определенно служит указанием на наличие в джете спиралевидного магнитного поля.

Изучению блазара 3C 454.3 посвящена **Седьмая** глава. В п.7.1 дается краткий обзор литературы, содержащий основные сведения об объекте и данные последних работ по изучению его переменности. В 2004-2005 годах произошла беспрецедентная по мощности вспышка этого блазара, который стал объектом мониторинга многих обсерваторий. В п.7.2 приводятся результаты его фотометрического мониторинга в НИАИ СПбГУ. Наблюдения охватывают нисходящую ветвь вспышки

и небольшую вспышку 2006 года, когда объект был в постэруптивной стадии. В работе методом двухпоточковых диаграмм анализируются оптические данные, собранные в рамках программы WEBT, и ИК данные НИИИ СПбГУ и ГАО РАН. В п.7.3 приводятся результаты анализа цветовой переменности. Данные 2004-2005 гг. и 2006 г. анализируются по отдельности. Расположение точек на диаграммах “поток-поток” указывает, что в пределах события SED переменного источника не менялось, но было разным в 2004-2005 гг. и в 2006 г.; в обоих случаях спектр был степенным, причем в 2006 г. более “жестким”. Обсуждение этих результатов дается в п.7.4. Степенной характер спектра и высокая наблюдаемая степень поляризации не оставляют сомнения в синхротронной природе переменных источников, ответственных за активность. Дается объяснение необычной для блазаров наблюдаемой зависимости цвета от блеска (чем ярче, тем краснее). Она обусловлена наложением излучения более красного переменного синхротронного компонента с неизменным SED на излучение постоянного более голубого компонента (голубой горб). В предположении о том, что ахроматическая переменность во вспышке 2004-2005 года вызвана изменением доплер-фактора, для минимума найдена нижняя граница для угла видности ($\phi = 7.3^\circ$) и верхняя оценка доплер-фактора ($\delta = 7.8$).

Пункт 7.5 посвящен инфракрасной спектроскопии блазара 3C 454.3. Полученные по фотометрическим оценкам распределения энергии в спектре объекта при разных уровнях яркости показывают избыточное излучение в полосе J , причем оно тем больше, чем меньше блеск блазара. Было сделано предположение, что, возможно, это линия H_α , попадающая в полосу при том красном смещении, которое имеет 3C 454.3. Выполненный автором спектральный мониторинг подтвердил это предположение. Линия была обнаружена, причем поток, излучаемый в линии, оказался неизменным.

В **Заключении** перечислены основные результаты, полученные в диссертационной работе.

Приложение содержит таблицы с результатами наблюдений.

На защиту выносятся:

1. Результаты многоцветного фотометрического и поляриметрического мониторинга блазаров 3C 279, BL Lac, S5 0716+71, AO 0235+16, PKS 1510-089 и 3C 454.3.
2. Вывод о том, что фотометрическое поведение блазаров в оптическом и ближнем инфракрасном диапазонах на разных временных шкалах обусловлено присутствием единственного, определяющего это поведение на данном временном интервале переменного источника с неизменным исходным (в системе отсчета источника) распределением энергии, характерным для синхротронных источников. Наблюдаемая в ряде случаев переменность формы спектрального распределения энергии объясняется доплеровским сдвигом исходного спектра.
3. Вывод о единой природе крупномасштабной и сверхбыстрой переменности блазаров. Объяснение переменности изменениями угла между лучом зрения и направлением вектора скорости излучающей области.
4. Объяснение особенностей кривой блеска BL Lac движением излучающих областей по спиральной траектории и эффектом релятивистского сжатия времени, который прежде не принимался во внимание.
5. Обнаружение систематического вращения плоскости поляризации, происходящего вблизи фазы повышенной фотометрической активности (связанной с выбросом сверхсветовых компонент), свидетельствующее о существовании геликондального магнитного поля как в области коллимации и ускорения в джете, так и за радиоядром.

Основные результаты диссертации изложены в следующих работах:

1. V.A.Hagen-Thorn, E.G.Larionova, S.G.Jorstad, C.-I.Bjornsson, V.M.LARIONOV - Analysis of the long-term polarization behaviour of BL Lac. *Astronomy & Astrophysics*, v.385, 56-61, 2002.
2. M.Villata, C.M.Raiteri, O.M.Kurtanidze, . . . ,V.M.LARIONOV. . . - The WEBT BL Lac Campaign 2000. *Astronomy & Astrophysics*, v.390, 407-421, 2002.
3. V.A.Hagen-Thorn, V.M.LARIONOV, S.G.Jorstad, E.G.Larionova - Periodic Component in the Variations of Brightness and Polarization of BL Lacertae. *Astronomical Journal*, v.124, 3031-3034, 2002.
4. V.A.Hagen-Thorn, V.M.LARIONOV, A.V.Hagen-Thorn, S.G.Jorstad, G.O.Temnov - The Analysis of Colour Variability of BL Lac during 1997 and 1999 Outbursts. *ASP Conf. Ser.*, v.284, 363-364, 2002.
5. V.A.Hagen-Thorn, V.M.LARIONOV, E.G.Larionova, S.G.Jorstad - Periodic Component in the Variations of Brightness and Polarization of BL Lac. *ASP Conf. Ser.*, v.299, 213-216, 2003.
6. M.Villata, C.M.Raiteri, O.M.Kurtanidze, V.M.LARIONOV, . . . - The Whole Earth Blazar Telescope on BL Lacertae. *ASP Conf. Ser.*, v.299, 221-224, 2003.
7. M.Boettcher, A.P.Marscher, M.Ravasio, . . . , V.M.LARIONOV, . . . , - Coordinated Multiwavelength Observations of BL Lacertae in 2000. *Astrophysical Journal*, v.596, 847-859, 2003.
8. В.А.Гаген-Торн, В.М.ЛАРИОНОВ, Е.Г.Ларионова, Н.А.Кудрявцева, А.В.Тихонов, А.В.Гаген-Торн, А.А.Архаров, А. Ди Паола, Ф. д'Алессиньо - Оптический и ИК-мониторинг BL Lac в 1999- 2001 гг. *Письма в АЖ*, т.30, 243-252, 2004.

9. M.Villata, C.M.Raiteri, O.M.Kurtanidze, ..., V.M.LARIONOV, ... - The WEBT BL Lacertae Campaign 2001 and its extension. Optical light curves and color analysis 1994-2002. *Astronomy & Astrophysics*, v.421, 103-114, 2004.
10. M.Villata, C.M.Raiteri, H.D.Aller,, V.M.LARIONOV, - The WEBT campaign on BL Lacertae. Time and cross-correlation analysis of optical and radio light curves 1968-2003. *Astronomy & Astrophysics*, v.424, 497-507, 2004.
11. C.M.Raiteri, M.Villata, M.A.Ibrahimov, V.M.LARIONOV, ... - The WEBT campaign to observe AO 0235+16 in the 2003-2004 observing season. Results from radio-to-optical monitoring and XMM-Newton observations. *Astronomy & Astrophysics*, v.438, 39-53, 2005.
12. В.А.Гаген-Торн, В.М.ЛАРИОНОВ, Н.В.Ефимова, Е.И.Гаген-Торн, А.А.Архаров, А.Ди Паола, М.Дольчи, Л.О.Такало, А.Силланпяя, Л.Остореро - Оптический и инфракрасный мониторинг блазара S5 0716+714 в 2001-2004 гг. *Астрономический Журнал*, т.83, 516-526, 2006.
13. L.Ostorero, S.J.Wagner, J.Garcia, ..., V.LARIONOV, ... (75 авт.) - Testing the inverse-Compton catastrophe scenario in the intraday variable blazar S5 0716+71. I. Simultaneous broadband observations during November 2003. *Astronomy & Astrophysics*. v.451, 797-813, 2006.
14. M.Villata, C.M.Raiteri, T.J.Balonek,, V.M.LARIONOV, ... (88 авт.) - The unprecedented optical outburst of the quasar 3C 454.3. The WEBT campaign of 2004-2005. *Astronomy & Astrophysics*, v.453, 817-822, 2006.
15. C.M.Raiteri, M.Villata, M.Kadler, ..., V.M.LARIONOV, ..., (60 авт.) - Multifrequency variability of the blazar AO 0235+16. The WEBT campaign in 2004-2005 and long-term SED analysis. *Astronomy & Astrophysics*, v.459, 731-743, 2006.

16. V.A.Hagen-Thorn, V.M.LARIONOV, N.V.Efimova - S5 0716+714: Analysis of Color Variability for 2001-2004. ASP Conf. Ser., v.360, 185-189, 2007.
17. M.Villata, C.M.Raiteri, M.F.Aller, ... , V.M.LARIONOV, ... (47 авт.) - The radio delay of the exceptional 3C 454.3 outburst. Follow-up WEBT observations in 2005-2006. Astronomy and Astrophysics, v.464, L5-L9, 2007.
18. U.Bach, C.M.Raiteri, M.Villata, ... , V.M.LARIONOV, ... (26 авт.) - Multi-frequency monitoring of gamma-ray loud blazars. I. Light curves and spectral energy distributions. Astronomy and Astrophysics, v.464, 175-186, 2007.
19. В.А.Гаген-Торн, В.М.ЛАРИОНОВ, Е.И.Гаген-Торн, А.А.Архаров - Переменные источники в активных ядрах галактик. Изв. Крымской Астрофизической Обсерватории, т.103, № 3, 21-27, 2007.
20. C.M.Raiteri, M.Villata, V.M.LARIONOV, ... (78 авт.) - XMM - Newton and WEBT observations of 3C 454.3 during the post-outburst Phase. Detection of the little and big blue bumps. Astronomy & Astrophysics, v.473, 819-827, 2007.
21. В.А.Гаген-Торн, В.М.ЛАРИОНОВ, К.М.Райтери, Е.И.Гаген-Торн, А.В.Шапиро, А.А.Архаров, Т.О.Такало, А.Силланпяя - Цветовая переменность блазара АО 0235+16. Астрономический Журнал. т.84. 975-983, 2007.
22. M.Boettcher, S.Bashu, M.Joshi, ... V.M.LARIONOV... (80авт.) - The WEBT Campaign on the Blazar 3C 279 in 2006. Astrophysical Journal, v.670, 968-977, 2007.
23. V.A.Hagen-Thorn, V.M.LARIONOV, S.G.Jorstad, A.A.Arkharov, E.I.Hagen-Thorn, N.V.Efimova, L.V.Larionova, A.P.Marscher - The Outburst of the Blazar AO 0235+164 in 2006 December: Shock-in-Jet Interpretation. Astrophysical Journal, v.672, 40-47, 2008.

24. A.P.Marscher, S.G.Jorstad, F.D.D'Arcangelo, P.S.Smith, G.G.Williams, V.M.LARIONOV, H.Oh, A.R.Olmstead, M.F.Aller, H.D.Aller, I.M.McHardy, A.Lahteenmaki, M.Torni-koski, E.Valtaoja, V.A.Hagen-Thorn, E.N.Kopatskaya, W.G.Gear, G.Tosti, O.Kurtanidze, M.Nikolashvili, L.Sigua, H.R.Miller, W.T.Ryle - The inner jet of an active galactic nucleus as revealed by a radio-to gamma-ray outburst. *Nature*, v. 452, 966-969, 2008.
25. C.M.Raiteri, M.Villata, V.M.LARIONOV, . . . (59 авт.) - Radio-to-UV monitoring of AO 0235+164 by the WEBT and Swift during the 2006-2007 outburst. *Astronomy & Astrophysics*, v.480, 339-347, 2008.
26. M.Villata, C.M.Raiteri, V.M.LARIONOV, . . . (52 авт.) - Multifrequency monitoring of the blazar 0716+714 during the GASP-WEBT-AGILE campaign of 2007. *Astronomy & Astrophysics*, v.481, L79-L83, 2008.
27. C.M.Raiteri, M.Villata, W.P.Chen, . . . V.M.LARIONOV, . . . (61 авт.) - The high activity of 3C 454.3 in autumn 2007. Monitoring by WEBT during the AGILE detection. *Astronomy & Astrophysics*, v.485, L17-L21, 2008.
28. C.M.Raiteri, M.Villata, V.M.LARIONOV, . . . (76 авт.) - A new activity phase of the blazar 3C 454.3. Multifrequency observations by the WEBT and XMM-Newton in 2007-2008. *Astronomy & Astrophysics*, v.491, 755-767, 2008.
29. R.Chatterjee, S.G.Jorstad, A.P.Marscher, . . . V.M.LARIONOV, . . . (15 авт.) - Correlated multiwaveband variability in the blazar 3C 279 from 1996 to 2007. *Astrophysical Journal*, v.689, 79-94, 2008.
30. V.M.LARIONOV, S.G.Jorstad, A.P.Marscher, . . . (71 авт.) - Results of WEBT, VLBA and RXTE monitoring of 3C 279 during 2006-2007. *Astronomy & Astrophysics*. v.492, 389-400, 2008.
31. В.А.Гаген-Торн, Н.В.Ефимова, В.М.ЛАРИОНОВ, К.М.Райтери, М.Виллата, А.А.Архаров, Е.И.Гаген-Торн, Л.А.Гомес, С.Г.Эрштадт,

- Л.В.Ларионова, Л.О.Такало, А.Силланпяя - Цветовая переменность блазара 3С 454.3 в 2004- 2006 гг. Астрон. Журн., т. 86, 555-563, 2009.
32. Е.Н.Конацкая, В.М.ЛАРИОНОВ - Фотометрические и поляризметрические наблюдения с ПЗС-камерой на телескопах LX200 и АЗТ-8. (Учебно-методическое пособие). Изд. СПбГУ, Санкт-Петербург, 2007, 24 с.
 33. M.Villata, C.M.Raiteri, V.M.LARIONOV, ... (56 авт.) - The correlated optical and radio variability of BL Lacertae. WEBT data analysis 1994-2005. *Astronomy & Astrophysics*, v.501, 455-460, 2009.
 34. M.Villata, C.M.Raitery, M.A.Gurwell, V.M.LARIONOV, ... (9 авт.) - The GASP-WEBT monitoring of 3C 454.3 during the 2008 optical-to-radio and gamma-ray outburst. *Astronomy & Astrophysics*, v.504, L9-L12, 2009.
 35. C.M.Raiteri, M.Villata, A.Capetti, ... V.M.LARIONOV, ... (11 авт.) - WEBT multiwavelength monitoring and XMM-Newton observations of BL Lacertae in 2007-2008. Unveiling different emission components. arXiv 0909.1701.

Личный вклад автора

Во всех статьях автору принадлежит большая часть наблюдений и окончательное представление всех данных, полученных в СПбГУ в ходе мониторинговых наблюдений. В статьях 3-5, 8, 12, 19, 21, 23 вклад в постановку задачи и обсуждение двух первых соавторов, а в статьях 20, 25, 26, 28, 31, 33 – трех первых соавторов является определяющим. В статьях 16 и 24 вклад всех соавторов равнозначен. В статье 30 автору принадлежат постановка задачи, сбор, коррекция и анализ наблюдательных данных во всех диапазонах; в обсуждении вклад пяти первых соавторов является определяющим. В работе 32 вклад соавторов равнозначен.

Подписано к печати 05.10.09. Формат 60x84 $\frac{1}{16}$.
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать цифровая. Печ. л. 1,0.
Тираж 100 экз. Заказ 4520

Отпечатано в Отделе оперативной полиграфии химического факультета СПбГУ
198504, Санкт-Петербург, Старый Петергоф, Университетский пр., 26
Тел.: (812) 428-4043, 428-6919

10 =