

СПЕЦИАЛЬНАЯ АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ
ОБСЕРВАТОРИЯ РОССИЙСКОЙ
АКАДЕМИИ НАУК

50 ЛЕТ

СПЕЦИАЛЬНАЯ
АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ
ОБСЕРВАТОРИЯ
РОССИЙСКОЙ
АКАДЕМИИ
НАУК

50 ЛЕТ

Юбилейный сборник



2018

**Специальная астрофизическая обсерватория
Российской академии наук
Special Astrophysical Observatory of the
Russian Academy of Sciences**

**50 лет
50 years**

***Юбилейный сборник
Jubilee Volume***



**п. Нижний Архыз
Nizhnij Arkhyz
2018**

УДК 520.1(09);520.2

Ю 13

Ответственный редактор

кандидат физико-математических наук В. В. Власюк

Редколлегия:

кандидат физико-математических наук Е. И. Кайсина - отв. секретарь

кандидат физико-математических наук О. П. Желенкова - корректура, верстка

доктор физико-математических наук И. И. Романюк

доктор физико-математических наук С. А. Трушкин

кандидат физико-математических наук Д. О. Кудрявцев

Е. Э. Филиппова

Ю 13 **Юбилейный сборник САО РАН. 50 лет/** Отв.ред. В.В.Власюк - Нижний Архыз, 2018. – 408 стр.

ISBN 978-5-9500369-6-5

В сборнике представлены основные научные достижения и научно-технические разработки коллектива Специальной астрофизической обсерватории за 50 лет ее деятельности. Основной акцент сделан на исследования последних 10 лет. Очерки о них изложены ведущими специалистами института. В книге много теплых воспоминаний посвящено ушедшим из жизни коллегам, без которых обсерватория не состоялась бы в таком виде, какова она есть сейчас.

Для сотрудников, ветеранов САО РАН и читателей, интересующихся историей российской астрономии.

UDK 520.1(09);520.2

Managing Editor Valery V. Vlasyuk, PhD

Editorial Staff:

Elena I. Kaisina, PhD – Executive Editor

Olga P. Zhelenkova, PhD – corrections and proofs

Iosif I. Romanyuk, Dr.Sci.

Sergey A. Trushkin, Dr.Sci.

Dmitry O. Kudryavtsev, PhD

Ekaterina E. Filippova

Jubilee Volume SAO RAS. 50 years/ Managing Editor Valery V. Vlasyuk – Nizhnij Arkhyz, 2018. – 408 p.

ISBN 978-5-9500369-6-5

The volume presents main scientific achievements and research-and-technology developments of the staff of the Special Astrophysical Observatory during 50 years of its activity. Special focus is on the research during last 10 years. Leading specialists of the institute present their essays about this. Many fond memories are dedicated to those colleagues who passed away, as without them the observatory would never be as it is now.

For the SAO RAS staff, veterans, and readers interested in the history of Russian astronomy.

ISBN 978-5-9500369-6-5

© CAO РАН, 2018

© SAO RAS, 2018

Введение

50 лет Специальной астрофизической обсерватории

Власюк В.В.,
директор САО РАН, к.ф.-м.н.; vvlas@sao.ru



Рис. 1. В.В. Власюк на вручении премии Most Cited Institute в 2016 г., которой награждаются самые цитируемые российские научно-исследовательские институты.

Юбилейный сборник содержит очерки, подготовленные ведущими сотрудниками Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук. Они посвящены научным результатам, которые получены в основном за время, прошедшее после выпуска сборника «Специальная астрофизическая обсерватория. 40 лет». Сборник включает обзор научных достижений и научно-технических разработок подразделений обсерватории, воспоминания сотрудников и краткие биографические очерки о наших ушедших коллегах, внесших существенный научный вклад в деятельность САО РАН.

Уверен, что представленные здесь материалы будут полезны всем, кто интересуется российской астрономией, ее современным уровнем, а также научной молодежи, для которой все изложенное ниже – уже история.

Хочу выразить признательность сотрудникам САО РАН, принявшим участие в подготовке издания как авторам очерков, так и редакционной коллегии. Фотографии и рисунки, включенные в сборник, любезно предоставлены нашими коллегами.

ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ ОБСЕРВАТОРИИ В 2006–2016 гг.

В 2016 г. САО РАН отпраздновала свое пятидесятилетие. Немногим ранее мы отметили сорокалетие работы наших уникальных инструментов – оптического телескопа БТА с 6-метровым зеркалом и радиотелескопа РАТАН-600 с антенной переменного профиля диаметром 600 метров. 30 декабря 1975 г. государственная межведомственная комиссия подписала акт о начале эксплуатации БТА, а раньше – 12 июля 1974 г. на северном секторе РАТАН-600 были проведены первые наблюдения.

Основные события в жизни обсерватории до 2005 г. были освещены в статье директора обсерватории Ю.Ю. Балеги в сборнике «Специальная астрофизическая обсерватория. 40 лет». Здесь мы расскажем о том, как прошло следующее десятилетие, какие удалось воплотить замыслы, а какие проекты остались незавершенными, большей частью, по объективным причинам.

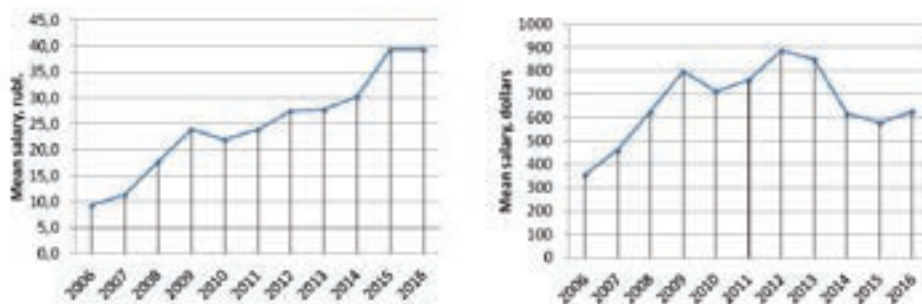


Рис. 2. Среднемесячная зарплата сотрудников обсерватории в тыс. рублей (слева) и в долларах (справа).

В это десятилетие в нашей стране были проведены существенные преобразования, которые не могли не отразиться на жизни обсерватории. Упомянем продолжавшуюся в течение ряда лет реформу российской науки, которая проводилась сначала в рамках Российской академии наук, а со второй половины 2013 г. – уже Федеральным агентством научных организаций, включая проект повышения оплаты труда работникам научных организаций РАН (2006–2008 гг.). Его реализация увеличила заработную плату научных работников, но отставание окладов инженерно-технического состава удалось поправить только к 2009 г. Удалось избежать серьезных кадровых сокращений. Так из 420 человек, составлявших штат в 2006 г., в конце 2016 г. осталось 408, из которых 102 – научные работники.

В связи с реформами обсерватория неоднократно переименовывалась в официальных документах. С 2008 г. мы стали называться Учреждением Российской академии наук Специальная астрофизическая обсерватория РАН, а с 2013 г. – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук. С 2014 г. САО РАН

находится в ведении ФАНО, сохранив при этом научно-методическое руководство со стороны Российской академии наук.

Далее отмечу как основные достижения САО РАН в научных исследованиях и научно-технических разработках, так и события, произошедшие в жизни обсерватории и поселка.

ОСНОВНЫЕ СОБЫТИЯ

2006

В 2006 г. обсерватория отметила свой сорокалетний юбилей. За эти 40 лет на телескопе БТА было выполнено порядка 2500 научных программ, на радиотелескопе РАТАН-600 – около 400, в рецензируемых журналах по материалам наблюдений сотрудниками САО РАН опубликовано более 2000 работ.



Рис. 3. Слева – руководитель ЮНЦ РАН академик Г.Г. Матишов, глава КЧР М.А.-А. Батдыев и директор САО РАН Ю.Ю. Балага при подготовке к наблюдению солнечного затмения с помощью солнечного телескопа; справа – окрестности БТА в полную фазу астрономического явления.

29 марта 2006 г. на Северном Кавказе наблюдалось полное солнечное затмение. Северная граница его полосы прошла около обсерватории. Рядом с БТА и в п. Нижний Архыз были организованы наблюдения этого астрономического явления с помощью небольших телескопов. В этот день обсерваторию посетили сотни гостей, среди которых – президент КЧР М.А.-А. Батдыев, председатель Южного научного центра РАН Г.Г. Матишов (рис. 3), депутат Государственной думы Н.С. Максимова, представители Роснауки, журналисты. Ведущие специалисты по физике Солнца Г.Б. Гельфрейх, В.М. Богод и А.Н. Коржавин прочитали научно-популярные лекции. Впервые в России была проведена прямая веб-трансляция затмения из Георгиевска и Горной астрономической станции ГАО (отдел информатики, рук. В.В. Витковский). Наблюдения Солнца с помощью РАТАН-600 обнаружили существование структур в солнечной короне, что можно было наблюдать лишь во время затмения.

Проведено несколько научных конференций, посвященных 40-летию САО РАН. В конце августа проходила VI Международная конференция «Магнитные звезды». В ней приняли участие около пятидесяти ученых из восьми стран. В сентябре были проведены всероссийская конференция «Многоволновые исследования Солнца и современные

проблемы солнечной активности» и школа для молодых ученых «Современные методы астрономической спектроскопии». Также сотрудники обсерватории принимали участие в проведении IX Российско-финляндского симпозиума «Многоволновые исследования солнечной и звездной активности и активных ядер галактик» и международного семинара, посвященного феномену гамма-всплесков.

В октябре состоялась юбилейная конференция, совмещенная с заседанием Комитета по тематике больших телескопов (рис. 4), где с 40-летием обсерваторию поздравили руководители КЧР М.А.-А. Батдыев и А.Х. Карданов, коллеги-астрофизики А.М. Черепашук, А.В. Засов, Б.М. Шустов, А.М. Финкельштейн, Н.А. Сахибуллин, В.А. Гаген-Торн и другие.



Рис. 4. Комитет по тематике больших телескопов. Первый ряд (слева направо): Ю.Н. Гнедин, И.И. Романюк, А.М. Черепашук, В.А. Гаген-Торн, Л.С. Любимков; второй ряд – Э.Е. Хачикян, Ю.Ю. Балега, Б.М. Шустов, В.В. Власюк.

В рамках проекта реформирования РАН было запланировано сокращение штата института сразу на 50 человек. Администрацией обсерватории были направлены письма в Президиум РАН с просьбой уменьшить эту квоту, учитывая удаленность обсерватории и необходимость обеспечения бесперебойной работы крупнейших российских телескопов. Это было принято во внимание президентом РАН Ю.С. Осиповым.

Выполнялись работы по модернизации телескопов:

- в несколько раз повышена проникающая способность РАТАН-600 при внедрении нового метода подавления шумов фоновых источников радиоизлучения;
- на БТА в результате применения стабилизатора изображения в сочетании с оптическим резателем и специализированным алгоритмом обработки эшелле-спектров было достигнуто рекордное угловое разрешение $0.4''$ в диапазоне длин волн 450–650 нм;
- продолжены работы по восстановлению главного зеркала БТА в рамках контракта с Лыткаринским заводом оптического стекла (ремонт полировального станка, новая оправа зеркала, контейнер, план перевозки ГЗ).

В апреле директор САО РАН Ю.Ю. Балега выезжал в Европейскую южную обсерваторию (ЕЮО) в г. Гархинг (Германия), где обсуждалась возможность вступления России в эту международную организацию. В беседе с ее генеральным директором К. Цесарски впервые была выражена заинтересованность европейских астрономов в участии России в проектах ЕЮО.

2007

В начале года были определены основные направления по развитию и модернизации телескопов обсерватории до 2010 г. Для телескопа БТА – это работы по обновлению главного зеркала и созданию системы охлаждения подкупольного пространства башни, а также модернизация автоматизированной системы управления, развитие режима удаленных наблюдений, внедрение ПЗС-приемников большого формата, освоение детектора инфракрасного диапазона, разработка волоконного спектрографа; для радиотелескопа РАТАН-600 – улучшение рабочей поверхности антенны, создание широкополосного радиометра «Октава», развитие техники для наблюдений в миллиметровом диапазоне длин волн.



Рис. 5. Погрузка и транспортировка первого главного зеркала 6-м телескопа БТА, на котором проводились наблюдения в 1975–1979 гг., для переполіровки в ЛЗОС.

В мае–июне успешно прошла транспортировка первого зеркала БТА в Лыткарино для реконструкции его рабочей поверхности (рис. 5). Этому предшествовали длительные поиски решений, связанных с обновлением главного зеркала (ГЗ), которые включили, среди прочего, и проект замены находящегося в эксплуатации зеркала на новое диаметром 8 метров. Отметим, что решение по переполіровке рабочей поверхности ГЗ было принято руководством РАН еще в 2004 г. Первоначально работы по обновлению зеркала планировалось завершить в 2010 г., но срывы в финансировании отодвинули окончание работ на более поздние сроки.

Обсерватория приступила к изданию журнала на английском языке «Astrophysical Bulletin», который по договору с издательством МАИК «Наука/Интерпериодика» распространяется по подписке издательским домом «Springer». Наш журнал, как и его предшественник – «Астрофизические исследования», продолжает публикацию

важнейших результатов наблюдений на телескопах САО РАН, научных обзоров по исследованиям, ведущимся в обсерватории, новых методов наблюдений. Обновленный журнал показал уверенный рост своего рейтинга (рис. 6, слева).

Проведены первые наблюдения на РАТАН-600 с не имеющей аналогов в отечественной радиоастрономии 16-канальной матричной радиометрической системой МАРС-3, позволившей в 4 раза повысить чувствительность радиотелескопа по сравнению с одноканальным радиометром. В Санкт-Петербургском филиале (СПбФ) обсерватории создан центр оперативного анализа данных для прогноза солнечной активности на основе спектральных наблюдений Солнца на РАТАН-600.

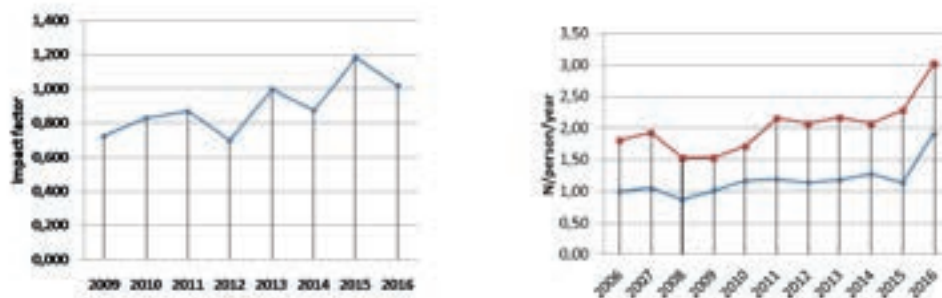


рис. 6. Слева – импакт-фактора журнала «Астрофизический бюллетень» в 2009–2016 гг.; справа – количество публикаций в год на одного научного сотрудника обсерватории, где красной линией показаны публикации, куда включены реферируемые журналы, статьи в сборниках и электронные публикации, а синей линией – только реферируемые журналы.

В наблюдениях на БТА использовались три системы регистрации изображений на базе охлаждаемых приборов с зарядовой связью (ПЗС) форматом 2048×2048 элементов, а также для спекл-интерферометрии – быстродействующая система с использованием ПЗС с внутренним усилением заряда форматом 512×512 элементов. Завершены разработки двух систем на базе крупноформатных ПЗС-матриц по 2048×4608 элементов и быстродействующего координатно-чувствительного детектора для эксперимента МАНИЯ.

Проведены две международные конференции – «Физика космоса» и «Сахаровские осцилляции и радиоастрономия», две всероссийские конференции – II Школа для молодых ученых «Физика галактик» и V Рабочее совещание-семинар «Информационные системы в фундаментальной науке», а также Осенняя астрономическая школа для старшеклассников – победителей и призеров Всероссийской астрономической олимпиады.

В конце года завершен многолетний проект, начатый еще в 2000 г., по прокладке 25-км газопровода от ст. Зеленчукской до п. Нижний Архыз. Это позволило перевести все теплоснабжение поселка на газовое топливо. Работы проводились подрядными организациями и силами обсерватории – подразделениями под руководством А.В. Захарова и П.И. Туполова.

Было принято решение о строительстве общежития для аспирантов и молодых сотрудников.

2008

Обсерватория победила в конкурсе Роснауки по ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2012 гг.», что решило многие проблемы, связанные с техническим переоснащением телескопов. Было приобретено уникальное оборудование на десятки миллионов рублей. Оно используется на телескопах и в лабораториях института и по сей день.

Запущена в опытную эксплуатацию система охлаждения подкупольного пространства башни БТА. Основные работы по проекту выполнены сотрудниками службы эксплуатации комплекса (СЭК) БТА (рук. Ю.М. Маметьев) в кооперации с коллегами из Института высоких температур РАН (г. Москва) и ОАО «Ростовтеплоэлектропроект» (г. Ростов-на-Дону).

На РАТАН-600 введены в штатную эксплуатацию радиометрические комплексы МАРС-3 и «Эридан». Их разработка выполнена лабораторией радиометров континуума (Н.А. Нижельский, П.Г. Цыбулев и др.) и СПбФ (А.Б. Берлин и др.). СЭК РАТАН-600 (рук. П.В. Призов) произведен ремонт электромеханических узлов плоского отражателя радиотелескопа.

Лабораторией перспективных разработок (рук. С.В. Маркелов) переданы в пробную эксплуатацию две ПЗС-системы (2048×4608 элементов) с чувствительностью, оптимизированной для ультрафиолетового и инфракрасного диапазонов спектра. Первые наблюдения на БТА показали, что они обладают высокой стабильностью и фотометрической точностью.

Проведены три конференции: международная конференция «Спектры поглощения полупрозрачных межзвездных облаков: наблюдатели встречаются с экспериментаторами», семинар «Комплексы звездообразования в спиральных рукавах Галактики», радиоастрономическая конференция «Повышение эффективности и модернизация радиотелескопов России».

1 августа силами сотрудников отдела информатики при содействии РосНИИРОС, НИВЦ МГУ, СГУ, ТГУ и др. была проведена прямая веб-трансляция полного солнечного затмения из Новосибирска.

Почетное звание «Заслуженный деятель науки КЧР» присвоено В.М. Богоду и В.Г. Клочковой, П.И. Туполову – «Заслуженный энергетик КЧР».

2009

62-я Генеральная ассамблея ООН объявила 2009 г. Международным годом астрономии (МГА). В обсерватории был проведен ряд мероприятий, посвященных МГА-2009. Сюда вошли научные конференции: заседание президиума ЮНЦ РАН, VI Рабочее совещание-семинар «Информационные системы в фундаментальной науке», международная конференция «Близкие карликовые галактики», III Всероссийская школа для молодых ученых «Галактические и аккреционные диски» (рис. 7), международное совещание «Разные стороны GRB-феномена – от оптики к физике высоких энергий», а также мероприятия по популяризации астрономии – дни открытых дверей, экскурсии, лекции для учителей школ КЧР, астрономическая фотовыставка в Черкесске, серия программ на местном телевидении, посвященных проблемам астрономии, а также восхождение группы сотрудников обсерватории на Эльбрус.

Обсерватория была поддержана Минобрнауки как центр коллективного пользования, что дало дополнительное финансирование на содержание и техническое оснащение телескопов. Часть этих средств была направлена на реконструкцию камеры алюминирования БТА, приобретение приемников сигналов точного времени, дифракционных решеток для многомодового фокального редуктора светосилы БТА SCORPIO, системы сбора данных для криорадиометров и видеотехники для удаленного доступа.

Внедрен в эксплуатацию солнечный спектрально-поляризационный комплекс высокого разрешения в диапазоне 0.75–18.2 ГГц. В сочетании с большой эффективной площадью РАТАН-600 он предоставляет новые возможности для исследования тонкой структуры радиоизлучения солнечной короны.



Рис. 7. Участники III Всероссийской школы молодых ученых «Галактические и аккреционные диски».

Модернизирована система МАРС-3, что привело к снижению шума и повысило ее долговременную стабильность. После установки системы в фокус вторичного зеркала №2 РАТАН-600 были начаты регулярные наблюдения по программе «Генетический код Вселенной» для исследования флуктуаций микроволнового космологического фона.

На собрании президиума ЮНЦ РАН проф. Ю.А. Щекинов (ЮФУ) впервые выдвинул идею о строительстве на базе САО РАН университетской обсерватории с телескопом 2-м класса, что могло бы послужить объединению образовательных и научных учреждений юга России вокруг совместных астрофизических программ.

По поручению ОФН РАН в апреле в Гархинге состоялась встреча представителей РАН Р.А. Сюняева и Ю.Ю. Балеги с генеральным директором ЕЮО Т. Де Зеу, на которой было принято решение о необходимости создания рабочей группы по вопросу возможного членства России в этой международной астрономической организации. 8 декабря в Минобрнауки состоялось первое заседание созданной правительственным поручением межведомственной рабочей группы по этому вопросу.

2010

В связи с окончанием полномочий в апреле были проведены выборы директора САО РАН на новый 5-летний срок, сопровождавшиеся острой дискуссией о дальнейшей судьбе института. Научный коллектив обсерватории в очередной раз большинством голосов избрал Ю.Ю. Балегу директором. Впервые веб-трансляция обсуждений велась на Санкт-Петербургский филиал. В июне на конференции научных работников был избран новый состав ученого совета обсерватории.

Большим событием стала Всероссийская астрономическая конференция «От эпохи Галилея до наших дней» (ВАК-2010). Выбору места ее проведения предшествовали обсуждения в НСА РАН. Совет решил, что очередную конференцию, равнозначную съезду астрономов страны, следует провести в одном из регионов. Это должно способствовать развитию астрономии в России.



Рис. 8. Участники VIII Международной конференции «Магнитные звезды».

Сначала был предложен Южный федеральный университет (г. Ростов-на-Дону). В ходе обсуждения стало ясно, что кафедра физики космоса ЮФУ не сможет обеспечить проведение такого крупного мероприятия. НСА РАН поддержал наше предложение организовать ВАК-2010 в САО РАН. На заседаниях НСА РАН была подготовлена программа ВАК-2010, куда вошли пять секций и пять присоединенных совещаний. Председателем научного оргкомитета был избран академик Н.С. Кардашев. В дальнейшем основная нагрузка легла на плечи сотрудников обсерватории. Местный оргкомитет возглавил гл.н.с. В.Л. Афанасьев. Работа в обсерватории велась по нескольким направлениям и включала: размещение участников, организацию их

питания и транспортного обеспечения, подготовку залов для заседаний, оргтехники, телекоммуникационной связи, культурной программы, многое другое. Усилиями сотрудников отдела информатики была увеличена пропускная способность канала для выхода в Интернет и реализован режим телеконференций для проводимых в обсерватории мероприятий.

Генеральной репетицией готовности к ВАК-2010 стала проводившаяся в обсерватории с 27 августа по 1 сентября VIII Международная конференция «Магнитные звезды» (рис. 8), в которой участвовали более пятидесяти российских и зарубежных астрономов.

В конференции ВАК-2010 приняли участие более 400 ученых из институтов и университетов Москвы, Санкт-Петербурга, Нижнего Новгорода, Волгограда, Казани, Ростова-на-Дону, Екатеринбурга, Иркутска, Томска, Челябинска, Вологды – практически все, кто активно занимается астрономическими исследованиями, а также зарубежные участники.



Рис. 9. На пленарных заседаниях Всероссийской астрономической конференции «От эпохи Галилея до наших дней».

На пленарных заседаниях выступили ведущие ученые России (рис. 9), а доклады на секциях и постерные сообщения отразили широкий спектр решаемых российскими астрономами задач. Все заседания транслировались в локальную сеть обсерватории. По мнению участников ВАК-2010 стала одной из лучших за все время проведения подобных научных форумов.

В ноябре была проведена школа для победителей Всероссийской астрономической олимпиады, в которой приняли участие 26 школьников из Великого Новгорода, Казани, Краснодара и Ростова-на-Дону.

В течение года продолжалась работа по подготовке вступления России в ЕЮО. Бюро ОФН возложило ответственность за подготовку мероприятий и необходимых документов, включая обоснование вступления и расчет затрат, на директора САО РАН

Ю.Ю. Балегу. Была продолжена дискуссия с руководством Минобрнауки РФ, которое отрицательно относится к вступлению в ЕЮО. В марте межведомственная рабочая группа, созданная под эгидой Минобрнауки, пришла к заключению, что рассмотрение проблемы преждевременно из-за отсутствия у Академии наук четкой позиции по приоритетным направлениям развития астрономии в стране. В июле во время конференции JENAM-2011 в Санкт-Петербурге была организована очередная встреча с представителями ЕЮО – генеральным директором Т. Де Зеу и членами совета Дж. Пало и Х. Барконсом. Была достигнута договоренность о подготовке программы вступления России в ЕЮО, причем, в случае ее поддержки Правительством РФ Т. Де Зеу предложил упрощенную процедуру вступления. К сожалению, должной реакции руководства страны на эти предложения не последовало, что отложило все на неопределенный срок.

Директор обсерватории Ю.Ю. Балега награжден орденом Почета, а главный научный сотрудник И.Д. Караченцев удостоен почетного звания «Заслуженный деятель науки Российской Федерации».

2011

В начале года были проведены первые спекл-интерферометрические наблюдения с использованием принципиально нового светоприемника с быстрым считыванием на основе трехфазного ПЗС-детектора. Такие приборы обладают высокой квантовой эффективностью в красном и ближнем инфракрасном диапазонах спектра и не имеют интерференционных полос по полю. В марте были проведены первые наблюдения с использованием монохроматора SPID, который выделяет в спектре объекта узкие полосы шириной до одного ангстрема и строит спекл-изображение. Инструмент разработан в Лионской обсерватории (Франция).

В апреле ученый совет принял предложенные администрацией изменения в структуре обсерватории. В составе отдела физики звезд была образована лаборатория исследования звездного магнетизма (рук. И.И. Романюк), в отделе радиоастрономии организована лаборатория радиоастрофизики (рук. С.А. Трушкин), а сотрудники эксплуатационных подразделений РАТАН-600 вошли в отдельную группу.

В августе прошла VII Научная летняя школа «Наблюдательная и теоретическая космология», проведенная при поддержке фонда «Династия» и содействии Международного центра фундаментальной физики (г. Москва) и Школы современной астрофизики (г. Пушино). Участниками стали 50 молодых астрофизиков, отобранных на конкурсной основе.

К 100-летию со дня рождения главного конструктора БТА Баграта Константиновича Иоаннисиани была проведена международная конференция «Большие оптические телескопы». В ней участвовали ведущие иностранные и российские специалисты в области телескопостроения, представители ведущих отечественных предприятий оптической промышленности. Почетным участником конференции был сын конструктора – А.Б. Иоаннисиани. Основные вопросы, обсуждавшиеся на конференции, были посвящены современному состоянию и перспективам в области оптического телескопостроения и навесной аппаратуры. Важную часть программы конференции составили выступления зарубежных гостей о крупнейших телескопах мира, включая и проекты их строительства – E-ELT, SALT и др.

В октябре сотрудники Института оптики атмосферы СО РАН (г. Томск) под руководством д.ф.-м.н. В.П. Лукина приступили к исследованию подкупольного пространства башни и места установки БТА с целью изучения характера атмосферной турбулентности, что в перспективе позволит создать адаптивные оптические системы для повышения разрешающей способности телескопа.

Среди научно-технических разработок, проводимых в САО РАН, хотелось бы отметить ряд многообещающих проектов для оптических телескопов:

- оптоволоконный эшелле-спектрометр для Цейсс-1000, с помощью которого в диапазоне 400–780 нм возможна регистрация 60 спектральных порядков со спектральным разрешением $R=30000$. Группа под руководством В.Е. Панчука уже разработала и внедрила аналогичные инструменты для Коуровской обсерватории (УрГУ) и ИНАСАН. При испытаниях такого спектрометра на Цейсс-1000 за один час экспозиции для звезд $m_v=12.5$ достигнуто отношение $S/N=10$. Внедрение инструмента автоматизирует процедуру наблюдений, повысит эффективность исследований звезд, а также позволит выполнять новые для нас программы по измерениям лучевых скоростей звезд с высокой точностью;

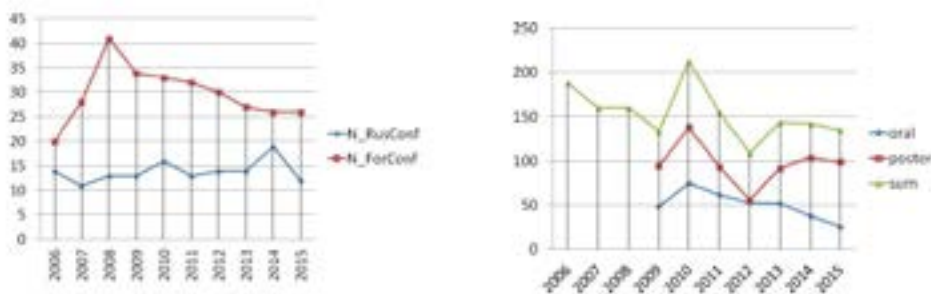


Рис. 10. Слева – число российских (синий цвет) и международных (красный цвет) конференций, в которых участвовали сотрудники САО РАН; справа – количество устных докладов (синий цвет), постеров (красный) и общего числа сообщений (зеленый), представленных на этих конференциях.

- система широкоугольного оптического мониторинга высокого временного разрешения МиниМегаТОРТОРА, разрабатываемая группой релятивистской астрофизики (рук. Г.М. Бескин) совместно с КФУ;
- спектрофотометр инфракрасного диапазона для БТА (рук. В.Л. Афанасьев).

Реализация этих проектов, которые расширят наблюдательные возможности обсерватории, рассчитана на несколько лет.

На РАТАН-600 проведены испытания кинематических механизмов на отражательных элементах северного и южного секторов антенны. Применение современного оборудования повысило точность установки щитов и сократило время перестановки антенны, причем надежность и ресурс кинематических механизмов возросли, а энергозатраты уменьшились.

В честь 50-летия полета в космос Юрия Гагарина для гостей обсерватории были организованы дни открытых дверей, а для коллектива САО РАН был проведен

торжественный вечер, на котором с рассказом о первом старте корабля «Восток» выступил Н.К. Шолухов – участник исторического события на космодроме Байконур.

В конце года состоялись очередные выборы в РАН, где от обсерватории на вакансии членов-корреспондентов баллотировались И.Д. Караченцев и С.Н. Фабрика, а на вакансию академика – Ю.Ю. Балега.

2012

Продолжалась оптимизация режимов работы системы охлаждения подкупольного пространства, разработка АСУ БТА нового поколения, поиск технических решений для создания адаптивных оптических систем видимого диапазона.

Для приемки главного зеркала лабораториями СФВО (рук. В.Л. Афанасьев) и ОН (рук. В.В. Власюк) совместно с сотрудниками ИПЛИТ РАН (рук. А.В. Ларичев) определены характеристики модулей датчика волнового фронта Шака-Гартмана, выбран оптимальный вариант прибора. В октябре были проведены измерения поверхности ГЗ. Их обработка и сравнение с данными 1995 г. показали, что около 65% зеркала сохранило точность поверхности $\lambda/4$, однако в некоторых областях имеется существенная деградация до 2λ .



Рис. 11. Процесс полировки зеркала БТА диаметром 6 метров на станке КУ-168АДМ (ЛЗОС).

Завершены основные работы по созданию универсального редуктора светосилы SCORPIO-2 (рук. В.Л. Афанасьев). При его разработке учтен опыт эксплуатации предыдущего варианта редуктора SCORPIO, который является самым используемым прибором БТА (до 60% наблюдательного времени). Протестированы следующие режимы SCORPIO-2: широкополосная и узкополосная фотометрия, спектроскопия среднего разрешения с длинной щелью, спектрополяриметрия и 3D-спектроскопия с интерферометром Фабри-Перо.

В начале года коллектив под руководством Г.Г. Валявина приступил к работе над проектом нового спектрографа с волоконным световым входом и разрешением $R \sim 100000$. Прибор с полностью дистанционным управлением должен обеспечивать высокую позиционную стабильность. Он существенно расширит возможности БТА в получении звездных спектров высокого разрешения. Спектрограф планируется для замены спектральных инструментов, некоторые из которых были разработаны еще в 1970-х годах.

Создание инфракрасного спектрографа, который является важным для обсерватории прибором, ведется коллективом из сотрудников лабораторий СФВО, ОН и ПР под общим руководством гл.н.с. В.Л. Афанасьева. Выполнен расчет узлов криостата (ИПФ РАН), изготовлены оптические детали (г. Санкт-Петербург), проектируется и изготавливается электроника для управления и сбора данных.

Разработан проект МиниМегаТортора, в котором предполагается создание 9-канального телескопа с полем зрения 900 кв. градусов для обнаружения вспыхивающих и движущихся объектов с блеском до 12^m при экспозициях в 0.1 секунды. Сотрудники группы релятивистской астрофизики Г.М. Бескин и С.В. Карпов совместно с коллегами из КФУ приступили к созданию этой системы.

На РАТАН-600 начался перевод радиометрической техники сантиметрового диапазона с криорадометров на неохлаждаемые приемники. Специалисты лаборатории РК и СПБФ, используя современные неохлаждаемые транзисторные усилители, получили низкие шумовые параметры и высокую надежность работы приемных комплексов без применения дорогостоящих микрокриогенных систем водородного уровня охлаждения.

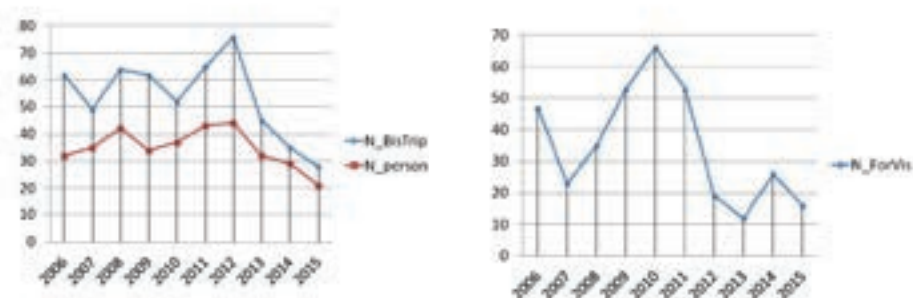


Рис. 12. Слева – количество поездок за рубеж в год (синий цвет) и число сотрудников (красный цвет), выезжавших в заграничные командировки для участия в конференциях и совместных работах; справа – количество иностранных ученых, посетивших обсерваторию.

Положительные результаты в экспериментах с антенной «Eleven» по использованию адаптивной фильтрации для борьбы с электромагнитными помехами в дециметровых диапазонах позволяют надеяться на возвращение для радионаблюдений хотя бы части рабочих полос в диапазонах длин волн 12.5–25 см.

В октябре проведена молодежная астрономическая конференция «Наблюдаемые проявления эволюции звезд». В ней приняли участие около 100 молодых астрономов и ведущие российские астрофизики, приглашенные для чтения лекций по актуальным темам. Молодые ученые также имели возможность выступить с результатами своих исследований.

Исполнилось 80 лет крупнейшему российскому ученому академику Юрию Николаевичу Парийскому, который с 1969 г. связал свою судьбу с РАТАН-600. Под его руководством и при непосредственном участии были проведены первые наблюдения на радиотелескопе, а основные параметры РАТАН-600 за сорок лет эксплуатации улучшены в несколько раз. Выдающимися достижениями Ю.Н. Парийского являются

определение размера радиисточника в центре нашей Галактики, измерение углового размера Венеры на длине волны 8 мм, который оказался меньше, чем предсказывалось принятой гипотезой, и указывал на высокое давление на поверхности планеты, ограничение на уровень флуктуаций космического микроволнового фона по наблюдениям на РАТАН-600, что привело к совершенствованию космологических моделей, поиск и исследование галактик ранней Вселенной в проекте «Большое Трио», в ходе которого была открыта мощнейшая радиогалактика на $z = 4.514$, измерение вариаций синхротронного излучения в сантиметровом диапазоне на минутных угловых масштабах.

В обсерватории остро стоит проблема кадров. Коллектив радиоастрономического сектора практически остался без молодых специалистов. Все усилия по привлечению к работам выпускников технических вузов, даже с юга России, оказались безрезультатными.

В июне началось финансирование строительства общежития для аспирантов и молодых специалистов. По результатам конкурса в качестве исполнителя работ был выбран «Южпроектстроймонтаж». Работы контролировались зам. директора А.В. Захаровым и в основном выполнялись по графику.

Завершилась газификация жилых домов поселка. Работы проводила специализированная организация, но службы обсерватории оказали им существенную помощь. Жители поселка начали получать в своих квартирах природный газ, а многолетние проблемы закупки и доставки сжиженного газа наконец-то ушли в прошлое.

Директор обсерватории Ю.Ю. Балега в составе коллектива авторов удостоен Государственной премии 2011 г. в области науки и техники за разработку и внедрение эффективных технологий использования возобновляемых и нетрадиционных источников энергии в малой энергетике.

2013

2013 г. стал годом перемен в научной сфере страны. Началось все с выборов президента РАН, проводившихся в конце мая. Они прошли в 2 этапа и сопровождались серьезной дискуссией о путях развития Академии и российской науки. Юрий Сергеевич Осипов, занимавший этот пост с момента образования РАН (1991 г.), в выборах участия не принимал. Борьба шла между тремя кандидатами – академиками Ж.И. Алферовым, А.Д. Некипеловым и В.Е. Фортовым. Большинство голосов президентом был избран В.Е. Фортов, занимавший прежде важные посты в РАН и Правительстве РФ. Итог выборов вселил надежду на то, что новый президент, сам работающий в экспериментальной физике, обратит внимание на судьбу крупнейших научных установок страны, к которым относятся и наши телескопы. Через месяц после выборов В.Е. Фортов был поставлен перед фактом о реформе РАН. Проект реформы разрабатывался аппаратом Правительства РФ и Минобрнауки без консультаций с руководством РАН. Президент РФ поддержал реформу, и все необходимые решения были приняты Государственной думой в кратчайшие сроки, несмотря на протесты научного сообщества страны.

Реформа РАН активно обсуждалась и в нашем коллективе. На заседаниях ученого совета обсерватории было поддержано обращение внеочередного расширенного общего

собрания ОФН РАН к В.В. Путину, в котором подчеркивалось, что проект закона о реорганизации государственных академий наук не прошел общественного обсуждения и фактически ведет к ликвидации РАН. 30 декабря Председатель Правительства РФ Д.А. Медведев подписал распоряжение о переводе научных организаций, подчиненных РАН, РАМН и РАСХ, в ведение ФАНО. Академия наук сохранила лишь экспертные функции и право осуществлять научно-методическое руководство своими бывшими институтами. На ближайшие годы был введен мораторий на передачу собственности РАН и ее институтов, на 3 года отложены очередные выборы академиков и членов-корреспондентов. На фоне таких организационных изменений сложно было ожидать улучшения финансового состояния обсерватории и, прежде всего, в части поддержки наших телескопов.

В течение года пришлось много заниматься разработкой комплексной программы развития астрономии в России. Эта задача была возложена РАН и Минобрнауки на САО РАН и ИНАСАН. Программа была доложена и доработана на конференции ВАК-2013 в Пулковской обсерватории.

В течение года аттестационной комиссией под председательством В.Л. Афанасьева была проведена аттестация научных работников.

Созданы две базовые кафедры в Университете ИТМО (г. Санкт-Петербург) и в Казанском федеральном университете. Решения об этом были приняты во время встреч с ректорами университетов В.Н. Васильевым (ИТМО) и И.Р. Гафуровым (КФУ). Есть надежда, что такая совместная работа позволит привлечь к работе в САО РАН молодых специалистов.

В начале года был представлен проект спектрографа высокого разрешения с волоконным вводом для БТА (рук. Г.Г. Валявин). Концептуально проект был принят к исполнению.

Продолжались работы по контролю качества поверхности ГЗ, ввод в штатную эксплуатацию спектрографа SCORPIO-2, совместная с ИПФ РАН разработка инфракрасного спектрометра для БТА.

Завершена реконструкция телескопа Цейсс-1000. Без остановки инструмента проведена замена силовых приводов и датчиков положения на осях телескопа, что в несколько раз повысило точность его наведения и улучшило качество слежения. Использование интеллектуальных цифровых приводов сделало возможным ведение телескопа с переменной скоростью, что важно при исследовании быстродвижущихся объектов. Работы выполнены сотрудниками лабораторий обеспечения наблюдений и информатики (С.В. Драбек, В.С. Шергин, В.В. Комаров и др.) под общим руководством В.В. Власюка.

2014

Смена ведомственной принадлежности не улучшила базового финансирования обсерватории, но при этом увеличился объем документооборота, что в основном коснулось работы административных подразделений обсерватории. ФАНО приступило к инвентаризации имущества академий, изменилась система финансирования и отчетности.

Дополнительное финансирование для обеспечения наших комплексов мы получили из средств Минобрнауки как победители конкурса по поддержке УНУ по

программе «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 гг.». Было приобретено необходимое научное оборудование, продолжена разработка дорогостоящих инструментов для наших телескопов, обеспечены текущие работы.

Научный коллектив под руководством Ю.Ю. Балеги выиграл конкурс мегагрантов Российского научного фонда с темой «Эволюция звезд от их рождения до возникновения жизни», что послужило еще одним источником средств для поддержки работ на БТА. Этот грант, где руководителями трех научных направлений являются Г.Г. Валявин, И.И. Романюк и С.Н. Фабрика, рассчитан на выполнение в течение 2015–2018 гг. Одним из требований РНФ является ежегодное софинансирование проекта из внебюджетных источников в размере 25% от суммы гранта. Еще один грант РНФ по теме «Распределение и движение галактик в близкой Вселенной» получила лаборатория ВАК (рук. Д.И. Макаров).



Рис. 13. Слева – интерферограмма ГЗ БТА, полученная в цехе ЛЗОС при доводке рабочей поверхности заготовки. Среднеквадратичное отклонение поверхности составляет 7λ , размах отклонений – 47λ . Справа – криостатированный спектрофотометр ИК-диапазона.

Начата полировка поверхности первого ГЗ БТА (рис. 13, слева). Причина отставания этих работ от запланированного графика вызвана их недостаточным финансированием со стороны ФАНО. Кроме этого, еще необходимо контролировать процесс формообразования зеркала в цехе, реализовать его приемку, установку зеркала в оправу и юстировку разгрузок зеркала, а также обеспечить контроль температуры зеркала и подкупольного пространства.

Для оснащения спектральных комплексов высокого разрешения наших телескопов в лаборатории перспективных разработок создана система регистрации изображений на основе ПЗС-матрицы EEV CCD42-40 форматом 2048×2048 элементов с охлаждением замкнутого цикла.

Группой разработчиков (рук. В.Л. Афанасьев) для спектрофотометра ИК-диапазона разработана схема автоматического управления и изготовлен криостат

(ИПФ РАН). Первый свет на спектрофотометре (рис. 13, справа) планировалось получить в 2016 г.

Летом была введена в эксплуатацию система широкоугольного оптического мониторинга высокого временного разрешения МиниМегаТортора, обеспечивающая обнаружение и исследование быстропотекающих явлений. Этот роботический многоканальный оптический телескоп создан совместными усилиями группы РА и специалистами ООО «Параллакс» (г. Казань) при финансовой поддержке КФУ. Система не имеет аналогов в мире по сочетанию своих характеристик.

На РАТАН-600 завершен перевод криогенных радиометров на «теплые» входные малошумящие усилители. В диапазоне длин волн 3–6 см отличие по шумам новых систем от криостатированных составляет 7–16 К. На длине волны 6.2 см реализована перестройка полосы приема для ухода от помех.

В конце августа прошла международная конференция «Физика и эволюция магнитных и родственных им звезд».



Рис. 14. Радиоастрономический сектор отметил 40 лет первых наблюдений на РАТАН-600.

Ее программа включила широкий круг научных тем – от эволюции и химического состава пекулярных звезд до магнитных полей белых карликов и исследований экзопланет. Впервые сборник трудов конференции, проведенной в САО РАН, издан в рамках международной серии «Astronomical Society of the Pacific Conference Series».

Главный научный сотрудник Игорь Дмитриевич Караченцев совместно с американским астрофизиком Брентом Талли и немецким ученым Феликсом Агароняном удостоен престижной награды в области астрономии и в смежных с нею областях физики и математики – Международной премии им. В.А. Амбарцумяна, учрежденной президентом Республики Армения. Этой премией И.Д. Караченцев и Б. Талли были награждены за фундаментальный вклад в космологию локальной Вселенной, а Ф. Агаронян – за вклад в астрофизику высоких энергий, физику космических ускорителей и в развитие стереосистемы черенковских телескопов.

Премия им. А.А. Белопольского вручена Ю.Ю. Балеге и Е.А. Малооголовцу за цикл работ «Определение фундаментальных характеристик звезд главной последовательности по данным интерферометрических наблюдений на 6-м телескопе БТА».

12 июля сотрудники радиоастрономического сектора отметили 40-летие первых наблюдений на радиотелескопе РАТАН-600 (рис. 14).

В день осеннего равноденствия впервые был проведен праздник «День поселка». В нем приняли участие около 200 человек.

2015

Средства мегагранта РФ позволили приступить к созданию спектрометра высокого разрешения с оптоволоконным входом, а также заказать ПЗС-чипы большого формата для оснащения наблюдательных комплексов.

Впервые после 2005 г. собственными силами СЭК БТА проведено переалюминирование (рис. 15, слева) рабочей поверхности главного зеркала БТА.

За счет средств Минобрнауки впервые после прокладки в 2005 г. оптоволоконной линии, соединяющей ННП с ВНП, проложена новая линия связи для замены устаревшей.

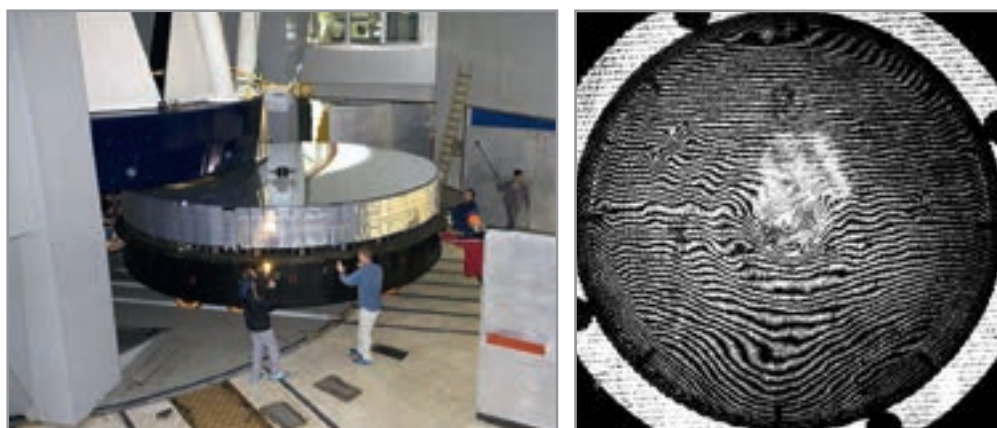


Рис. 15. Слева – алюминирование ГЗ БТА, проведенное с 1 июля по 4 августа сотрудниками СЭК БТА. Справа – интерферограмма, полученная в цехе ЛЗОС. Результаты измерений 01.12.2015 г.: СКО поверхности 1.7λ , полный размах 13λ .

Подготовка кадров, которые в дальнейшем будут обеспечивать работу телескопов, является важной задачей. При вступлении в силу новой редакции закона об образовании потребовалось провести аккредитацию аспирантуры САО РАН, что было выполнено своевременно и в соответствии с нормами закона благодаря работе, организованной ученым секретарем Е.И. Кайсиной.

В октябре проведены две международные конференции, первая из которых «Кварковый фазовый переход в компактных объектах и многоволновая астрономия: нейтринные сигналы, сверхновые и гамма-всплески» была организована совместно с Баксанской нейтринной обсерваторией ИЯИ РАН и проходила у нас и в пос. Терскол

(КБР). Более полусотни ученых из России, Италии, Германии и Польши обсуждали теоретические и экспериментальные аспекты проблемы. Следом была проведена конференция «Настоящее и будущее малых и средних телескопов». В ее работе участвовали более семидесяти ученых из России, ряда стран Европы и Азии.

В связи с истечением срока полномочий директора САО РАН Ю.Ю. Балеги были назначены выборы нового директора на 2016–2020 гг. Конференция трудового коллектива, где приняли участие 387 человек из 437, состоялась 27 ноября. Большинство голосов был избран В.В. Власюк, который вступил в должность по приказу ФАНО России от 22 декабря 2015 г. Проведены кадровые перемещения в администрации. Член-корреспондент РАН Ю.Ю. Балега назначен и.о. научного руководителя обсерватории, заместитель директора по научной работе д.ф.-м.н. М.Г. Мингалиев – и.о. научного руководителя направления «радиоастрономия», к.ф.-м.н. Д.О. Кудрявцев и к.ф.-м.н. Ю.В. Сотникова назначены и.о. заместителей директора по научной работе.

Отсутствие целевого финансирования по модернизации ГЗ БТА не позволило завершить работы, хотя в цехе продолжалась доводка параметров поверхности зеркала (рис. 15, справа). Создание совместно с ИПФ РАН нового охлаждаемого приемного комплекса на 20–30 ГГц для РАТАН-600 также были приостановлены по этой же причине.



Рис. 16. Общежитие для молодых ученых и визитеров в п. Нижний Архыз.

Завершено строительство общежития (рис. 16) для молодых ученых и визитеров обсерватории. Часть помещений нами была зарезервирована под размещение студентов, прибывающих в обсерваторию на ознакомительные и производственные практики.

2016

В этом году обсерватория отмечала свое 50-летие. В феврале были проведены выборы ученого совета, в состав которого вошел 21 человек. Ученый совет принял план мероприятий к 50-летию обсерватории, включивший серию научных конференций, торжественные, спортивные и культурные мероприятия, а также подготовку изданий, посвященных юбилею, включая и этот сборник.

4 февраля была проведена конференция, отметившая 40-летие первых наблюдений на БТА. В апреле прошли дни открытых дверей, посвященные 55-летию полета в космос Ю.А. Гагарина и 50-летию САО РАН. Обсерваторию посетили в общей сложности более 600 детей и взрослых.

3 июня состоялось празднование юбилея САО РАН, где, кроме сотрудников обсерватории, жителей поселка и гостей, присутствовали глава КЧР Р.Б. Темрезов (рис. 17, слева), спикер Народного собрания КЧР А.И. Иванов, глава администрации Зеленчукского района С.И. Самоходкин. В связи с юбилеем обсерватории М.Г. Мингалиев, И.И. Романюк и Е.Л. Ченцов были удостоены почетного звания «Заслуженный деятель науки КЧР».

В июне в Санкт-Петербурге прошла международная конференция «Темные эпохи и белые ночи», посвященная спектроскопическим исследованиям космологического микроволнового фона. Она была организована сотрудниками СПбФ совместно с ГАО РАН, ИПА РАН, СПбГУ. Ученые из России, Великобритании, Японии и Италии обсуждали теоретические проблемы, связанные с возникновением и формированием Вселенной, результаты научных экспериментов, создание новых инструментов.



Рис. 17. Слева – директор обсерватории В.В. Власюк и глава КЧР Р.Б. Темрезов на празднике, посвященном юбилею САО РАН; справа – вручение памятного подарка и цветов д.ф.-м.н. Наталье Федоровне Войханской на торжественном собрании 1 октября 2016 г.

В августе Фонд поддержки научных образовательных и культурных инициатив «Траектория» и САО РАН провели астрофизическую школу для старшеклассников.

Осенью прошли две международные конференции и торжественное собрание, посвященное юбилею. Основной темой конференции «Мультиспиновые галактики» стали дискуссии между наблюдателями и теоретиками по вопросам происхождения и эволюции выделенных подсистем в галактиках. Среди таких подсистем - внешние и

внутренние полярные диски и кольца, кинематически выделенные ядра, подсистемы звезд и газа с противовращением и др. В конференции приняли участие астрономы из России, Украины, Италии, Германии, Франции, ЮАР, США, Израиля.

1 октября состоялось торжественное собрание, посвященное юбилею обсерватории, под председательством научного руководителя САО РАН Ю.Ю. Балеги, где присутствовали сотрудники обсерватории, наши ветераны и почетные гости – представители научных институтов и организаций-партнеров, включая представителя ФАНО. Директор обсерватории В.В. Власюк сделал сообщение о результатах научной и научно-технической деятельности САО РАН. Были зачитаны приветственные адреса крупнейших астрономических институтов России и ближнего зарубежья, вручены памятные подарки и грамоты ОФН РАН (рис. 17, справа).

Из проведенных научных мероприятий самой большой по количеству участников стала международная конференция «Физика звезд: от коллапса до коллапса» (рис. 18), которая была посвящена проблемам, связанным с физикой звезд и звездных систем. В ее работе участвовали более двухсот астрономов из России, Индии, Ирана, Польши, Чехии, Словакии и других стран. Обсерватория лидирует в этой области исследований в России, поскольку БТА является основным инструментом, обеспечивающим российских астрономов спектральными данными для изучения физики звезд, и единственным телескопом в России и СНГ, где выполняется интерферометрия небесных объектов. На конференции обсуждались проблемы звездообразования и межзвездная среда, атмосферы звезд и звездный магнетизм, звездная активность, кратные звездные системы и экзопланеты, звезды после ядерного горения, методы и инструменты звездной астрофизики.



Рис. 18. Участники международной конференции «Физика звезд: от коллапса до коллапса».

В октябре состоялось выездное заседание президиума ЮНЦ РАН «Прорывные направления астрономии, механики, химии, физики, нанотехнологий и высокопроизводительных вычислительных систем», также приуроченное к 50-летию обсерватории.

На общем собрании РАН 24–28 октября в Москве прошли выборы новых членов Академии наук. Научный руководитель САО РАН Ю.Ю. Балегга был избран академиком. Значительно «омолодился» состав РАН за счет новой процедуры выборов, где предпочтение отдавалось кандидатам в возрасте до 50 лет.

Благодаря средствам, полученным от ФАНО в качестве софинансирования проекта РНФ, продолжились работы по переполировке ГЗ БТА. Получить финансирование на реконструкцию комплекса РАТАН-600 и объектов инфраструктуры обсерватории так и не удалось.

Введена в штатную эксплуатацию автоматизированная система для определения параметров радиоисточников при наблюдениях в радиоконтинууме на РАТАН-600. Она используется как для мониторинга эффективной площади антенны и ее диаграммы направленности, так и для контроля качества работы приемных систем радиотелескопа.

Впервые после ввода в эксплуатацию в 1990 г. проведена юстировка телескопа Цейсс-1000 с помощью датчика волнового фронта Шака-Гартмана. С использованием новой методики удалось достичь характеристик, близких к дифракционному пределу (порядка 0."5).

В декабре вместо КТБТ был образован Национальный комитет по тематике российских телескопов при ФАНО с новым составом экспертов (рис. 19). НКРТР занимается научной экспертизой заявок и распределением наблюдательного времени на российских телескопах.



Рис. 19. Национальный комитет по тематике российских телескопов (слева направо): Р.И. Уклеин, В.В. Власюк, М.А. Погодин, К.А. Постнов, А.Б. Пушкарев, Ю.Ю. Ковалев, М.Е. Сачков, С.Ю. Сазонов.

8 декабря в Москве прошла церемония вручения премии самым цитируемым российским научно-исследовательским институтам. Из институтов ФАНО этого звания были удостоены САО РАН и ИТФ РАН. За последние 10 лет сотрудниками САО РАН опубликовано 1120 работ, вошедших в индекс цитирования Web of Science Core Collection. Обсерватория является лидером в России по нормализованной цитируемости в своей предметной области.

Научные достижения

Далее представлены наиболее значимые научные результаты. Последовательность изложения идет в порядке увеличения пространственных масштабов – от Солнечной системы до самых далеких объектов нашей Вселенной.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТЕОРНЫХ ПОТОКОВ. Мониторинг небесной сферы с помощью системы МиниМегаТортора (ММТ), проводимый группой РА (рук. Г.М. Бескин), дал новую информацию о метеорных потоках. В течение первого года за двести ночей наблюдений обнаружено свыше 65 тысяч метеоров или 300–350 за ночь при длительности метеорных событий 0.1–2.5 с и угловой скорости до 38°/с. Самые слабые детектируемые ММТ объекты имеют блеск в максимуме порядка 10^m. Следует отметить, что для большинства регистрируемых другими способами метеоров эта величина лежит в диапазоне 4^m–8^m. Десятки объектов наблюдались еще и в BVR-полосах. Для них определены вариации показателя цвета вдоль трека. Данные о ранее недоступных изучению метеорных событиях послужат ценной базой для углубления знаний о пространственном распределении пылевых частиц в околоземном пространстве.

ПОЛЯРИЗАЦИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ СПУТНИКОВ ВНЕШНИХ ПЛАНЕТ. Спектрополяриметрический режим наблюдений прибора SCORPIO-2 позволил исследовать поляризационные свойства ядер комет и спутников планет-гигантов, что было выполнено в совместных программах САО РАН (В.Л. Афанасьев) и ГАО НАНУ (Н.Н. Киселев, В.К. Розенбуш). В 2011–2012 гг. проведены наблюдения главных спутников Урана. Блеск Урана (6^m) существенно ярче их блеска (14.^m4–16.^m5). Спутники находятся достаточно близко от планеты – на угловых расстояниях 5"–40", и вклад рассеянного света от Урана сравним с регистрируемым потоком от спутника. Авторы показали, что в пределах точности измерений не обнаружено значительных изменений поляризации блеска спутников, т.е. их поверхности достаточно однородны по своим физическим характеристикам. Установленная для спутников зависимость величины поляризации от фазы является, скорее всего, результатом наложения двух механизмов рассеяния света – когерентного и эффектов ближнего поля.

ИССЛЕДОВАНИЯ ЯДЕР КОМЕТ. Фотоэлектрические (ЗТШ, КрАО) и спектрополяриметрические (БТА/SCORPIO-2) наблюдения позволили измерить поляризацию у кометы C/2009 P1 (Garrad) при ее сближении с Землей в 2011–2012 гг. Установлено с точностью 0.2%, что степень поляризации света, рассеянного кометой, меняется от –2.2% до 4.9% при фазовых углах 3.7° и 35.9°, соответственно. Это согласуется с данными для пылевых комет. Круговая поляризация в коме значимо меняется от –0.05% до –0.30%. Величина круговой поляризации в кометах зависит от фазового угла и расстояния от Солнца. Механизмом ее возникновения является рассеяние на оптически активных несферических частицах. С помощью БТА круговая поляризация обнаружена у 4 комет из тех 9, у которых она была зарегистрирована.

ИССЛЕДОВАНИЯ СОЛНЦА В РАДИОДИАПАЗОНЕ. Благодаря полному солнечному затмению 29 марта 2006 г., в полосе которого оказался РАТАН-600, сотрудникам групп наблюдений Солнца и исследований Солнца СПбФ удалось зарегистрировать ряд редких событий, наблюдающихся только при таком астрономическом явлении. Было

измерено радиальное распределение яркости слабого залимбового радиоизлучения и получены данные о плотности короны на расстояниях до одного радиуса Солнца. Обнаружен мощный радиоисточник с пространственной структурой в области полярной корональной дыры и в ее излучении зарегистрирована граница перехода от уярчения к потемнению. Детектировано поляризованное радиоизлучение высокоширотного протуберанца и определены характеристики его магнитного поля.

ПРОГНОЗ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ. Используя радионаблюдения в диапазоне от 3 до 18 ГГц и нескольких азимутах, реализованные на РАТАН-600 для исследований активной структуры солнечной атмосферы, В.М. Богод и его коллеги из СПбФ разработали новый критерий прогноза солнечной активности. В его основе лежит сравнение нормализованного спектра стабильной активной области с уровнем активности вспышечной области. Критерий удовлетворительно работает для протонных событий и мощных вспышек рентгеновских классов X, M и C большого уровня. Одновременные измерения в таком широком диапазоне длин волн делают критерий более устойчивым. Результаты ежедневного мониторинга Солнца в радиодиапазоне, а также прогноз протонной солнечной активности на ближайшие три дня публикуются на сайте САО РАН.

СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ ЗВЕЗД И ЗВЕЗДНЫХ СИСТЕМ. Развитие спекл-интерферометрии для реализации на БТА дифракционного углового разрешения почти 30 лет ведется лабораторией (теперь группой) МАВР под руководством Ю.Ю. Балеги. Такими методами наблюдений обладают всего несколько обсерваторий в мире.

Для очень молодой (возраст ~100 тыс. лет) массивной двойной системы θ^1 Ori C в ближайшем к нам комплексе звездообразования в Орионе впервые построена точная орбита, определены массы и спектральные классы компонентов. Чтобы покрыть полный период обращения системы, авторы использовали данные в видимом и инфракрасном диапазонах спектра за более чем 10 лет наблюдений, которые были получены на БТА, а также на интерферометрических системах VLT/AMBER (ESO, Чили) и IOTA (SAO, США).

В гало Галактики открыта четверная система звезд-карликов G89-14 с очень низким показателем металличности $[m/H] = -1.9$, который свидетельствует о том, что система образовалась в среде с низким содержанием металлов. Соотношение орбитальных периодов подсистем G89-14 указывает на ее высокую иерархичность и устойчивость. Существование таких объектов доказывает способность звездных систем высокой кратности сохраняться в результате динамической эволюции за время, сравнимое с возрастом Галактики.

В 2011 г. удалось измерить видимый диаметр долгопериодической переменной звезды R Leo – холодного пульсирующего гиганта на последней стадии эволюции, размеры которого в сотни раз превышают размер Солнца. С рекордной точностью (0."002) были получены данные о ее видимом диаметре в фазах пульсации от 0."043 до 0."056. Обнаружена асимметрия профиля звезды при наблюдениях в линии водорода H α и в полосе поглощения молекулы TiO. Полученные результаты помогут объяснить природу пульсаций этого редкого класса звезд.

В 2016 г. завершена обработка интерферометрических наблюдений (2007–2014 гг.) звезд в OB-ассоциации Cas-Tau. Разрешено на компоненты 19 систем, две из которых

оказались тройными. Общее число звезд в 83 системах, входящих в ассоциацию, составляет 134. Измеренные орбитальные параметры компонентов позволят получить согласованные данные о возрасте и массах звезд различных спектральных классов.

ИССЛЕДОВАНИЯ ЗВЕЗДНОГО МАГНЕТИЗМА ведутся с помощью спектрографа ОЗСП с анализатором круговой поляризации. Этот прибор является единственным из инструментов БТА первого поколения, еще находящимся в штатной эксплуатации. Спектрограф неоднократно модернизировался. Сейчас в наблюдениях используется ПЗС-приемник (2048×4608 элементов), изготовленный в ЛПП. Отметим следующие результаты, полученные в лаборатории исследований звездного магнетизма (И.И. Романюк, Д.О. Кудрявцев, Е.А. Семенко и др.).

В 2007 г. обнаружена химически пекулярная звезда HD 45583 с сильным магнитным полем. Продольный компонент поля звезды меняется сложным образом от -2 до $+4$ кГс с периодом 1.4^d , причем периоды фотометрических и спектральных изменений совпадают. В рамках модели наклонного ротатора структуру магнитного поля можно объяснить комбинацией сильно нецентрального диполя и соосного с ним октуполя. Звезда является членом молодого звездного скопления. Тот факт, что поле сложной структуры встречается редко и только у молодых объектов, является аргументом в пользу реликтового происхождения магнитных полей химически пекулярных звезд.

По итогам 30-летних наблюдений, которые проводились в международной кооперации с основным участием астрономов САО РАН, удалось обнаружить замедление осевого вращения магнитной звезды HD 37776, составившее $dP/P = 4.0 \times 10^{-6}$ в год. Звезда имеет очень сильное магнитное поле (70–80 кГс на поверхности) сложной конфигурации, ее возраст не более 1 млн лет, она окружена туманностью. Это первый случай обнаружения магнитного торможения для химически пекулярной звезды, находящейся на главной последовательности (ГП).

По результатам наблюдений 2000–2015 гг. химически пекулярной звезды HD 965 установлено, что она является сверхмедленным магнитным ротатором с периодом вращения около 20 лет и входит в тройку таких объектов среди более чем 300 изученных магнитных CP-звезд. Наличие уже трех таких ротаторов означает, что механизм динамо не является эффективным во время жизни пекулярной звезды на ГП и не может сформировать крупномасштабного магнитного поля. Скорее всего, генерация поля происходит на ранних стадиях эволюции, еще до прихода звезды на ГП.

Предложен эффективный способ отбора кандидатов в магнитные звезды по особенностям их спектров – депрессии континуума и аномалиям в интенсивностях линий разных химических элементов. В 2015 г. среди отобранных таким методом кандидатов было обнаружено 12 новых магнитных звезд. Одна из них, HD 34736, имеет уникальные параметры. У нее обнаружено очень сильное магнитное поле, продольный компонент которого меняется от -5 до $+5$ кГс с периодом 1.4^d . Звезда оказалась двойной с орбитальным периодом около 83^d и эксцентриситетом орбиты более 0.9. В периастре спутник очень близко подходит к основному магнитному компоненту и может влиять на его атмосферу. Период вращения главной звезды и орбитальный период не совпадают, что является уникальным случаем для подобных пар. Видимо, обнаружена очень молодая система, где синхронизация орбит еще не произошла.

МАГНЕТИЗМ БЕЛЫХ КАРЛИКОВ. Повышение проникающей способности при измерениях магнитных полей звезд на БТА с помощью спектроскопии высокого разрешения позволило исследовать слабые магнитные поля у белых карликов.

По наблюдениям 2014 г. звезды 40 Eri на БТА (ОЗСП), CFHT (ESPADONS) и WHT (ISIS) Г.Г. Валявиным и Е.А. Семенко совместно с коллегами из Канады и Чили установлено, что при рекордной точности измерений 85 Гс верхний предел магнитного поля этого белого карлика не превышает 250 Гс. Этим опровергнута гипотеза о том, что у всех белых карликов магнитное поле должно быть порядка единиц кГс.

Для белого карлика WD 1953-011 впервые получены детальные карты распределения магнитного поля и температуры по его поверхности. Установлено, что сильные магнитные поля практически полностью останавливают конвективный вынос энергии из недр таких звезд к поверхности, существенно тормозя их эволюционное остывание. Магнитные белые карлики с наиболее сильными полями и температурами поверхностей менее 6000 К являются одними из самых старых из наблюдаемых звезд Галактики. Результаты исследований Г.Г. Валявина вместе с коллегами из САО РАН, Крыма, Канады, Чили были опубликованы в журнале «Nature» в 2014 г.

ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛЯРОВ проводятся сотрудниками ЛОН с применением методов спектроскопии и спектрополяриметрии умеренного и низкого разрешения и выполняются на фокальных редукторах SCORPIO и SCORPIO-2 с привлечением фотометрических возможностей Цейсс-1000. К полярам относят двойные системы, в состав которых входят карлик, находящийся на ГП, и белый карлик, обладающий очень сильным магнитным полем.

В 2014 г. завершен анализ наблюдений USNO-A2.0 0825-18396733 (БТА, Цейсс-1000). Избыток блеска в красном диапазоне, наличие красного континуума и характерных деталей в спектре подтвердили принадлежность этой переменной звезды к полярам. Анализ доплеровских карт, построенных по сильным эмиссиям, показал, что область формирования линий локализована вблизи внутренней точки Лагранжа и связана с аккрецирующей колонной. Из спектров и кривых лучевых скоростей определены массы компонентов и установлено, что в системе происходит частное затмение белого карлика. Дополнительные фотометрические наблюдения уточнили орбитальный период системы и дали указания на сильную собственную переменность объекта. Излучение системы сильно поляризовано, в ней происходит аккреция вещества на один из полюсов.

В 2016 г. Н.В. Борисов, М.М. Габдеев, О.И. Спиридонова вместе с коллегами из КФУ завершили исследования затменного поляра CRTS CSS081231 J071126+440405, который обладает сильной переменностью на орбитальной и долговременной шкалах с изменением формы и амплитуды кривых блеска. Измерена длительность затмения и установлены ограничения на угол наклона системы. Для нахождения амплитуды лучевых скоростей красного карлика использовались модельные спектры, учитывающие эффекты переизлучения. Определены параметры аккреционной колонны. Показано, что даже при незначительных изменениях блеска в системе происходит кардинальная перестройка областей формирования спектральных линий.

СПЕКТРОСКОПИЯ ЗВЕЗД С ВЫСОКИМ СПЕКТРАЛЬНЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ. Задачи звездной астрофизики, для которых нужны спектры с максимально высоким разрешением, выполняются на эшелле-спектрометре БТА, установленным в фокусе

Нэсмита. Прибор создан под руководством гл.н.с. В.Е. Панчука, и поддерживается сотрудниками лаборатории астроспектроскопии.

Переменность оптического спектра ИК-источника IRAS 01005+7910 была впервые обнаружена в 2002 г. В течение 10 лет В.Г. Клочкова и Е.Л. Ченцов вели мониторинг объекта с высоким спектральным разрешением. Определены спектральный класс звезды, ее фундаментальные параметры и химический состав атмосферы. Отождествлены абсорбции, формирующиеся в близфотосферных слоях, узкие оболочечные эмиссии и эмиссионно-абсорбционные профили, образующиеся в переходных от фотосферы к оболочке областях, рассмотрена переменность их профилей и лучевой скорости. Деформации профилей абсорбционно-эмиссионных линий связаны с изменениями их абсорбционных составляющих из-за вариаций геометрии и кинематики в основании ветра. Относительно низкая скорость ветра и большая интенсивность длинноволновой эмиссии характерны не для классических сверхгигантов, а для гипергигантов. IRAS 01005+7910 – пример спектральной мимикрии маломассивной post-AGB звезды под массивный гипергигант.

По наблюдениям (БТА/НЭС) 2014-2016 гг. В.Г. Клочковой изучены особенности спектра и поля скоростей в атмосфере и оболочке оптического компонента ИК-источника IRAS 23304+6147, где впервые было обнаружено расщепление профилей сильных абсорбций ионизованных металлов (YII, BaII, LaII, SiII), что обусловлено наличием коротковолновой компоненты, формирующейся в околосветной оболочке. Таким образом, на БТА открыта еще одна post-AGB звезда с оболочкой, которая обогащена металлами, синтезированными на предыдущей стадии эволюции.

Анализ спектров с высоким спектральным разрешением А-сверхгигантов, выполненный В.Г. Клочковой, Е.Г. Сендзикасом и Е.Л. Ченцовым, показал, что определение эволюционного статуса сверхгигантов в галактическом поле - задача нетривиальная, поскольку одни и те же значения спектрального класса и близкого класса светимости могут иметь звезды разных возрастов и масс, находящиеся на различных этапах своей эволюции. Одну и ту же область диаграммы Герцшпрунга-Рессела занимают звезды, эволюционирующие от стадии AGB к планетарной туманности, и массивные сверхгиганты, эволюционирующие от ГП к стадии красного сверхгиганта.

ИССЛЕДОВАНИЯ РЕНТГЕНОВСКИХ ДВОЙНЫХ СИСТЕМ. РАТАН-600 обладает уникальной возможностью одновременного измерения плотностей потока в широком диапазоне радиоизлучения. Это используется в изучении микроквазаров, являющихся рентгеновскими двойными системами, в состав которых предположительно входят черная дыра (ЧД) и звезда ГП. Такие работы ведутся С.А. Трушкиным в сотрудничестве с радиоастрономами Великобритании и Японии.

В 2006 г. впервые за длительный период наблюдений у микроквазара Cyg X-3 была зарегистрирована серия мощных радиовспышек с переходом системы в жесткое и мягкое рентгеновские состояния. В рамках модели установлено, что мощные выбросы из внутренних областей аккреционного диска сопровождаются распространением релятивистских ударных волн, в которых происходит быстрая и эффективная генерация релятивистских электронов и магнитных полей.

В 2007–2008 гг. в течение 500 дней наблюдений в диапазоне 1–30 ГГц у Cyg X-3 были зарегистрированы более десятка вспышек. По этим радионаблюдениям и

рентгеновским данным сделан вывод о тесной связи процессов образования и коллимации релятивистских истечений массы из центральных областей вокруг ЧД с кардинальной перестройкой структуры и энергетики аккреционного диска и горячей короны вокруг него. По данным мониторинга этого источника в спокойной фазе, в которой он находится в настоящее время, удалось установить, что средние за 10 дней радиопотоки антикоррелируют со средними рентгеновскими потоками в диапазоне 15–50 кэВ (Swift/BAT) с коэффициентом корреляции выше 0.9. Это является еще одним подтверждением взаимосвязи процессов в аккреционном диске и в струйных выбросах.

Рентгеновская двойная система V404 Cyg (GS 2032+336) еще является и новой в оптическом диапазоне. Она состоит из ЧД с массой $10M_{\odot}$ и субгиганта спектрального класса K0, заполняющего полость Роша. В июне 2015 г. у V404 Cyg произошла ярчайшая вспышка, которая была зарегистрирована от гамма- до радиодиапазона. С 18 июня по 12 июля система наблюдалась на частотах 2.3–22 ГГц (РАТАН-600), где радиоспектр V404 Cyg кардинально менялся синхронно с изменениями рентгеновского потока в диапазоне 15–300 кэВ (Swift/BAT и Интеграл). Сделан вывод, что это связано с началом формирования релятивистского струйного выброса вещества из полюсов аккреционного диска во время близкой к критической аккреции вещества на ЧД.

LBV-ЗВЕЗДЫ В БЛИЗКИХ ГАЛАКТИКАХ. Интерес астрофизиков к поиску ярких голубых переменных звезд (Luminous Blue Variable) обусловлен их редкой встречаемостью, связанной с их эволюционным статусом – это наиболее массивные звезды на стадии перед вспышкой сверхновой. В 2008 г. лабораторией физики звезд (рук. С.Н. Фабрика) была открыта седьмая по счету LBV-звезда в галактике M33. Ее светимость составила $2 \cdot 10^6 L_{\odot}$, масса – $100 M_{\odot}$, температура – 16000 К. В этом же году С.А. Пустильник с коллегами открыли LBV-звезду в близкой карликовой галактике DDO 68. Она имеет светимость $50000 L_{\odot}$ и очень низкую металличность ($Z=1/36 Z_{\odot}$). Последнее накладывает ограничения на модели эволюции массивных звезд в ранней Вселенной.

Используя селекционный критерий, основанный на свойстве LBV-звезд сохранять постоянную болометрическую светимость при значительных изменениях оптического блеска, сотрудники ЛФЗ подготовили список LBV-кандидатов. В кооперации с учеными из Apache Point Observatory (США) проведены исследования в оптическом (БТА/SCORPIO) и инфракрасном (Triplespec, 3.5-м телескоп АРО) диапазонах пяти LBV-кандидатов в галактике M31. Две из них оказались звездами LBV, одна звезда была классифицирована как «спящая» LBV, а две оставшиеся – как В[e]-сверхгиганты.

УЛЬТРАЯРКИЕ РЕНТГЕНОВСКИЕ ИСТОЧНИКИ (Ultra-Luminous X-ray Sources, ULX) обнаруживаются во внешних галактиках и обладают очень высокими светимостями (10^{39} – 10^{41} эрг/с) в рентгеновском диапазоне. Имеются предположения, что они могут быть сверхкритическими аккреционными дисками вокруг ЧД звездных масс ($\sim 10 M_{\odot}$), как SS 433, или гипотетическими ЧД промежуточных масс ($\sim 1000 M_{\odot}$) со стандартными аккреционными дисками. В 2006-2008 гг. при исследованиях ULX на БТА сотрудниками ЛФЗ обнаружено, что эмиссионные спектры отдельных связанных с ними туманностей свидетельствуют о высоких светимостях центральных источников в УФ-диапазоне. Несколько ULX были отождествлены с молодыми (возраст 5–10 млн лет) массивными звездными скоплениями. Последующие наблюдения скоплений звезд, связанных с этими объектами, на южном небе (VLT) в галактиках Антенны и NGC 3256 и на

северном небе (БТА) в галактиках NGC 4485/4490 подтвердили этот факт. Вероятность случайной ассоциации ULX со звездными скоплениями крайне мала ($\sim 10^{-7}$), и она еще меньше для молодых скоплений звезд.

Из совместных с зарубежными учеными исследований сделан вывод о том, что предшественниками ULX являются тесные двойные системы, масса звезд которых 50-100 M_{\odot} , и они, как правило, выброшены из молодых скоплений. При этом выброс происходит не за счет взрыва сверхновой, так как в этом случае не хватает времени на транспортировку звезды из скопления наружу, а в результате многократных столкновений звезд в центрах скоплений на самых начальных этапах сжатия скоплений.

В оптическом диапазоне отождествлены два новых ULX в галактиках NGC 5474 и M 66. Оба объекта имеют наибольшее среди всех отождествленных ULX отношение рентгеновской светимости к оптической – 7000 для NGC 5474 X-1 и 8000 для M 66 X-1.

ГАММА-ВСПЛЕСКИ. В последние годы исследования гамма-всплесков (GRB, Gamma-Ray Bursts) в оптическом диапазоне в течение последнего десятилетия были сосредоточены на уточнении природы самого феномена и поиске связи GRB с уже известными в астрофизике взрывными процессами. В 2006 г. группой исследования под руководством В.В. Соколова в кооперации с командой А. Кастро-Тирадо (Испания) обнаружена связь гамма-всплесков со сверхновыми.

При мониторинге оптического послесвечения самого близкого гамма-всплеска GRB 060218 с красным смещением $z = 0.033$ установлено, что «длинные» гамма-всплески являются началом взрыва массивных сверхновых. Скорее всего, в виде всплеска мы наблюдаем релятивистский коллапс ядра звезды и рождение очень плотного компактного объекта. В ранних спектрах сверхновой SN 2006aj, связанной с этим гамма-всплеском, были обнаружены линии водорода H α со скоростями 28000 и 24000 км/с, что указывает на существование звездно-ветровой оболочки около звезды-прародительницы.

В 2008 г. с помощью широкопольной камеры высокого временного разрешения TORTORA, созданной под руководством Г.М. Бескина и установленной на итальянском телескопе REM, была зарегистрирована оптическая вспышка, сопровождавшая гамма-всплеск GRB080319B. Благодаря яркому блеску событие получило имя «Naked eye», т.е. видимое невооруженным глазом. Впервые в мире были обнаружены вариации блеска с характерными временами в несколько секунд. Структуры кривых блеска в оптическом и гамма диапазонах коррелируют с коэффициентом 0.82 при запаздывании оптического излучения на 2 с. Этот результат привел к пересмотру представлений о природе излучения GRB.

В ходе международной кампании по мониторингу сверхновой SN 2012au сотрудниками группы исследования GRB (рук. В.В. Соколов) совместно с коллегами из Испании получен весь набор оптических спектров явления, начиная с 5 дня перед максимумом блеска и заканчивая 96 днем после него, что позволило проследить эволюцию спектральных особенностей сверхновой. Для понимания физики процессов по линиям металлов, водорода и гелия были построены кривые изменения лучевых скоростей различных частей оболочки, разлетающейся в результате взрыва звезды. В максимуме блеска лучевые скорости достигали 24000 км/с. По сравнению с характерными представителями сверхновых типа Ib этот объект показал более высокие

скорости расширения фотосферы, характерные для сверхновых, связанных с гамма-всплесками.

Интересные результаты были получены при исследовании GRB 140801A в сотрудничестве с проектом МАСТЕР (ГАИШ МГУ). Наблюдения объекта на БТА начались спустя 2 часа после детектирования гамма-всплеска космической обсерваторией Fermi. Обнаружение абсорбционных линий ионизованных металлов в одном из самых ранних спектров этого объекта подтвердило его красное смещение $z = 1.32$. Поведение оптического источника отслеживалось в течение нескольких ночей. Это позволило обнаружить изменение показателя степенного закона падения блеска, что объясняется доминированием прямой ударной волны на ранних стадиях и обратной волны на более поздних.

ИССЛЕДОВАНИЯ МЕСТНОЙ ВСЕЛЕННОЙ ведутся в лаборатории внегалактической астрофизики и космологии под научным руководством И.Д. Караченцева по наблюдениям на БТА, космическом телескопе им. Хаббла HST (Hubble Space Telescope), южно-африканском 10-м телескопе SALT (South Africa Large Telescope), включая и индийский радиотелескоп GMRT (Gaint Metrewave Radio Telescope).

В 2006 г. сотрудниками ЛВАК совместно с астрономами Киевского университета обнаружено коллективное движение галактик в объеме радиусом 100 Мпк со средней скоростью 225 км/с в направлении, в пределах ошибок совпадающем с положением центра масс богатых рентгеновских скоплений галактик. Построенная карта распределения пекулярных скоростей галактик в системе координат, связанной с СМВ, показывает, что распределение темной материи в Местной Вселенной практически повторяет видимое распределение галактик на небе.

В 2011 г. анализ пекулярных скоростей близких галактик показал, что галактики с большими отрицательными пекулярными скоростями распределены на небе крайне неравномерно. Половина таких быстролетающих объектов сосредоточена в малой области неба, называемой «Облаком Coma I». Они «падают» на Облако со скоростью 700 км/с, что может быть вызвано наличием в области Coma I на расстоянии 15 Мпк от нас «темного аттрактора» с массой $\sim 4 \times 10^{14} M_{\odot}$. «Темный аттрактор» может оказаться новым типом астрономических объектов.

Оценки плотности барионного вещества и темной материи, проведенные И.Д. Караченцевым и Д.И. Макаровым в 2011–2012 гг. и совпавшие с оценками других авторов, говорят о трехкратном дефиците плотности вещества в объеме Вселенной вплоть до 100 Мпк по сравнению с критической плотностью, определяемой глобальными космологическими параметрами.

Совместно с астрономами США и ЮАР в 2014 г. обнаружены две изолированные карликовые галактики в окрестности Местной группы. Они обладают очень низким темпом звездообразования и удалены от ближайших соседей подобного класса почти на 1 Мпк, что весьма необычно для карликовых галактик. Ранее было известно всего два таких объекта. Существование изолированных карликовых сфероидальных галактик накладывает сильные ограничения на сценарии формирования карликовых систем.

При анализе полной выборки из 750 галактик Местного объема, завершеном в 2015 г., обнаружен почти пятикратный дефицит массивных карликовых галактик по сравнению с предсказаниями стандартной космологической модели Λ -CDM (Lambda-Cold Dark Matter), в которой во Вселенной доминируют холодная темная

материя и темная энергия, описываемая в уравнениях Эйнштейна космологической постоянной Λ . Функция распределения круговых скоростей для карликовых галактик с вириальными массами $M_{\text{vir}} \geq 5 \times 10^{10} M_{\odot}$ хорошо описывается моделью, но при этом количество карликовых галактик с массами $M_{\text{vir}} \approx 10^{10} M_{\odot}$ завышено в 5 раз. Чтобы оказаться потерянными, такие галактики должны быть экстремально низкой поверхностной яркости, без звездообразования и нейтрального водорода. Поиски недостающих галактик в глубоких обзорах оптического и радио диапазонов позволили открыть лишь несколько таких объектов.

Группа изучения внегалактических систем (рук. Н.А. Тихонов) исследует звездное население близких галактик по архивным данным HST. Для пекулярной галактики NGC 1313, у которой нет близких соседей, искажение ее формы ранее объяснялось взаимодействием с невидимой материей. По прямым снимкам (HST) у NGC 1313 были выделены звезды разного возраста. Красные сверхгиганты и гиганты разделены на группы с большим и меньшим показателем цвета, что объясняется различием в металличности этих звезд. Оказалось, группы обладают различным пространственным распределением и, следовательно, принадлежат разным галактикам – самой NGC 1313 и почти разрушенному при взаимодействии галактик спутнику. Этим и объясняется деформация видимых форм NGC 1313.

Для галактик в скоплении Дева сотрудниками ГИВС на прямых снимках HST выделены красные гиганты. Это позволило уточнить расстояния для 8 членов скопления, которые оказались в диапазоне от 14 до 18 Мпк. В исследуемых полях определены градиенты падения звездной плотности и пространственные размеры толстых дисков и гало галактик. Звездная периферия этих галактик занимает всю область исследуемых полей, а так называемые «межгалактические» звезды являются лишь периферийными объектами.

С.А. Пустильник с коллегами продолжает исследования бедных металлами карликовых галактик, которые были начаты более 30 лет назад В.А. Липовецким. По наблюдениям 2008–2009 гг. (BTA, SALT) установлено, что возраст старого звездного населения в самых малометаллических галактиках DDO 68 и SDSS J0926+3343, находящихся в пустоте в направлении созвездий Рыси и Рака, не превышает 3 млрд лет. В 2012 г. по радионаблюдениям в линии HI 21 см (GMRT, Индия) в центральной части этой пустоты был обнаружен необычный триплет карликовых галактик низкой поверхностной яркости с экстремально высоким отношением массы нейтрального водорода к светимости. Оцениваемая масса видимых звезд в них составляет всего лишь доли процента. Эти факты указывают на то, что в одной из самых близких к нам пустот формирование и эволюция галактик, вероятно, происходит с большой задержкой.

АКТИВНЫЕ ЯДРА ГАЛАКТИК: ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕМЕННОСТИ, ОЦЕНКА МАСС ЦЕНТРАЛЬНЫХ ЧЕРНЫХ ДЫР. Сейчас принято считать, что в центре активной галактики находится так называемая «центральная машина», которая включает сверхмассивную черную дыру (СМЧД), подпитываемую веществом из околоядерной области – аккреционного диска. Группой исследователей под руководством А.И. Шаповаловой совместно с коллегами из Белградской обсерватории (Сербия) получены результаты, проясняющие некоторые аспекты этой модели. В 2006–2009 гг. были проведены исследования спектральной и фотометрической переменности ряда активных ядер галактик (АЯГ). Для ядра сейфертовской галактики NGC 4151

установлено, что среднее запаздывание изменений потока в линии водорода H_{β} относительно континуума составляет около 20 дней, а переменность, наблюдаемая в широких водородных линиях, присутствует еще и в электронной температуре исследуемых областей. Таким образом, метод реверберации, применяемый для определения размеров области формирования широких эмиссионных линий и оценки массы центральной черной дыры, для NGC 4151 неприменим.

В 2013 г. по измерениям линейной поляризации в спектре сейфертовской галактики Mkn 6 впервые установлено, что по зависимости угла плоскости поляризации от скорости в контурах широких водородных линий можно определить тип движения вещества. Для ядерной области Mkn 6 движение вещества оказалось кеплеровским на расстояниях менее 0.02 парсека от центра, тем самым нижний предел массы СМЧД в ядре составил $1.5 \times 10^8 M_{\odot}$. Проверка метода численным моделированием показала, что такой способ дает правильные оценки динамических масс, которые не зависят от угла наклона галактики к лучу зрения.

По данным многолетних наблюдений 3С 390.3 В.Л. Афанасьевым, А.И. Шаповаловой и Н.В. Борисовым установлено согласие в переменности наблюдаемых профилей широкой эмиссионной линии H_{β} и модельных профилей в случае использования модели с ярким пятном на возмущенной области в аккреционном диске. В 2014 г. для галактики получены оценки поляризации излучения и определено смещение широкой компоненты спектральной линии в поляризованном свете относительно системной скорости. Наблюдаемая деполяризация излучения в линии H_{β} объясняется теплым газом,двигающимся по оси диска в направлении наблюдателя со скоростью 1200 км/с.

СТРУКТУРЫ В ГАЛАКТИКАХ. А.В. Моисеев (ЛСФВО) успешно развивает направление, связанное с исследованиями различных структур во внешних галактиках, которые выделяются как по своим физическим свойствам (остатки сверхновых, сверхпузыри, области звездообразования), так и по кинематике и химическому составу (центральные и полярные диски и кольца, газовые и звездные подсистемы с противовращением и т.п.). Сюда же относятся совместные работы с коллегами из ГАИШ МГУ Т.А. Лозинской – исследование структур в близких карликовых и иррегулярных галактиках и О.К. Сильченко – исследование противовращения звезд и газа в спиральных и линзовидных галактиках, включая и разгадку природы уникального объекта Хоуга (Hoag's object).

По анализу дисперсий лучевых скоростей ионизованного газа в большой выборке близких карликовых галактик А.В. Моисеевым с соавторами установлено глобальное соотношение между текущим темпом звездообразования SFR (Star Formation Rate) и средневзвешенной по яркости дисперсией скоростей σ как $SFR \sim \sigma^{5.3 \pm 0.2}$. Оно выполняется в широком диапазоне SFR и верно как для дисков, форма которых поддерживается вращением, так и для отдельных гигантских областей III. Это говорит о том, что дисперсия скоростей газа не отражает вириальные движения, а определяется энергией, «впрыскиваемой» в межзвездную среду в процессе звездообразования.

ИССЛЕДОВАНИЯ ГРАВИТАЦИОННЫХ ЛИНЗ. В 2007 г. в рамках российско-английской программы А.В. Моисеевым с коллегами была обнаружена гравитационная линза «Космическая подкова», которая состоит из гигантской эллиптической галактики с красным смещением $z = 0.44$ и линзированного

изображения галактики с мощным звездообразованием, находящейся на $z = 2.38$. Хотя сейчас известно более сотни аналогичных систем, обнаруженный объект обладает рядом уникальных характеристик: диаметр линзированного изображения («кольца Эйнштейна») составляет $10''$, а за счет эффекта линзирования яркость более далекой галактики увеличена более чем в 35 раз.

БЛАЗАРЫ – мощные радиисточники, отождествляемые в оптическом диапазоне с объектами без выраженных особенностей в спектре. Их относят к экстремальным проявлениям АЯГ с сильной переменностью излучения от радио до гамма-диапазона. На РАТАН-600 в течение ряда лет проводится мониторинг (рук. М.Г. Мингалиев) выборки из 800 радиисточников, включающей блазары и источники-кандидаты в этот класс объектов. Составлен каталог блазаров, в который вошли более 450 источников. Для его поддержки реализована информационная система, которая кроме поиска объектов по заданным критериям реализует следующие функции: построение радиоспектров и кривые блеска, вычисление спектральных индексов и параметров переменности источников.

При сравнении данных РАТАН-600 и каталога Fermi (1FGL) для выборки из 123 блазаров обнаружена значимая связь между плотностью потока на частотах 2.3–4.8 ГГц и гамма-излучением в диапазоне 0.1–1 ГэВ для подкласса блазаров – лацертид, а для всей выборки установлена высокая корреляция светимостей в этих диапазонах. Тем самым подтверждается общность механизмов излучения блазаров в радио и гамма-диапазонах. Привлечение данных Цейсс-1000 по переменности блеска позволили классифицировать блазары по положению максимума синхротронной компоненты спектрального распределения энергии.

Сотрудниками ЛОН совместно с коллегами из группы академика Н.С. Кардашева (АКЦ ФИАН) и КраО ведется мониторинг выборки АЯГ типа VL Lac. Синхронные наблюдения этих объектов проводились О.И. Спиридоновой на Цейсс-1000 и А.Е. Вольвачем на 22-м радиотелескопе КраО. Данные 15-летних наблюдений указывают на наличие переменности у объектов на интервалах от нескольких дней, недель и до года. На масштабах порядка года амплитуда изменения блеска блазара может достигать нескольких звездных величин (в частности, для объекта АО 0235+164 – до 4^m). Как правило, вспышка в оптическом диапазоне совпадает с нарастанием потока в радио и гамма-диапазоне. Внутрисуточная переменность у объектов выборки носит слабовыраженный характер.

РАННЯЯ ВСЕЛЕННАЯ. Исследования микроволнового космического фона ведутся под научным руководством Ю.Н. Парийского. Первые наблюдения по поиску флуктуаций СМВ (Cosmic Microwave Background) от первичных галактик на $z = 1000$ были проведены на Большом пулковском радиотелескопе еще в 1968 г. Предсказываемые флуктуации не были обнаружены. Это направление научных исследований продолжает оставаться одним из основных на РАТАН-600, где они ведутся в рамках проекта «Генетический код Вселенной».

При анализе данных многомесячных радионаблюдений уточнен вклад синхротронного и теплового излучений Галактики, а также определен диапазон частот, который лучше всего подходит для предельно глубоких исследований СМВ. Получена статистически значимая информация о спектральных свойствах слабых

радиоисточников в сантиметровом диапазоне, что позволило оценить их влияние на эксперименты по изучению СМВ.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДАЛЕКИХ РАДИОИСТОЧНИКОВ. В 1980–1999 гг. ключевым проектом по исследованию реликтового микроволнового фона являлся эксперимент «Холод», в ходе которого выполнялись глубокие обзоры на частоте 3.9 ГГц 24-часовой полосы неба на высоте антенны вблизи склонения $\delta \approx 5^\circ$. По данным эксперимента получен каталог радиоисточников (RC-каталог). Не имеющий аналога объект ранней Вселенной ($z = 4.514$) RC J0311+0507 обнаружен при выполнении международной программы «Большое Трио» (РАТАН-600, VLA, БТА) по изучению выборки источников с крутыми и ультракрутыми спектрами каталога RC. В 2009–2011 гг. эта радиогалактика была детально исследована методами радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой. Ее уникальность состоит в предельно высокой светимости в радиодиапазоне, что говорит о наличии в центре родительской галактики СМЧД с массой $\approx 10^{10} M_\odot$, близкой к предельной в наблюдаемой части Вселенной. Оценка возраста звездного населения родительской галактики, полученная О.П. Желенковой и А.И. Копыловым по многоцветной фотометрии (БТА) и данным ИК-диапазона (3.8-м телескоп UKIRT, Великобритания), в ~ 0.8 млрд лет приводит к моменту ее образования при возрасте Вселенной около 0.5 млрд лет.

ПОИСК СКОПЛЕНИЙ ПО ДАННЫМ МИССИИ PLANCK. Следует отметить цикл работ по данным космических миссий WMAP и Planck О.В. Верховданова с коллегами, посвященный свойствам реликтового излучения. В частности, предложен новый метод селекции кандидатов в объекты с эффектом Сюняева-Зельдовича по данным радиообзоров и картам СМВ, который основан на анализе спектра радиоисточника и распределение сигнала СМВ в его окрестности. Так как радиоисточник, чья родительская галактика чаще всего является гигантской эллиптической галактикой, образовавшейся вследствие слияний близких звездных систем, что указывает на окружение повышенной плотности, т.е. на возможное скопление галактик. При разделении компонент сигнала в области скопления галактик на карте СМВ образуется локальный минимум. Здесь для исключения путаницы с локальными минимумами СМВ в такой области предложено удалять первые двадцать гармоник карты и оставшуюся часть использовать для селекции кандидатов.

Научно-технические разработки

АППАРАТУРА ДЛЯ ФОТОМЕТРИИ И СПЕКТРОСКОПИИ НИЗКОГО РАЗРЕШЕНИЯ.

Основным инструментом БТА при исследованиях слабых объектов методами фотометрии и спектроскопии низкого и умеренного разрешения является универсальный редуктор светосилы первичного фокуса SCORPIO (рис. 18, слева), находящийся в эксплуатации с 2000 г. Среди недостатков инструмента отмечались: значительные абберрации оптики на краю поля зрения, высокий уровень бликов и рассеянного света, недостаточное число сменных фильтров и решеток, потери времени на переключение режимов наблюдений. Устранение этих недостатков, необходимость повышения эффективности панорамной спектроскопии, внедрение новой системы регистрации на крупноформатной ПЗС-матрице (2048×4608) послужили стимулом для создания в 2009–2010 гг. прибора нового поколения – SCORPIO-2. Руководитель

проекта – гл.н.с. В.Л. Афанасьев, исполнители – В.Р. Амирханян, А.В. Моисеев и Н.А. Фоменко.



Рис. 20. Многорежимный фокальный редуктор первичного фокуса SCORPIO (слева) и универсальный спектрограф в первичном фокусе SCORPIO-2 (справа).

В настоящее время SCORPIO-2 (рис. 20, справа) используется в наблюдениях в ограниченном режиме из-за продолжающихся работ по его развитию. В приборе реализованы следующие моды:

- широкополосная и узкополосная фотометрия в поле зрения $6' \times 6'$;
- спектроскопия с длинной щелью (длина $6'$) в диапазоне $0.36\text{--}0.95\ \mu\text{м}$ со спектральным разрешением $R = 500\text{--}5000$;
- поляриметрия в широких фильтрах в поле зрения $3' \times 2'$;
- измерения методом Фесенкова линейной поляризации протяженных объектов в поле диаметром $6'$;
- спектрополяриметрия с длинной щелью (длина $2'$) в диапазоне $0.36\text{--}0.9\ \mu\text{м}$ со спектральным разрешением $R = 500\text{--}5000$;
- 3D-спектроскопия с ИФП в поле диаметром $6'$ со спектральным разрешением $R = 2500\text{--}12500$ в диапазоне $0.48\text{--}0.7\ \mu\text{м}$;
- 3D-спектроскопия с мультизрачковым блоком из 22×22 линз с полем зрения $16.5'' \times 16.5''$ (в стадии разработки);
- многощелевая спектроскопия с перемещаемыми щелями в поле зрения $4' \times 6'$, в диапазоне $0.36\text{--}0.95\ \mu\text{м}$ с $R = 400\text{--}3000$ (в стадии разработки).

Возможности исследований протяженных объектов со сканирующим интерферометром Фабри-Перо были существенно расширены за счет приобретения в 2009–2015 гг. комплекта интерферометров, работающих как в низких порядках и имеющих больший диапазон изменения лучевых скоростей, так и высокопорядковых, обеспечивающих максимальное спектральное разрешение.

СПЕКТРОСКОПИЯ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ. Наблюдательной основой звездной астрофизики являются исследования, проводимые на спектрометрах высокого спектрального разрешения. Они выполняются на БТА на эшелле-спектрографе НЭС (рис. 21), который был разработан в лаборатории астроспектроскопии под руководством гл.н.с. В.Е. Панчука почти 20 лет назад. Сначала НЭС был оснащен несъемным приемником (Дания) на базе ПЗС-матрицы форматом 2048×2048 элементов, предоставленным во временное пользование Н.Е. Пискуновым (Швеция). Последние годы светоприемниками для НЭС служат системы форматом 2048×2048 и 2048×4609 элементов, изготовленные в ЛПР. Прибор пока не обеспечен постоянно установленной ПЗС-камерой. Несколько раз в полугодие светоприемную систему перемещают между НЭС и ОЗСП.

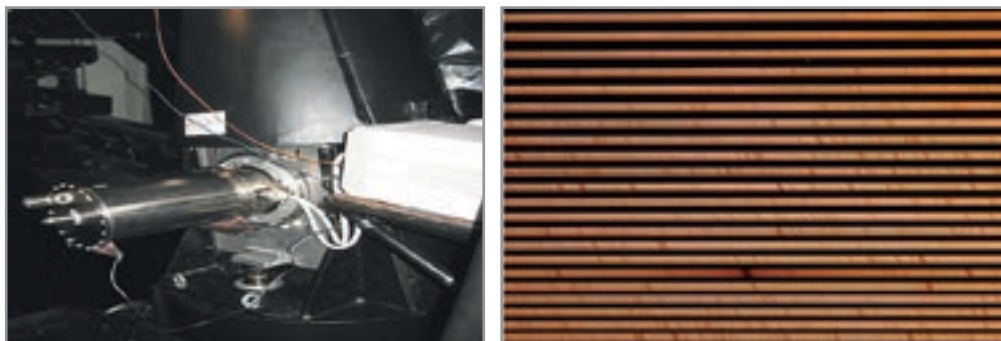


Рис. 21. Эшелле-спектрометр высокого разрешения НЭС с ПЗС-системой в фокусе Нэсмит-2 (слева), пример эшелле-спектра (справа).

В.Е. Панчуком и И.Д. Найденовым внедрен в режим наблюдений анализатор линейной и круговой поляризации в фокусе Нэсмит-2 и оптический резатель изображения (2006 г.). В результате испытаний устройства на телескопе получен выигрыш в проникающей способности в 6 раз, а предельное угловое разрешение метода составило $\sim 0.5''$. В 2007 г. благодаря применению абсорбционной ячейки точность измерения доплеровских смещений на звездных спектрографах БТА увеличена более чем на порядок ($\Delta V_r = 20\text{--}30$ м/с).

Изготовление в 2008 г. измерителя параметров Стокса с большим разведением пучков сделало возможным исследование на НЭС магнитных полей звезд. Годом позже была завершена адаптация спектрометра НЭС к наблюдениям в наземном ультрафиолете (300–400 нм). Опыт использования ПЗС-камер формата 2048×4608, обладающих высокой чувствительностью и отсутствием косметических дефектов в ближнем ИК-диапазоне, позволяет рассчитывать на работу спектрографа и в этом диапазоне при условии внедрения нового узла кросс-дисперсии. Перспективным проектом является разработка интерференционно-дифракционного спектрографа на основе интерферометра Фабри-Перо с открытым входом, проводимая В.Е. Панчуком совместно со специалистами из ГАО РАН.

Оптическая схема спектрометра «белый зрачок» обеспечивает экономичное использование света и позволяет снизить диаметр объектива камеры. В 2009–2011 гг. В.Е. Панчук, М.В. Юшкин с коллегами из лаборатории ОН (М.В. и Г.В. Якоповы, Э.В. Емельянов) изготовили оптоволоконные спектрографы с коллимированным пучком диаметром 100 мм для телескопов с зеркалами класса 1–2 м. Спектрометр, созданный ими для 1.2-м телескопа Коуровской обсерватории (УрГУ), одновременно регистрирует 60 спектральных порядков со спектральным разрешением $R = 30000$ в диапазоне 400–780 нм. При его испытаниях на телескопе Цейсс-1000 за время экспозиции 1 час на нем было достигнуто отношение сигнал/шум 10 для звезд $m_v = 12.5$.

СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ – метод наблюдений, развиваемый лабораторией (теперь группой) методов астрономии высокого разрешения, получил принципиально новую инструментальную базу – систему регистрации на базе ПЗС-матриц с электронным усилением сигнала в выходном регистре. Это позволило в 2009 г. ввести в строй новый спекл-интерферометр и отказаться от трудоемкого способа наблюдений с ЭОПом и ТВ-камерой в качестве светоприемника. Этот прибор, использующий детектор 512×512 элементов (PhotonMAX-512), позволяет наблюдать на 6-м телескопе БТА звездобразные объекты до 15^m при качестве изображений около $1''$. При этом выбор исследуемого участка в полосе 450–900 нм осуществляется фильтром шириной до 10 нм. Динамический диапазон системы превышает 5^m при скорости регистрации изображений до 15 кадров в секунду. Переход на улучшенную систему регистрации Andor iXonEM+897 еще позволил повысить скорость обработки кадров и снизить шумовые параметры системы в целом.

Одним из интересных примеров использования такой аппаратуры стали спекл-интерферометрические наблюдения 29–30 октября 2015 г. покрытия Луной Альдебарана (α Tau) для измерения углового диаметра этого гиганта спектрального класса КIII. Впервые для решения такой задачи использовалась ПЗС-камера с электронным умножением сигнала.

Определенные надежды связаны со спекл-интерферометрией в ИК-диапазоне в фотометрических полосах J и H. Проведенные на БТА исследования показали принципиальную возможность такой работы, но ее внедрение в штатный режим сдерживается высокими шумами имеющейся системы регистрации.

ПОИСК И ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНЗИЕНТОВ на временах до микросекунд ведутся в группе релятивисткой астрофизики (рук. Г.М. Бескин, С.В. Карпов, В.Л. Плохотниченко). Прогресс в развитии координатно-чувствительных детекторов стимулировал разработку и создание в 2006–2009 гг. многоканального панорамного спектрофотополариметра, где в качестве светоприемников используются два КЧД с временным разрешением 1 мкс. Квантовый выход этих детекторов, созданных в ИФП СО РАН (Новосибирск), составляет 25–38% для диапазона 4000–8000 Å, при этом обеспечивается пространственное разрешение на уровне 20–30 мкм. Такой детектор близок по чувствительности и пространственному разрешению к ПЗС-камерам, но на 3–4 порядка превосходит их по временному разрешению. В приборе реализовано несколько режимов наблюдений – фотометрия, фотополариметрия, спектроскопия и спектрополариметрия низкого разрешения. В 2014 г. прибор был модернизирован, что позволило использовать КЧД с мультищелочным и GaAs катодами.

В 2006 г. в рамках международного проекта с участием САО РАН, НИИ прецизионного приборостроения (г. Москва) и Болонского университета (Италия) создан двухтелескопный комплекс для обнаружения с высоким временным разрешением вспыхивающих оптических объектов. Он состоит из быстрой широкопольной оптической камеры TORTORA с зеркальным 12-см объективом, ЭОПом и ТВ-камерой Sony на ПЗС-детекторе, регистрирующей область неба $25^\circ \times 22^\circ$ с минимальной экспозицией 0.13 с и пределом $10.^m5$ (В), и 60-см роботического телескопа REM (Ла Силла, Чили). Комплекс позволяет обнаруживать и исследовать быстрые оптические транзиенты по координатам, полученным с телескопов рентгеновского и гамма-диапазонов, а также по результатам собственного мониторинга.

Используя опыт эксплуатации этого комплекса, сотрудники ГРА вместе с коллегами из КФУ и ООО «Параллакс» в 2014 г. разработали систему ММТ. Система предназначена для обнаружения и исследования быстропотекающих явлений в ближнем и дальнем космосе. ММТ представляет собой роботический многоканальный оптический телескоп с полем зрения 900 кв. градусов и временным разрешением 0.1 с, в который включена система обработки и хранения данных. Он аккумулирует информацию обо всех стационарных и транзиентных (во времени и пространстве) источниках оптического излучения с блеском до 17^m на небесной полусфере. При этом каждое поле размером 900 кв. градусов наблюдается один раз в ночь с 15-минутной экспозицией. В случае обнаружения представляющего интерес события все 9 объективов системы за доли секунды переориентируются на область его локализации для проведения фотометрических и поляризационных исследований. ММТ не имеет аналогов в мире по сочетанию характеристик - поля зрения, временного разрешения и проницающей способности (около 12^m за 0.1 с).

РАЗРАБОТКА ПЗС-СИСТЕМ РЕГИСТРАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ АСТРОНОМИИ ведется в лаборатории перспективных разработок (рук. С.В. Маркелов). Системы предназначены для регистрации слабых объектов, потоки от которых зачастую определяются единицами фотонов на элемент изображения. В приборах с зарядовой связью, использующих сверхчистый кремний, уже на рубеже веков была достигнута практически 100% эффективность регистрации. Подавляющая доля ПЗС-чипов для астрономии производится компанией E2V Technologies (Великобритания). Параметры этих устройств приближены к идеальным по чувствительности во всем оптическом диапазоне, по однородности и косметическим свойствам. Усилия разработчиков ПЗС-систем направлены на достижение предельно низкого шума считывания, максимальной линейности передаточной функции и стабильности работы на больших временных интервалах, а также из-за ограниченных размеров ПЗС-чипов - на создание мозаичных систем.

Для телескопов обсерватории и других организаций в ЛПР были созданы приборы с лучшими в своем классе параметрами. В 2006 г. специально для спекл-интерферометрии изготовлена ПЗС-система с режимом счета фотонов. В ней используется матрица E2V CCD97 с внутренним усилением сигнала за счет ударной ионизации в специальном умножающем регистре переноса заряда. По сравнению с зарубежными аналогами в ней достигнута частота считывания 16 Мпикс/с при кадровой частоте 60 Гц. За счет реализации алгоритмов предсказания числа регистрируемых квантов света при попадании более, чем одного кванта в отдельный пиксел, в этой

системе существенно повышается отношение сигнал/шум при регистрации серий кадров с короткими экспозициями.

Изготовлено две системы (рис. 22, слева) на матрицах CCD42-90 E2V (2048×4608 элементов) разных модификаций, одна – с тонкой подложкой, антиотражающим покрытием и квантовой эффективностью 85% в синей части спектра, другая – с толстой высокорезистивной подложкой, глубоким обеднением, с квантовой эффективностью 95% в красной части спектра и отсутствием интерференционных полос в ближнем ИК-диапазоне. При шуме считывания $<3\epsilon$ - достигнута величина нелинейности световой характеристики $<0.05\%$, которая при считывании обеспечивается цифровой коррекцией нелинейности видеосигнала. В 2008–2009 гг. системы были установлены на звездных спектрографах и фокальном редукторе SCORPIO.

В 2008 г. изготовлены две ПЗС-камеры для звездного спектрографа LRS телескопа LAMOST (Китай) для синего и красного плеч спектрографа. Камеры имеют уникальную конструкцию с выносной камерной головкой для внутреннего фокуса камеры спектрографа, обеспечивающей минимальное перекрытие пучка. В них размещены матричные детекторы CCD203, специально разработанные E2V Technologies для проекта LAMOST.

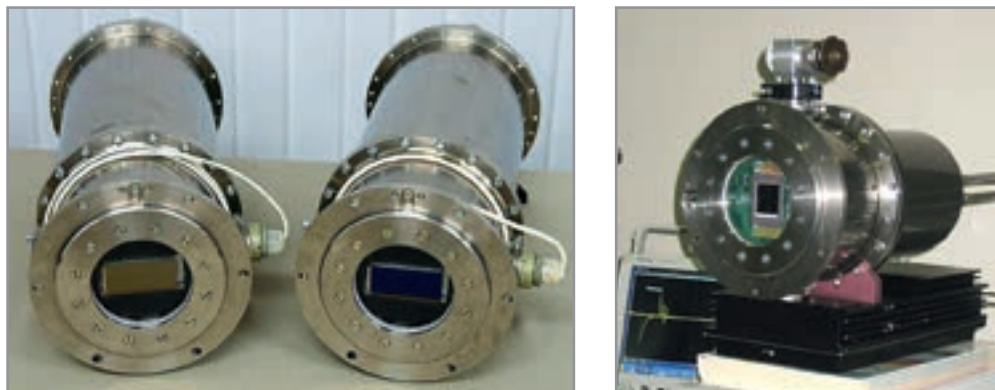


Рис. 22. В декабре 2007 г. завершена разработка двух ПЗС-систем с EEV-42-90 (2048×4608) (слева) с back-illuminated «синим» чипом и deep-depletion «красным» чипом. В 2014 г. создана система регистрации (справа) для оснащения спектрографов высокого разрешения на базе EEV CCD42-40 (2048×2048).

В ЛПР разработано целое семейство сверхмалошумящих светоприемных систем. Каждая система включает в себя ПЗС-камеру со встроенным охлаждаемым матричным светоприемником, модульный управляющий контроллер, подсистему ввода цифровых изображений и высокопроизводительный промышленный компьютер. К ним относятся мозаичные системы (до 8К×8К элементов), охлаждаемые криорефрижератором замкнутого цикла типа Cryotiger, и ПЗС-системы с монолитным приемником (до 4К×4К элементов), охлаждаемые жидким азотом или с помощью Cryotiger. Последние работают как в режиме накопления заряда, так и в режиме электронного усиления сигнала. Отличительной особенностью новых систем являются: цифровая оптимальная фильтрация видеосигнала в реальном времени, стабилизация и коррекция передаточной

характеристики «заряд-отсчет». Фильтрация позволяет снизить шум считывания на 50%, а стабилизация передаточной характеристики обеспечивает фотометрическую стабильность на уровне $<0.03\%$ в широком диапазоне климатических условий. Это в несколько раз лучше, чем в зарубежных образцах. Изготовление вакуумных камер для ПЗС-систем ведется в кооперации с Институтом прикладной физики РАН (г. Нижний Новгород).

В 2015 г. завершена разработка конструкторской документации модульного универсального контроллера пятого поколения, предназначенного для модернизируемых ПЗС-систем БТА и новых систем для широкоугольных телескопов. Благодаря гибкости и масштабируемости цифровых решений он сможет обслуживать монолитные и мозаичные системы практически любого формата при скорости оцифровки накопленного сигнала в десятки гигабит за секунду, а также обеспечить управление детекторами инфракрасного диапазона типа HAWAII.

РАДИОМЕТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ РАТАН-600 разрабатываются лабораторией радиометров континуума (рук. Н.А. Нижельский) и группой аппаратурно-методических разработок СПбФ (рук. А.Б. Берлин) под общим руководством ак. Ю.Н. Парийского и М.Г. Мингалиева.

В 2008 г. завершены работы по созданию 16-канальной матричной радиометрической системы МАРС-3 для диапазона 30 ГГц. Уже первые наблюдения на РАТАН-600 со вторичным зеркалом №5 показали, что использование такой системы в режиме прохождения радиоисточников через диаграмму направленности антенны позволяет в 4 раза повысить чувствительность радиотелескопа по сравнению с одноканальным радиометром и в 16 раз сократить время накопления сигнала от слабых источников. В феврале 2009 г. система МАРС-3 была перенесена в фокус вторичного зеркала №2, имеющего более точную отражающую поверхность. После отладки радиометров и системы сбора данных был начат обзор по программе «Генетический код Вселенной».

Из-за превышения ресурса микрокриогенных систем и их дороговизны было принято принципиальное решение о переводе радиометрического комплекса с радиометров криогенного типа на детекторы, работающие при обычных температурах. Наиболее подходящими для радиометров РАТАН-600 оказались неохлаждаемые транзисторные усилители на гетероструктурах, выпускаемые научно-производственной фирмой «Микран» (Томск). Они обеспечивают низкие шумовые параметры и высокую надежность работы приемных комплексов без применения дорогостоящих микрокриогенных систем водородного уровня охлаждения.

На облучателе № 2 в 2011–2012 г. завершена реконструкция и началась опытная эксплуатация трехчастотного приемного комплекса «Эридан» с рабочими частотами 4.8, 11, 22 ГГц и чувствительностью 5–7 мК. С помощью комплекса можно проводить контрастные наблюдения в максимуме излучения атмосферы в линиях водяного пара.

В 2014 г. реализован новый режим работы радиометров – режим полной мощности, что ранее не было возможно из-за несовершенства элементной базы. Впервые на практике реализована чувствительность идеального радиометра полной мощности на типовых для РАТАН-600 масштабах времени (~10 с). Режим полной мощности внедрен в работу комплекса высокочувствительных радиометров континуума. Был завершен перевод всех семи криогенных радиометров на «теплые»

входные МШУ в режиме однолучевого приема. Основной вклад в работу принадлежит П.Г. Цыбулеву, который в 2015 г. защитил кандидатскую диссертацию по этой теме.

Благодаря разработкам по борьбе с радиопомехами возобновлены регулярные наблюдения на волне 13 см. Принимаемая полоса частот составляет 2.215–2.295 ГГц, шумовая температура системы ~200 К, реализуемая чувствительность на средних высотах составляет 15 К при 1 с.

В 2016 г. силами сотрудников СПбФ (В.М. Богод, А.А. Стороженко и др.) на облучателе №3 введен в опытную эксплуатацию новый спектрально-поляризационный комплекс для наблюдений Солнца, перекрывающий частотный диапазон 3–18 ГГц. Сюда входят 10 широких каналов шириной по 1500 МГц 80 узких каналов шириной по 100 МГц. В системе увеличен динамический диапазон измерений до 10^6 , в 3 раза улучшена чувствительности при наблюдениях опорных источников, повышена стабильность и надежность работы. Автоматизирован процесс наблюдений и передача данных.



Рис. 23. Телескоп Цейсс-1000 с 1-м зеркалом.

АВТОМАТИЗАЦИЯ МАЛЫХ ТЕЛЕСКОПОВ. В 2013 г. сотрудники лаборатории обеспечения наблюдений и отдела информатики (С.В. Драбек, В.С. Шергин и др.) завершили работы над новой системой управления телескопом Цейсс-1000 (рис. 23). Без остановки инструмента заменены силовые приводы и датчики положения на осях телескопа, реконструирована система энергоснабжения. Все электрические приводы главных осей телескопа и купола башни управляются через электронные блоки частотных преобразователей программно-сервером. Помимо этого, она управляет всеми операциями на телескопе, включая контроль времени, электропитания, освещения, метеорологических условий и др. Достигнута полная унификация в аппаратной части с системой управления БТА. В несколько раз повысилась точность наведения и слежения телескопа. В 2014 г. начались удаленные наблюдения на Цейсс-1000.

В 2015 г. С.Н. Додоновым, В.Л. Афанасьевым, В.Р. Амирханяном совместно с коллегами из Бюраканской астрофизической обсерватории (Армения) выполнена модернизация 1-м телескопа БАО, обладающего большим полем зрения $6^\circ \times 6^\circ$. Он входит в пятерку крупнейших телескопов мира системы Шмидта по размеру зеркала и в тройку – по размеру объективной призмы. На телескопе установлен фотометр с крупноформатным ПЗС-приемником Aropgee ALTA-16M (4K×4K элементов) и жидкостным охлаждением. Детектор имеет шум считывания $11e^-$ и поле зрения $1^\circ \times 1^\circ$. Фотометр оснащен набором из 21 среднеполосного фильтра, 5 широкополосных и 3 узкополосных. Модернизация АСУ телескопа обеспечила удаленный режим наблюдений. Система управляет детектором, сменой фильтров, куполом башни, фокусировкой телескопа, гидированием и др. На телескопе уже получены первые научные данные по программе глубокого фотометрического обзора.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И БАЗЫ ДАННЫХ. Информационные и телекоммуникационные технологии, цифровые ресурсы являются важной составляющей в работе современной обсерватории, включая как наблюдения, так и обработку и анализ данных. Научно-технические разработки этого направления ведутся в ряде подразделений обсерватории.

В лаборатории информатики разработаны и внедрены информационные системы поддержки наблюдательного цикла. К ним относятся АСУ телескопов БТА и Цейсс-1000, открытая в Интернет система ТВ-мониторинга оптических телескопов обсерватории для отслеживания состояния основных систем телескопа и астроклиматических условий. Постоянно развивается приложение «БТА-online», где реализован веб-интерфейс оперативного управления БТА, позволяющий корректировать положение, управлять поворотным столом и фокусировкой телескопа. Для обеспечения заявочных кампаний на телескопах обсерватории и работы КТБТ/НКРТПТ внедрены и постоянно развиваются веб-приложения подачи заявки на наблюдения, составления расписаний и электронный журнал наблюдений. Архивная система обсерватории включает 16 цифровых коллекций наблюдений, полученных на инструментах обсерватории. Свободный доступ к данным реализуется посредством веб-интерфейса ИПС OASIS. Для сопровождения процесса подачи статей в журнал «Астрофизический бюллетень» разработана и внедрена информационная система с веб-интерфейсом.

В радиоастрономическом секторе разработаны и поддерживаются несколько информационных ресурсов. Создан центр анализа наблюдений Солнца PROGNOZ (<http://www.spbf.sao.ru/prognoz/>), которым выполняется автоматический сбор и обработка наблюдательных данных спектрографа на облучателе №3, а также радиогелиографов ССРТ (Россия) и Нобеяма (Япония), магнитографа MDI (SOHO). Реализовано отображение данных для анализа и сопоставления результатов многоволновых наблюдений, а также модельные расчеты физических параметров активных областей.

Система поддержки астрофизических каталогов CATS (С.А. Трушкин, О.В. Верхованов, В.Н. Черненко) разработана для оперативного доступа к информации, необходимой при наблюдениях на радиотелескопе РАТАН-600, а также для интерпретации результатов наблюдений. CATS является одной из самых востребованных баз данных среди радиоастрономов в мире.

Архив радиоастрономических данных ODA-R (Observational Data Archive – Radioastronomical) содержит цифровые наблюдения, начиная с 1989 г. (разработка В.К. Кононова). Сначала архив поддерживал наблюдательные данные, полученные радиометрами континуума облучателя N1. В соответствии с концепцией построения интегрированной информационно-системы радиотелескопа база была горизонтально фрагментирована по разделам, каждый из которых относился к отдельному типу наблюдательных радиоданных.

Разработана и введена в штатную эксплуатацию автоматизированная система оценки параметров радиоисточников, наблюдаемых на радиометрах континуума РАТАН-600 (общее число радиометров – 30). Система еще используется для мониторинга изменения эффективной площади антенны и ширины главного лепестка диаграммы направленности, а также качества работы приемных систем радиотелескопа.

В оптическом секторе следует отметить в лаборатории ЛСФВО систему ASPID для архивизации данных, полученных на БТА с помощью приборов IFP, UAGS, MPFS, MOFS и SCORPIO. Здесь хранится одна из крупнейших в мире коллекций 3D-спектроскопических наблюдений галактических и внегалактических источников. На основе этой коллекции разработан прототип архива разнородных «science-ready» данных ASPID-SR, базирующийся на модели данных IVOA.

В лаборатории ЛВАК поддерживается и сопровождается база данных галактик Местного Объема LVG (разработка Е.И. Кайсиной), которая включает расширенную и обновленную версию каталога соседних галактик (Karachentsev et al., 2004). В ней собраны разнообразные параметры галактик как полученные из наблюдений, так и вычисляемые. Доступ к LVG реализован с помощью веб-интерфейса, который обеспечивает выполнение разнообразных запросов и сервисных функций.

HyperLEDA – база данных для изучения физики галактик и космологии. Этот проект, разработка которого началась в 1983 г. в Лионе, в настоящее время поддерживается и сопровождается совместными усилиями Лионской обсерватории (Франция) и САО РАН (рук. Д.И. Макаров). В HyperLEDA собраны данные о внегалактических объектах, опубликованные в литературе. Они объединены в уникальную однородную коллекцию параметров, характеризующих астрономические объекты, что позволяет сравнивать параметры объектов независимо от расстояния до них.

Заключение

Подводя итог, отмечу, что, несмотря на все внешние и внутренние сложности, коллективу обсерватории удалось обеспечить бесперебойную работу телескопов. Потери наблюдательного времени в основном были связаны с погодными условиями, а доля поломок научного оборудования и аварийных ситуаций на телескопах не превышала 1–2%. Инструменты обсерватории остаются востребованными астрономами стран дальнего зарубежья. Около четверти всего времени телескопов выделяется по их заявкам.

Наблюдения на телескопах САО РАН проводятся в соответствии с решениями КТБТ/НКТРТ, бессменным председателем которого до 2016 г. являлся Ю.Н. Гнедин.

За 2006–2016 гг. нашими сотрудниками опубликованы почти 1300 научных работ в рецензируемых изданиях (рис. 6). За это же время ими было представлено более 1600

устных докладов и постеров на 150 российских и 330 международных конференциях и совещаниях (рис. 10, 12).

Успешно работал специализированный совет по защитах докторских и кандидатских диссертаций Д002.203.01. До 2012 г. его председателем был академик Ю.Н. Парийский, а потом его сменил Ю.Ю. Балега. С 2006 г. сотрудники обсерватории защитили 27 кандидатских и 4 докторских диссертации (Г.М. Бескин, Д.И. Макаров, А.В. Моисеев, С.А. Пустильник), и еще 20 диссертаций защитили сотрудники других астрономических учреждений России, из них – 4 докторские.

Доля сотрудников моложе 40 лет в обсерватории сейчас составляет около 30%. Это обеспечивается активной деятельностью нашей аспирантуры, совместной работой с ведущими вузами страны, включая базовые кафедры в Университете ИТМО, Казанском (Приволжском) и Северо-Кавказском федеральных университетах. Надежды возлагаем и на работу со старшеклассниками.



Рис. 24. Большой телескоп азимутальный БТА, идет наблюдения.

В заключение хочу вспомнить наших коллег, которые ушли из жизни за эти годы. Это – бывшие заместители директора по научной работе Л.И. Снежко и А.Ф. Фоменко, заведующий СПБФ Ю.К. Зверев, ведущие научные сотрудники – Н.С. Соболева, А.Б. Берлин, В.В. Леушин, И.Д. Найденов, с.н.с. В.К. Кононов и гл.н.с. ГАО РАН Г.Б. Гельфрейх, внесший большой вклад в исследования Солнца на РАТАН-600.

САО РАН вступает в свое шестое десятилетие как крупнейший астрономический наблюдательный центр России. Продолжается модернизация уникальных российских инструментов, что обеспечит проведение исследований на этих телескопах на мировом уровне. Коллектив, который обеспечивает бесперебойную работу комплексов, имеет все основания уверенно смотреть в будущее.



Телескопы и методы наблюдений

40 лет спектроскопии высокого разрешения на БТА

Панчук В.Е.,

главный научный сотрудник ЛАС, д.ф.-м.н., профессор; panchuk@ya.ru

Клочкова В.Г.,

заведующая ЛАС, д.ф.-м.н., профессор; valenta@sao.ru

В обзоре рассматриваются работы, связанные с эксплуатацией штатной и созданием новой аппаратуры высокого спектрального разрешения 6-м телескопа БТА. Отмечены успехи и недостатки, оцениваются перспективы этого направления.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие техники эксперимента не синхронизировано с круглыми датами, но обзоры приходится готовить вовремя (Клочкова и Панчук, 1997; Панчук и Клочкова, 2006). В данной публикации мы частично использовали эти малодоступные обзоры, дополнив работами, выполненными в 2006–2016 гг. Мы сочли необходимым напомнить здесь некоторые моменты развития спектроскопии звезд. Совпадение 40-летия наблюдений с высоким спектральным разрешением и 50-летия образования САО обязано следующим обстоятельствам. Во-первых, на момент пуска БТА в конце 1974 г. не было завершено ни одного штатного спектрального прибора. Во-вторых, половина 1975 г., намеченного как год совместной (ЛОМО и САО) опытной эксплуатации БТА, была потрачена на ремонт купола башни, и первым годом работы телескопа со спектрографами высокого разрешения оказался 1976 г.

РОЛЬ ПРЕДШЕСТВЕННИКОВ

По оценкам сегодня на Земле проживает столько людей, сколько уже отжило свой век за все предыдущие поколения. В спектроскопии звезд ситуация еще более разительна – сегодня количество публикующихся ученых в сотни раз превосходит количество авторов, уже прекративших свою деятельность. Это обстоятельство позволяет безошибочно оценить роль немногочисленных предшественников, но затрудняет прогноз развития данного направления.

Эмпирическая наука начинается с классификации. Первую классификацию звездных спектров А. Секки опубликовал 150 лет назад. Реалистичная интерпретация звездных спектров появилась только в 20 годы XX века путем объединения работ Максвелла, Планка, Росселанда, Эддингтона и Саха. Именно интересом к «новой физике» можно объяснить первый технологический бум, состоявшийся в спектроскопии звезд в первой трети XX века, когда вступили в строй спектрографы 1.5-м и 2.5-м телескопов обсерватории Маунт Вилсон и 1.9-м телескопа в Канаде. В 1934 г. спектрограф фокуса кудэ 2.5-м телескопа был уже оснащен дифракционными решетками с профилированным штрихом и светосильными катадиоптрическими камерами (Данэм, 1956). К 1935 г. по результатам спектроскопии звезд в *Astrophysical Journal* публиковалось 50% от общего числа статей.

Послевоенное развитие физики звездных атмосфер обязано стечению ряда обстоятельств.

Во-первых, был радикально пересмотрен вопрос о формировании непрерывных спектров Солнца и звезд. Следует упомянуть как новые наблюдения в наземном УФ-диапазоне, так и вывод о роли поглощения на отрицательных ионах водорода.

Во-вторых, в дополнение к спектрографу фокуса кудэ 2.5-м телескопа начал работу универсальный спектрограф фокуса кудэ 5-м рефлектора Паломарской обсерватории. На этих инструментах выполнялся основной объем наблюдений звездных спектров с высоким спектральным разрешением.

В-третьих, развитие атомной физики привело к составлению обширных списков спектральных линий практически всех атомов и ионов. Потребность в надежных значениях сил осцилляторов и других атомных констант была столь высока, что некоторые обсерватории занялись самообеспечением, организовав лаборатории экспериментальной астрофизики.

В-четвертых, после выявления роли поглощения на отрицательных ионах водорода довоенный метод кривых роста стал давать реалистичные параметры и оказался достаточным для выявления основных количественных закономерностей физики атмосфер и обнаружения аномалий химического состава (звезды двух типов населений, химически-пекулярные звезды и т.д.).

Наряду с методами космохимии спектроскопия звезд начала поставлять информацию о синтезе ядер и эволюции химического состава Галактики. Уже в конце 50-х сформировалось мнение, что исследование плазмы в астрофизических условиях существенно дополняет усилия, предпринимаемые по развитию наземных аналитических и диагностических методов оптической спектроскопии. Достаточно продолжительное время отдавали приоритет эмпирической шкале сил осцилляторов, построенной по спектрам звезд с использованием первых моделей атмосфер. В качестве одного из аргументов по строительству новых телескопов обязательно отмечалась необходимость распространения спектроскопии высокого разрешения на более слабые объекты. Внедрение в астрономическую практику первых фотоэлектрических приемников не повлияло особенно на развитие спектроскопии высокого разрешения, и последняя все чаще смотрелась как технологически архаичная. Кроме спектрофотометрических работ, применение ФЭУ в звездной спектроскопии оправдалось в случае одноканального корреляционного метода (Фелгетт, 1955; Гриффин, 1967), где систематическая работа двух-трех измерителей лучевых скоростей оказалась определяющей как в исследовании двойных систем, так и при построении картины движений звезд, принадлежащих различным подсистемам Галактики. В ИК-диапазоне одноканальные приемники были применены (Конн и др., 1969) для исследования атмосфер планет методом фурье-спектрометрии. Работа (Копылов и Стешенко, 1965) открыла эру компактных спектрографов высокого разрешения и стимулировала развитие отечественного производства дифракционных решеток с большим углом блеска. В ГАО выполнялись перспективные исследования по интерферометрам Фабри-Перо (Меркулов, 1960). Использование ЭОП в спектроскопии высокого разрешения наиболее эффективно проявилось только к началу 70-х годов, когда на 4-м телескопе обсерватории Китт Пик в сочетании с подвесным эшельным спектрографом была выполнена спектроскопия гигантов в составе шаровых скоплений. В целом новые направления в технике спектроскопии высокого разрешения – одноканальный корреляционный метод, фурье-спектрометр, спектрограф скрещенной

дисперсии, интерферометр Фабри-Перо – были сформированы в 60-е годы, и, как оказалось впоследствии, на два-три десятилетия вперед.

Послевоенное развитие отечественного спектроскопического приборостроения легко проследить по комплектованию обсерваторий ГАО и КрАО АН СССР. Вначале определяющей была роль инструментов, полученных по ремонтам. По мере того, как создавались телескопы все возрастающих диаметров, разрабатывалась соответствующая спектральная аппаратура. Перечислим спектроскопические проекты, которые считаем этапными.

Бесщелевой спектрограф АСИ-5 состоял из параболического рефлектора ($D_1 = 25$ см, $1:3$, $D_2 = 4$ см), призмы Корню ($A = 60^\circ$), кварцевого объектива ($D = 46$ мм, $F = 280$ мм), обеспечивая обратную линейную дисперсию $P \sim 70 \text{ \AA/мм}$ у $\lambda = 3300 \text{ \AA}$.

Для параболических 70 см рефлекторов (АЗТ-2 и АЗТ-8) были разработаны три призмённых спектрографа: один из них (двухпризмённый с двумя сменными камерами) устанавливался в фокусе Кассегрена, остальные два (щелевой кварцевый и бесщелевой) – в фокусе Ньютона. Впоследствии для телескопов этой конструкции были разработаны дифракционные спектрографы АСП-16 и АСП-21.

На 1.22-м рефлекторе КрАО вначале использовались однопризмённый спектрограф конструкции В. Альбицкого ($d = 50$ мм, призма из флинта $A = 66.6^\circ$, камеры $1:4$, $1:8$ и $1:12$, $P = 72, 36, 23 \text{ \AA/мм}$ на $\lambda = 4341 \text{ \AA}$) и двухпризмённый кварцевый спектрограф ($d = 40$ мм, призма флинт $A = 66.6^\circ$, камера $1:4$, $P = 95 \text{ \AA/мм}$ на $\lambda = 3704 \text{ \AA}$).

Для проверки принципов работы при переменных значениях окружающей температуры и положении в пространстве был разработан экспериментальный спектрограф АСПП, который пережил все «неэкспериментальные» разработки подвесных систем. АСПП состоит из коллиматора типа «обратный Кассегрен», дифракционной решетки 1200 штр/мм (размер заштрихованной области $140 \times 150 \text{ мм}^2$), камеры Шмидта $F = 185$ мм, $P = 36$ и 15 \AA/мм (в 1 и 2-м порядках спектра, соответственно). Для наблюдений в ИК-области спектра с ЭОП использовались линзовая камера и сменная дифракционная решетка (300 штр/мм).

Для фокуса Кассегрена 1.25-м зеркального телескопа им. Энгельгардта созданы два спектрографа: двухпризмённый спектрограф АСПЗ с диаметром коллимированного пучка $d = 60$ мм призмой из легкого флинта ($A = 63^\circ$) и сменными камерами $F = 175$ и 520 мм ($P = 59$ и 19 \AA/мм при $\lambda = 4341 \text{ \AA}$, соответственно) и кварцевый однопризмённый спектрограф с $P = 240 \text{ \AA/мм}$ при $\lambda = 4046 \text{ \AA}$. Для фокуса Ньютона был разработан однопризмённый бесщелевой спектрограф.

В оснащение 2.65-м зеркального телескопа им. Шайна было изготовлено два бесщелевых дифракционных спектрографа с линзовой оптической системой: СП-79 для диапазона $3300\text{--}4000 \text{ \AA}$ с положительным коллиматором и камерой $1:4.7$, $P = 180 \text{ \AA/мм}$; и СП-80 для диапазона $4000\text{--}6500 \text{ \AA}$ с отрицательным коллиматором и камерой $1:3.8$, $P = 250 \text{ \AA/мм}$. Для фокуса Нэсмита был разработан СП-72, состоящий из коллиматора типа «обратный Кассегрен», дифракционной решетки ($90 \times 100 \text{ мм}^2$, 600 штр/мм), двух камер Шмидта, ($1:1$ и $1:2$), обеспечивающих $P = 160 \text{ \AA/мм}$ и 80 \AA/мм , соответственно. Для фокуса кудэ был разработан АСП-14. Его дифракционная решетка 600 штр/мм имела рекордные по тем временам параметры ($280 \times 280 \text{ мм}^2$, концентрация энергии 40% на $\lambda = 4400 \text{ \AA}$ в 3-м порядке). Спектрограф имел три камеры: $F = 0.7, 1.35$ и 3.35 м (внеосевая), длина фотографических спектрограмм – 12, 22 и 53 см соответственно. Рабочие значения $P = 12, 6$ и 2.4 \AA/мм во 2-м порядке и 8, 4 и 1.6 \AA/мм – в 3-м.

В 1964 г. астрономы КрАО изготовили спектрограф СПЭМ для фокуса Нэсмита с коллиматором $1:16$, $D = 80$ мм, решетками $150 \times 150 \text{ мм}^2$, 651 и 1200 штр/мм, камерой

Максутова 1:2.5, $P=90$ и $40 \text{ \AA}/\text{мм}$ на $\lambda=6000 \text{ \AA}$. На этом долгоживущем (более полувека) спектрографе использовался ЭОП, а затем ПЗС-приемник.

Итак, в период формирования требований к спектральной аппаратуре БТА отечественная оптико-механическая промышленность освоила технологию как призмных спектрографов, так и дифракционных спектрографов (АСПП, СП-72, СП-79, СП-80 и АСП-14). К системам высокого разрешения можно отнести только АСП-14 (Васильев, 1976) и эшелный спектрограф (Копылов и Стешенко, 1965), использовавшийся на ЗТШ в то время, когда сооружение спектрографа фокуса кудэ еще не было завершено (в 1965 г.). В 1969 г. в Шемахинской астрофизической обсерватории был смонтирован спектрограф фокуса кудэ 2-м телескопа, изготовленный на предприятии «Карл-Цейсс Йена» (ГДР) и оснащенный дифракционными решетками производства ГОИ.

ФОРМИРОВАНИЕ НАБОРА ШТАТНОЙ СПЕКТРАЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ БТА

Первые проектные разработки комплекса САО были начаты в 1959 г. в отделе астрономического приборостроения ГАО АН СССР, возглавлявшемся до 1964 г. Д.Д. Максуповым. Техническое задание на спектральную аппаратуру телескопа было составлено О.А. Мельников и Н.А. Козырев. Для фокусов Нэсмита предполагалось построить:

- основной звездный спектрограф (ОЗСП) с тремя камерами, $F = 300, 60, \text{ и } 20 \text{ см}$, при фокусном расстоянии коллиматора $F = 840 \text{ см}$;
- планетный спектрограф;
- дифракционный спектрограф с интерферометром Фабри-Перо;
- бесщелевой спектрограф с интерференционными реперами (Линник, 1961).

В соответствии с этим предусматривалось четыре варианта оптической системы БТА (Лобачев и Якухнова, 1977) в фокусах Нэсмита: с линзовой укорачивающей системой, $F:14.6$; без корректора, $F:30.7$; с линзовой удлиняющей системой, $F:58.2$; с линзовой системой для ИФП, $F:31.4$.

Для главного фокуса предполагалось построить:

- призмный спектрограф для измерения лучевых скоростей звезд;
- спектрограф с ЭОП, оснащенный тремя сменными камерами.

Спектральные приборы были ориентированы на фотографическую регистрацию спектров. По этому признаку их можно выделить как первое поколение спектроскопической аппаратуры БТА.

Сопоставление содержания технического задания с датами опубликования новых идей и технических решений в астрономической спектроскопии (Боуэн, 1952; Фелгетт, 1955; Копылов и Стешенко, 1965; Гриффин, 1967; Конн и др., 1969) показывает, что разработка спектральной аппаратуры БТА происходила, в целом, в соответствии с общепризнанными представлениями конца 50-х и первой половины 60-х годов: широкощельность, универсализация за счет сменных камер и дифракционных решеток, применение ЭОП. Учитывались и другие прогрессивные решения: скрещивание дисперсий, интерферометрия.

Несмотря на очевидные успехи в отечественной технологии изготовления нарезных дифракционных решеток (Герасимов и др., 1957; Герасимов, 1965) и реплик (Коссова и др., 1958), формирование и исполнение технического задания на спектральную аппаратуру БТА проходило в период затянувшейся полемики «призма или дифракционная решетка?». Например, для первичного фокуса БТА предполагалось

изготовить призменный спектрограф, тогда как уже для ЗТШ были разработаны только дифракционные спектрографы.

Здесь работал эффект нашего отставания по большим телескопам с фокусом куда. Если построенный в 1919 г. 2.5-м телескоп обсерватории Маунт Вилсон был оснащен дифракционными решетками к 1934 г., и к созданию спектрографа фокуса куда 5-м телескопа астрономы уже накопили 15-летний опыт наблюдений, то дифракционный спектрограф фокуса куда 2.65-м ЗТШ вступил в строй только в конце 1965 г. Позволим себе утверждать, что первое поколение советских спектроскопистов «выросло на призмах».

Пулковские спектроскописты являлись преимущественно сторонниками призменных спектрографов (стр. 364, Курс, 1973), а крымские астрофизики, уже имея опыт работы на спектрографе АСПП, настояли на оснащении ЗТШ исключительно дифракционными спектрографами.

Опыт создания универсальных куда-спектрографов (Боуэн, 1952; Данэм, 1956) был использован на БТА с известными особенностями. Конструкция альт-азимутальной монтировки БТА исключает передачу света в неподвижное помещение при помощи зеркал (соответствующая схема появилась на телескопах Кеск и VLT на 40 лет позже). Метод оптоволоконного сочетания телескопа и спектрографа был испытан в конце 70-х (Хаббард и др., 1979). Для фокусов Нэсмита БТА была оставлена единственная конфигурация $D:F = 1:30.7$. Это обстоятельство оставило спектроскопию высокого разрешения без прогрессивных схем, предусматривающих фотоэлектрические методы регистрации. Из вышеперечисленного набора аппаратуры были изготовлены только ОЗСП (Васильев и др., 1977) и спектрограф скрещенной дисперсии СП-161 (Зандин и др., 1977а), вскоре дополненные планетным спектрографом СП-124 (Гусев и др., 1976). При этом перспективная идея использования решетки с большим углом блеска в схеме скрещенной дисперсии была представлена двумя аномальными вариантами – на длиннофокусной камере ОЗСП (1:12) можно было одновременно фотографировать три низких спектральных порядка, а на спектрографе СП-161 с камерой (1:1.5) при регистрации 11 спектральных порядков с ЭОП обеспечивалось среднее спектральное разрешение $R = 3000$. Единственный «импортный» спектрометр со сменными интерферометрами Фабри-Перо производства «Карл-Цейсс Йена» был быстро разобран «на детали». Уникальные характеристики планетного спектрографа СП-124 – линейное разрешение 0.01 мм по полю длиной 150 мм, с высотой щели, соответствующей максимальным угловым размерам планеты-гиганта согласно техническому заданию, составленному Н.А. Козыревым, – также не были использованы. Дело в том, что состав тематической группы «Физика тел солнечной системы», формировавшейся в САО дважды (в 1967 г., рук. О.Б. Васильев и в 1971 г., рук. Д.А. Кузнецов), диссипировал задолго до завершения работ по планетному спектрографу. Асферическая двухзеркальная камера СП-124 (Лобачев, 1978) в комбинации с набором трех дифракционных решеток, теоретическая разрешающая способность которых составляла $R = 24000, 96000$ и 190000 , по относительному отверстию (1:8) превосходила длиннофокусную камеру ОЗСП (1:12). Учитывая, что СП-124 конструктивно являлся более стабильным спектрографом, чем ОЗСП, приходим к выводу, что планетный спектрограф предоставлял астрономам САО возможность еще в 70-е годы получать уникальную информацию по околозвездным оболочкам, межзвездной среде и неоднородностям звездных атмосфер. Однако в схему СП-124 была встроена короткофокусная камера из комплекта спектрографа UAGS, в фокусе

Нэсмит-1 начались эксперименты с диссектором, а затем была размещена аппаратура телевизионного счета фотонов.

Таким образом, из средств высокого спектрального разрешения на БТА оказались только две камеры ОЗСП с фотографической регистрацией в низких порядках дифракции (длиннофокусная камера 1:12 и камера Шмидта 1:2.3).

Уже из того обстоятельства, что планировался один список спектральной аппаратуры, затем список корректировался, затем была изготовлена только часть запланированного, а продуктивно использовалась лишь часть изготовленного, трудно предположить, что первое поколение спектральной аппаратуры БТА формировалось под определенные научные задачи. Скорее всего, планировалось предоставить астрономам набор средств, в той или иной мере соответствующих интересам и квалификации возможных потребителей. Первоочередной задачей, поставленной перед САО, было ввести в эксплуатацию то, что было заказано старшими коллегами и построено в промышленности.

СПЕКТРОСКОПИЯ С ФОТОГРАФИЧЕСКОЙ РЕГИСТРАЦИЕЙ

Основной период фотографической спектроскопии на ОЗСП занял около 13 лет. Под эти наблюдения было выделено 1013 ночей (Панчук, 1998). Во время наблюдений на ОЗСП астроном находился непосредственно на телескопе, сопровождение объекта дополнялось ручной коррекцией, т.к. работоспособность автоматического гидрирующего устройства оказалась низкой. Не все наблюдатели выдержали испытания этим трудом. В конце периода фотографической спектроскопии уже около половины астрономов освободились от обязанностей по выполнению регулярных наблюдений на телескопе.

Методы предварительной обработки фотоэмульсий с целью повышения чувствительности получили распространение на БТА только в начале 80-х (Панчук, 1984). Обработку фотоматериалов выполняли, как правило, астрономы-наблюдатели. К недостаткам фотографического способа регистрации относятся низкая квантовая эффективность и небольшой динамический диапазон, к числу преимуществ – непревзойденные размеры светоприемника и возможность длительного хранения информации в исходном виде. Последнее обстоятельство не привязывало задачу оцифровки спектра непосредственно к задаче его регистрации. Процессом регистрации и обработки спектров занимались астрономы, а процессом оцифровки фотопластинок на автоматическом микроденситометре – преимущественно сотрудники вычислительного центра. Кроме организационных проблем, существовали и объективные, определяемые уровнем вычислительных и оптико-механических технологий:

- проблема цифровых носителей,
- проблема буферизации промежуточной информации,
- проблема интерактивного взаимодействия в процессе первичной обработки,
- поддержание высоких позиционных и фотометрических характеристик системы считывания информации.

Так, информация с первых цифровых устройств выводилась на перфоленту, параметры первых интерактивных дисплеев позволяли работать с небольшими фрагментами спектров, что снижало точность проведения уровня непрерывного спектра, повторяемость режима пошагового сканирования на автоматическом микроденситометре АМД-1 имела недостаточную точность в 1–2 шага или 5–10 мкм,

при внутренней точности сканирования 5 мкм (Додонов, 1985). Работы по оцифровке спектрограмм, выполненные на других микроденситометрах вне САО, составляли исключение (Киппер и Клочкова, 1980). Большинство астрономов предпочитало более доступную, лишь частично механизированную обработку, где все этапы записи и измерений спектрограммы контролировались автором наблюдения. С этой целью использовались измеритель лучевых скоростей (Антропов, 1972) и микрофотометр интенсивностей, созданные на базе серийного микрофотометра МФ-2. Обработка регистрограмм выполнялась вручную. Именно на этой методической основе были обработаны спектры, полученные в результате многолетних обзоров химически пекулярных и магнитных звезд (Клочкова и Копылов, 1986; Глаголевский и др., 1987). Переход в середине 80-х на цифровые методы регистрации привел к потере интереса астрономов-наблюдателей к проблемам оцифровки фотографических спектрограмм, хотя фотографические наблюдения продолжались некоторыми группами до 1992 г. (!). Заметим, что в отсутствие устойчивой технологии двумерного фотометрического сканирования обработка искривленных порядков эшелельных спектров представляла проблему, последнее затормозило развитие спектроскопии в высоких спектральных порядках. Не детализируя причины, можно утверждать, что задача, поставленная перед САО по сохранению коллекций фотопластинок ОЗСП и СП-124, в том числе и в цифровой форме, не решена.

ПЕРВЫЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Остановимся на тех работах, которые повлияли на развитие спектроскопии высокого разрешения. Из методов с небольшим числом каналов выделим магнитометр с перестраиваемым интерферометром Фабри-Перо (Глаголевский и др., 1979) и магнитометр, работающий по линиям водорода (Штоль и др., 1985). Первый прибор использовался на длиннофокусной камере ОЗСП, второй – на универсальном спектрографе UAGS в главном фокусе БТА. Под наблюдения на этих приборах в 1980–1996 гг. было выделено свыше 400 ночей. Эти приборы могли быть использованы и для фотоэлектрических измерений профилей линий без анализаторов поляризации, но такой способ наблюдений не входил в круг научных задач разработчиков аппаратуры. Упомянем еще одноканальный метод быстрой регистрации фрагмента спектра с диссектором (Алексеев и др., 1983). Под этот вид наблюдений на реконструированном планетном спектрографе было выделено 26 ночей. Следует вспомнить и о неудачной попытке создания фотоэлектрического кросс-корреляционного измерителя лучевых скоростей, предпринятой астрономами РГУ. Было известно, что этот метод, завоевавший место на телескопах 1-м класса, успешно использовался и на 5-м телескопе (Гриффин и Ганн, 1974). Научные интересы разработчиков многоканального телевизионного счетчика фотонов (Балега и др., 1979) были сосредоточены в области спектроскопии квазаров, т.е. были ориентированы на спектроскопию с низким разрешением. В целом можно констатировать, что первый этап внедрения фотоэлектрических методов в спектроскопию на БТА повлиял на методы наблюдений с высоким спектральным разрешением только в задаче измерений круговой поляризации в профилях избранных линий (Глаголевский и др., 1979).

СПЕКТРОСКОПИЧЕСКАЯ АППАРАТУРА ВТОРОГО ПОКОЛЕНИЯ

Анализ степени использования спектральной аппаратуры, изготовленной для БТА промышленностью по вышеупомянутым техническим заданиям, вызвал определенное разочарование. Исходя из анализа расписаний наблюдений (Панчук, 1998) за первые 10 лет работы БТА (1977–1986 г.) эта аппаратура использовалась в режимах, предусмотренных проектными заданиями (т. е. с фотопластинкой или ЭОП-ом с фотографической регистрацией) в течение 798 из 1257 ночей, выделенных для спектроскопии звезд, а спектрографы ОЗСП и СП-161 использовались в течение 783 и 15 ночей, соответственно. Из 1059 ночей, выделенных для спектроскопии галактик и звезд со средним разрешением, спектральная аппаратура использовалась в этих режимах всего 115 ночей. Спектрографы СП-160 (Зандин и др., 1977б) и СП-161 использовались 108 и 7 ночей, соответственно. Таким образом, 60% спектроскопических наблюдений были выполнены в новых режимах, не предусмотренных проектными заданиями.

Остановимся на некоторых деталях появления новых методов и приборов. В 1978 г. были приняты директивные решения, обязывающие промышленность выполнить ряд работ по повышению эффективности БТА. К этому времени было ясно, что создание новых образцов астрономической спектральной аппаратуры на короткой шкале времени практически невозможно. Поэтому было решено улучшать существующую аппаратуру, адаптируя ее под новые светоприемники. В части спектроскопии высокого разрешения планировалось переоснащение ОЗСП дифракционными решетками (размер заштрихованной площади $360 \times 320 \text{ мм}^2$), перехватывающими весь коллимированный пучок, и создание катадиоптрической камеры с внешним фокусом $F:1.1$, ориентированной на использование ЭОПа с большим полем (до 40 мм). Конструкция камеры предполагала наличие сменных корректоров поля, устанавливаемых перед фокальной плоскостью и настраиваемых в зависимости от используемого диапазона длин волн. Исходя из опыта работы на камере ОЗСП с внутренним фокусом $F:1.1$, нам удалось убедить коллег, что камера подобной светосилы с внешним фокусом окажется сложной в эксплуатации и неэффективной – выигрыш в широкощельности в значительной степени компенсируется большими потерями на центральном экранировании, поэтому следует строить камеру $F:2.3$.

ТЗ на камеру с внешним фокусом было изменено в 1980 г. В КБ-1704 ЛОМО было выполнено проектирование, но ее изготовление было отложено до второй половины 80-х (заводская приемка изделия состоялась в 1989 г., техническая документация получена во второй половине 1990 г.). В конце 80-х в ГОИ был изготовлен комплект дифракционных решеток $360 \times 320 \text{ мм}^2$ для ОЗСП. Мы остановились на подробностях для того, чтобы подчеркнуть два момента. Во-первых, после «парадной» сдачи БТА в эксплуатацию скорость исполнения дополнительных заданий в промышленности была уже не та. Во-вторых, основные затраты на крупногабаритную оптику для спектроскопии высокого разрешения на БТА были сделаны более четверти века назад.

С 1985 г. в рамках деятельности группы спектроскопии звезд, наряду с выполнением научных программ, авторам было поручено внедрение многоканальных фотоэлектрических методов в спектроскопию высокого разрешения. Работа базировалась на использовании одного из светоприемников комплекса КВАНТ (Афанасьев и др., 1987). Этот приемник, состоящий из трехкаскадного ЭОПа с электромагнитной фокусировкой, объектива оптического переброса и телевизионной трубки, весил почти центнер и не мог быть использован в главном фокусе БТА или в

фокусе Нэсмит-1, где к тому времени на базе спектрографа СП-124 устойчиво работал телевизионный сканер БТА (Драбек и др., 1986; Балега и др., 1979).

Мы решили реконструировать неиспользуемый спектрограф СП-161, который в штатном варианте предполагалось устанавливать в фокусе Нэсмит-1, поочередно со спектрографом СП-124. Реконструкция состояла в адаптации нового светоприемника, создании адекватных средств калибровки и стационарной установке спектрографа в фокусе Нэсмит-2, предназначенном ранее только для ОЗСП. В 1987 г. метод двумерного счетчика фотонов на эшелле-спектрографе уже использовался в наших наблюдениях в опытной эксплуатации, а с 1988 г. был предоставлен для плановых наблюдений (Клочкова и Панчук, 1991а). Таким образом на БТА был стационарно установлен и введен в эксплуатацию реконструированный спектрограф, уровень использования которого ранее, за первые 10 лет работы БТА, составил всего 22 ночи (Панчук, 1998). Формат изображений составлял 512×512 элементов, накопление и первичная обработка выполнялись на ЭВМ СМ-4. Были созданы методы первичной обработки эшелле-спектров (Клочкова и Галазутдинов, 1991; Галазутдинов, 1992). «Заложниками» этих методов сотрудники ГСЗ (впоследствии лаборатории ЛСЗ) стали на долгие годы, т.к. вся обработка выполнялась в САО, пока заявители не освоили эти или аналогичные методы и не перенесли часть процедур обработки спектров в свои организации.

Успех внедрения цифровых методов регистрации в спектроскопию высокого разрешения позволил нам выступить в 1989 г. с инициативой реконструкции ОЗСП для применения новых светоприемников. В кудэ-спектрографе 2.6-м ЗТШ ПЗС-камера уже использовались с 1985 г. (Березин и др., 1991). Одновременно предполагалось заменить старый комплект дифракционных решеток ОЗСП (форматом $300 \times 200 \text{ мм}^2$). Эта инициатива не была поддержана. Заявки и соответствующее распределение времени под фотографические наблюдения на ОЗСП как из САО, так и извне, продолжали поступать вплоть до 1993 г., поэтому мы занялись созданием эшелле-спектрографа с разрешением, не уступающим достигнутому на ОЗСП. В 1989 г. в лаборатории дифракционных решеток ГОИ была изготовлена первая крупноформатная эшелле ($R2$, 75 штр/мм , $300 \times 200 \text{ мм}^2$), затем в течение трех месяцев в САО был изготовлен автоколлимационный эшелле-спектрограф ЭСПАК (Клочкова и др., 1991), $d = 90 \text{ мм}$, который использовался на этапе перехода от двумерных счетчиков фотонов к первым ПЗС-камерам. Конструкция прибора позволяла устанавливать на нем поочередно оба типа светоприемников.

Упомянем еще два применения двумерного счетчика фотонов на аппаратуре высокого спектрального разрешения. В 1990 и 1991 гг. мы провели реконструкцию первой и второй камер ОЗСП, $F = 310 \text{ см}$ и $F = 60 \text{ см}$ соответственно, с целью использования счетчика фотонов в режиме регистрации фрагмента одного спектрального порядка одновременно с регистрацией фона ночного неба (Клочкова и Панчук, 1991б), но при этом мы были обязаны сохранить возможность периодического возвращения к режиму фотографической регистрации. В результате такой реконструкции на ОЗСП в режиме двумерного счета фотонов были впервые получены фрагменты абсорбционных спектров ярких квазаров.

Практически все спектральные векторы, полученные в результате первичной обработки изображений эшелле-спектров, зарегистрированных на двумерных счетчиках фотонов, были сохранены в виде цифрового архива (Кононов и др., 1996).

Работа с двумерными счетчиками фотонов (1986–1991 гг.) для спектроскопии высокого разрешения оказалась менее продуктивной, и причин здесь несколько. Во-первых, небольшой динамический диапазон (скорость счета не должна была

превосходить 0.5 события на канал в секунду) ограничивал величину сигнал/шум ($S/N < 50$ на канал), которую можно было достичь за время накопления, сравнимое с характерным временем проявления нестабильностей светоприемника (1 час). А в этот период в звездной спектроскопии уже преобладали задачи, требующие более высоких значений S/N . Во-вторых, метод оказался трудоемким, сильно зависящим от уровня инженерного обеспечения, что было непривлекательным для большинства астрономов, привыкших к определенной самостоятельности на телескопе. В-третьих, отдельную проблему составляли хранение и обработка материала – двумерные изображения просто было негде хранить. Это обстоятельство исключало и режим быстрой спектроскопии, реализованный позже, да и то, только в случае счета фотонов на двух линейках сканера (Сомов и др., 1998). В-четвертых, ощущался некомплект аппаратуры, так фокус Нэсмит-2 не имел ни одного стационарно установленного телевизионного подсмотра. Но главным было то, что для спектроскопии высокого разрешения период 1987–1992 гг. был переходным. Одни астрономы продолжали фотографическую регистрацию, тогда как другие освоили полные технологические циклы (спектрограф, светоприемник, вычислительная техника, цифровая обработка), связанные с внедрением новых светоприемников. В течение пяти лет аппаратура высокого разрешения использовалась с двумерными счетчиками фотонов лишь часть времени, чего в сочетании с погодным фактором оказалось недостаточно для выполнения ряда программ. Обеспечивать столь различающиеся виды наблюдений (фотопластинка и счетчик фотонов) на одном телескопе и даже на одном спектрографе (табл. 4, Панчук и др., 2014а) было тяжело. Затраты труда небольшой группы на развитие аппаратуры, подготовку к наблюдениям и их выполнение, на первичную обработку всего наблюдательного материала были столь велики, что приходилось жертвовать личными научными интересами. Такая ситуация не объединяла людей. В итоге продвижение цифровых методов в спектроскопии высокого разрешения на БТА было медленным.

СПЕКТРОСКОПИЧЕСКАЯ АППАРАТУРА ТРЕТЬЕГО ПОКОЛЕНИЯ

Аппаратурой третьего поколения мы называем спектрографы, разработанные для применения ПЗС-камер. Этот период нашей деятельности практически совпал с преобразованием группы спектроскопии звезд в 1991 г. в лабораторию астроспектроскопии, возглавил которую В.Е. Панчук, а с 1996 г. – В.Г. Ключкова. Круг задач лаборатории остался прежним:

- «своя» наука по результатам наблюдений на БТА,
- развитие спектроскопических методов,
- обеспечение наблюдательных программ на БТА.

Тогда уже преобладал оправдавшийся на практике тезис «аппаратура разрабатывается под научные интересы разработчиков». Поэтому при распределении наблюдательного времени разработчик получал некоторую гарантированную квоту на «свою науку» и развитие метода. С конца 90-х, как следует из расписаний наблюдений, этот тезис в части спектроскопии высокого разрешения перестал действовать, что привело к снижению темпа наших разработок.

В 1990 г. лаборатория перспективных разработок предоставила в ГСЗ для решения задач спектроскопии высокого разрешения комплект светоприемника на основе ПЗС-детектора с объемным каналом (580×520 элементов, пиксель 24×18 мкм, неоднородность чувствительности 2%, шум считывания 18e⁻). Сбор осуществлялся на ПЭВМ АТ-286. Светоприемник был испытан на спектрографе ЭСПАК, а в 1991 г. была

начата его эксплуатация на эшелле-спектрографе РЫСЬ (Панчук и др., 1993) с диаметром коллимированного пучка 100 мм, также разработанном в ГСЗ. К этому времени в фокусе Нэсмит-2 «набралось» четыре стационарно установленных спектрографа, пригодных для применения ПЗС: ОЗСП, с камерой $F = 60$ см (Панчук, 2001; Панчук и др., 2014), эшелле-спектрограф среднего разрешения СП-161 (Клочкова и Панчук, 1991а), автоколлимационный спектрограф ЭСПАК (Клочкова и др., 1991) и эшелле-спектрограф РЫСЬ. Комплекс спектрографов был скомпонован так, что вход на любой из них обеспечивался при одном и том же положении вторичного зеркала БТА, это открывало путь к созданию двухплечевых спектральных систем – одного из элементов предложенной нами концепции спектроскопии звезд на БТА (Клочкова и Панчук, 1991б). Комплекс обеспечивался единой системой калибровки, общими каналами связи и управления, впоследствии – общим телевизионным подсмотром с ЭОП. Это обстоятельство также являлось важным элементом концепции – стационарная установка спектрографов облегчала их эксплуатацию. Инженеры привлекались только для коммутации каналов связи и настройки ТВ-подсмотра. Нам удавалось в экстренных случаях (вспышка сверхновой SN 1993J) быстро переносить светоприемник с одного спектрального прибора на другой, затрачивая на это время, сравнимое с перенаведением телескопа с объекта на объект. Комплекс светоприемной аппаратуры, разработанный в ЛПР, отличался высокой надежностью – в среднем один ремонт или профилактика за два года. Этот ассортимент спектральной аппаратуры позволял нам выполнять ее поочередное усовершенствование без риска «провалить» наблюдения – в расписании наблюдений удавалось организовывать поочередное использование различных спектрографов. Таким образом, обеспечивался еще один элемент концепции – развивать спектральную аппаратуру, постоянно имея в готовности минимум один метод наблюдений. Необходимость непрерывного продвижения небольшими шагами объяснялась прозаически – отсутствием достаточных финансовых средств (методическая революция на БТА происходила в самый сложный период финансирования научных исследований). Оставалось два варианта: или строить постепенно, от сета к сету наращивая возможности прибора, или вообще ничего не строить, дожидаясь лучших времен.

В те времена важным для развития спектральной аппаратуры явилось решение о принципах построения новой аппаратной БТА – совокупности помещений, где находятся наблюдатели, средства управления аппаратурой и сбора информации со спектрографов. В 1993–1994 гг. обсуждались две точки зрения: аппаратная содержит одну мощную ЭВМ, на которую поочередно на период выполнения наблюдений подключаются разные спектрографы, или аппаратная содержит несколько ПЭВМ среднего уровня, каждая из которых закреплена за отдельным методом наблюдений или группой близких методов. Второй, сегодня очевидный для всех вариант, вызывал тогда много возражений, но был реализован, что позволяло далее развивать отдельные методы так, как считали необходимым их авторы. Схема «разветвленной аппаратной» существенно облегчала подготовку и тестирование спектрографов БТА.

В развитие вычислительных и коммуникационных средств аппаратной определяющий вклад внесли сотрудники отдела информатики и астрономы, ответственные за методы наблюдений.

В начале 90-х уже ощущалась недоукомплектованность аппаратуры высокого спектрального разрешения БТА ПЗС-приемниками. Тем не менее, в 1990 г. от предложения астрофизиков обсерватории Медон передать на БТА для спектроскопии высокого разрешения комплект ПЗС (форматом $1К \times 1К$) и соответствующую систему

сбора САО отказалась. Напомним, что переход на отечественные приемники такого формата состоялся на БТА в 1995 г.

КОЛЛИМИРОВАННЫЕ ПУЧКИ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА

Спектральное разрешение спектрографа R пропорционально диаметру коллимированного пучка d и обратно пропорционально ширине щели s . Если желаем увеличить спектральное разрешение без потерь света на щели, следует увеличить d , т.е., построить новый спектрограф. Получив опыт создания эшелле-спектрографов с $d \sim 100$ мм, в 1993 г. мы предложили программу перевода спектроскопии высокого разрешения на коллимированные пучки большого диаметра. Предлагалось создать три спектральные системы с диаметром коллимированного пучка не менее 25 см, реконструировать ОЗСП, построить эшелле-спектрограф БТА и построить новый эшелле-спектрограф фокуса кудэ 1-м телескопа.

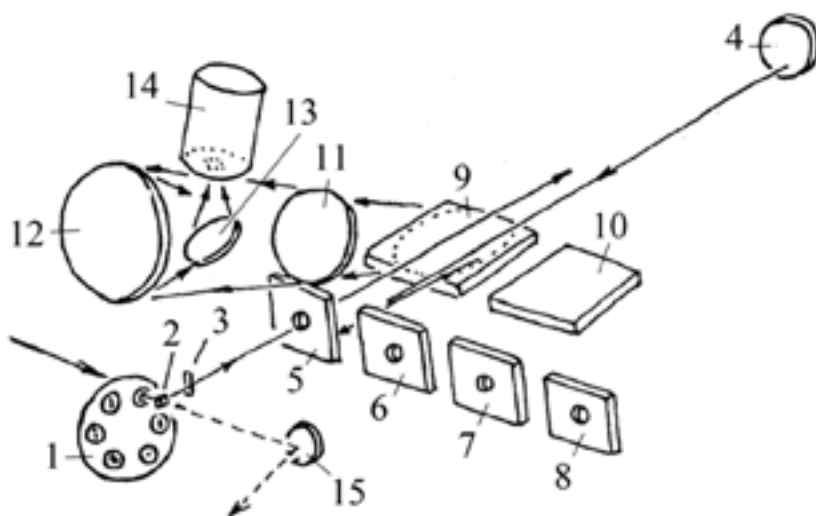


Рис. 25. Схема третьей модификации спектрографа РЫСЬ (Панчук и др., 1999): 1 – турель с деккерами, 2 – поворотная призма, 3 – затвор, 4 – зеркальный коллиматор, 5 – решетка скрещенной дисперсии 600 штр/мм, 6 – решетка скрещенной дисперсии 300 штр/мм, 7 – решетка скрещенной дисперсии 150 штр/мм, 8 – плоское зеркало, 9 – решетка эшелле 75 штр/мм, 10 – решетка эшелле 37.5 штр/мм, 11 – коррекционная пластина камеры Шмидта, 12 – сферическое зеркало камеры Шмидта, 13 – плоское ломающее зеркало в сходящемся пучке, 14 – криостат с ПЗС, 15 – поворотное зеркало оптики коллиматора спектрографа НЭС.

В 1995 г. сотрудники ЛПР завершили работу по созданию трех комплектов светоприемника на основе ПЗС-детектора 1060×1040 (элемент 13×13 мкм, более компактная электроника, сбор на ПЭВМ АТ-386). Один из этих комплектов был предназначен для развития методов спектроскопии высокого разрешения. Нам следовало либо адаптировать существующие спектрографы под новый формат приемника, либо построить новые оптические схемы. Продвигались по обоим направлениям. Так спектрограф РЫСЬ был существенно реконструирован (рис. 25),

установлен набор сменных решеток скрещенной дисперсии, заменен объектив камеры (Панчук и др., 1999) и построен эшелле-спектрограф первичного фокуса PFES (Панчук и др., 1998), $d=50$ мм (рис. 26).

Осенью 1996 г. наши предложения по созданию эшелле-спектрографа с большим диаметром коллимированного пучка были приняты, в течение 1997 г. нэсмитовский эшелле-спектрограф был построен (рис. 27), а в январе 1998 г. были выполнены первые наблюдения с ПЗС-камерой (1060×1040 элементов). Основу спектрографа составила камера с внешним фокусом, разработанная ранее для ОЗСП. На спектрографе используется мозаичная эшелле, составленная из двух фрагментов, каждый с заштрихованной частью 300×300 мм².

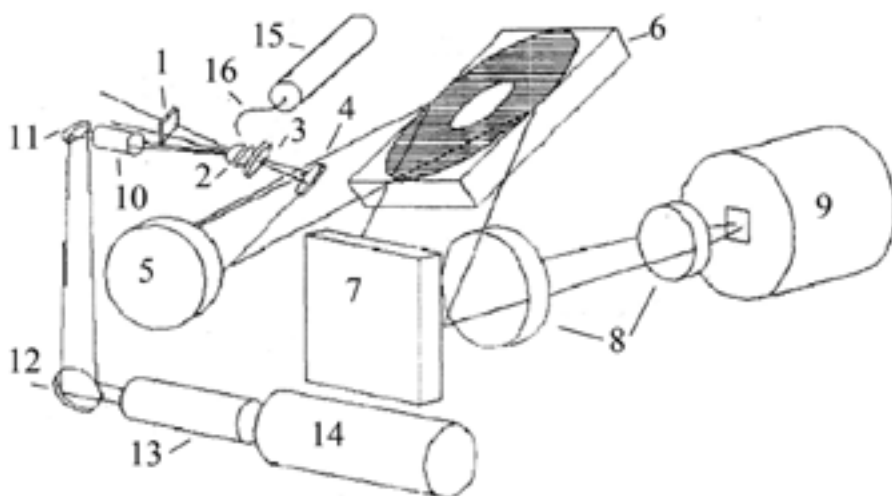


Рис. 26. Схема эшелле-спектрографа первичного фокуса PFES (Панчук и др., 2001): 1 – желтый фильтр, выделяющий рабочий порядок решетки скрещенной дисперсии 300 штр/мм, 2 – щель спектрографа, 3 – анализатор линейной поляризации, 4 – плоское зеркало коллиматора, 5 – вогнутое зеркало коллиматора, 6 – эшелле, 7 – сменная решетка скрещенной дисперсии, 8 – оптика камеры, 9 – криостат с матрицей ПЗС, 10 – первый объектив канала подзора щели, 11, 12 – плоские зеркала канала подзора щели, 13 – второй объектив (трансфокатор) канала подзора щели, 14 – телевизионный подзор с усилителем яркости, 15 – источник спектров калибровки, 16 – оптоволоконный жгут канала калибровки.

Из-за больших габаритов НЭС ($d = 240\text{--}270$ мм, фокусное расстояние коллиматора 7200 мм) сборка прибора выполнена непосредственно на платформе фокуса Нэсмита-2. Предварительно пришлось демонтировать спектрографы СП-161, ЭСПАК и реконструировать спектрограф РЫСЬ, объединив его с конструкцией НЭС. На период выполнения этих работ единственным работающим эшелле-спектрографом БТА являлся заблаговременно построенный спектрограф первичного фокуса PFES (Панчук и др., 1998а). Кроме того, при реконструкции фокуса Нэсмита-2 не прекращались ежемесячные наблюдения на ОЗСП.

Дальнейшее развитие аппаратуры высокого спектрального разрешения состояло в оснащении существующего набора спектрографов (НЭС, РЫСЬ, PFES и ОЗСП) анализаторами поляризации (Найденев, 1998; Панчук и др., 2014а), резателями изображения (Панчук и др., 2003; Найденев и др., 2007), абсорбционными ячейками с парами йода (Панчук и др., 1998б; Панчук и др., 2009б), интерферометром Фабри-Перо (Панчук, 2000). Были усовершенствованы методы калибровки и обработки спектров, созданы новые алгоритмы (Юшкин и Клочкова, 2004) для работы со спектрами, полученными в особых режимах, например, с анализатором круговой и линейной поляризации, скомбинированным с резателем изображения.

Была также разработана оптическая схема, развивающая демонтированный из фокуса Нэсмит-2 спектрограф СП-161. В результате новый эшелле-спектрограф среднего разрешения с ПЗС-камерой был установлен в фокусе Нэсмит-1 и испытан в наблюдениях (Монин и Панчук, 2002). Результаты исследования спектрографов высокого разрешения БТА опубликованы в работах (Панчук и др., 1998а, 2001; Клочкова и др., 1999, 2000, 2008; Панчук, 2001).

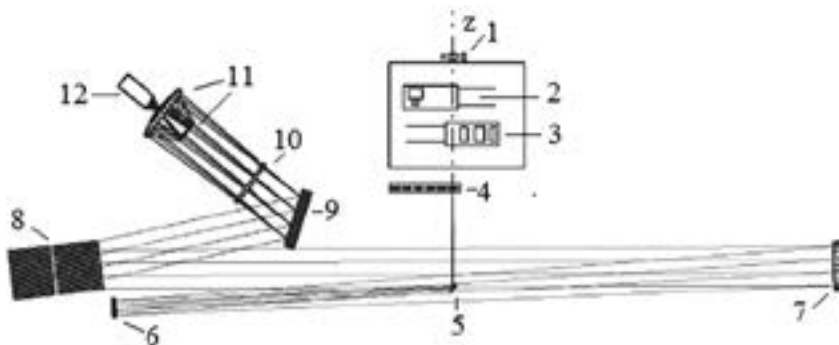


Рис. 27. Схема НЭС (Панчук и др., 2009а): 1 – локальный корректор изображения звезды, 2 – узел калибровок, 3 – платформа предельных устройств, 4 – узел деккеров и резателей, 5 – первое зеркало коллиматора, 6 – второе зеркало коллиматора, 7 – параболическое зеркало коллиматора, 8 – составная (мозаичная) эшелле, 9 – узел сменных решеток скрещенной дисперсии, 10 – коррекционная пластина Шмидта, 11 – зеркальная оптика камеры, 12 – криостат с ПЗС.

В 2001 г. на спектрограф НЭС (рис. 27) был установлен ПЗС-приемник (2К×2К элементов), созданный в Копенгагенском университете под научную программу проф. Н.Е. Пискунова (Университет Упсала). В сочетании с кварцевой оптикой камеры спектрографа этот светоприемник открыл новые возможности работы в коротковолновом диапазоне (Панчук и др., 2009в). С 2000 г. приборы фокуса Нэсмит-2 оснащены локальным корректором положения звезды (Иванов и др., 2001), работа которого принципиально изменила характер наблюдений и снизила нагрузки на систему управления БТА.

Итак, с ПЗС-камерами последовательно увеличивающегося формата использовались четыре системы высокого спектрального разрешения:

- основной звездный спектрограф (ОЗСП), $15000 > R > 5000$;
- эшелле-спектрограф первичного фокуса (PFES), $R = 15000$;

- эшелле-спектрограф красного диапазона (РЫСЬ), $R = 34000$;
- кварцевый эшелле-спектрограф (НЭС), $80000 > R > 50000$.

С 1992 по 2006 г. для наблюдений на этих приборах было выделено 366, 81, 336 и 365 ночей, соответственно. Поляриметрические наблюдения с более высоким разрешением, необходимым для задач исследования неоднородностей звездной поверхности, были начаты нами на спектрографе НЭС в 1999 г. по программе В.Л. Хохловой, а с 2000 г. – и по программе Н.Е. Пискунова. С 2004 г. спектрополяриметрические наблюдения на НЭС выполняются сотрудниками ЛИЗМ. Всего с 1992 г. для наблюдений на спектрографах ОЗСП, PFES, РЫСЬ (три модификации) и НЭС было выделено 684, 81, 336, и 811 ночей, соответственно. Под наблюдения на ОЗСП для исследований звездного магнетизма регулярно выделялось резервное и техническое время и около 20 ночей затрачено на отладку новых эшелльных спектрографов. Поэтому можно считать, что с 1992 г. по настоящее время на спектроскопию высокого разрешения было выделено более двух тысяч ночей.

Перевод методов высокого спектрального разрешения на коллимированные пучки большого диаметра состоялся благодаря мерам, предпринятым до 1991 г. В последующие 15 лет на крупногабаритную оптику для спектрографов высокого разрешения БТА расходов не было, но обсерватория уделяла внимание строительству спектрографов высокого разрешения для телескопов других учреждений: 2-м ГАО НАНУ (Терскол), 1.5-м КГУ (Турция), 0.7-м PST2 (Польша), 0.6-м (ИНАСАН), 1.2-м (УрГУ).

ИТОГИ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Наши наблюдательные программы разных лет перечислены в работах Клочковой и Панчука(1997), Панчука и Клочковой (2006), где даны ссылки на соответствующие публикации. В обзоре Клочковой (2016) упомянуты основные публикации периода 2007–2016 гг. Можно утверждать, что работа по развитию методов высокого спектрального разрешения на БТА в целом оправдалась, т.к. позволила нам с коллегами получить тысячи спектров мирового уровня и опубликовать сотни статей. Отметим основные недостатки, характерные для перечисленных этапов.

В фотографическую эпоху в обсерватории не удалось наладить оцифровку спектрограмм, что привело к большим трудозатратам по ручной обработке спектров. Кроме того, усилия по разработке первых моделей резателя изображения не привели к выигрышу в проникающей способности ОЗСП, т.к. отсутствовала возможность суммировать фотометрические разрезы отдельных полосок спектрограммы. Но главным недостатком явилось отсутствие стабильного спектрографа, пригодного для высокоточных позиционных наблюдений (таким прибором потенциально являлся СП-124).

При эксплуатации двумерного счетчика фотонов основные проблемы состояли в небольшом динамическом диапазоне приемника и в настройке сложного комплекса электроники. В этот период обозначилась нехватка носителей информации, и двумерные изображения необходимо было быстро обрабатывать. Все алгоритмы и программы обработки спектров высокого разрешения были созданы двумя-тремя астрономами. Около полугода было потеряно в ожидании разрешения по установке СП-161 в фокус Нэсмит-2.

Работы с первыми ПЗС-камерами мы начали на ОЗСП, используя опыт наблюдений со счетчиком фотонов. Естественным развитием этих работ явилась бы

реконструкция спектрографа: дифракционные решетки большого формата уже были изготовлены и разработано устройство для смены тяжелых оправ с решетками. Однако большинство пользователей ОЗСП высказалось за продолжение регулярных фотографических наблюдений на БТА. Планы продолжать такой тип наблюдений были доведены и до европейских астрономов (Бируля и др., 1993). Поэтому для регулярных наблюдений с ПЗС мы построили первый эшелльный спектрограф высокого разрешения. В итоге систематические наблюдения на ОЗСП с ПЗС по научным программам САО начались на 5 лет позже – уже после наблюдений ярких квазаров в 1994 г. (Варшавович и др., 1996), а переход на дифракционные решетки большого формата состоялся только в XXI веке.

Что касается спектрографа НЭС, то здесь основные потери времени приходятся на интервал между предложением строить (1993 г.) и принятием решения о постройке (1996 г.). Спектрограф был построен на балконе фокуса Нэсмит-2 в течение одного года (1997 г.), причем без прекращения наблюдений на ОЗСП, оказавшихся в этот год крайне важными. Решающую роль в достижении устойчивых эксплуатационных характеристик спектрографа сыграло оснащение НЭС ПЗС-камерой (2К×2К), статус которой исключал ее перестановку на другие приборы. В течение последующих 10 лет НЭС использовался со стационарно установленной матрицей (ситуация, типичная для любого спектрографа высокого разрешения, но неординарная для спектрографов высокого разрешения БТА). Именно в период 2000–2010 гг. на НЭС были выполнены программы, успех которых определялся устойчивым сохранением PSF (point spread function) за счет стационарно установленной матрицы ПЗС и высокого качества юстировки мозаичной эшелле.

В 2002 г. работы по созданию НЭС были включены в перечень важнейших достижений в области астрономии с формулировкой: «На 6-м телескопе БТА достигнута предельная чувствительность и фотометрическая стабильность наблюдений, в десятки раз увеличена информативность спектрометрических наблюдений. Это достигнуто благодаря введению в эксплуатацию созданных в САО РАН приборов нового поколения: (а) кварцевого эшелле-спектрографа НЭС со спектральным разрешением до $R = 82000$ в диапазоне длин волн 320–1000 нм; (б) ПЗС-системы с цифровой фильтрацией видеосигнала с криостатируемым матричным детектором, содержащим 2К×2К элементов. (САО РАН, университет г. Упсала (Швеция) и ИПФ РАН)».

В результате последовательного выхода из строя ПЗС сложилась ситуация, когда часть спектрографов (PFES, РЫСЬ, а затем и НЭС) остались без светоприемников. Поэтому для периода 2007–2016 гг. мы приводим данные только для ОЗСП – 328 ночей, без учета резервного и технического времени, и для НЭС – 446 ночей. Возможности спектроскопии высокого разрешения на БТА еще понизились, когда в 2010 г. для работ на ОЗСП и НЭС остался один приемник, переставляемый с прибора на прибор практически ежемесячно. Соотношение выделяемого времени на ОЗСП и НЭС при этом изменилось: от среднего 0.75 за период 1992–2010 гг., до 1.0 за период 2011–2016 гг. Получается, что доля наблюдений на ОЗСП с разрешением $R = 15000$, которое на Западе уже определяют как среднее, начинает преобладать над наблюдениями с $R = 60000$ – 75000 (НЭС). Из-за нехватки светоприемников спектроскопия высокого разрешения на БТА начинает сдавать позиции.

К определенным достижениям можно отнести разработки, связанные с усовершенствованием существующих спектрографов и поиском новых возможностей для спектроскопии высокого разрешения на БТА.

Во-первых, был построен спектрограф высокого разрешения (UFES, $d = 100$ мм, $R = 30000$) для 1.2-м телескопа УрГУ (Панчук и др., 2011). На нем было проверено несколько технических решений, которые теперь используются при разработке аналогичного спектрографа повышенной светосилы (EFES, $d = 100$ мм, $R = 45000$), имеющего трехволоконное сочетание с Цейсс-1000 (Панчук и др., 2015а). Казалось бы, эти работы не имеют отношения к проблемам спектроскопии высокого разрешения на БТА. Поэтому напомним об относительно новой тенденции – понижении диаметра коллимированного пучка в спектрографах высокого разрешения, проектируемых для больших телескопов. Например, для телескопа диаметром $D = 6.5$ м завершается изготовление эшелле-спектрографа ($R \sim 80000$), имеющего $d = 100$ мм (Сейфарт и др., 2016). Считаем, что на примере EFES разработана базовая модель, которая может применяться и на БТА в сочетании с простейшими методами коррекции изображения (Якопов и др., 2013) и усовершенствованной калибровкой (Панчук и др., 2016а).

Во-вторых, учитывая опыт спектрополяриметрии на спектрографе PFES (Клочкова и др., 2004), разработан эшелле-спектрополяриметр первичного фокуса БТА (Панчук и др., 2016 б, в). В режиме измерения круговой и линейной поляризации этот прибор окажется в десятки раз эффективней ОЗСП за счет увеличенного разрешения, $R = 20000$, числа одновременно регистрируемых порядков, повышенного пропускания и снижения инструментальной поляризации. В режиме спектроскопии ($R = 30000$) эшелле-спектрограф первичного фокуса будет существенно превосходить спектрограф РЫСЬ.

В-третьих, необходимо продвигаться в сторону значений $R > 100000$. С момента реконструкции СП-124 на БТА отсутствует возможность наблюдений с $R \sim 100000$. Это затрудняет работы по спектроскопии планетных атмосфер, межзвездной среды и околозвездных оболочек. Новые эффекты, недавно обнаруженные в спектрах звезд на стадии post-AGB (Клочкова, 2014; Клочкова и Панчук, 2016), заставляют нас искать технические решения для наблюдений ярких объектов с высоким и сверхвысоким разрешением. Мы рассматриваем следующие варианты применения интерферометрической техники:

- эталон Фабри-Перо с открытым входом в схеме интерференционного спектрографа (Кулагин, 1980);
- интерферометр Фабри-Перо, установленный в коллимированном пучке эшелле-спектрографа (Панчук и др., 2015б),
- интерферометр белого света с постдисперсией – EDI (Эдельштейн и др., 2012).

Ключевую роль в перечисленных проектах играет степень информационного обеспечения всех этапов – моделирования (Юшкин и др., 2016а), проектирования, обработки результатов, автоматизации, удаленного контроля наблюдений, что является заслугой наших коллег: В.С. Шергина, М.В. Юшкина, Г.В. Якопова, Т.А. Фатхуллина, М.В. Якопова, Э.В. Емельянова и Ю.Б. Верича.

Необходимо упомянуть о проекте, на который обсерватория делает ставку. С 2001 г. в план секции №10 «Оптические телескопы и методы» НСА РАН включен пункт «создание оптоволоконного эшелле-спектрографа БТА с разрешением до $R = 100000$ для широкого диапазона длин волн с возможностью измерения поляризации». В 2003 г. был подготовлен аванпроект спектрополяриметра (Валявин и др., 2003). В 2004 г. были сделаны первые расходы на разработку и изготовление оптических элементов. Позже, получив аналогичное поручение, мы подготовили свою концепцию спектрографа (Панчук и др., 2007). В 2011 г. на семинаре отдела физики звезд принято окончательное

решение по руководителю проекта и составу исполнителей, с 2014 г. (после 10-летнего перерыва) продолжено финансирование проекта. Содержание проекта уже доведено до международного сообщества специалистов по спектроскопическому приборостроению (Валявин и др., 2014; Кукушкин и др., 2016; Сазоненко и др., 2016).

В течение 40 лет наблюдений на БТА с высоким спектральным разрешением удалось:

- приспособиться к той части штатной аппаратуры, которая оказалась пригодной для таких наблюдений,
- усовершенствовать штатную аппаратуру и адаптировать ее под новые светоприемники,
- разработать новые приборы и методы наблюдений,
- приобрести опыт наблюдений по разнообразным научным программам,
- подготовить нескольких специалистов для наблюдений и дальнейшего развития спектроскопии высокого разрешения на БТА.

Все технические работы выполнялись без остановки спектроскопических наблюдений, всегда в наличии оставался минимум один наблюдательный вариант. Получен опыт разработки спектроскопической аппаратуры, который оказался востребованным в наземных и космических проектах (Панчук и др., 2011; Панчук и др., 2014б; Юшкин и др., 2016б). Все это позволяет выработать более широкий взгляд на аппаратуру высокого спектрального разрешения, не ограничиваясь возможностями БТА.

Во-первых, для работы со спектрами высокого разрешения необходима высокая квалификация. Было немало случаев, когда заявитель наблюдательного времени такой квалификации не имел. Зачастую на аппаратуре БТА молодой астроном тратит время на постижение основ спектроскопии в ущерб тем профессионалам, которые остаются за рамками расписания наблюдений. В университетах, как правило, нет аппаратуры высокого (и даже среднего) спектрального разрешения, на которой можно было бы организовать спектроскопическую подготовку. Телескопы университетских обсерваторий, установленные в 50–60 годах, сегодня оказались в зонах интенсивной подсветки неба, и для высокоточной фотометрии и спектроскопии слабых объектов уже непригодны. Поэтому некоторые усилия мы потратили на разработку спектрографов высокого разрешения для телескопов умеренных и малых диаметров. Например, для цейссовских телескопов $D = 0.6$ м и $D = 1.0$ м разработан подвесной эшелле-спектрограф фокуса Кассегрена ($d = 50$ мм, $R = 35000$) (Панчук и др., 2015в). Для телескопов диаметром 0.25–0.3 м разработаны подвесные спектрографы: эшелльный, $d = 30$ мм, $R = 16000$ (Панчук и др., 2015г) и однопорядковый, $d = 30$ мм, $R = 20000$ (Панчук и др., 2015д). Изготовлен и эшелльный спектрограф, имеющий оптоволоконное сочетание с телескопом малого диаметра. Такие спектрографы пригодны как для обучения, так и для выполнения научных программ мониторинга ярких звезд.

Во-вторых, при наличии квалифицированных спектроскопистов необходимо строить специализированный телескоп, оснащенный спектрографом высокого разрешения. Анализ расписаний наблюдений на БТА и библиографический поиск показали, что за первые 20 лет наблюдений из 120 заявителей по программам спектроскопии звезд половина так и не опубликовала своих результатов. Опираясь на данные по астроклимату места установки БТА (Ерохин и Пляскин, 1983; Панчук и Афанасьев, 2011) и на результаты анализа наших архивов наблюдений, мы пришли к выводу, что за первые 20 лет наблюдений на коротких программах было потеряно

минимум 2 года. Как правило, такие программы не завершились публикациями (даже в форме нерейтинговых тезисов конференций), подробнее см. (Панчук, Ключкова, 2006). В последние 10 лет средняя продолжительность программ спектроскопии с высоким разрешением (за год) увеличилась почти на одну ночь, как за счет уменьшения ассортимента спектральной аппаратуры, так и за счет уменьшения числа заявителей. Многопрограммный статус БТА несовместим с мониторинговыми программами звездной спектроскопии, ориентированными на выполнение в течение двух-трех лет. Именно такие программы популярны сегодня: доплер-зеemanовское картирование, астросейсмология, исследование маломассивных спутников звезд. Спектрографы высокого разрешения относятся к категории самых дорогих приборов, поэтому на нескольких телескопах спектрограф фокуса кудэ использовался как с большим телескопом (диаметром 3.6–2.2 м), так и со вспомогательной оптикой (диаметром до 1.4 м), т.е., работал каждую ясную ночь. В ЕЮО с переносом части программ на 8-метровые VLT, для спектроскопии высокого разрешения освободились телескопы диаметром 3.6, 2.2 и 1.5 м. Основные результаты по высокоточным измерениям доплеровских смещений поступают именно с этих телескопов, превращенных из многопрограммных в специализированные. Уже функционируют телескопы-роботы, разработанные под узкий класс спектроскопических задач.

В России пока нет специализированного телескопа, оснащенного спектрографом высокого разрешения, что и определяет уровень конкурентоспособности наших специалистов по спектроскопии звезд. Здесь напомним, что в дополнение к БТА планировалось создать 2.6-м широкоугольный телескоп (Белороссова и др., 1964) с использованием опыта создания 2.6-м ЗТШ, оставшихся чертежей и технологического оборудования. Этот проект, инициированный Д.Д. Максutowым, был закрыт, но впоследствии с использованием опыта ЗТШ был построен 2.6-м телескоп для БАО. В САО потребность в большом вспомогательном телескопе сохраняется до сих пор. В лунные ночи такой телескоп в спектроскопии высокого разрешения мог бы составить конкуренцию БТА.

В-третьих, необходимо учитывать новые решения, которые внедряются в конструкции спектрографов. Схема белого зрачка, предложенная еще в 60-х (Баранн и Дюшес, 1972), претерпела неоднократные изменения. Сегодня на первый план выходит несимметричная схема белого зрачка, что позволяет использовать линзовые объективы небольшого диаметра и в качестве элементов скрещенной дисперсии – голографические решетки с объемным фазированием. Если раньше две ветви спектрографа («синяя» и «красная») разделялись сразу после деккера (UVES, VLT), то в несимметричной схеме светоделитель устанавливается после второго коллиматора, что существенно снижает стоимость проекта. Революционным представляется внедрение в спектроскопию достижений нового направления – астротоники. Преимущества одномодовых оптических волокон перед многомодовыми общеизвестны, но «упаковать» изображение звезды в одномодовое волокно даже методами адаптивной оптики представляется затруднительным. Изобретен так называемый «фотонный фонарь» – устройство, расщепляющее излучение в многомодовом волокне на определенное количество одномодовых (Леон-Саваль и др., 2005). Одномодовые волокна могут питать недорогие, дифракционно ограниченные спектрографы (Робертсон и Блэнд-Хауторн, 2012). Таким образом, удастся решить проблему широкощельности и уменьшить габариты спектрографа высокого разрешения более чем на порядок. В создании миниатюрных спектрографов сыграет роль и технология дифракционных оптических элементов.

ПУБЛИКАЦИИ

- [1] Алексеев Г.Н., Драбек С.В., Саморуков Г.С. 1983, Изв. КрАО., т.67, с.177.
- [2] Антропов Ю.Ф., В кн. «Новая техника в астрономии», 1972, вып.4, с.75–77.
- [3] Афанасьев В.Л., Балега Ю.Ю., Грудзинский М.А., Кац Б.М., Маркелов С.В., Нощенко В.С., Цуккерман И.И., Техн. средств связи, сер. Техника телевидения, 1987, вып.5, с.13.
- [4] Балега И.И., Верещагина Р.Г., Маркелов С.В., Небелицкий В.Б., Сомов Н.Н., Сомова Т.А., Спиридонова О.И., Фоменко А.Ф., Фоменко Л.П., Чепурных Г.С., 1979, Астрофизические исслед. (Изв. САО АН СССР), т.11, с.248.
- [5] Baranne A. and Duchesne M., in *Proc. ESO CERN Conference on Auxiliary Instrumentation for Large Telescopes*, Ed. by S. Lautsen and A. Reiz. (ESO/CERN, Geneva, Switzerland, 1972), p. 241.
- [6] Белороссова Т.С., Максутов Д.Д., Мерман Н.В., Соснина М.А., *Известия ГАО в Пулкове*, 1964, Т. 23, вып.5, №175, с.162–166.
- [7] Березин В.Ю., Зуев А.Г., Кирьян Г.В., Рыбаков М.И., Хвиливицкий А.Т., Ильин И.В., Петров П.П., Саванов И.С., Шербаков А.Г., 1991, Письма в АЖ, т.17, с.953–960.
- [8] Бируля и др., 1993 Birulya T.A., Mikhailov D.K., Sheglov P.V., *The Messenger*, No.71, March 1993, p.57.
- [9] Боуэн, 1952, Bowen I.S. *The Spectrographic Equipment of the 200-inch Hale Telescope*, *Astrophysical Journal*. 1952. V.116. No.1. P.1–7.
- [10] Валявин Г.Г., Галазутдинов Г.А., Кудрявцев Д.О., Драбек С.В., Опволоконный спектрограф-поляриметр БТА (проект). Н.Архыз, 2003. 48с.
- [11] Валявин и др., 2014. Valyvin G.G., Vychkov V.D., Yushkin M.V. et al., *Astrophys.Bull*, 2014, V.69, N.2, p.224-239.
- [12] Варшалович Д.А., Панчук В.Е., Иванчик А.В., 1996, Письма в АЖ, т.22, с.8–16.
- [13] Васильев А.С., 1976, Изв. КрАО, т.55, с. 224.
- [14] Васильев А.С., Евзеров А.М., Лобачев М.В., Пейсахсон И.В., 1977, Оптико-механич. промышл., вып.2, с.31.
- [15] Галазутдинов Г.А., 1992, Препринт САО, No.92.
- [16] Герасимов Ф.М., Современные дифракционные решетки. Часть I. Методы изготовления, Оптико-механическая промышленность, 1965, вып.10, с.33–49.
- [17] Герасимов Ф.М., Тельтевский И.А., Спизарский С.Н., Несмелов С.В., Оптико-механическая промышленность, 1957, вып.4, с.56–60.
- [18] Глаголевский Ю.В., Чунтонов Г.А., Найденов И.Д., Романюк И.И., Рядченко В.П., Борисенко А.Н., Драбек С.В. 1979, Сообщения САО, вып.25, с.5–16.
- [19] Глаголевский Ю.В., Клочкова В.Г., Копылов И.М., *Астрон.ж.*, 1987, 64, с.360–366.
- [20] Гриффин (Griffin R.F.), *Astrophys. J*, 1967, V. 148, P. 465–476.
- [21] Гриффин и Ганн (Griffin R., Gunn J.E.), 1974, *Astrophys.J.*, v.191, p.545.
- [22] Гусев О.Н., Зандин Н.Г., Лобачев М.В., Оптико-механич. промышл., 1976, вып.12, с.63.
- [23] Данэм (T.Dunham, Jr.) *Vistas in Astronomy*, 1956, v.2, p.1223–1249.
- [24] Додонов С.Н. Астрофизические исследования (Изв. САО АН СССР), 1985, т. 20, с.157–161.
- [25] Драбек С.В., Копылов И.М., Сомов Н.Н., Сомова Т.А., 1986, Астрофизические исслед. (Изв. САО АН СССР), т. 22, с. 64.
- [26] Зандин Н.Г., Гусев О.Н., Пейсахсон И.В., 1977а, Оптико-механич. промышл., вып.6, с.20.
- [27] Зандин Н.Г., Колесников А.Е., Пейсахсон И.В., Лобачев М.В., 1977б, Оптико-механич. промышл., вып.2, с.34.
- [28] Иванов и др., (Ivanov A.A., Panchuk V.E., Shergin V.S.), Preprint SAO, N155, 2001.
- [29] Киппер и Клочкова (Kipper T.A., Klochkova V.G.), 1987, *An atlas of the spectrum of Aldebaran 4000-6720*. Tallinn, Valgus, p.1–50.
- [30] Клочкова, 1997. <https://www.sao.ru/hq/ssl/>
- [31] Klochkova V.G., *Astrophysical Bulletin*, 2014, V. 69, Is. 3, pp.279–295.
- [32] Клочкова В.Г. 2016, статья в данном сборнике.
- [33] Клочкова и Галазутдинов, (Klochkova V.G., Galazutdinov G.A.), Preprint SAO, 1991, No.71, p. 2–20.

- [34] Клочкова В.Г., Копылов И.М., *Астрон. ж.*, 1986, 63, с.240–245.
- [35] Клочкова В.Г., Панчук В.Е., *Препринт САО*, 1991а, No.70.
- [36] Клочкова В.Г., Панчук В.Е., 1991б, *Астрофиз. исслед. (Изв.САО)*, т. 33, с.3.
- [37] Клочкова и Панчук, (Klochkova V.G., Panchuk V.E.), *Bull. SAO*, 1997, v.44, p.39–42.
- [38] Klochkova V.G., Panchuk V.E., *Astronomy Reports*, 2016, V. 60, Is. 3, pp.344–355.
- [39] Клочкова В.Г., Панчук В.Е., Рядченко В.П., *Письма в Астрон.ж.*, 1991, т.17, с.645.
- [40] В.Г. Клочкова, С.В. Ермаков, В.Е. Панчук, Н.С. Таволжанская, М.В. Юшкин, *Препринт САО*, No.137, 1999.
- [41] Клочкова В.Г., Ермаков С.В., Панчук В.Е., Таволжанская Н.С., *Препринт САО*, No.152. 2000.
- [42] Klochkova V.G., Panchuk V.E., Yushkin M.V., Miroshnichenko A.S., *Astronomy Reports*, 2004, V.48. No.4. P. 288–300.
- [43] Klochkova V.G., Panchuk V.E., Yushkin M.V., Nasonov D.S., *Astrophysical Bulletin*, 2008, V. 63, Is. 4, pp.386–394.
- [44] Конни др. (Connes J., Connes P., Maillard J.P.) *Atlas des spectres dans le proche infrarouge de Venus, Mars, Jupiter et Saturne*. Paris. 1969.
- [45] Кононов В.К., Клочкова В.Г., Панчук В.Е. 1996, *Препринт САО*, No.15Т, с.1–19.
- [46] Копылов И.М. и Стешенко Н.В., *Изв. КрАО*, 1965, т.33, с.308-314.
- [47] Коссова Н.Ф., Нижин А.М., Смирнова А.В., *Оптико-механическая промышленность*, 1958, вып.8, с.35–39.
- [48] Кулагин Е.С., *Астрономический журнал*, Т.57, 1980, С.200-210.
- [49] Кукушкин и др., 2016. D. Kukushkin, D. Sazonenko, A. V. Bakholdin, G.G. Valyavin, *Proceedings SPIE*. 2016.9908-240.
- [50] *Курс астрофизики и звездной астрономии*. Т.1. Под ред. акад. А.А.Михайлова, изд. 2-е, перераб. и дополн., Л., ФМЛ «Наука», 1973, 608стр.
- [51] Леон-Саваль и др., (Leon-Saval S., Birks T.A., Bland-Hawthorn J., Englund M.) 2005, *Opt. Lett.* 30. 2545.
- [52] Линник В.П., *Новая техника в астрономии*. Вып.1. Под ред. О.А.Мельникова, Наука, Ленинград. 1961. с.176.
- [53] Лобачев М.В., *Астрофиз. исследования (Известия САО)*. 1978. вып.10. с.61–69.
- [54] Лобачев М.В., Якушнова Л.Е., *Астрофиз. исследования (Известия САО)*, 1977, вып.9. с.99–107.
- [55] Меркулов А.В., *Известия ГАО*, 1960, т. 21, вып. 5, с. 35–72.
- [56] Монин и Панчук, (Monin D.N., Panchuk V.E.), *Pis'ma Astron. Zhurn.*, 2002, v.28, p. 940–946.
- [57] Найденев (Najdenov I.D.), 1998, *Bull. SAO*, v.45, p.117–119.
- [58] Najdenov I.D., Panchuk V.E., Yushkin M.V., *Astrophysical Bulletin*. 2007, V. 62, No. 3, P.296–299.
- [59] Панчук В.Е. 1984, *Сообщения САО АН СССР*, вып.40, с.13-19.
- [60] Панчук, 1998. Panchuk V.E., *Bulletin of SAO*, 1998, V. 44, P. 65-70.
- [61] Панчук В.Е., 2000, *Препринт САО*, No.144.
- [62] Панчук В.Е., *Препринт САО*, 2001, No.154.
- [63] Panchuk V. E., Afanas'ev V. L., 2011, *Astrophys. Bull.*, V. 66, Is. 2, pp.233-254.
- [64] Панчук В.Е., Клочкова В.Г., В кн. "Специальная астрофизическая обсерватория. 40 лет" Нижний Архыз. 2006. С.32-67.
- [65] Панчук В.Е., Клочкова В.Г., Галазутдинов Г.А., Рядченко В.П., Ченцов Е.Л., 1993, *Письма в Астрон. журн.*, т.19, с. 1061.
- [66] Панчук и др., (Panchuk V.E., Najdenov J.D., Klochkova V.G., et al.), *Bull. SAO*, 1998а, v. 44, p. 127-131.
- [67] Panchuk V.E., Yermakov S.V., Bondarenko Yu., *Bull. SAO*, 1998б, v. 44, p. 132.
- [68] Панчук В.Е., Клочкова В.Г., Найденев И.Д., Витриченко Э.А., *Препринт САО*, No.139, 1999.
- [69] Панчук В.Е., Клочкова В.Г., Юшкин М.В., Найденев И.Д., Ермаков С.В., *Препринт САО*, No.159. 2001.
- [70] Панчук В.Е., Юшкин М.В., Найденев И.Д., *Препринт САО РАН № 179*. 2003. С.1-20.
- [71] Панчук В.Е., Клочкова В.Г., Юшкин М.В., В кн. *Методы спектроскопии в современной астрофизике*. Под ред. Л.И.Машонкиной и М.Е.Сачкова. М., Янус-К, 2007. с.166-177.

- [72] Панчук В.Е., Клочкова В.Г., Юшкин М.В., Найденов И.Д., Оптический журнал, 2009а, Т. 76, №2. С.42-55.
- [73] Panchuk V. E., Nasonov D. S., Yushkin M.V., *Astrophys. Bull.*, 2009б, V. 64, Is. 3, pp.286-295.
- [74] Panchuk V.E., Klochkova V.G., Yushkin M.V., Yakopov M.V., *Astrophys. Bull.*, 2009в, V. 64, No. 4, P. 392-400.
- [75] Панчук В.Е., Юшкин М.В., Якопов М.В., *Астрофиз. бюлл.*, 2011, т. 66, №3, с. 382–399.
- [76] Панчук и др., Panchuk V.E., Chuntunov G.A., Naidenov I.D., *Astrophys. Bull.*, 2014а, V. 69, No.3, P.339-355.
- [77] Panchuk V., Yushkin M., Fatkhullin T., Sachkov M., *Astrophysics and Space Science*, 2014б, vol. 354, Is. 1, pp.163-168.
- [78] Panchuk V.E., Yushkin M.V., Klochkova V.G., Yakopov G.V., Verich Yu.B., *Astrophys. Bull.*, 2015а, v.70, N.2, p.339-355
- [79] Панчук В.Е., Клочкова В.Г., Сачков М.Е., Юшкин М.В., *Астрономический вестник*, 2015б, т. 49, №6, с. 1-10.
- [80] Панчук В.Е., Клочкова В.Г., Сачков М.Е., Верич Ю.Б., Юшкин М.В., Якопов Г.В., 2015в. Тезисы международной конференции SMT-2015, 19 - 22 октября 2015 г., Нижний Архыз, С.70.
- [81] Панчук В.Е., Клочкова В.Г., Комаров В.В., Марченко Д.В., 2015г., Тезисы международной конференции SMT-2015, 19 - 22 октября 2015 г., Нижний Архыз, С.69.
- [82] Панчук В.Е., Верич Ю.Б., 2015д, Тезисы международной конференции SMT-2015, 19 - 22 октября 2015 г., Нижний Архыз, С.66.
- [83] В.Е. Панчук, Г.В. Якопов, М.В. Юшкин, 2016а. Патент РФ, RU 2572460 С1, опубликовано 10.01.2016, действует с 30.09.2014.
- [84] Panchuk V.E., Yushkin M.V., Klochkova V.G., Sachkov M.E., *Proceedings SPIE*. 2016б. 9908-263.
- [85] Панчук В.Е., Клочкова В.Г., Юшкин М.В., Якопов Г.В., Верич Ю.Б., *Известия вузов. Приборостроение*. 2016в.
- [86] Робертсон и Блэнд-Хауторн (J. Gordon Robertson and Joss Bland-Hawthorn), *Proceedings SPIE*. 2012. Vol. 8446 844623-1.
- [87] Сазоненко и др., 2016. D. Sazonenko, D. Kukushkin, A.V. Bakholdin, G.G. Valyavin, *Proceedings SPIE*. 2016. 9908-241.
- [88] Сейфарт и др., 2016. arXiv:1606.07140v1 (astro-ph.IM) 22 Jun 2016.
- [89] Сомов и др., (Somov N.N., Somova T.A., Najdenov I.D.), *A&A*, 1998, v.335, p.583-586.
- [90] Феллгетт, Р.В., Fellgett. *OpticaActa*, 1955, V. 2, P. 9-16.
- [91] Хаббард и др., Hubbard E.N., Angel J.R.P., Gresham M.S., *Astrophys. J.*, 1979, 229, 1074.
- [92] Штоль В.Г., Бычков В.Д., Викульев Н.А., Георгиев О.Ю., Глаголевский Ю.В., Драбек С.В., Найденов И.Д., Романюк И.И., 1985, *Известия САО*, т.19, с. 66.
- [93] Эдельштейн и др., 2012. J. Edelstein, D.J. Erskine, M. Sirk, A. Vanderburg, E.H. Wishnow, *Ground-based & Airborne. Instr. Astr. IV*, July 1-6, 2012, Amsterdam, Netherlands, SPIE 8446, paper 177, Ed. Ian McLean, S. Ramsay, Hideki Takami.
- [94] Юшкин М.В., Клочкова В.Г., Препринт САО РАН, 2004, No. 206, с. 1-21.
- [95] Юшкин и др., (Yushkin M.V., Fathullin T.A., Panchuk V.E.), *Astrophys. Bull.*, 2016а, V.71, No.3.
- [96] Yushkin M., Panchuk V.E., Gracia Belén Perea Abarca, Pablo Marcos-Arenal, Mikhail Sachkov, Ana Inés Gómez de Castro, *Proceedings SPIE*. 2016б. 9905-143.
- [97] Якопов М.В., Якопов Г.В., Панчук В.Е., Юшкин М.В., 2013. Патент РФ, RU 2484507 С2, опубликовано 10.06.2013, действует с 17.08.2011.

От юбилея к юбилею: радиометры континуума РАТАН-600 за 10 лет

Нижельский Н.А.,
заведующий ЛРК, к.ф.-м.н.; nizh@sao.ru

Цыбулев П.Г.,
старший научный сотрудник ЛРК; к.т.н.; peter@sao.ru

Данная публикация является продолжением статьи, написанной к 40-летию САО РАН «Долгая дорога радиометров сплошного спектра» и вошедшей в предыдущий юбилейный сборник. В ней был отражен тернистый путь создания радиометрических приемных комплексов для РАТАН-600, так как элементная база для изготовления высокочувствительных устройств в те годы была очень громоздкой и ненадежной (лампы, электровакуумные приборы, источники питания). Далее мы кратко расскажем о новых разработках лаборатории радиометров континуума РАТАН-600.

ПРОЕКТ «ОКТАВА» ДЛЯ РАБОТЫ В УСЛОВИЯХ ПОМЕХ



Рис. 28. А.Б. Берлин и П.Г. Цыбулев за отладкой входного блока «Октавы».

Основные проблемы в дециметровом диапазоне радиотелескопа РАТАН-600 связаны с возрастанием уровня электромагнитных помех от телевидения, мобильной связи, локаторов и др. Трехчастотный первичный облучатель на резонаторах бегущей волны с совмещенными фазовыми центрами разработки В.Н. Дикого (г. Санкт-Петербург) не позволяет отдельно перестраивать один из трех вложенных друг

в друга облучателей из-за взаимозависимости их габаритов и сдвигать полосу приема одного из радиометров на свободное от помех место.

Предварительный мониторинг диапазона 0.5–3.0 ГГц на приобретенной в Германии сканирующей аппаратуре фирмы «Rohde & Schwarz» показал, что возможна эффективная отстройка от помех при наличии сверхширокополосного входного блока, включающего облучатель и УВЧ на основе НЕМТ-усилителя с применением высокоселективных фильтров после помехоустойчивого малошумящего усилителя.

В 2006 г. были начаты работы по проекту «Октава» (рис. 28) на основе заказанного в Швеции (Чалмерский технологический университет) сверхширокополосного облучателя типа «Eleven» и сопряженного с ним малошумящего усилительного блока нашей разработки. Предполагалось объединить три радиометра дециметрового диапазона ($\lambda\lambda 13, 30$ и 50 см), а затем на этом же принципе построить три радиометра сантиметрового диапазона, но уже с охлаждаемым входным блоком. Пока работы по проекту «Eleven» находятся в стадии исследований. Мощный уровень помех в дециметровых диапазонах волн, большой уровень задних лепестков широкополосной антенны «Eleven» и проблемы насыщения входных широкополосных усилителей – все это потребовало вернуться к узкополосному приему.

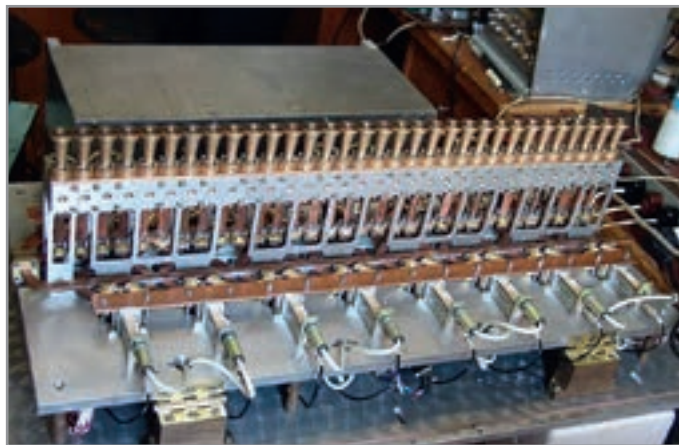


Рис. 29.
16-канальная
радиометрическая
система МАРС-3.

К настоящему времени разработаны и введены в штатные наблюдения два радиометра диапазона 2.21–2.29 ГГц для радиометрических комплексов вторичных зеркал №1 и 2 с первичными облучателями, спроектированными и изготовленными специально для них. Радиометры построены на неохлаждаемых усилителях по схеме «радиометр полной мощности». Аппаратура для исследования радиоконтинуума (сканирующий приемник помех, спектроанализаторы) позволила тщательно изучить помеховую обстановку и выбрать для данного радиометра оптимальный диапазон с минимальным уровнем помех шириной только 80 МГц. Дополнительно ведутся исследования свободного от помех «окна прозрачности» в диапазоне 1–1.5 ГГц.

Таким образом, более чем шестилетний перерыв наблюдений в дециметровых диапазонах завершен, и в настоящее время на РАТАН-600 есть возможность проводить измерения в этом диапазоне. Новые радиометры имеют возможность активного

подавления импульсных помех. Эта методика [1] разрабатывалась с конца 90-х гг. при активном участии П.А. Фридмана.

ПРОЕКТ «МАРС-3»

16-канальная матричная радиометрическая система МАРС-3 была создана в качестве основного радиометра для наблюдений по программе «Генетический Код Вселенной (рук. академик Ю.Н. Парийский). Сначала она была установлена на вторичном зеркале № 5, где были проведены первые эксперименты. Одновременно разрабатывались методики многочастотной чистки материала, полученного на волне 1 см в многосуточных наблюдениях по этой программе, от радиоизлучения атмосферы.

В 2009 г. матричная система была перенесена в фокус вторичного зеркала №2, где эксперименты по поиску анизотропии микроволнового фона были продолжены. В 2012 г. был выполнен шестой цикл наблюдений по этой программе. Обработка полученных данных продолжается. Особенности реализации системы МАРС-3 (рис. 29) изложены в работе [2].

ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ НЕОХЛАЖДАЕМЫЕ РАДИОМЕТРЫ

Важное направление работы последних лет связано с переводом радиометрических комплексов континуума на новую элементную базу – неохлаждаемые транзисторные усилители на гетероструктурах.



Рис. 30. Радиометрический модуль диапазона 6.5 см НППФ «Микран» (г. Томск).

В 1979 г. впервые в отечественной радиоастрономии на РАТАН-600 для достижения предельно низких шумов усилителей были применены микрокриогенные системы замкнутого гелиевого цикла, которые охлаждали входные части радиометров до 15°К. Более 30 лет на радиотелескопе круглосуточно работали четыре микрокриогенные системы, произведенные объединением «Сибкриотехника» (г. Омск), проводились ремонтные и профилактические работы, приобретались новые системы для замены выработавших свой ресурс, составлявший 15 тысяч часов или около 2 лет непрерывной работы. В быту – это эквивалент пробегу автомобиля 900000 км при средней скорости 60 км/ч. (!). Сокращение финансирования не позволяло более приобретать эти дорогостоящие системы или заключать договоры на их восстановление.

Появление современных неохлаждаемых транзисторных усилителей на гетероструктурах открыло новые возможности. С их помощью можно получить низкие шумовые параметры и высокую надежность работы приемных комплексов без применения охлаждения («теплые» усилители). Было проведено сравнение параметров и стоимости неохлаждаемых усилителей многих фирм, как отечественных, так и зарубежных. По большинству характеристик самыми подходящими для использования в радиометрах оказались малошумящие усилители (МШУ) НПФ «Микран» (г. Томск). Первые входные широкополосные МШУ диапазонов 4.8, 11.2 и 21.7 ГГц по нашему техническому заданию в «Микране» были разработаны в 2009 г. Высокая чувствительность с применением этих устройств успешно реализована на семи радиометрах РАТАН-600 (рис. 30). Подобные работы будут продолжены для реализации двухлучевой схемы приема. Последняя разработка этой фирмы для РАТАН-600 – полный радиометр модульной конструкции диапазона 6.5 см, аналогично примененной в МАРС-3.

РЕКОНСТРУКЦИЯ ТРЕХЧАСТОТНОГО КОМПЛЕКСА «ЭРИДАН»

Входные «теплые» МШУ были использованы при реконструкции трехчастотной криогенной радиометрической системы «Эридан», разработанной в НИИ «Сатурн» (г. Киев) для РАТАН-600 еще в 80-х годах прошлого века. Три ее радиометра были размещены в общем криостате, охлаждавшемся жидким азотом. Усилители системы были построены на устаревших полевых транзисторах и уже не обеспечивали требуемой чувствительности даже на азотном уровне температур. Было решено отказаться от громоздкого азотного криостата и изменить конструкцию входных частей приемной системы для неохлаждаемого варианта. Прогресс в разработках «теплых» МШУ позволил получить хорошую чувствительность и без охлаждения входных каскадов. Во всех трех радиометрах реализована модуляционная схема с переключателями с «магнитной памятью» на входе.

Однолучевой прием обеспечивается с помощью компьютера системы сбора данных путем отдельной регистрации сигналов обоих полупериодов модуляции. Единый входной блок на три частоты разрабатывался и изготавливался с использованием опыта, полученного при эксплуатации матричной системы МАРС-3. При такой компоновке термостатируются не только усилители и переключатели, но и все входные тракты в целом.

Радиометр успешно прошел лабораторные испытания и был установлен на облучателе №2 в дополнение к 16-канальной матричной системе МАРС-3. В настоящее время он активно используется во многих наблюдательных программах вместе с приемным комплексом облучателя №1.

МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМ РЕГИСТРАЦИИ ДАННЫХ

Вместе с развитием радиометрических комплексов проводилась модернизация систем сбора данных и управления радиометрами. В 2012 г. была введена в строй система нового поколения ER-DAS [3]. В ее разработке использовался опыт, накопленный при создании более ранних систем. ER-DAS (рис. 31) вводилась поэтапно на всех радиометрических комплексах, включая и МАРС-3. Мы получили универсальную систему для всех радиометров континуума РАТАН-600. Она соответствует всем требованиям, предъявляемым к радиоастрономическим наблюдениям, и обладает предельно низкими шумами, возможностью встраивания в

радиометр, микропроцессорными средствами для предварительной обработки сигналов в реальном времени, сетевой архитектурой, поскольку радиометр и центр сбора данных обычно разделены существенным расстоянием.

РЕАЛИЗАЦИЯ ПРЕДЕЛЬНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ РАДИОМЕТРОВ

Радиометры, используемые на РАТАН-600 для наблюдений в сантиметровом диапазоне непрерывного спектра, традиционно строились либо по модуляционной схеме, либо по схеме радиометра с добавлением шумов. Последняя позволяла перенести модулятор со входа за первый каскад усиления с некоторым выигрышем по шумам, но с ухудшением стабильности и потерей двухлучевого приема. Попытки построить радиометр по схеме приема полной мощности давали результат в 5–10 раз хуже по сравнению с модуляционной схемой из-за наличия фликер-шума вида $1/f$.



Рис. 31. Встраиваемая систем сбора данных и управления радиометров континуума.

Путем долгих и тщательных экспериментов по изучению природы шумов в отдельных элементах радиометров П.Г. Цыбулевым были получены обнадеживающие результаты по освоению нового, ранее не применявшегося из-за несовершенства элементной базы режима работы радиометров сантиметрового диапазона, а именно - регистрации полной мощности принимаемого излучения. Исследования шумов в радиометрах и в применяемой элементной базе показали, что сильным источником фликер-шума является детектор радиометра. Применение современных детекторов на неохлаждаемых усилителях дает возможность проводить наблюдения на РАТАН-600 с радиометрами, построенными по схеме полной мощности, причем с расчетной чувствительностью [4]. Они имеют наилучшую чувствительность среди других типов радиометров, превосходя вдвое модуляционные радиометры.

Теоретическая чувствительность радиометров полной мощности была реализована на временных интервалах короче 20 с. В целом этого достаточно для

наблюдений на РАТАН-600 точечных источников на средних склонениях, угловой размер отклика которых равен размеру луча телескопа, то есть составляет 1–10 с на волнах 1.4–13 см.

С ОПТИМИЗМОМ СМОТРИМ В БУДУЩЕЕ

Представленные здесь разработки лаборатории радиометров континуума дают повод для оптимистичного взгляда в будущее. Ее коллективом проделана большая работа по модернизации радиоастрономической приемной аппаратуры на уровне, соответствующем современным технологиям, и заложен необходимый задел для дальнейшего развития комплекса радиометров РАТАН-600. Эти разработки позволяют увеличить в два раза число радиометров основных рабочих диапазонов, повысить долговременную стабильность работы радиометров, а также восстановить наблюдения в дециметровых диапазонах длин волн. Эти задачи решает коллектив ЛРК в составе Н.А. Нижельского, А.Н. Борисова, Ю.П. Джанибекова, Б.И. Карабашева, Д.В. Кратова, П.В. Призова, Р.Ю. Удовицкого, А.А. Хапаева и П.Г. Цыбулева.



Рис. 32. Ю.Н. Коновалов за сборкой очередного приемника.

БЛАГОДАРНОСТИ

Достижение вышеперечисленных результатов было бы невозможно без участия сотрудников опытного производства РАТАН-600, которые выполняли все механические работы, применяя все свое мастерство, умение, смекалку и многие другие качества. Особо следует отметить токаря С.С. Ермоленко, изготовившего все приспособления, оснастку, рупора, волноводы для МАРС-3 и других радиометров, руководителя механического участка А.П. Кравцова (пайка, сварка), Ю.Н. Коновалова, «золотыми» руками которого были смонтированы и отлажены все приемники (рис. 32, 33).

5 января 2015 г. не стало нашего старейшего и активнейшего сотрудника Александра Борисовича Берлина (рис. 28, 33), более 60 лет отдавшего разработке приемной радиоастрономической аппаратуры. Вместе с Д.В.Корольковым они заложили канонические принципы построения радиометров, которые на десятилетия стали руководством для инженеров и конструкторов не только в нашей обсерватории, но и в других институтах России и бывших союзных республик.



Рис. 33. А.Б. Берлин и Ю.Н. Коновалов на испытаниях сверхширокополосной антенны «Eleven».

ПУБЛИКАЦИИ

- [1] Цыбулев П.Г., Берлин А.Б., Нижельский Н.А., Мингалиев М.Г., Крапов Д.В., *Астрофизический бюллетень* 62, No 2, 208-217 (2007).
- [2] Берлин А.Б., Парийский Ю.Н., Нижельский Н.А., Мингалиев М.Г., Цыбулев П.Г., Крапов Д.В., Удовицкий Р.Ю., Смирнов В.В., Пилипенко А., *Астрофизический бюллетень* 67, No 3, 354-366 (2012).
- [3] Цыбулев П.Г., *Астрофизический бюллетень* 66, No 1, 118-133 (2011).
- [4] Цыбулев П.Г., Дугин М.В., Берлин А.Б., Нижельский Н.А., Крапов Д.В., Удовицкий Р.Ю., *Астрофизический бюллетень* 69, No 2, 256-262 (2014).

Геодезические измерения на радиотелескопе РАТАН-600

Жаров В.И.,
руководитель ГАИ, ведущий инженер; vit@sao.ru

ВВЕДЕНИЕ

Формирование поверхности антенны переменного профиля (АПП) по окружности или параболе производится путем выставления каждого элемента главного зеркала (ГЗ) в расчетное положение. Для наблюдений нужна высокая точность отражающей поверхности главного и вторичных зеркал радиотелескопа, что требует их регулярной юстировки и проверки положения. Контроль качества отражающей поверхности АПП проводится постоянно. В большинстве случаев эта работа выполняется геодезическими методами с применением различных измерительных приборов.

Опыт эксплуатации АПП показывает, что юстировка, геометрический контроль состояния отдельных элементов и составляющих радиотелескопа требуют не только миллиметровой точности. Так, для контроля радиальных рельсов достаточно точности 1-2 мм, для юстировки отдельных элементов АПП точность должна быть на порядок выше, а для поверхности элементов надо проводить измерения с микронной точностью. Из-за непрерывных наблюдений геодезические измерения обычно выполняются в техническое и профилактическое время. Их можно проводить частями как, например, проверку кинематических поправок.

Кроме геодезических измерений применяются и радиотехнические методы юстировки антенны. Радиотехнический или автоколлимационный метод (А.А. Стоцкий) с использованием модернизированного двухчастотного юстировочного комплекта радиометров (И.В. Берлизев) обладает некоторыми преимуществами по точности юстировки ГЗ и скорости проведения работ. Тем не менее, применение геодезических методов по-прежнему остается актуальным [1].

Измерения положения пунктов опорной геодезической сети для контроля ее стабильности, а также знаков для установки облучателей на заданный фокус проводятся ежегодно. Их результаты используются для привязки опорных щитов при геодезической или радиотехнической юстировке и для установки облучателей при наблюдениях.

Оборудование, имеющееся на радиотелескопе, несмотря на свою высокую точность, отстает по производительности от современных прецизионных измерительных систем. Приходится постоянно его совершенствовать, чтобы проводить юстировку и контроль поверхности АПП более качественно и в более короткие сроки.

СОТРУДНИЧЕСТВО СО СТОРОННИМИ ОРГАНИЗАЦИЯМИ

После завершения строительства радиотелескопа необходимо было провести большой объем работ по определению положения плановых пунктов опорной геодезической сети (ОГС) и контролю их стабильности. Основной вклад в разработку методов геодезических измерений внесли отдел специального применения геодезии Центральный НИИ геодезии, аэросъемки и картографии (рук. А.Г. Белевитин) и постоянно действующая на РАТАН-600 экспедиция ЦНИИГАиК (нач. А.П. Глумов).

Совместно с сотрудниками ЦНИИГАиК была разработана конструкция геодезических знаков и технология закладки ОГС. Благодаря тщательной разработке сети (рис. 34) и при постоянном совершенствовании методов измерений ее плановых пунктов уже не требуется привлечения экспедиции ЦНИИГАиК. Отметим, что определение положений плановых пунктов ОГС остается одной из самых ответственных задач.

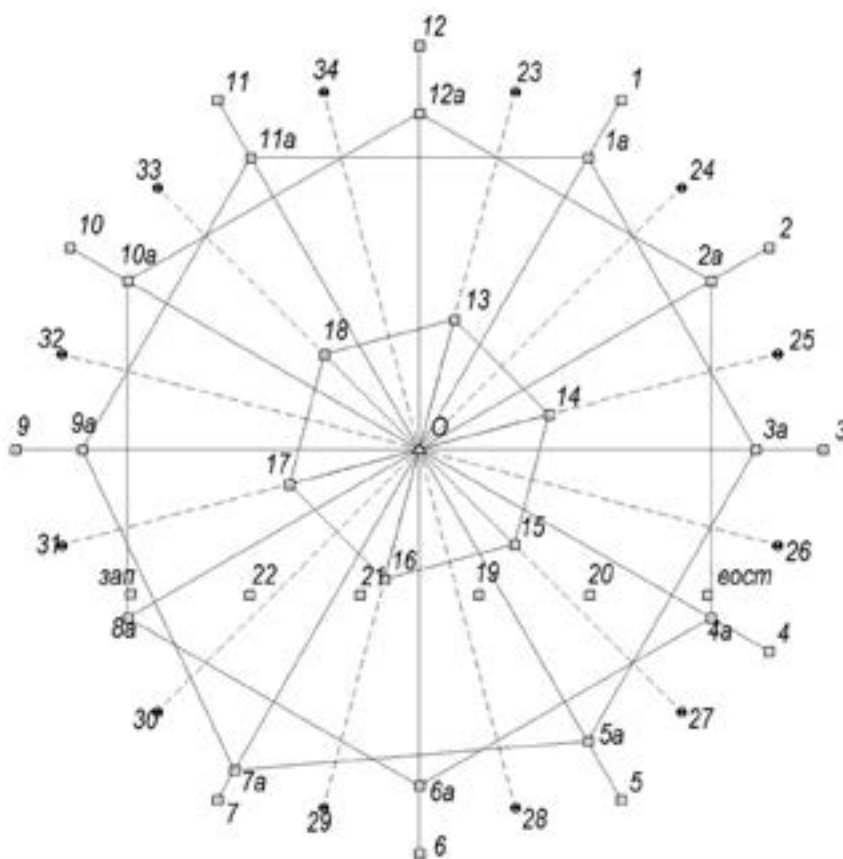


Рис. 34. Схема планово-высотных пунктов опорной сети РАТАН-600.

Передовые разработки ведущих производителей геодезического оборудования позволяют резко поднять эффективность и производительность измерений. Поэтому большое значение имеет внедрение на радиотелескопе современных измерительных систем, таких как лазерные трекеры и роботизированные прецизионные тахеометры. Это осуществляется в тесном сотрудничестве с организациями, зарекомендовавшими себя лидерами в области геодезических измерений. На радиотелескопе используется абсолютный лазерный трекер Leica AT402 (разработка фирмы LeicaGeosystems) с программным комплексом SpatialAnalyzer. Оборудование поставлено специалистами ООО «Промышленная геодезия». Инструмент даже в самых сложных условиях

показывает высокие точностные характеристики. Основные преимущества использования абсолютного лазерного трекера:

- повышение точности линейных измерений;
- юстировка и контроль положения элемента одним прибором;
- возможность в режиме реального времени проводить измерения и корректировку отражающей поверхности элементов;
- получаемые данные позволяют определять пространственное положение щитов, в частности, представительных площадок, по которым ведется юстировка, с учетом положения отражающей поверхности.

После внедрения новых измерительных систем приходится дорабатывать методики измерений отражающей поверхности главного и вторичных зеркал, отдельных элементов ГЗ и плоского отражателя (ПО). Из-за раскручивания регулировочных винтов работы по исследованию отражающей поверхности проводятся постоянно, включая и контроль азимутальных знаков для установки вторичного зеркала при наблюдениях на южном секторе совместно с ПО. Несмотря на то, что проведение таких работ затруднено из-за отсутствия прямой видимости знаков из центра радиотелескопа, они решаются благодаря использованию современных координатно-измерительных систем.

СОПРОВОЖДЕНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ И МОНТАЖНЫХ РАБОТ

При строительстве радиотелескопа сопровождение строительных и монтажных работ осуществлялось отделом радиоастрономии ГАО АН СССР и сотрудниками САО АН СССР. Были разработаны уникальные методики по разбивке фундаментов щитов кругового отражателя и самих щитов, по установке опорных балок кареток направляющих рельсов и самих кареток. Были проведены измерения наклона направляющих рельсов, ориентирования угломестных осей щитов и определения высотных отметок угломестных осей. Исследования проводились совместно со специалистами ЦНИИГАиК.

В настоящее время геодезическое сопровождение строительных работ выполняется при реконструкции рельсовых путей, контроле плано-высотного положения радиальных и дуговых рельсов, при замене реперных знаков для установки вторичного зеркала на радиальных рельсах и азимутальных знаков для установки вторичного зеркала на дуговых рельсах.

Проводятся работы по исследованию направляющих рельсов каждого элемента, определению его разворота из-за влияния направляющих рельсов и измерению прямолинейности движения щита. Выявляются элементы со значительными люфтами, после чего службе эксплуатации выдаются рекомендации по замене или профилактическому обслуживанию приводов элементов. Обеспечивается бесперебойный ввод в эксплуатацию элементов после их ремонта или профилактического обслуживания.

Проведена большая работа по нивелировке угломестных осей северного сектора и определению поправок щитов за разновысотность угломестных осей.

КОНТРОЛЬ ОТРАЖАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ АНТЕННЫ

Существовавшие при строительстве и начале эксплуатации РАТАН-600 методы геометрического контроля отражающей поверхности ГЗ позволяли корректировать поверхность с точностью 0.2–0.3 мм [2, 3]. Если для наблюдений на волне 3 см и более

этой точности достаточно, то для наблюдений в миллиметровом диапазоне точность отражающей поверхности должна иметь среднеквадратичную ошибку (СКО) $\sigma \pm 0.04 \lambda$ [4, 5]. Допуск на изготовление поверхности принят равным ± 0.2 мм. Для юстировки поверхности с такой точностью раньше использовался метод высокоточного нивелирования на стапеле нивелиром Ni-004 [6]. Он трудоемок и требует больших временных затрат, поскольку каждый щит надо снимать и перевозить в цех для юстировки. При этом не учитываются весовые деформации щита.

Был разработан метод нивелирования вертикальными лучами прибором вертикального проектирования PZL, при котором щита с места снимать не надо, но он требует значительных затрат по времени при перевозке и установке дополнительной оснастки. Также было разработано несколько методик юстировки поверхности щитов трубой измерительной визирной ППС-11, которую модернизировали под задачи радиотелескопа. С применением этих приборов проведена большая работа по проверке и корректировке отражающей поверхности щитов.

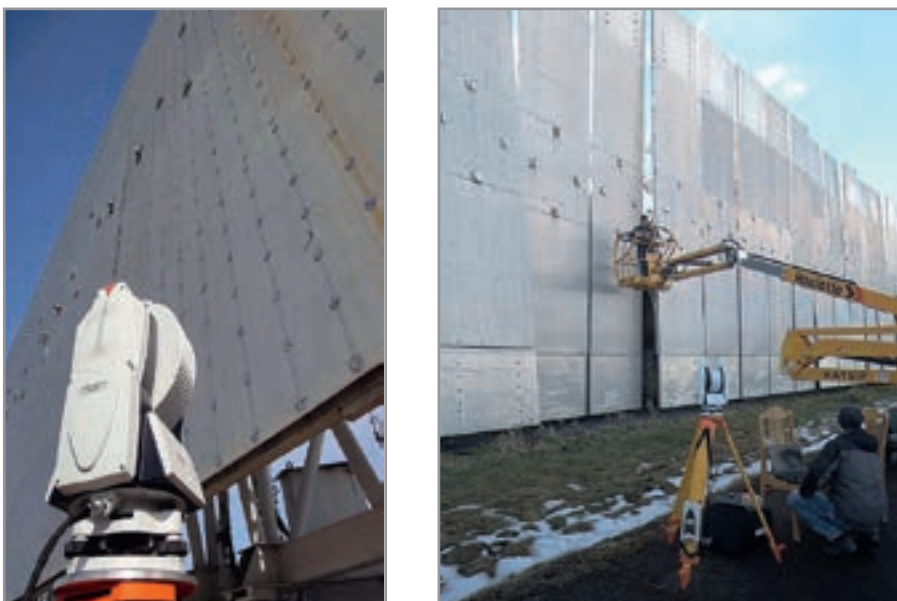


Рис. 35. Слева – предварительная оценка состояния отражающей поверхности элемента плоского отражателя; справа – юстировка поверхности южного сектора РАТАН-600.

Дополнительно была проведена фиксация регулировочных винтов, ухудшающего качество рабочей поверхности щита, специальными пружинками (разработка В.Б. Хайкина) для предотвращения их раскручивания. Работы с корректировкой и закреплением отражающей поверхности проведены на трех секторах ГЗ и на всех элементах ПО.

В настоящее время контроль и формирование отражающей поверхности отдельных элементов ГЗ производится трекером на рабочих углах наклона и без снятия щитов с места (рис. 35). Это особенно важно для мониторинга «старения» поверхности, что связано с температурными расширениями каркаса (фермы) щита, поломкой

фиксирующих пружинок, раскручиванием регулировочных винтов. Контроль проводится постоянно, полученные расхождения оцениваются и, если необходимо, корректируются. Для этого же исследуется влияние температурных деформаций фермы щита на состояние отражающей поверхности элемента, а также проводится контроль радиусов кривизны каждого элемента и стабильности отражающей поверхности. Обнаруженные в процессе исследования предельные отклонения исправляются регулировочными винтами (рис. 36).

Для формирования более качественной отражающей поверхности элемента АПП разработана модель щита с заданным радиусом кривизны и фиксированным расстоянием до представительных площадок, которые используются при проведении геодезической юстировки ГЗ. Модель позволяет проводить корректировку отражающей поверхности с учетом кривизны поверхности от 300 м в центре к 370 м на краях ГЗ [7] и с заданными углами наклона и разворота относительно представительных площадок.

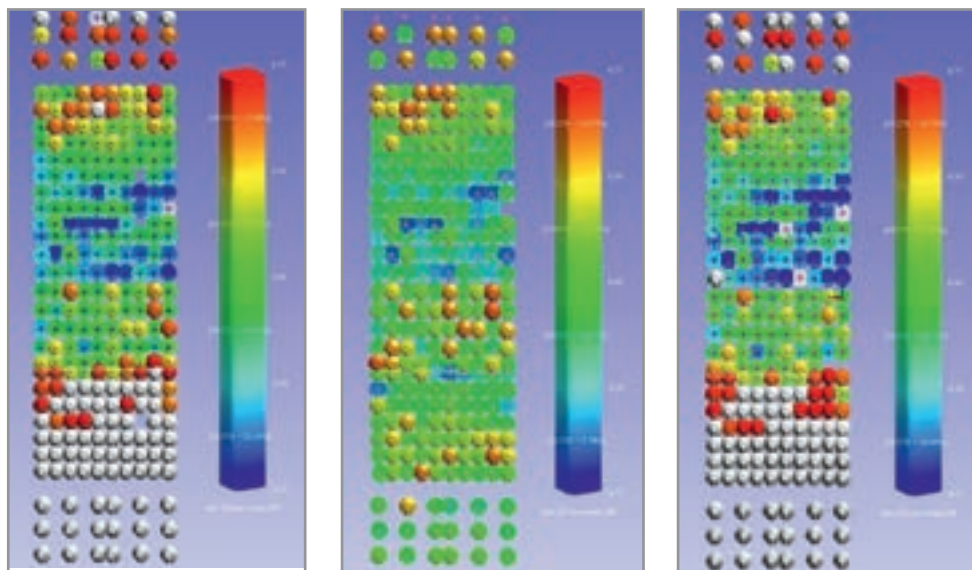


Рис. 36. Состояние поверхности элемента №262 главного зеркала АПП.

Использование современных координатно-измерительных систем резко сократило время на юстировку отражающей поверхности. Геодезические работы по контролю и корректировке поверхности отдельных элементов проводятся без выделения антенного времени. Даже при измерении отражающей поверхности элементов ПО, имеющих большой размер и большее количество регулировочных точек, применение трекера Leica AT402 существенно сокращает время, затраченное на измерения.

КОНТРОЛЬ И КОРРЕКТИРОВКА ПОВЕРХНОСТИ ВТОРИЧНЫХ ЗЕРКАЛ

Со временем отражающая поверхность вторичных зеркал ухудшается и требует проверки и корректировки. Струнно-оптический метод позволял получать высокую точность поверхности, но измерения проводились ночью, приходилось останавливать наблюдения на несколько дней, облучатель перекачивался на специально

оборудованную для этого площадку. Из-за большого количества времени, затрачиваемого на юстировку, трудоемкости проведения работ и наличия большого количества оснастки от него постепенно отказались.

Ранее применялся комбинированный струнно-оптический метод, в котором прямоугольные координаты опорных точек измерялись электронным тахеометром, а корректировка поверхности контролировалась при помощи оптического микрометра. В результате удавалось немного уменьшить ошибку поверхности, но желаемая точность не достигалась.

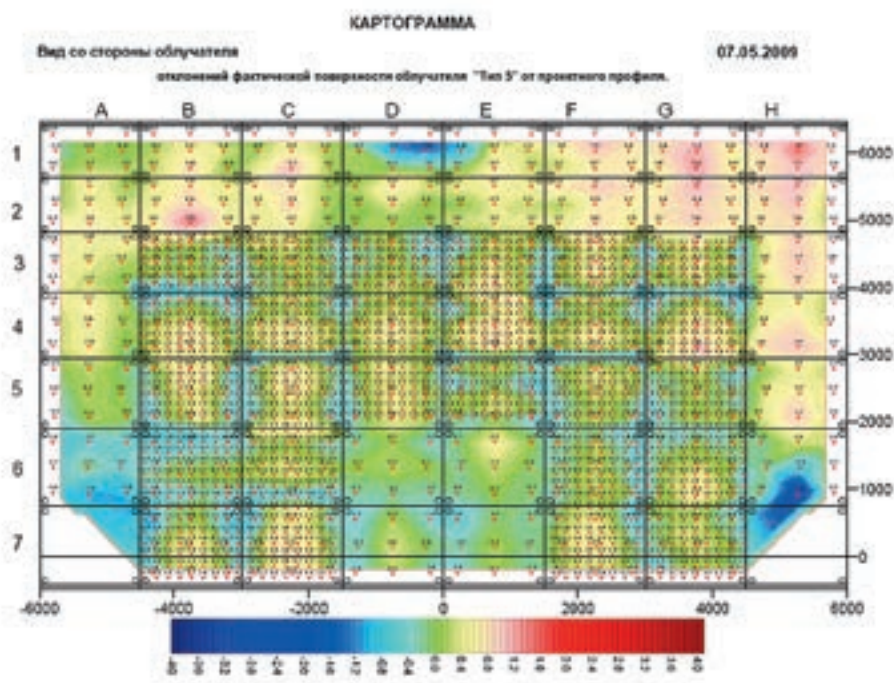


Рис. 37. Картограмма поверхности вторичного зеркала, СКО = 0.42 мм. На поверхности облучателя определено 1966 точек. При допустимом отклонении ± 0.2 мм в допуске оказывается 39% точек зеркала, вне допуска – 61%. Точность центральной части, исключая крайние и верхний ряды щитов, СКО = 0.36 мм. На центральной части облучателя определены 1506 точек. Минимальное отклонение: -1.20 мм, максимальное: +1.19 мм. Считая допустимым отклонение ± 0.2 мм, в допуске – 42%, вне допуска оказывается 58% точек зеркала.

При поддержке специалистов ЗАО «БумТехно» и ООО «Промышленная геодезия» под руководством В.В. Петрова с использованием тахеометра Leica TDA5005 и лазерного радара MV260 проведен комплекс работ по исследованию и повышению точности отражающей поверхности вторичных зеркал. Привлечение специалистов сторонних организаций со своими приборами и оборудованием для проведения таких работ экономически целесообразно из-за большой стоимости оборудования. В результате проведения работ удалось снизить СКО отражающей поверхности вторичного зеркала (рис. 37).

Дополнительно проведена оценка состояния отдельных панелей отражающей поверхности и их доработка методом шлифовки. В результате удалось снизить СКО панели с 0.32 мм до 0.24 мм (рис. 38). Также были проведены измерения по контролю термостабильности панелей и деформациям фермы вторичного зеркала из-за разности температур.

Совместно со специалистами ООО «Промышленная геодезия» проведены работы по исследованию центральной части отражающей поверхности облучателя №2. Полученное СКО 0.26 мм соответствует определенному ранее значению. Для уменьшения ошибки поверхности и для проверки углов наклона и разворота вторичного зеркала необходимы дополнительные исследования, что требует создания новых методик измерений, создание модели, привязанной к пунктам опорной сети или условной системе координат.

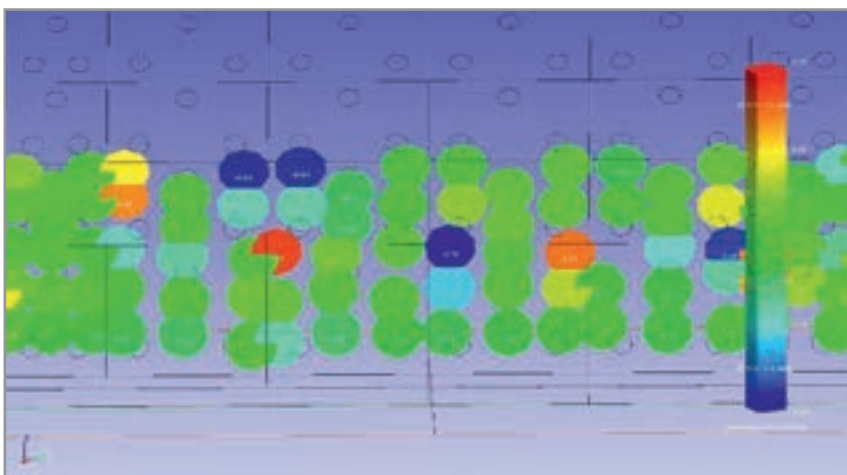


Рис. 38. Центральная часть поверхности вторичного зеркала.

ЮСТИРОВКА ПОВЕРХНОСТИ ГЛАВНОГО ЗЕРКАЛА

Формирование поверхности ГЗ производится как методами, использовавшимися еще при строительстве и начале эксплуатации телескопа, так и с применением новейшего геодезического оборудования. Определение мест нулей отсчетно-установочных устройств (ОУУ) по углу места проводится старыми методами с теми же приборами и оснасткой (модернизированный квадрант оптический на длинной базе), обладающими наилучшей на настоящее время точностью. Определение мест нулей (МО) по азимуту и радиусу проводится несколькими способами – визирной трубой с окулярным микрометром, угловыми измерениями с помощью высокоточного тахеометра и современной координатно-измерительной системой по новым методикам, причем по точности определения МО по радиусу предпочтительно использовать визирную трубу с окулярным микрометром. После определения мест нулей ОУУ по радиусу геодезическими методами для получения более качественной поверхности ГЗ проводится радиотехническая юстировка сектора. С использованием модернизированного двухчастотного радиометра разработана методика автоколлимационной юстировки без перевода элементов в полуавтоматически режим.

За счет отказа от перевода антенны в этот режим существенно сокращена продолжительность работ.

Геодезическая и автоколлимационная юстировки проводятся ежегодно, причем раз в несколько лет осуществляется полная геодезическая юстировка южного сектора (рис. 35, справа).

Юстировка поверхности главного зеркала проводится с использованием координатно-измерительной системы на базе трекера Leica AT402 с использованием знаков ОГС. Разработанная методика позволяет проводить юстировку сектора по частям с минимальным использованием антенного времени. Разрабатывается методика геодезической юстировки ГЗ с использованием автоматического режима управления антенной.

ЮСТИРОВКА ПЛОСКОГО ОТРАЖАТЕЛЯ

Ранее формирование поверхности плоского отражателя проводилось с использованием створных измерений. Эта методика предусматривает получение единого створа на всю длину ПО по измерениям участков по 24 щита. Таким образом удавалось получать единый створ со СКО от 0.2 до 0.3 мм при точности створа на участках лучше ± 0.2 мм [8].

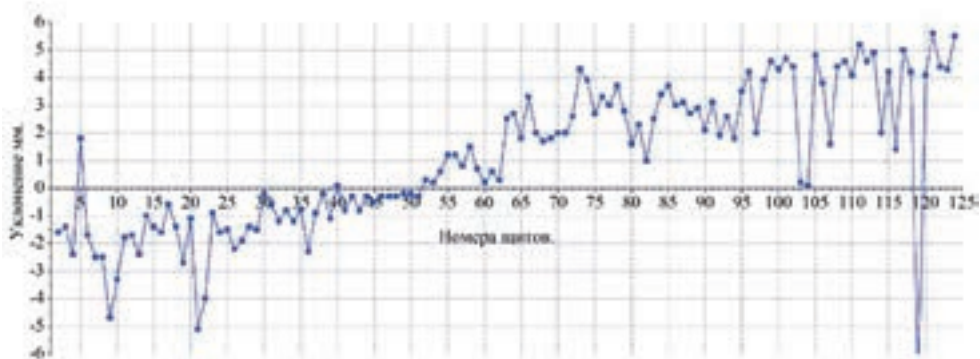


Рис. 39. Плановое положение элементов плоского отражателя.

При современной загруженности антенны радиотелескопа нет возможности проводить створные измерения для определения планового положения элементов ПО. Это потребовало бы остановки наблюдения на секторе радиотелескопа на 2–3 месяца. Поэтому используются другие методы. Так, створ задается плановыми знаками ОГС, и от них с помощью высокоточного тахеометра определяется положение каждого элемента. При этом нет необходимости использовать всю антенну, и юстировку можно проводить по частям в свободное от наблюдений время (рис. 35, слева). Так была проведена полная геодезическая юстировка и уменьшен разворот ПО. При юстировке поверхность ПО была выставлена в створ с азимутом $90^{\circ}00'00''$ с ошибкой положения каждого элемента 0.3 мм по радиусу и 0.3 мм по высоте (рис. 39). СКО по всем выставленным в створ щитам ПО, которые были измерены уже после проведения юстировочных работ, составила ± 0.24 мм, общий разворот относительно меридиана составил $2''$.

Из-за небольших подвижек элементов ПО на домкратах при эксплуатации и замене угломестных винтов элементов происходит общее ухудшение поверхности. Формирование поверхности ПО остается важной и ответственной задачей при геодезическом обеспечении наблюдений на южном секторе с ПО.

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ГЛАВНОГО ЗЕРКАЛА

Учет кинематических поправок в расчете уставок антенны остается актуальным. Проверка угломестных винтов и определение ошибок установки щитов после проведения регламентных работ или ремонта является важной частью методики повышения точности поверхности АПП.

В настоящее время разработана методика измерения ошибок установки щита по радиусу с использованием лазерного трекера Leica AT402. Это позволяет избавиться от некоторых независимых ошибок, таких, как ошибка наведения, ошибки наблюдателя, ошибки записи отсчетов в журнал.

Таблица 1. Сводка расхождений величины « Δ прямо-обратно» угломестных винтов после проведения регламентных работ 2010 г. для щитов, имеющих расхождение в секундах.						
калибровка	40"	50"	60"	70"	80"	>80"
2009 г.	55%	67%	57%	36%	23%	21%
2010 г.	37%	44%	31%	23%	8%	5%

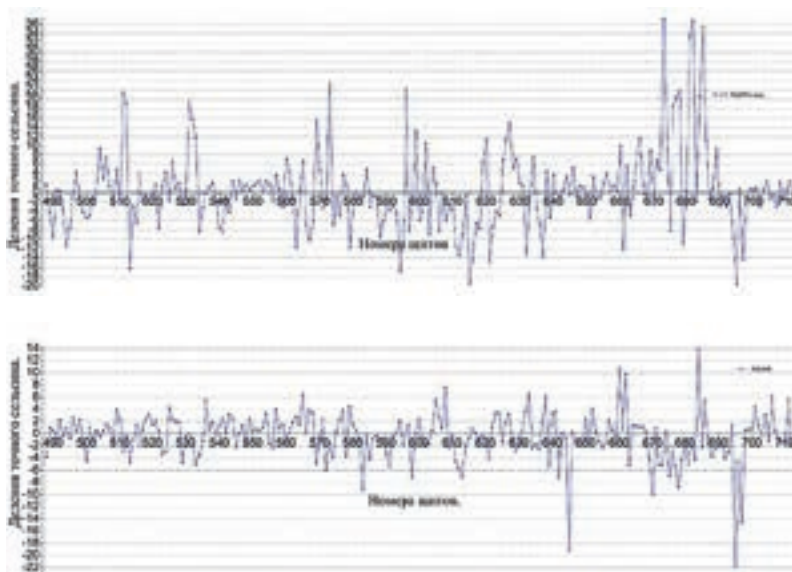


Рис. 40. Разность кинематических поправок радиальных винтов Δ в 2010–2015 гг. 10 дел. гр. сельсина (вверху) и 160 дел. гр. сельсина (внизу).

Основной принцип методики – измерение динамических характеристик элементов антенны, определение фактических установок щитов и сравнение их с теоретическими данными. Вычисление «кинематических» поправок и введение их в расчет уставок антенны позволяет получить более качественную отражающую поверхность ГЗ. Эта методика позволяет проводить измерения сразу на нескольких щитах. Управление антенной проводится в полуавтоматическом режиме. Разрабатывается методика измерений при управлении антенной в автоматическом режиме.

После проведения работ значительно повысилась точность установки элементов северного сектора по углу места. Так, в четыре раза (с 21% до 5%) сократилось число элементов, отклоняющихся по координатам более, чем на 80", и в 2–3 раза уменьшилось число элементов с неточностями в установке до 80". Для сравнения на рисунке 38 и в таблице 1 приведены результаты калибровки 2009 г. (рис. 40, сверху) и 2010 г. (рис. 40, внизу).

Поиск источников ошибок установки у элементов с большими отклонениями по координатам (>80") выявил влияние датчиков угломестных винтов и, в некоторых случаях, редукторов – из-за дефектов сборки. Для плоского отражателя это заметно улучшило точность установки.

Была выполнена проверка установки элементов с учетом кинематических поправок. Так точность установки элемента северного сектора составила 25" при ошибке установки в 0.8 деления точного сельсина. Точность АСУ составляет ± 0.6 деления точного сельсина, так что можно с уверенностью сказать, что проектная точность установки элементов реализуется, и поправки работают правильно. Угломестные поправки были полностью обновлены в 2009 г., а с 2010 г. обновляются поправки только тех элементов АПП, где проводились регламентные или ремонтные работы.

В результате ввода обновленных кинематических поправок в расчет уставок антенны на северном секторе повысилась точность установки элементов по радиусу. Работы проводятся и на южном секторе. Оперативность получения кинематических поправок трекером имеет большое значение при интенсивной эксплуатации антенны.

ГЕОДЕЗИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

Кроме работ по повышению точности отражающей поверхности ГЗ и вторичных зеркал проводится периодическая проверка и корректировка установочных уровней, углов наклона и разворота вторичных зеркал, положение и корректировку рупоров на фокальной линии вторичного зеркала, исследование траектории движения вторичного зеркала на дуговых путях южного сектора, исследование точности установки облучателя на заданный азимут и другие текущие работы.

Для реализации метода угловой засечки, который используется при определении радиальных МО, были проведены измерения азимутов на все знаки ОГС, а также вычислены значения азимутов для центра каждого элемента южного сектора. Полученные значения используются при юстировке отдельных элементов южного сектора по азимуту и групп элементов по радиусу. Это позволяет оперативно проводить проверку положения и юстировку элементов после профилактического обслуживания или ремонта.

При подготовке к проведению автоколлимационной юстировки проводятся измерения положения мнимого фокуса и индекса облучателей. Для вычисления соответствия фокуса расчетной параболы проводится определение траектории

движения вторичного зеркала по дуговым рельсам и установка вторичного зеркала в заданный фокус.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Практическая значимость применения геодезических методов контроля отражающей поверхности ГЗ и вторичных зеркал радиотелескопа до сих пор актуальна, а внедрение современного высокоточного геодезического оборудования позволяет существенно увеличить точность отражающей поверхности ГЗ и дает возможность проводить более оперативный контроль состояния антенны и вторичных зеркал радиотелескопа. Разработка дополнительных методик на радиотелескопе дает возможность получения реальной поверхности сектора кругового отражателя с $CKO = 0.4$ мм, формирование поверхности ПО с $CKO = 0.3$ мм и обеспечение его работы в совокупности с южным сектором кругового отражателя.

Хочется отметить огромный вклад, который внес в строительство, эксплуатацию и исследования геодезическими методами АПП РАТАН-600 основатель группы геодезической юстировки Ю.К. Зверев.

Хотелось бы отметить сотрудников группы геодезической юстировки РАТАН-600 С.Я. Голосову, В.Ф. Миленко, Е.К. Хилькову, А.Г. Ивкина, которые принимали активное участие в измерениях и исследованиях. В разработке методов измерений с использованием координатно-измерительных систем оказывали содействие специалисты ООО «Промышленная геодезия» В.В. Петров, М.А. Иванов, В.О. Медяников, П.Н. Микрюков, Н.А. Мишин, Н.А. Зуева, П.А. Соколова. В проведении работ с нами участвовали сотрудники службы эксплуатации РАТАН-600.

Выражаем всем свою благодарность!

ПУБЛИКАЦИИ

- [1] Хайкин С.Э. и др., Проект радиоастрономической станции и радиотелескопа РАТАН-600. Рукопись. Ленинград, (1967).
- [2] Голосова С.Я. и др., *Астрофиз. исслед.* (Изв. САО) 15, 132 (1982).
- [3] Зверев Ю.К., *Геодезия и картография* 2, 11 (1984).
- [4] Белевитин А.Г., Назаров В.М., *Земля и Вселенная* 1, 42-49 (1977).
- [5] Хайкин С.Э., Кайдановский Н.Л., Есепкина Н.А., Шиврис О.Н., *Изв. ГАО в Пулковке* XXI, вып. 5, 164, с. 3-26 (1960).
- [6] Глумов А.П. и др., *Астрофиз. исслед.* (Изв. САО) 21, 65 (1986).
- [7] Шиврис О.Н. Парийский Ю.Н., *Изв. ГАО* 185 (1970).
- [8] Беляков В.М. и др., В кн. *Радиоастрономическая аппаратура, антенны и методы. Всесоюзная радиоастрономическая конференция. Тезисы докладов.* Ереван, с. 250 (1982).

История создания комплекса автоматизации радиотелескопа РАТАН-600. 1969–1987 гг.

Голубчин Г.С.,

заведующий ЛАСУР в 1976–1986 гг., к.ф.-м.н.; go_gen39@mail.ru

Комплекс автоматизации РАТАН-600 по объемам капитальных вложений сопоставим со строительством самого радиотелескопа, причем автоматизация позволила многократно повысить эффективность работы инструмента. Документация и переписка по созданию комплекса автоматизации оказались практически недоступными, отсутствовали общие семинары по этой тематике. Данная публикация, выполненная с использованием моих записей и копий документов, должна восполнить этот пробел.

Масштабы задачи, уникальность проекта радиотелескопа побудили меня в 1969 г. обратиться с просьбой о принятии на работу к Ю.Н. Парийскому, тогда заместителю директора и ответственному ученому по РАТАН-600. До этого я работал руководителем группы в одном из институтов Минприбора СССР и занимался автоматизацией технологических процессов. В ноябре 1969 г. меня приняли старшим инженером-конструктором в Ленинградский филиал САО в группу главного конструктора, в которую входили Н.Л. Кайдановский – главный конструктор РАТАН-600, О.Н. Шиврис – заместитель главного конструктора, А.И. Копылов, Э.И. Коркин, О.В. Чуканов, Ю.К. Зверев – ответственный за геодезические юстировки и работы. Мне предстояло заниматься автоматизацией РАТАН-600.

Объектами автоматизации являлись отражающие элементы кругового и плоского отражателей РАТАН-600, имеющие суммарно около 3000 степеней свободы, четыре облучателя – передвижные кабины весом от 60 до 120 тонн, имеющие по три степени свободы. Уже была готова рабочая документация по отражающим элементам РАТАН-600, выполненная московским конструкторским бюро Министерства энергетики и электрификации СССР, которую нужно было передавать на Сызранский завод тяжелого машиностроения для изготовления 895 элементов кругового и 124 элементов плоского отражателей. Каждый элемент кругового отражателя имел три, а плоского отражателя – одну координату перемещения. Перемещение по каждой координате должно было осуществляться с помощью двухмоторного привода. Вся система управления антенной радиотелескопа включала в себя около 6000 асинхронных электродвигателей и планетарных редукторов, 3000 электромагнитных муфт и электромеханических тормозов и многое другое.

Ранее вопросами автоматизации РАТАН-600 практически никто не занимался. После изучения рабочей документации и требований, предъявляемым к приводам РАТАН-600, я предложил одномоторный вариант привода с использованием двухступенчатого конденсаторного торможения [1], что почти в 2 раза снижало затраты на производство и эксплуатацию узлов телескопа, а также уменьшало в 1.7 раза интенсивность отказов на одну установку антенны.

Переход на одномоторный вариант привода требовал проведения испытаний на точность установки, а также выпуска новой рабочей документации, что вело к переносу сроков. Ситуация была совсем не простая – перед руководством Академии ставился

вопрос о запрещении дальнейших переделок чертежей приводов кругового отражателя из-за отставания общих сроков их изготовления.

Мне пришлось в кратчайший срок разработать эскизный проект управления одномоторным приводом. Силами механической мастерской и электромеханика А.А. Новыша был изготовлен макет из новых комплектующих элементов, которые были закуплены у предприятий-изготовителей и доставлены сотрудниками ЛФ САО из разных городов. В течение нескольких дней января 1970 г. в 30-градусный мороз и сильный ветер мною вместе с О.В. Чукановым были проведены испытания одномоторного привода на опытном образце отражающего элемента кругового отражателя РАТАН-600, установленном в Пулковое. В результате были получены положительные результаты. Для выпуска новой проектно-конструкторской документации для одномоторных приводов потребовалось более месяца совместных работ с разработчиками из Москвы.

РАТАН-600 проектировался как пассажный инструмент для наблюдения космических источников при прохождении ими неподвижной диаграммы направленности радиотелескопа. Конструкция радиотелескопа не позволила при начальном проектировании разработать технические требования к наблюдениям с помощью автоматизированной системе управления (АСУ) из-за отсутствия данных по кинематической стабильности механических узлов. Необходимость удешевить проект для получения разрешения на строительство, также повлияли на это. К началу 1970 г. О.Н. Шиврис и О.В. Чуканов предложили полуавтоматическую систему управления для установки элементов кругового и плоского отражателей РАТАН-600 с использованием двухотсчетных сельсинных линий, работающих в трансформаторном режиме [2]. Задание на установку вводилось вручную в сельсины-задатчики бригадой операторов по заранее вычисленным таблицам уставок со средней производительностью – одна установка 225 отражающих элементов в час. Это было реализовано к началу первых наблюдений на РАТАН-600 в 1974 г. с помощью НИИАвтоматика (г. Кировоакан, Армения) и завода «Импульс» (г. Пятигорск).

Полуавтоматическая система управления установки элементов кругового и плоского отражателей РАТАН-600 имела ряд недостатков, в числе которых было отсутствие обратной связи - информации о значениях координат отражающих элементов, что препятствовало дальнейшему развитию процесса наблюдений. С 1969 г. и одновременно с разработкой полуавтоматической системы начались поисковые работы по созданию АСУ. Тогда были сформулированы основные требования к автоматизированной системе:

- возможность перехода с полуавтоматического режима на автоматизированный режим без остановки наблюдательных программ;
- сохранение полуавтоматического режима на базе штатного оборудования;
- использование режима программного управления.

Попытки найти организацию-исполнителя для разработки АСУ закончились безрезультатно. Начиная с 1970 г. при поддержке Ю.Н. Парийского я стал заниматься разработкой технического предложения по АСУ. В первую очередь надо было определить принципы построения и особенности системы измерения координат для элементов антенны. Отметим, что обратная связь в системе реализуется в основном по положению отражающих элементов. В связи с установкой бесконтактных сельсинов, служащих датчиками положения, на щиты кругового отражателя, который имеет протяженность около 2 км, и плоского отражателя длиной около 400 м, большого

количества датчиков (около 5700) и требованием преемственности АСУ с полуавтоматической системой управления мною был предложен многоканальный преобразователь «угол-код», построенный по амплитудно-замкнутому методу с числом двухотсчетных каналов равным 75, который обеспечивал измерение положения 25 отражающих элементов по трем координатам. В 1971 г. был собран частичный макет многоканального преобразователя «угол-код», проведены укрупненные испытания и подготовлены эскизы принципиальных и функциональных схем. До 1978 г. этой работой занимался А.И. Оболенский, который внес значительный вклад в создание штатного многоканального преобразователя «угол-код» в стандарте КАМАК. Подготовленная им рабочая документация была передана на завод им. Коминтерна (г. Новосибирск), который являлся основным изготовителем аппаратных средств для комплекса автоматизации РАТАН-600.

Создание комплекса автоматизации РАТАН-600 в конце 1971 г. была поддержано решением Научного Совета по комплексной проблеме «Радиоастрономия» АН СССР, в котором отмечалась необходимость оснащения РАТАН-600 системой комплексной автоматизации на базе ЭВМ. В 1972 г. мною было детально разработано техническое предложение по системе автоматизированного управления РАТАН-600 с использованием многоканальных преобразователей «угол-код», построенных по амплитудно-замкнутому методу [3]. В начале 1973 г. по инициативе Ю.Н.Парийского оно было рассмотрено рядом экспертных комиссий. Их рекомендации стали основанием для решения об организации научно-исследовательских, конструкторских и производственных работ по автоматизации РАТАН-600, принятого на совещании при президенте АН СССР М.В. Келдыше в мае 1973 г.

Основные исходные данные, технические предложения и предварительные технические задания по комплексу автоматизации, состоящему из системы управления антенной, системы сбора и предварительной обработки наблюдательных данных на облучателях, системы обработки, отображения и накопления наблюдательных данных в центральной пультовой были разработаны ведущими научными сотрудниками ЛФ САО. На техническом совещании представителей САО, Института автоматики и электрометрии и СКБ научного приборостроения СО АН СССР (далее – СКБНП) в декабре 1973 г. были согласованы этапы выполнения работ. С этого момента к выполнению работ подключился Л.А. Корнев – уполномоченный ООФА по строительству РАТАН-600, сыгравший заметную роль в подготовке постановления Правительства СССР по созданию комплекса автоматизации РАТАН-600. Его обязательность, настойчивость, связи и опыт помогли нам в строительстве, проектировании, поставках оборудования и взаимоотношениях с министерствами и ведомствами, принимавшими участие в создании комплекса автоматизации РАТАН-600.

К началу июня 1974 г. были составлены протоколы предварительного согласования по выполнению работ с проектными организациями АН СССР, Министерства средств связи, Минрадиопрома, трестом «Севкавгидроэнергострой». Был подготовлен ориентировочный сметно-финансовый расчет по созданию комплекса автоматизации РАТАН-600. В августе 1974 г. было завершено техническое задание на проектирование комплекса автоматизации РАТАН-600, утвержденное вице-президентом АН СССР академиком В.А. Котельников. В соответствии с распоряжением Совета Министров были даны поручения Академии наук в лице САО АН СССР по согласованию организаций-исполнителей, сроков, объемов и стоимости работ по созданию комплекса автоматизации РАТАН-600 с союзными министерствами и ведомствами. В постановлении Совета Министров СССР от 24.09.1975 о создании комплекса

автоматизации РАТАН-600 в 1976–1981 гг. САО АН СССР была назначена головной организацией. К декабрю 1975 г. был закончен технический проект комплекса автоматизации.

Основной объем работ по созданию комплекса автоматизации РАТАН-600 приходился на создание АСУ круговым и плоскими отражателями, особенностями которой являются: многомерность (контроль и управление тысячами параметров), многоуровневость (функции системы распределяются по уровням иерархии), независимость от потерь (потери эффективности от выполняемых параллельно функций АСУ нижнего уровня слабо зависят друг от друга), частичная (поканальная функционально-аппаратурная) децентрализация.



Рис. 41. Узел управления 100 элементами кругового отражателя – наружный и внутренний вид.

Для проверки результатов опытно-конструкторских и проектных работ и тестирования программного обеспечения на лето 1976 г. были запланированы испытания головной группы АСУ, рассчитанной на управление 25 отражающими элементами кругового отражателя РАТАН-600. Этап включал в себя строительство на западном секторе помещения узла для управления (рис. 41) 100 элементами кругового отражателя – одного из девяти таких узлов по всему круговому отражателю. Помещение было предназначено для установки управляющей ЭВМ «Электроника 100-И», стоек измерения и управления в стандарте КАМАК. Для испытаний надо было установить и ввести в строй эти стойки управления, провести монтаж металлоконструкций, прокладку кабелей и наладку собственно АСУ.

В этой работе принимали участие специалисты САО АН СССР – Г.С. Голубчин, А.И. Оболенский, Е.Н. Нижельская, представители СКБНП, завода им. Коминтерна, Ленинградского отделения ГИПРОНИИ, других проектных и строительных организаций страны.

Деятельность межведомственной комиссии для приемки и оценки выполненных работ в июле 1976 г. позволила проанализировать работоспособность и точность установки отражающих элементов головной группы, внести необходимые замечания и корректировки в конструкторскую и проектную документацию, уточнить методику монтажных и наладочных работ.

В конце 1976 г. решением ученого совета обсерватории была образована лаборатория автоматизированных систем управления РАТАН-600 (далее – ЛАСУР)

(рис. 42, 43) под моим руководством, состоявшая из групп А.И. Оболенского (в дальнейшем – Г.В. Жеканиса), В.И. Филипенко и Г.С. Голубчина. В основные задачи лаборатории входили научно-методическое руководство работ по созданию АСУ, курирование и контроль выполнения работ организациями-исполнителями, разработка и тестирование программного обеспечения, модернизация программно-аппаратных средств, создание АСУ облучателей, проведение поисковых и исследовательских работ по повышению надежности АСУ, участие в опытной эксплуатации АСУ. Тогда же решением ООФА я был назначен главным конструктором комплекса автоматизации РАТАН-600.



Рис. 42. Сотрудники ЛАСУР (слева направо): А.И. Оболенский, Г.В. Жеканис, Л.С. Жеканис, Н.И. Трофимова, Г.С. Голубчин, В.И. Филипенко, А.В. Мизенков (1976 г.).

В 1977 г. СКБНП и САО АН СССР передали конструкторскую документацию на завод им. Коминтерна для последующего изготовления аппаратных средств для комплекса автоматизации РАТАН-600. Всего надо было изготовить более 2000 модулей 36 типов, 47 стоек КАМАК, 150 крейтов. Мы должны были, впервые в СССР, решить задачу промышленного изготовления аппаратных средств в стандарте КАМАК на заводе Минрадиопрома. Следует отметить, что ни одна из сторон не была готова к этой работе. Основные причины состояли в отсутствии согласованного понимания комплектности конструкторской документации, наличии большого количества комплектующих изделий (например, 10000 многослойных печатных плат с особыми требованиями и других непрофильных комплектующих для завода). Несмотря на трудности перехода на новые технологии, работа продвигалась.

В 1978 г. западный сектор РАТАН-600 был передан подрядчику – Северо-Кавказскому управлению проектно-монтажных работ (СКУМПР) – для монтажа АСУ под надзором и контролем ЛАСУР. Состояние дел у изготовителя узлов – завода им. Коминтерна – оставалось непростым, нам приходилось постоянно координировать работу служб завода от имени его директора. Несколько раз на заводе сотрудники ЛАСУР из группы Г.В. Жеканиса вместе с группой наладчиков из СКУМПР принимали участие в наладке партии «трудных» модулей для ускорения передачи их на РАТАН-600, работая и в выходные дни.

В апреле 1979 г. монтаж АСУ западного сектора был завершен, и началась наладка коммуникационных связей, программно-аппаратных средств КАМАК и программного обеспечения.



Рис. 43. Сотрудники ЛАСУР первого призыва спустя 29 лет (2005 г.), слева направо: И.Х. Карабашиев, Г.В. Жеканис, Е.К. Нижельская и Г.С. Голубчин.

В январе 1980 г. наладочные работы завершились, и началась проверка работоспособности системы в соответствии с требованиями технического задания в части реализации научных задач. Среди основных пунктов программы были:

- проверка качества установки поверхности западного сектора РАТАН-600 по характеристикам фокального пятна на волне 8 мм с помощью радиотехнической юстировки;
- испытания на точность установки элементов кругового отражателя, проверка соответствия точности установки элементов кругового отражателя и положения отражающей поверхности элементов кругового отражателя РАТАН-600 с помощью автоколлимационной юстировки;
- проверка качества установки антенны по наблюдениям опорного источника 3С 123.

На основании проведенных испытаний было сделано заключение о пригодности АСУ западного сектора РАТАН-600 для проведения наблюдений на длинах волн 1–21 см. Первое наблюдение с помощью АСУ галактики Девы А на волне 21 см было успешно проведено 28 мая 1980 г.

В июне 1980 г. межведомственной комиссией (МВК), включившей представителей академических институтов, проектных организаций и подрядчиков работ, были

проведены испытания и приемка АСУ западного сектора РАТАН-600. Комиссии были предъявлены десятки крейтов и модулей КАМАК различных типов, два узла управления с ЭВМ «Электроника 100-И», более сотни папок чертежей, схем, альбомов проектной документации, описаний и текстов рабочих и тестовых программ.

Комиссия пришла к следующему заключению:

- оборудование АСУ западного сектора РАТАН-600 работоспособно;
- комплекс программно-аппаратных средств обеспечивает наблюдательный режим;
- уровень надежности достаточен;
- АСУ западного сектора РАТАН-600 [4] позволила резко повысить производительность работы и точность работы западного сектора РАТАН-600;
- АСУ рекомендуется для передачи в эксплуатацию и может быть использована при создании аналогичных АСУ остальных секторов РАТАН-600.

МВК также рекомендовала разработать перечень мероприятий по повышению надежности периферийных элементов и узлов управления РАТАН-600, положение по эксплуатации радиотелескопа с учетом использования АСУ РАТАН-600, определить перспективные планы модернизации узлов управления и элементов кругового и плоского отражателей, автоматизации перемещения облучателей и сбора наблюдательных данных.

После завершения работы комиссии один из ее членов О.В. Еманин написал следующее стихотворение:

Друзья мои!
Прекрасен наш РАТАН!
Он нами принят, вами сдан!
Хотя не сразу и поймешь –
Ты принимаешь иль сдаешь?
Спасибо людям, сотворившим это чудо.
Парийский, Шиврис, Постоенко – кто откуда!?
Голубчин Гена много поработал,
Чтобы РАТАН крутился и работал.
Чтобы внедрить всю нашу автоматику,
Пришлось немало потрудится математикам.
РАТАН - бетон, моторы и металл.
Но КАМАК есть – и «запад» заиграл.
Мы точно знаем, что в XX веке,
Пока на пенсию мы не уйдем,
Внедрим мы автоматику навеки
И космос нами будет покорен!

По итогам работы МВК в сентябре 1980 г. вышло распоряжение Совета Министров СССР о продолжении работ по созданию комплекса автоматизации РАТАН-600 на следующую пятилетку. В соответствии с ним было необходимо выполнить незаконченные работы и обеспечить реализацию рекомендаций МВК.

Для повышения надежности работы АСУ РАТАН-600 в 1980–1983 гг. проводилась замена периферийного электрооборудования кругового и плоского отражателя – тысяча конечных и автоматических выключателей, разъемов датчиков отсчетно-установочных устройств – на более надежные, установка 20000 переходных плат для применения

монтажа пайкой, перестановка аппаратуры из силовых шкафов (рис. 44, слева) в пульта отсчетно-установочных устройств (рис. 44, справа). В результате проведенных работ интенсивность отказов на одну установку антенны снизилась в 7 раз.

В 1981 г. управление западным сектором кругового отражателя РАТАН-600 было переведено из узлов управления 1А и 2А в помещение узла автономного центрального управления 10А (рис. 45), расположенного внутри кругового отражателя, установка антенны осуществлялась с использованием перфолент, расчет установок производился на ЭВМ М4030.

В 1982 г. была сдана в эксплуатацию АСУ северного сектора кругового отражателя РАТАН-600. Особым конструкторским бюро станкостроения (г. Ленинград) совместно с ЛАСУР закончены научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по созданию АСУ облучателей РАТАН-600. Был изготовлен опытный образец АСУ кареткой облучателя №2, которая эффективно использовалась при спектральных наблюдениях.



Рис. 44. Слева – верхняя галерея кругового отражателя, шкафы электроаппаратуры приводов. Справа – нижняя галерея кругового отражателя, пульта отсчетно-установочных устройств.

В 1983 г. сдана в эксплуатацию АСУ восточного сектора кругового отражателя РАТАН-600, установка антенны стала выполняться с использованием магнитных лент вместо перфолент.

В 1984 г. сдана в эксплуатацию АСУ южного сектора кругового отражателя и АСУ плоского отражателя РАТАН-600.

В 1985 г. мной был составлен перспективный план автоматизации научных исследований на РАТАН-600 с 1985 по 2010 гг.:

1. 1985–1990 гг.

- 1.1. Разработка и внедрение распределенной системы управления круговым и плоским отражателем РАТАН-600 на базе локальной сети, микроЭВМ и новых аппаратных средств в стандарте КАМАК.
- 1.2. Разработка и внедрение модернизированного периферийного электрооборудования.
- 1.3. Автоматизация юстировок.
- 1.4. Разработка и внедрение АСУ облучателей.
- 1.5. Реализация режимов длительного накопления сигналов источников радиоизлучения на РАТАН-600

2. 1990–1995 гг.

- 2.1. Капитальный ремонт периферийного электрооборудования и кабельной сети;
- 2.2. Разработка и внедрение защитных покрытий с улучшенными эксплуатационными характеристикам.
- 2.3. Комплексование системы управления РАТАН-600 с облучателями и системой сбора данных.
- 2.4. Разработка и внедрение тиристорного управления электроприводами кругового и плоского отражателей РАТАН-600.
- 2.5. Улучшение «временной» эффективности работы РАТАН-600 за счет увеличения динамических характеристик кинематики антенны.
- 2.6. Создание системы управления антенны с замыканием обратной связи на оперативные методы юстировки.

3. 1995–2000 гг.

- 3.1. Организация наблюдений на РАТАН-600 в реальном масштабе времени.
- 3.2. Автоматизация процессов накопления, статистической обработки и прогнозирования отказов.
- 3.3. Автоматизация работы поворотного круга.

4. 2000–2005 гг.

- 4.1. Подключение РАТАН-600 к сети наземных и космических радиотелескопов.
- 4.2. Управление и сбор данных РАТАН-600 через терминалы, расположенные в Москве, Ленинграде и других пунктах.
- 4.3. Замена аппаратуры КАМАК, вычислительной техники и электрооборудования на технические средства нового поколения.

5. 2005–2010 гг.

- 5.1. Капитальный ремонт сетей и кабельного хозяйства.
- 5.2. Создание телескопа-автомата – «безлюдной» системы управления и сбора РАТАН-600.



Рис. 45. Слева – помещение узла центрального управления кругового и плоского отражателя. Слева направо: Г.С. Голубчин, Г.В. Жеканис, А.И. Мотренко, Н.И. Трофимова (31.07.1981 г.). Справа – внутренний вид узла центрального управления.

В 1987 г. оборудование системы сбора и предварительной обработки наблюдательных данных облучателей и оборудование системы обработки, отображения

и накопления наблюдательных данных РАТАН-600, изготовленные заводом им. Коминтерна, СКБНП и опытным заводом СО АН СССР, в основном было получено. В соответствии с распоряжением Президиума АН СССР для приемки в эксплуатацию АСУ РАТАН-600 была образована межведомственная комиссия (МВК) из представителей ведущих институтов АН СССР, академических конструкторских бюро, проектных организаций и промышленных предприятий. МВК проводила проверку соответствия параметров и характеристик АСУ РАТАН-600 техническому заданию, конструкторской, проектной и программной документации, качеству установки антенны по наблюдениям опорных и исследуемых источников, проверку внутренней точности установки элементов кругового отражателя, качество режима многократных перестановок. Комиссии были представлены результаты наблюдений на РАТАН-600 за 1981-1986 гг. МВК рекомендовала принять АСУ РАТАН-600 в эксплуатацию и пришла к заключению, что ее разработка и внедрение улучшили основные показатели эффективности работы радиотелескопа по сравнению с проектной полуавтоматической системой управления, такие как:

- временная эффективность (до 30 раз);
- предельная чувствительность в суточном сеансе (до 5 раз);
- скорость получения наблюдательной информации (до 30 раз).

Выполненный комплекс работ позволил создать впервые в СССР серийную промышленную аппаратуру в стандарте КАМАК для автоматизации научных исследований.

В заключение хочу упомянуть участников создания комплекса автоматизации радиотелескопа РАТАН-600, среди которых:

сотрудники САО АН СССР – Г.В. Жеканис, А.И. Оболенский, В.И. Филипенко, И.Х. Карабашев, Е.К. Нижельская, Л.С. Жеканис, Н.И. Васильева, В.И. Фурса, А.И. Мотренко, А.В. Мизенков, П.А. Фридман, А.А. Иванов, С.Р. Желенков, З.Е. Петров, Т.А. Пляскина;

сотрудники СКБ НП СО РАН – Ю.К. Постоенко, А.Н. Ангельский, И.Н. Сковородин, А.М. Бечаснов;

сотрудники Новосибирского филиала государственного проектного НИИ «ГОСРАДИОПРОЕКТ» – О.В. Еманин, В.В. Полищук;

сотрудники Северо-Кавказского управления проектно-монтажных работ – Ю.Г. Каменский, Ю.Г. Бабаевский, Ю.Г. Стройнов, Ю.К. Жиров;

сотрудники Дирекции строящихся специальных научных объектов – В.В. Крапивин, А.Т. Захарченко;

сотрудник треста «Севкавгидроэнергострой» – А.Г. Алешников;

сотрудник ЛО ГИПРОНИИ – Д.Х. Еникеев.

22 июля 2016 г.

ПУБЛИКАЦИИ

- [1] Голубчин Г.С., Известия ГАО в Пулкове, 188, 97-100 (1972).
- [2] Копылов А.И., Чуканов О.В., Шиврис О.Н. Известия ГАО в Пулкове, 188, 101-105 (1972).
- [3] Голубчин Г.С. Известия САО, 7, 226-236 (1975).
- [4] Ангельский А.Н., Голубчин Г.С., Постоенко Ю.К., Бармасов В.Д., Бечаснов А.М., Жеканис Г.В. Известия Специальной астрофизической обсерватории, 15, 88-105 (1982).

Информационные технологии

Информатика в САО

Витковский В.В.,
заведующий ЛИ, к.ф.-м.н.; vvv@sao.ru

ПРЕДЫСТОРИЯ

Строго говоря, история информатики в САО началась раньше создания самой обсерватории после принятия кардинального решения об азимутальном типе установки 6-м телескопа. Для управления телескопом необходим был компьютер. И такой отечественный компьютер ЭЦУМ, в то время совершенно уникальный, был создан. Наблюдения на антенне переменного профиля РАТАН-600 были невозможны без предварительного расчета положения для каждого элемента антенны. Сложность вычислений требовала применения больших по тем временам универсальных вычислительных машин. Кроме управления телескопом коллективу обсерватории для обработки наблюдательных данных и решения научных задач был необходим переход от механических и электронных калькуляторов к современным средствам вычислительной техники.



Рис. 46. Витковский В.В. Расчет уставок для антенны РАТАН-600.

Первой универсальной ЭВМ в обсерватории был «МИР-1», затем в башне БТА была установлена одна из лучших отечественных ЭВМ – М-222. Надо отметить, что в те годы даже вычислительные центры крупных университетов МГУ и ЛГУ имели в своем составе не более двух таких ЭВМ. Понятно, что для работы на вычислительных машинах требовалось разрабатывать и внедрять уникальное для каждой научной задачи программное обеспечение. Для поддержки и развития аппаратных и программных средств обсерватории в составе САО был создан вычислительный центр (рук. Ю. Коровяковский). Коллектив инженеров, программистов и операторов во взаимодействии с сотрудниками других подразделений создавал программы и алгоритмы для решения различных задач: исследование оптики БТА, цифровая

обработка результатов фотометрических и спектральных наблюдений, моделирование процессов эволюции звезд и звездных систем, изучение физических и статистических свойств небесных объектов. Много времени и сил отдавали решению задач на ЭВМ молодые тогда астрономы – В. Панчук, Г. Алексеев, А. Щербановский, В. Лебедев и другие. Трудно переоценить значение для ввода в эксплуатацию БТА комплексов программ исследования оптики и механики телескопа, разработанных Л. Снежко.

Группой системных разработок РАТАН-600 на М-222 была внедрена система расчета установки антенны РАТАН-600 (разработка В. Витковского), которая с первого наблюдения обеспечивала работу радиотелескопа (рис. 46).

На М-222 впервые в отечественной астрономии была установлена и использовалась для организации работы операционная система пакетной обработки (ОСПО) – прообраз будущих универсальных операционных систем, без которых немислима сейчас работа компьютеров.

Основными средствами регистрации и носителями данных оставались в оптике – фотопластинка, в радиоастрономии – самописец и диаграммная лента. Но, если в радиоастрономии переход от аналогового сигнала к цифровому признавался естественной эволюцией систем регистрации, то в оптике разработка цифровых приборов и методов регистрации многими классическими астрономами принималась в штыки. Так, разработка группой под руководством А. Фоменко 1000-канального сканера, впоследствии ставшего одним из основных спектральных приборов БТА, расценивалась некоторыми как пустая трата средств.

Пионерские проекты цифровой регистрации наблюдений РАТАН-600 базировались на отечественной миниЭВМ «Электроника К-200». Выходным носителем вначале была перфолента, замененная в дальнейшем на магнитную ленту. Какое-то время параллельная запись на самописцах сохранялась, но удобство переноса данных для обработки на универсальные ЭВМ, а также хранение информации на машиночитаемом носителе окончательно решили судьбу аналоговой формы регистрации.

Принципиально новым аспектом стала необходимость вмешиваться в работу программы в ходе ее исполнения, что можно считать предвосхищением интерактивного взаимодействия с компьютером. Использование ЭВМ позволяло, кроме того, производить в реальном времени некоторую первичную обработку данных, улучшая качество и уменьшая объем выходной информации.

В оптической астрономии переход к цифровой регистрации происходил более опосредованно – через оцифровку фотопластинок. В САО для этой цели был приобретен отечественный АМД-1, с помощью которого сканировались отснятые на БТА фотопластинки. В ВЦ САО была реализована цифровая регистрация данных на машинных носителях для некоторых измерительных приборов. Полученная в результате цифровая информация обрабатывалась на ЭВМ.

Однако не только удобный ввод и быстрая обработка информации определяли успешную экспансию ЭВМ в науку. Немаловажным фактором являлась возможность адекватного представления результатов обработки и расчетов. В обсерватории уже в конце 70-х годов было выполнено несколько пионерских работ по использованию графопостроителей и алфавитно-цифровых печатающих устройств для визуального представления сложных графиков, карт и изображений.

К сожалению, произошедшее в те же годы изменение технической политики в СССР привело к прекращению развития хорошо зарекомендовавших себя отечественных ЭВМ и ориентации промышленности на копирование линии ЭВМ

IBM-360. Первой из таких машин была М-4030 (рис. 47, слева), установленная на РАТАН-600, второй – ЕС-1035, ставшая на несколько лет основным компьютером обсерватории. Уже к моменту установки эти ЭВМ идеологически и технически отставали от компьютеров, используемых западной наукой. Тем не менее, с их помощью удалось решить ряд научных и методических задач, разработать алгоритмы и программы обработки астрономических данных. В частности, была разработана пакетная система обработки данных радиометров континуума РАТАН-600 (В. Витковский, Ю. Барышев), а в части системных работ была впервые инсталлирована и испытана на ЕС-1035 операционная система ДЕМОС – отечественная версия многопользовательской ОС Unix. В 1981 г. система пакетной обработки данных РАТАН-600 была внедрена на мощной ЭВМ СУБЕР 172-6, установленной в ЛНИВЦ (Ленинградский научно-исследовательский вычислительный центр АН СССР) и успешно инсталлирована на VAX-11 в Радиоастрономическом институте им. М. Планка (г. Бонн, ФРГ).



Рис. 47. Слева – пульт М-4030, справа Шергин В.С. за графическим дисплеем «Альфа».

В Институте теоретической астрономии во взаимодействии с САО был разработан и внедрен комплекс программ универсальных эфемеридных расчетов. Совместно с Институтом автоматики и электрометрии СО АН СССР была создана и введена в рабочую эксплуатацию АСУ РАТАН-600. Создание структурно-алгоритмической модели системы коллективного пользования РАТАН-600, выполненное группой системных разработок в сотрудничестве с Университетом дружбы народов (г.Москва), явилось пионерской работой в области создания территориально-распределенных систем автоматизации эксперимента.

В те же годы были начаты работы по созданию архивов наблюдательных данных БТА и РАТАН-600 на машинных носителях (М. Моносов, В. Кононов, О. Желенкова).

Обсерватория явилась активным участником комплексных программ научно-технического развития СССР на 1976–1980 гг. и на 1981–1985 гг., обеспечивших создание аппаратно-программной базы науки и существенный прогресс в автоматизации фундаментальных исследований.

ЦИФРОВОЙ ВЕК

В 1983 г. информатика в СССР была признана самостоятельной наукой. В АН СССР было создано Отделение информатики, вычислительной техники и автоматизации, создан Институт проблем информатики АН СССР в Москве. В 1985 г. в Ленинграде на базе ЛНИВЦ был создан Научно-исследовательский институт

информатики и автоматизации АН СССР, теперь – Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации (СПИИРАН). При Президиуме Академии наук был создан Совет по автоматизации научных исследований, в деятельности которого обсерватория активно участвовала (В. Витковский).

САО РАН в известном смысле сыграла роль «начального запала в цифровом взрыве», изменившем лицо отечественной фундаментальной науки. Необычайная технологическая сложность уникальных телескопов БТА и РАТАН-600, дополненная вниманием руководства страны к ним как к объектам национального престижа, привела к технологическому прорыву в производстве средств автоматизации для неприкладных (не оборонных) направлений науки. Прежде всего, это относится к началу массового производству модульной аппаратуры КАМАК, предложенной Специальным конструкторским бюро научного приборостроения СО АН СССР для создания систем управления и сбора РАТАН-600. В силу многоэлементности радиотелескопа речь шла не о штучных изделиях, а о серийном производстве.

Более удачным, чем следование серии IBM-360, оказалось освоение промышленностью серий PDP-8 – «Электроника-100И» и, в особенности, PDP-11 – СМ-4 (рис. 48, справа). Внедрение этих ЭВМ и ИВК, функционирующих на их основе, привело к качественным изменениям в автоматизации научных исследований.



Рис. 48. Г. Алексеев. Слева – у телескопа Цейсс-1000, справа – у компьютера СМ-4.

Применение в системах сбора и управления мини-ЭВМ «Электроника-100И» и, в особенности, внедрение в эксперимент многочисленных микроЭВМ «Электроника-60» и МЕРА-60 (аналоги LSI-11) подтолкнули спрос на технику автоматизации научных исследований. Это произвело революцию в создании цифровых систем сбора наблюдательных данных. Быстродействие и память в сочетании с компактностью и расширенными аппаратурой КАМАК возможностями управления, преобразования сигналов и интерфейсами позволили оснастить БТА и РАТАН-600 высокопроизводительными системами сбора данных, вытеснившими аналоговые методы регистрации.

Однако основной прогресс в автоматизации астрофизических исследований в обсерватории был связан с внедрением ИВК (информационный вычислительный комплекс) на базе ЭВМ СМ-3, СМ-4 и МЕРА-125 производства Польской Народной Республики. ИВК, обладающие по тому времени высоким быстродействием и большой памятью и снабженные контроллерами КАМАК, которые позволяют подключать аппаратуру и нестандартную периферию, позволили создать многофункциональные

системы сбора данных и управления экспериментом. Таким был комплекс «КВАНТ», разработанный в САО (А. Фоменко, С. Маркелов, Г. Алексеев и др.) совместно с Всесоюзным научно-исследовательским институтом телевидения. В 1991 г. комплекс был отмечен Государственной премией СССР в области науки и техники за создание цифровых телевизионных средств для исследования предельно слабых астрономических объектов на БТА АН СССР. Ее лауреатами от обсерватории стали В.Л. Афанасьев, С.В. Маркелов и Ю.Ю. Балега.

Универсальные операционные системы RT-11 и отечественная многопользовательская ОС NTS, разработанная в Институте общей и неорганической химии, поддерживающие языки программирования высокого уровня, дали возможность разработки специализированных программ и программных систем обработки данных, получаемых на телескопах САО.

Особенно перспективной оказалась возможность интерактивной графической обработки. Появление в обсерватории графического дисплея «Альфа» (рис. 49, слева) и первых прецизионных графопостроителей позволило создать и внедрить в практику обработки наблюдений программные системы, дававшие возможность пользователю не только контролировать процесс обработки в реальном времени, но и вмешиваться в этот процесс, вводить коррективы и выполнять неформализованные процедуры обработки, которые основаны на опыте и интуиции астронома-наблюдателя. Созданная группой системных разработок РАТАН-600 управляемая пользователем система обработки радиоастрономических данных BUMS (В. Витковский) не только сыграла основную роль в первичной обработке данных эксперимента «Холод», но и в течение многих лет служила основой обработки наблюдений на радиометрах сплошного спектра РАТАН-600.

Переход к интерактивным методам обработки данных оптического диапазона происходил прежде всего для цифровых систем регистрации. Одной из первых была разработана система обработки данных сканера БТА (Н. Сомов). Развитые в обсерватории методы оцифровки фотоматериалов на микроденситометрах АМД-1 и АМД-2 позволили применять интерактивные методы обработки к фотографическим данным. Однако массовое их применение стало возможным только со сменой аппаратной платформы, появлением профессиональных персональных ЭВМ на основе IBM PC и графических станций типа SUN SPARC.

Необходимо отметить, что, в отличие от более чем 10-летнего отставания обсерватории в получении эквивалентных западным технических средств, первый персональный компьютер IBM PC/XT появился в САО всего спустя год после своего появления в мире. В дальнейшем временной разрыв с Западом в уровне применения аппаратно-программных средств, в немалой степени усилился лабораторией, а затем отдела информатики, неуклонно сокращался. Что же касается идеологической, программной и системной областей, то САО РАН была и остается одним из лидеров разработки и внедрения информационных технологий в отечественной астрофизике.

ЛАБОРАТОРИЯ ИНФОРМАТИКИ

Все возрастающее значение автоматизации научных исследований и необходимость объединения усилий разрозненных небольших подразделений привели в 1986 г. к организации в САО лаборатории информатики (рук. В. Витковский). Перед ней были поставлены технические задачи эксплуатации, поддержки и развития аппаратно-программных средств обсерватории, поддержка автоматизации научных

исследований, решение научных задач информатики в приложении к астрофизическим исследованиям. Объединение в одном коллективе инженеров, программистов и научных сотрудников позволило решить значительное число насущных проблем.

Лаборатория участвовала в освоении и внедрении телевизионного цифрового вычислительного комплекса «Квант» в части освоения программного обеспечения и методики работы с комплексом. На основе разработанного А. Назаренко комплекса программ работали несколько прикладных систем обработки данных, включая систему обработки спектров «Спектр», системы регистрации и обработки данных магнитометра и полевого фотометра БТА. В. Плехотниченко были выполнены разработка и реализация алгоритмов поиска и анализа переменности для эксперимента МАНИЯ, а также создан универсальный многоканальный прибор «Квантохрон-3».



Рис. 49. Испытания первой ПЗС-системы на БТА в 1988 г.; слева направо – О.П. Желенкова, Ю.В. Барышев, В.С. Шергин, В.В. Витковский, В.П. Рядченко.

Совместно с ЛПР был создан первый отечественный комплекс регистрации изображений с детектором ПЗС (В. Шергин, В. Витковский, О. Желенкова). Большая работа была проделана по модернизации комплекса БТА в части подготовки предложений по аппаратно-программной архитектуре и составу комплекса технических средств АСУ БТА. Разработана архитектура, программное обеспечение и аппаратура АСУ РАТАН-600 нового поколения (Б. Ерухимов, Г. Жеканис). Т. Пляскиной был разработан и внедрен комплекс программ расчета установки РАТАН-600 в ОС UNIX, включая и реализацию алгоритмов расчета установки антенны для наблюдений в различных режимах.

Значительных успехов лаборатория добилась в создании новых алгоритмов и программ обработки наблюдательных данных. В. Шергиным были разработаны

алгоритмы оптимальной цифровой фильтрации для спектров и радиосканов. Алгоритмы оптимального гаусс-анализа (Л. Иванов) и статистической обработки и анализа данных (В. Горохов) реализованы в нескольких программных комплексах и эффективно применяются и по сей день для обработки наблюдательных данных. Разработаны алгоритмы и программы обработки наблюдений в континууме для облучателя №1 РАТАН-600, моделирования радиоастрономических сигналов.

Программные и системные разработки лаборатории информатики используются астрономами САО и сторонними пользователями БТА и РАТАН-600. Некоторые из этих разработок были внедрены в других научных институтах страны (ГАО, СибИЗМИР, ПГУ) и за рубежом (ФРГ, Аргентина). В то же время лабораторией информатики проводилось тестирование и внедрение зарубежных астрономических программ и систем. Была выполнена установка и освоение европейской системы обработки астрономических данных MIDAS (В. Шергин, О. Желенкова), включая перенесение и адаптирование на ППЭВМ AT/386 системы MIDAS/portable.

Поскольку астрономические данные не теряют своей ценности со временем, одной из важнейших задач работы с данными является задача архивизации, хранения и обеспечения удобного доступа к ним. Для решения этой задачи были разработаны основные принципы построения банка астрономических данных САО и концепция унифицированного формата данных систем сбора. На их основе созданы и введены в эксплуатацию локальные архивы наблюдательных данных РАТАН – ODA-E, ODA-P, ODA-R, ODA-S и ODA-U (В. Кононов). Был разработан комплекс программ для решения задачи оптического отождествления радиоисточников глубокого обзора «Холод» по картам Паломарского обзора неба и наблюдениям на БТА (О. Желенкова), что было отмечено в 1993 г. в качестве важнейших результатов САО.

В ходе модернизации аппаратуры регистрации данных радиометров сплошного спектра РАТАН-600 была разработана и внедрена на облучателе №1 иерархическая система автоматизации и сбора данных радиометрического комплекса (Б. Ерухимов, В. Черненко). На базе различных программно-аппаратных средств на ее основе были реализованы модели иерархических многопользовательских систем, внедренные сначала на РАТАН-600, БТА и несколько позже в ПРАО (Пушино). Следующим шагом была разработка и внедрение многопользовательской системы централизованного сбора данных, а также разработка архитектуры локальных сетей для автоматизации научных исследований САО. Особое внимание уделялось созданию программных средств интерактивного управления наблюдательным экспериментом. Была выполнена существенная модернизация системы подготовки наблюдений облучателя № 1.

Лаборатория информатики отслеживала мировые тенденции развития компьютерной техники, операционных систем и прикладного математического обеспечения. Были сделаны успешные установки Unix-подобных систем на ЭВМ серии CM и QNX – операционной системы реального времени на ППЭВМ.

В 1988 г. в САО проведено всесоюзное совещание-семинар по открытым системам с участием ведущих специалистов и разработчиков из академических и прикладных институтов (П. Антонов, В. Бардин, Д. Бурков, Д. Володин А. Руднев и др.).

В качестве аппаратной платформы, на основе опыта применения ППЭВМ IBMPC и их аналогов – Правец-16 и ЕС-1841, были выбраны персональные компьютеры PC AT 286/386 с операционными системами – серверной SCO Xenix и MSDOS/Windows, а также рабочие станции SUNSPARCstation с операционной системой UNIX System 5 (SUN Solaris).

РАСКИНУТЫЕ СЕТИ

Определенная лабораторией стратегия предусматривала для обеспечения научных исследований скорейшее развитие локальных вычислительных сетей для обеспечения научных исследований. Первая локальная сеть в САО была реализована в 1984 г., на двадцать лет позже первой локальной сети, разработанной в Ливерморской лаборатории (США), но раньше всех других в советской астрономии. Исторически в САО строились и успешно эксплуатировались разнородные локальные сети, специализированные под довольно узкий перечень задач, таких как передача наблюдательных данных в многоуровневых системах сбора БТА и РАТАН-600 или обслуживание юстировочных работ.

В 1991 г. лабораторией информатики был предложен проект базовой архитектуры вычислительных средств на основе локальной вычислительной сети. До этого времени основными вычислительными средствами в САО были ЭВМ СМ-4 и ЕС-1035, которые не только безнадежно устарели, но и выработали свой технический ресурс. Интенсивное приобретение персональных компьютеров АТ 286/386 частично позволило решить проблему редукции данных, однако оставалось много других проблем. На БТА использовались более десяти штатных методов наблюдений, основная часть которых использовала цифровую регистрацию. Резко возросли потоки информации.

Второе поколение АСУ БТА на базе СМ-2 перестало удовлетворять требованиям точности и надежности. Предложенный новый вариант комплекса технических средств АСУ БТА строился на двух профессионально-персональных ЭВМ, соединенных между собой средствами ЛВС, и с нижним уровнем системы управления коммутаторами последовательных каналов. Bus-топология локальной сети и связь каждой ППЭВМ с каналами нижнего уровня обеспечивали симметрию и равноправие ППЭВМ, позволяя работать каждой в режиме «горячего» резервирования и перераспределения вычислительных нагрузок. Средства ЛВС допускали естественное подключение ППЭВМ к компьютерам и локальным сетям систем сбора.

В 1992 г. практически было завершено создание полноценной ЛВС с включением в нее в качестве узлов имеющихся на ННП персональных компьютеров типа IBM PC/AT-286/386 общим числом до 25 абонентов и обеспечен информационный обмен между ними и доступ к серверам САО. Сеть превратила практически все имеющиеся персональные компьютеры САО в рабочие станции и обеспечила доступ к наблюдательным данным и системам обработки. Создание локальной сети САО было выполнено на основе протокола TCP/IP поверх ArcNet (В. Шергин, В. Черненко).

К 1994 г. ИВС САО в общей сложности объединяет 64 ЭВМ, в основном типа PC AT-386/486, с помощью сетевых средств Ethernet/ArcNet. В 1993 г. выполнено объединение сегментов ННП – РАТАН-600 модемной связью, переход с протоколов UUCP на SLIP по мере создания выделенных каналов. Созданы первые системы сбора на базе Linux (свободно распространяемой версии Unix).

Серверы БТА (ОС Linux) соединены с сетью ННП через кабельную пару модемами на скорости 9600 бит/с. Неоценимую поддержку сетевым начинаниям в обсерватории, в том числе привезенными из США модемами и закупкой первых сетевых карт ArcNet, оказал В. Липовецкий (рук. лаборатории «Структура»).

В соответствии с решением научно-технического совета в 1995 г. после обсуждения идеологии развития, архитектуры и состава программно-аппаратных средств аппаратной БТА была принята общая концепция развития комплекса

аппаратной и утверждена архитектура комплекса и состав базовых аппаратно-программных средств АРМ (автоматизированных рабочих мест) наблюдателей. Все компьютеры аппаратной включались в локальную сеть ВНП, и любой операционной системе обеспечивался доступ к ресурсам сервера ВНП (HDD, стример, DAT и проч.) и ИВС САО.

Лабораторией информатики производилось постепенное переоснащение и развитие локальных сетей САО: переход на Ethernet, внедрение серверов на базе IBM PC 486, выполняющих функции маршрутизаторов и серверов удаленного доступа. Для аппаратной БТА был разработан сетевой интерфейс наблюдателя под ОС Linux (с X11).

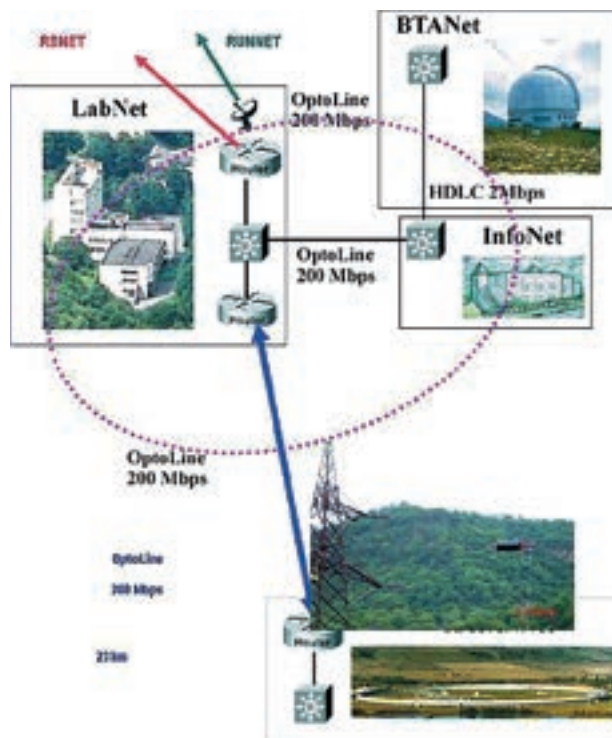


Рис. 50. Схема информационно-вычислительной сети обсерватории (2016 г.).

Модемный канал Буково-РАТАН был переведен с аналоговой аппаратуры на цифровую. Были разработаны средства для подключения PPP, SLIP и dial-up сервисов на расположенных в регионе наблюдательных станциях других астрономических учреждений России. АСУ БТА была дополнена средствами сетевого доступа для обеспечения возможности удаленного управления. Были разработаны и внедрены web- и ftp-серверы САО (<http://www.sao.ru/>, <ftp://ftp.sao.ru/>).

Развитие ЛВС (рис. 50) продолжалось в направлении внедрения новой архитектуры компьютерной сети САО с использованием маршрутизаторов и коммутаторов фирмы Cisco. При этом максимальная производительность

межсерверного соединения увеличилась до 100 Мбит/с. Новая архитектура позволила интегрировать разрозненные участки локальных сетей САО в единое многосвязное адресное пространство. Между ВНП и ННП были введены в эксплуатацию два параллельных IP-канала – проводной (160 Кбит/с) и радио (2 Мбит/с), проложены каналы (10 Мбит/с) между телескопами БТА и Цейсс-1000, БТА и Цейсс-600 и внедрен радиоканал (820 Кбит/с) между БТА и 60-см телескопом наблюдательной станции КГУ. Внедрены два синхронных проводных (2×16.8 Кбит/с) канала между ННП и ПАТАН-600, подключена к сети САО станция Института прикладной астрономии РАН.

Введен в строй канал цифровой радиосвязи в ISM-диапазоне между пунктами Цейсс-1000 и радиоцентром в п. Сарытюз (52 км). Оборудованы и введены в строй узлы сети SAO-EDU с размещением телекоммуникационного оборудования в п. Сарытюз и городском узле связи г. Черкесска. Организовано подсоединение сети SAO-EDU и маршрутизация в Интернет через РГУ по арендованному каналу Ростов-на-Дону – Черкесск производительностью 2 Мбит/с. Отлажено и сдано в эксплуатацию программное обеспечение маршрутизаторов и средств мониторинга состояния каналов связи и качества сигнала оборудования радиосвязи. Успешно опробован совместный способ передачи телефонии и данных Интернет по организованному каналу связи САО – Черкесск с использованием комбинирования средств ISDN и VoIP.

В 2000 г. были созданы своими силами и введены в штатную эксплуатацию каналы связи ННП – БТА – оптоволоконный (скорость передачи 200 мегабит) и кабельный резервный (2 мегабит). Разработана и внедрена в эксплуатацию программно-аппаратная система удаленного наведения спутниковой антенны и проведена модернизация канала Интернет с помощью высокоскоростного спутникового модема.



Рис. 51. Слева - прокладка оптического волокна ННП-ВНП; справа - серверное помещение в к. 412 лабораторного корпуса.

В 2002 г. разработана и введена в эксплуатацию высокоскоростная оптоволоконная линия связи ННП-ПАТАН-600 протяженностью 22 км. Обеспечено полнодуплексное (Ethernet 2×100 Мбит) подключение ПАТАН-600 к общей сети САО. Работа принята межведомственной комиссией РАН, Минпромнауки, Минобразования РФ.

Создан кластер из основных серверов САО на базе высокоскоростного (2.5 Гбит/с) коммутатора, внедрены мультимедийные средства маршрутизации в основные информационные каналы сети SAONet.

В 2005 г. основная магистраль SAONet переведена на 1G Ethernet, а через год установлены внешние серверы САО в РосНИИРОС. На них размещено активное зеркало сайта САО для обеспечения скоростного доступа к информационным ресурсам обсерватории произвольному числу пользователей. Организована внешняя виртуальная сеть САО, подключена к общей сети локальная сеть СПбФ САО и реализована система мониторинга состояния сети САО в режиме реального времени.

В 2015 г. завершено создание основного телекоммуникационного канала сетевой инфраструктуры САО РАН (SAONet backbone) – оптоволоконной линии ВПП-ННП (рис. 51, слева) со скоростями до 40 Гбит/с реальными сегодня и свыше 100 Гбит/с в будущем.

ПУТЬ В ИНТЕРНЕТ

Сеть Интернет является крупнейшей всемирной компьютерной сетью, благодаря своей миссии сети сетей. Разработка и внедрение первой глобальной компьютерной сети ARPANET (Advanced Research Projects Agency Network), связывающей исследовательские лаборатории на территории США, под эгидой Агентства по перспективным исследованиям МО США началась в 1969 г. Научные коллективы и отдельные исследователи получили возможность оперативного обмена научными данными и разнообразной документальной информацией посредством электронной почты. Работая с ARPANET, ученые пришли к выводу, что быстродействующие компьютерные сети являются необходимым инструментом во всех областях научных исследований. Исходя из этого, в целях развития международной кооперации и соединения большого числа компьютеров и сетей научно-исследовательских учреждений Национальный научный фонд США в 1986 г. учредил проект NSFNET (National Science Foundation Network). Его целью являлось свободное подключение исследовательских групп и ученых США и других стран к ARPANET для обмена информацией. 1987 г. можно считать началом Интернет как глобальной информационной сети с коммутацией пакетов на основе IP-протокола. Однако принципиальное изменение, определившее нынешнее существование и развитие Интернет, произвело внедрение протокола HTTP. В 1989 г., работая в CERN, Тим Бернерс-Ли предложил проект, известный как Всемирная паутина (англ. *WorldWideWeb*). Он подразумевал публикацию гипертекстовых документов, связанных между собой гиперссылками, что облегчило бы поиск и консолидацию информации. Он был предназначен для ученых CERN и первоначально использовался во внутренней сети CERN. Для осуществления проекта Т. Бернерсом-Ли и его коллегами были изобретены идентификаторы URI (и, как частный случай, URL), протокол HTTP и язык HTML. Эти технологии легли в основу современной Всемирной паутины. В период с 1991 по 1993 гг. Бернерс-Ли усовершенствовал технические спецификации стандартов и опубликовал их. Днем рождения Интернета в СССР считается дата регистрации домена .su – 19.09.1990.

САО явилась одним из лидеров внедрения Интернет в науку Советского Союза, лидером среди астрономических институтов и безусловным лидером среди нестоличных научных учреждений. Первое доменное имя обсерватории (sao.stavropol.su) было зарегистрировано в конце 1990 г., а в следующем году уже все компьютеры научных подразделений обсерватории были оснащены средствами электронной почты или удаленного доступа к почтовому серверу. Лабораторией информатики были выполнены работы по внедрению системы электронной почты на ННП, РАТАН-600 и в Ленинградском филиале САО.

Нужно особо отметить, что в августовские дни 1991 г., когда ГКЧП перекрыл все каналы массовой информации, единственной связью Карачаево-Черкессии с Москвой и миром являлась электронная почта Релком через САО РАН – КНТКЦ «КИТ».

В 1993 г. Россия была представлена в Интернет тремя некоммерческими сетями - RelCom/EUNet, RadioMSU и FreeNet. Сеть Релком была подключена к EUNet наземным каналом через NordUNet (Хельсинки) и спутниковым через Останкино - Медвежье Озера. Сеть Радио-МГУ подключалась спутниковым каналом НИИЯФ МГУ - DESY (Гамбург) с пропускной способностью канала 256 Кбит/с. FreeNet использовала шлюз компьютерной сети EARN/BITNET, международный узел которой функционировал на базе ИОНХ РАН. Развитие этих сетей осуществлялось при поддержке Международного научного фонда (ISF), Института «Открытое Общество» (OSI), НАТО, а также крупных международных проектов Комиссии Европейских Сообществ (ЕС). В начале 1994 г. был завершён первый этап создания сети RSSI, а именно: проведено подключение первых организаций и осуществлен выход в Интернет по спутниковому каналу 256 Кбит/с между ИКИ РАН и Goddard Space Flight Center (NASA, USA).

В это время конечные пользователи – научные институты даже в Москве и Санкт-Петербурге имели весьма скромные возможности доступа в Интернет. Так например ИНАСАН подключался к FreeNet и RSSI выделенными модемными линиями со скоростями до 19 Кбит/с, а в Санкт-Петербурге в связи с развалом в 1991-1993 гг. академической сети доступ в Интернет практически отсутствовал.

Тем значительнее на этом фоне выглядели успехи в 1994–1995 гг. САО РАН, в которой собственными силами была установлена спутниковая станция и проведено подключение к Интернет через провайдера «Радио-МГУ» к сети НЕР DESY (г. Гамбург) со скоростью 64 Кб/с. Был создан полноценный веб-сайт <http://www.sao.ru>, проведены первые успешные эксперименты по удаленным наблюдениям на РАТАН-600 (рис. 52) из Санкт-Петербурга (ИПА РАН) и Москвы (АКЦ ФИАН) с полноценным визуальным отображением процесса регистрации данных в реальном времени (В. Черненко). Создан ftp-сервер и обеспечен сетевой доступ к наблюдательным данным телескопов БТА и РАТАН-600, архивам и некоторым астрономическим каталогам, созданы домашние страницы WWW для некоторых лабораторий САО.

В 1996 г. главные усилия ОИ были сконцентрированы на создании надежного канала Интернет и интеграции трех существующих локальных сетей в общую информационно-вычислительную сеть – SAOnet. Дополнительно уделялось внимание разработке локальных информационных служб. Были модернизированы линии связи по радиорелейному и выделенному телефонному каналам между главным зданием института и телескопами БТА и РАТАН-600 (5 км и 25 км соответственно). Базовый TCP/IP сервис, включающий передачу файлов (FTP), электронную почту, Интернет и терминальный доступ (telnet и X-Windows), был сделан доступным для всей сети. Астрономы САО и приезжающие ученые получили возможность работы с мировыми астрономическими центрами данных. В 1997 г. было выполнено подключение наблюдательных станции ИПА РАН и КГУ к сети САО с выходом в Интернет и проведена совместная работа по подключению ГАС ГАО к сети Интернет.

К 1999 г. SAOnet использует следующее оборудование: VSAT «Калинка», два спутниковых модема SDM-100, PPC «Эриком-43», два Sparc20, как серверы/маршрутизаторы, до 120 автоматизированных рабочих мест (в основном АТ/486-586 классов), несколько типов модемов для выделенных и коммутируемых линий, внешнюю память на HDD (20Gb).

Выполнено подключение к сети RUNNet («Вузтелекомцентр», Санкт-Петербург) с увеличением пропускной способности спутникового канала до 256 Кб/с. Создана собственная провайдеро-независимая сеть SAONet с регистрацией автономной системы в европейской части Интернет. Обсерватория имеет полное Интернет-подключение, включая собственный домен второго уровня *sao.ru* и две Интернет-сети класса С (IP 193.125.88.0 и 193.125.89.0). С 2011 г. функционирует многосвязное трехточечное подключение сетей SAONet к Интернет-провайдеру РОСТЕЛЕКОМ в п. Нижний Архыз (40 Мбит/с), ст. Зеленчукская (35 Мбит/с) и Черкесск (2 Мбит/с) во взаимодействии с регистрирующими организациями.

Телекоммуникационный сервис дает возможность астрономам САО оперативно обмениваться данными с партнерами и более эффективно выполнять совместные проекты. Сотрудники и гости САО интенсивно используют SIMBAD, каталоги CDS и другие мировые информационные ресурсы. Осуществляются активные контакты и обмены данными через Интернет между САО и западными астрономическими институтами, в частности – ESO, Observatoire de Paris и Cote d'Azur Observatoire (Франция), Università di Bologna (Италия), Max-Planck-Institute für Radioastronomie и Astrophysikalisches Institut Potsdam (Германия), NOAO и NRAO (США), Poznan Observatoire (Польша) и многими другими.

В 2010 г. в SAONet реализована система аудио-видео доступа в реальном времени к проводимым в САО конференциям, семинарам, заседаниям. С помощью этой же системы осуществляется процесс дистанционного обучения студентов и магистрантов базовых кафедр САО в университетах.

Был создан распределенный веб-сайт с доступом к внутренним веб-сайтам, содержащим различную научную и техническую информации. Разработан комплекс программ, автоматизирующих поддержку и развитие сайта. Создано и поддерживается зеркало сайта САО РАН на площадке MSK-IX (<http://w0.sao.ru>). По независимым оценкам рейтинга «Астротоп России» веб-сайт САО в течение нескольких лет являлся лучшим профессиональным астрономическим сайтом России и СНГ.

СИСТЕМНЫЕ РАЗРАБОТКИ

Основная деятельность обсерватории в области информатики направлена на внедрение в научные исследования информационных технологий, обеспечение и развитие ИВС и средств связи, а также на автоматизацию процесса наблюдений. Развитие ИВС САО состояло в обеспечении сотрудников обсерватории доступом к мировым астрономическим информационным ресурсам, предоставлении мировому астрономическому сообществу доступа к архивам, каталогам и первичным наблюдательным данным САО, создании удаленных средств наблюдений для БТА и РАТАН-600, модернизации ИВС САО (BTANet, RATANNet и LabNet) и межсетевых линий связи.

В 1998 г. для скоростной обработки данных при решении научных задач был запущен высокопроизводительный двухпроцессорный вычислитель общего пользования (big2), и на него установлены системы обработки астрономических данных MIDAS и IRAF. Для хранения промежуточных архивов, оперативной обработки данных и размещения www и ftp-серверов САО внедрен RAID – дисковый массив большой емкости (47 Гб), подключенный к серверу serv и вычислителю big2.

В рамках договора с Южно-Российским региональным центром информатизации высшей школы о совместных разработках на основе программной среды СУБД Oracle

информационной системы наблюдательных данных САО начата разработка инфологической модели ее базы данных (О. Желенкова).

Продолжались работы сотрудников отдела по адаптации существующих и созданию новых средств управления и контроля БТА, которые в дальнейшем позволят реализовать режим удаленных наблюдений на телескопе. В ходе этих работ создана базовая структура матобеспечения АСУ, методы и алгоритмы управления аппаратурой телескопа, исключающие необходимость режимов жесткого реального времени, что позволяет использовать обычную многозадачную сетевую операционную систему Linux, опробован первый вариант серверной управляющей программы в реальных наблюдениях на БТА, разработана и внедрена система цифрового обзора ночного неба с дистанционно управляемой наружной телевизионной камерой.

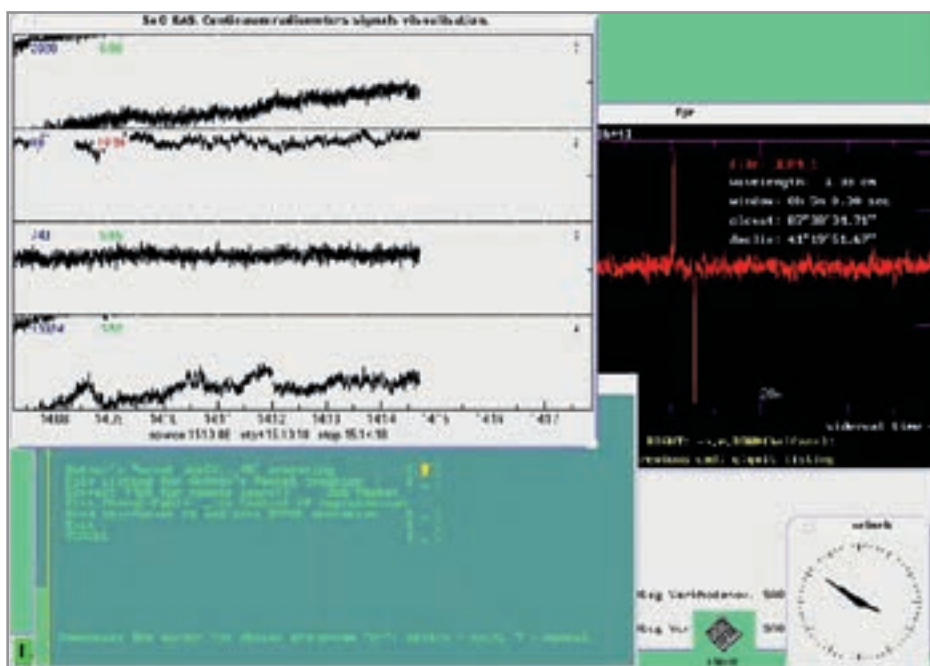


Рис. 52. Графический интерфейс пользователя регистрации данных на РАТАН-600 в реальном времени.

В 1999 г. выполнялась разработка новых непараметрических алгоритмов обработки сигнала радиометров, позволивших увеличить штатную чувствительность при наличии помех. В штатную эксплуатацию была введена система регистрации для радиометров сплошного спектра на РАТАН-600 на IBM PC386 под ОС Linux с возможностью удаленного доступа (рис. 52) по сети ArcNet и система подготовки заданий MCOSS-U с автоматической передачей заданий по e-mail (В. Черненко).

Сопровождается и развивается комплекс программно-аппаратных средств АСУ БТА. К веб-сайту САО РАН подключена страница «BTA-on-line» (рис. 53), с помощью которой реализована возможность удаленного мониторинга работы телескопа, включающая видеоконтроль телескопа, внешних погодных условий и TV-подсмотров систем сбора (<http://www.sao.ru/BTAcontrol>). Для модернизации и замены приводов

азимута и зенитного расстояния БТА разработано программное обеспечение, позволяющее управлять новыми приводами с использованием CAN-шины. Разработана программа тестирования динамики приводов азимутальной и зенитной осей БТА. Интерфейс оператора дополнен предоставлением цифровой и графической информации о токе и скоростях. Написана программа для обеспечения возможности синхронизации системы АСУ по UTC (с GPS-приемника).

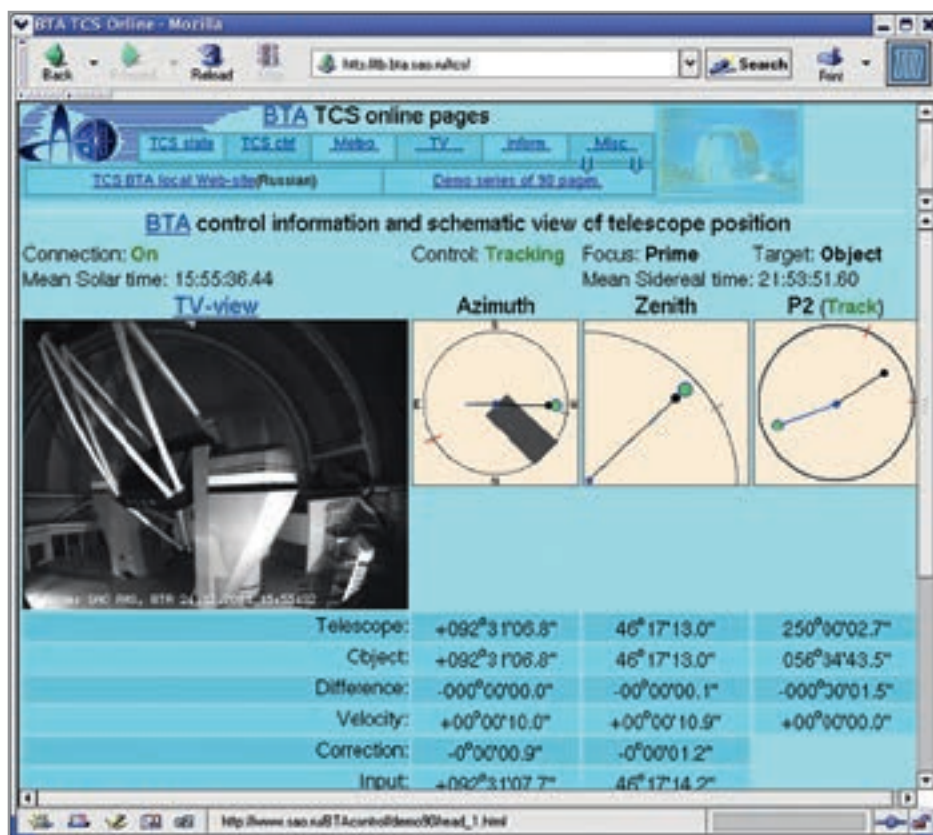


Рис. 53. Веб-интерфейс системы контроля и управления БТА.

Программная разработка В. Шергина «Сетевой клиент-серверный программный комплекс контроля и управления крупнейшим российским оптическим телескопом БТА» зарегистрирована во Всероссийском фонде алгоритмов и программ ВНИИЦ (№ 50200200455).

Проведена полная модернизация программного обеспечения цифровых телевизионных каналов БТА телевизионного комплекса обсерватории, разработана драйверная программа-сервер для грабберов, реализована возможность одновременной обработки и презентации телевизионных каналов (<http://www.sao.ru/BTAcontrol>). Программное обеспечение цифрового телевизионного комплекса БТА зарегистрировано во Всероссийском фонде алгоритмов и программ ВНИИЦ под № 50200200025 (В. Шергин).

На основе проведенного системного анализа и формализации наблюдательного цикла телескопов БТА и РАТАН-600 разработана многоуровневая схема системы диспетчеризации ресурсов от подачи заявки до получения оперативных и архивных данных. Разработана и внедрена (С. Малхасян, О. Желенкова) on-line заявка (русская и английская версии) на наблюдательное время для оптических телескопов САО РАН (www.sao.ru/request/zeiss.html и www.sao.ru/request/). Создана база данных расписаний наблюдений на инструментах обсерватории и веб-архив расписаний наблюдений с 1992 г. по настоящее время (www.sao.ru/request/schedule/index/html) на БТА, РАТАН-600 и Цейсс-1000 (О. Желенкова, Т. Пляскина). Разработана программная система автоматического составления предварительного расписания наблюдений (С. Малхасян). Разработана трехуровневая система ролевых разделений сервисных функций и привилегий пользователей со следующими категориями пользователей: администраторы, члены КТБТ, наблюдатели (В. Витковский, О. Желенкова).

На базе CISCO-маршрутизаторов реализовано квотирование потоков данных. Управление доступом к контентам Интернет/Интранет основано на выделении в каналах полос различной ширины для промежуточных кэш-серверов (В. Черненко), что позволяет осуществлять быстрый доступ к астрономическим ресурсам и «мягко» ограничить доступ к остальным. Для защиты от несанкционированного доступа к информационным и техническим ресурсам обсерватории разработана многоуровневая система со сквозной идентификацией пользователей, ролевым разделением сервисных функций, прав доступа и квотированием информационного канала.

Разработано и внедрено программное обеспечение и электромеханическая часть локального корректора положения звезды фокуса N2 (А. Иванов). Для автоматизации систем сбора данных БТА разработана электрическая схема и изготовлено дистанционное управление механизмами платформы SCORPIO в ПФ БТА, разработана электрическая схема и изготовлен пульт дистанционного управления магнитометром в ПФ БТА.

Совместно с лабораторией «Структура» введен в рабочую эксплуатацию программный пакет NICE для нескольких наблюдательных методов. Внедрена издательская система LaTeX: разработаны стилевые файлы для изданий САО (Т. Пляскина).

Сотрудники лаборатории принимали участие в обеспечении наблюдательных программ (ремонт, тестирование, подготовка и коммутация аппаратуры), выполняли профилактическое обслуживание вычислительной техники, поддержку и сопровождение FTP-архива обсерватории, плановую модернизацию операционных систем и прикладного программного обеспечения.

Выполнялись совместные работы с другими подразделениями обсерватории, в частности: разработка информационной системы «Эволюция радиогалактик», работы по теме «Исследование ранней Вселенной методами радиоастрономии», работы по оптическому отождествлению радиоисточников и спекл-интерферометрии. Осуществлялось рабочее взаимодействие с European FITS Committee.

В 2005 г. проведены работы по испытанию и внедрению компьютерного оборудования для систем сбора данных и управления на базе конструктива CompaqPC и ОС Linux RH-8.0 и Windows2000. Разработана базовая часть АСУ инструментальных комплексов телескопов САО для унификации взаимосвязей, распределенных по различным компьютерам, программ управления наблюдательной аппаратурой, сбора сопутствующей информации и интерфейсов наблюдателей. На ее основе выполнена разработка системы автоматизации для аппаратуры управления устройствами в фокусе

N2. Система прошла опытную эксплуатацию в процессе реальных наблюдений. Завершен перевод управления и сбора в узлах А и Z на контроллерный вариант с обменом через CAN-шину. Для этого в серверной программе АСУ для Z реализованы алгоритмы ведения условного времени контроллера и актуализации значений датчиков угла, т.е. их синхронизации с текущим временем, на которое производится расчет теоретических значений. Создана штатная система для систематического мониторинга точностных характеристик БТА. Проведены испытания нового цифрового ТВ ICCD подсмотра с охлаждаемой ПЗС-матрицей. Реализована ТВ-система с сетевым доступом для 70-см гида БТА. Организована сетевая служба точного времени на базе GPS-сервера.

Новая версия страницы «BTA-online» включает веб-интерфейс оперативного управления БТА (<http://tb.bta.sao.ru/tcs/ctrl/>), позволяющий корректировать положение телескопа, управлять поворотным столом и фокусировкой (В. Шергин). Разработан новый интерфейс веб-камер (http://tb.bta.sao.ru/webcam/bta_webcam_js.html) и интерфейс представления ТВ-каналов (tb.bta.sao.ru/webcam/tvcams_js.html). Реализован live-интерфейс к веб-камерам (tb.bta.sao.ru/tcs/livestart.html).

Проведены разработка и внедрение на серверах CATS и SED системного программного обеспечения, что объединило их в общий Linux-кластер с балансированием загрузки процессоров (В. Черненко). Проведены разработка и тестирование миграции UNIX-процессов для программ с общей разделяемой памятью, в том числе HTTP-серверов с возможным линейным масштабированием производительности.

Введено в эксплуатацию программное обеспечение маршрутизаторов и средств мониторинга состояния каналов связи и качества сигнала оборудования радиосвязи. Успешно опробовано совмещение передачи телефонии и данных по гибриднему каналу связи САО–Черкесск с использованием комбинирования средств ISDN и VoIP. Установлена и внедрена офисная АТС DEFINITY с возможностью подключения к междугородной АТС. Выполняется сопровождение последних версий пакета teTeX и поддержка стилей САО на основных ЭВМ ННП и РАТАН-600. Создан терминальный комплекс Ставропольском государственном университете для апробации методики дистанционного обучения. Выполнена административная установка и запуск 1С: Бухгалтерии. Установлен сервер с билинговой системой для поселковой сети.

В июне 2002 г. обсерватория вошла в международный альянс IVOA. Участники альянса решают задачу объединения вычислительных и экспериментальных комплексов, архивов и центров данных с помощью стандартных протоколов и интерфейсов.

Создана система дистанционного доступа к информационным и техническим ресурсам (<http://www.sao.ru/racs>). Система предоставляет возможность проводить наблюдения на телескопах обсерватории в режиме удаленного доступа, включая on-line подачу заявки через веб-сайт САО РАН, удаленный ввод заданий и получение наблюдательных данных, а также удаленное управление телескопом БТА. Реализация этой системы является базой для создания Российской виртуальной обсерватории (РВО), интегрирования российских астрономических ресурсов и обеспечения доступа к данным мирового научного сообщества. Разработка программы создания РВО осуществляется совместно с ИНАСАН, ИПИ и МСЦ РАН.

Лаборатория информатики была инициатором работ по проекту учебно-научного центра коллективного пользования «Наземная астрономия» ФЦП «Интеграция». Создан территориально-распределенный центр дистанционного использования

вычислительных и экспериментальных научно-образовательных ресурсов Южного федерального округа «Информатика, наука, образование». Сотрудниками оборудовано два учебных класса на ННП и РАТАН-600 для студентов, аспирантов и молодых научных сотрудников, проходящих практику и стажировку в САО РАН, установлены стандартные астрономические системы обработки данных на учебных машинах, разработана домашняя страница УНЦКП на веб-сайте САО РАН (Н. Калинина). Сотрудниками ОИ проводятся лекции и практические занятия со студентами МГУ, СПбГУ, НИУ ИТМО, КГУ и СГУ по темам «Инфокоммуникационное обеспечение наблюдений», «Интеллектуальная обработка данных», «Работа в системе MIDAS» и др.

В 2004 г. при участии лаборатории (О. Желенкова) в программе «Большое Трио» была обнаружена радиогалактика с красным смещением $z = 4.514$ по результатам спектроскопии на БТА слабого оптического объекта, ранее отождествленного также на БТА с компактным радиоисточником RC J0311+0507 из выборки объектов с ультракрутыми радиоспектрами обзора «Холод», что было отмечено в качестве важнейших результатов САО по тематике «Метагалактика».

Обсерватория являлась активным участником целевых программ РАН: «Информатизация Президиума и научных учреждений РАН» и «Высокопроизводительные вычислительные системы и телекоммуникации». РФФИ поддержал более двадцати проектов, представленных сотрудниками отдела информатики.

На базе САО организованы и проведены с участием ведущих специалистов России семь рабочих совещаний-семинаров «Информационные системы в фундаментальной науке», включенных с 2005 г. в программу регулярных мероприятий РАН. В настоящее время информационные системы приобретают все более важное значение в связи с увеличением объема информации, поступающей от новых экспериментальных комплексов, с развитием новых подходов к обработке и хранению данных и обеспечением доступа к ним максимально возможному числу научных коллективов и исследователей. Состояние информационно-образовательных сетей, как общероссийских, так и региональных вызвало большой интерес и широко обсуждалось участниками совещания. Дополнительно обсуждалась проблема взаимодействия государственных и негосударственных учреждений, министерств, ведомств, РФФИ и других фондов в решении проблемы обеспечения информационной базы науки.

В 2010–2014 гг. создан программно-алгоритмический комплекс восстановления изображений наблюдаемых объектов SPECKLE, реализующий метод биспектрального анализа для восстановления информации о фазе в спекл-интерферометрических данных. Реконструкция изображения проводится в два этапа: восстанавливается автокорреляционная функция объекта, на втором этапе реконструируется фаза (С. Комаринский).

Разработана программа обработки наблюдательных данных DSR LAB (С. Комаринский), которая ориентирована на использование широким кругом специалистов, занимающихся анализом и обработкой астрономических, рентгеновских, оптических, тепловых, радио или любых других массивов данных.

Разработано (В. Шергин) веб-приложение для графического представления данных из астрономических каталогов, которое реализует веб-доступ и визуализацию данных из широко используемых каталогов. Разработка выполнялась на базе программных приложений, реализованных на языке Python с использованием интерфейса CGI и универсального интерфейса DB-API для СУБД PostgreSQL. Реализован динамический веб-интерфейс (В. Шергин) для визуализации объектов из

каталога в виде модели поля зрения телескопа. Дополнительно, в нем на языке JavaScript, реализована возможность оперативного просмотра координат объектов «on-click». Одной из особенностей разработки является ее почти полная независимость от используемой операционной системы. Это достигнуто выбором базового инструментария, имеющего реализации в различных ОС.

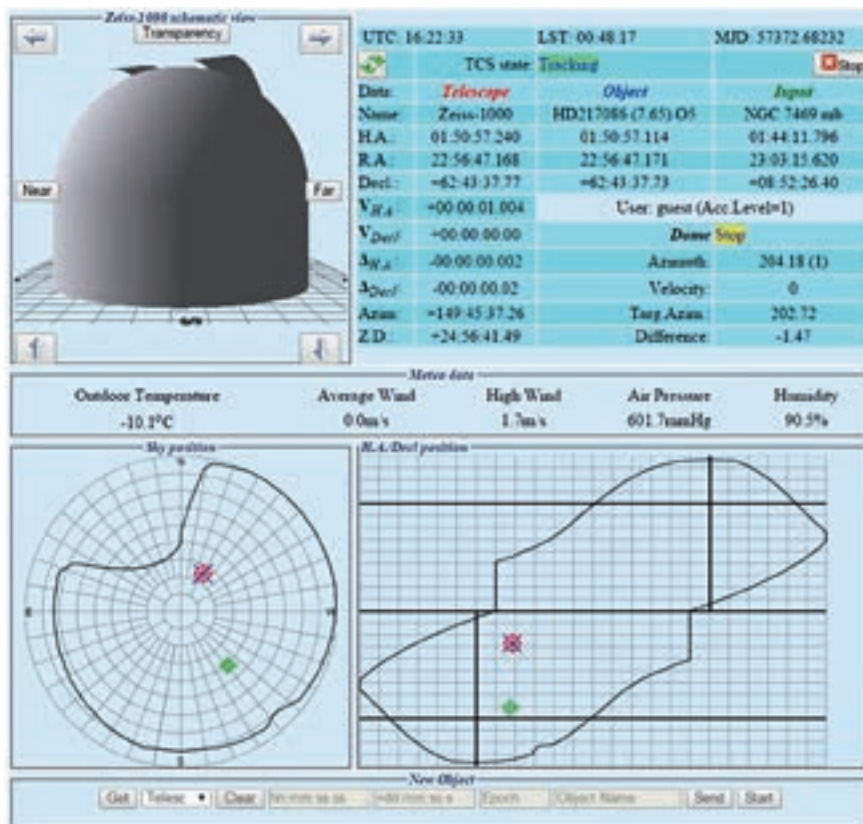


Рис. 54. Веб-интерфейс астронома системы управления телескопом Цейсс-1000.

В 2014 г. завершены разработка и внедрение в эксплуатацию новой АСУ телескопа Цейсс-1000 в части программных разработок, что позволило приступить к наблюдениям в режиме удаленного доступа. Создан сайт Цейсс-1000 для наблюдателей (www.sao.ru/zics/index_ru.php). Разработаны веб-интерфейсы (рис. 54), где размещена вся информация, необходимая наблюдателям, инженерам и администратору: интерфейсы телескопа, протоколы работы системы, интерфейсы ТВ-камер, руководства по АСУ, метеоданные (В. Шергин).

Создан программный пакет и отработана методика координатной привязки прямых снимков по стандартным астрометрическим каталогам (GSC2, 2MASS). Разработан и внедрен RCP-сервер (Remote Control Procedure) для координатной привязки прямых снимков с телескопов САО и архивных FITS-файлов.

ВИРТУАЛЬНОЕ БУДУЩЕЕ

Количество информации, получаемое мировым астрономическим сообществом, благодаря достижениям в создании крупных наземных и спутниковых телескопов, производству высокочувствительных мозаичных светоприемников и развитию средств связи, растет по экспоненциальному закону. Эти тенденции де-факто меняют традиционную схему проведения астрофизических исследований: от небольшой группы исследователей, выполняющих для получения научного результата в течение достаточно продолжительного времени наблюдения нескольких объектов, к многопараметрическому исследованию цифровых обзоров в различных диапазонах электромагнитного излучения. Изменение парадигмы наблюдательного процесса связано с ростом вычислительных мощностей компьютерного оборудования, позволяющего накапливать, обрабатывать и сохранять терабайтные объемы данных, а также с необходимостью эффективного использования дорогостоящих экспериментальных комплексов. Изменения определенно затронут способы распределения наблюдательного времени. По принятой сейчас схеме орбитальные и наземные обсерватории выделяют значительную часть своего времени на проведение исследований в режиме «single observer – single program», когда маленькие порции времени выделяются большому количеству исследовательских программ. В дальнейшем предполагается выделение большей части времени для программ, связанных с обзорами неба и выполняемых в нескольких диапазонах.

Существующие цифровые обзоры неба в разных диапазонах электромагнитного излучения открывают возможности для получения новых знаний (data mining), открытия редких объектов, поиска переменности и т.п. с помощью алгоритмов распознавания образов, статистических и эвристических методов. Совершенно новые научные результаты могут быть получены из совместного использования данных, накопленных на разных инструментальных комплексах в ходе различных экспериментов.

Высокая пропускная способность средств телекоммуникации и быстрый темп накопления данных требуют адекватной организации эффективного обмена информацией между большим количеством сайтов для скорейшего получения новых научных результатов.

В настоящее время очевидно, что не только накопление и анализ, но и организация и распространение данных являются существенным элементом дальнейшего развития науки и технологии. Все это требует новой инфраструктуры для более эффективного синтеза технологий. Эту объединяющую, контролирующую, наблюдательную роль может играть виртуальная обсерватория (ВО).

Основные идеи проекта РВО впервые были представлены (В. Витковский и др.) на конференциях «Toward an International Virtual Observatory» (Garshing, 2002), ВАР-2001 (Санкт-Петербург) и ADASS XI (Victoria, Canada). Принципы и подходы к созданию РВО (рис. 55) сформулированы на основе анализа проблем, связанных с повышением эффективности использования российских и мировых информационных и экспериментальных астрономических ресурсов, а также реализуемых или объявленных проектов виртуальных обсерваторий.

Более широкий взгляд на проблему создания ВО сделал необходимым расширение самой ее концепции, поскольку не существует принципиальных различий между данными, хранящимися в архивах, и данными, получаемыми непосредственно с телескопов или в результате моделирования и численных экспериментов.

В отличие от общепринятого в настоящее время представления ВО как распределенной коллекции архивных и производных от них данных (т.н. «виртуальное небо») основным принципом РВО является объединение в одной распределенной системе экспериментальных комплексов, архивов, баз и банков данных со стандартизованными интерфейсами и средствами сетевого доступа, в том числе и к суперкомпьютерным центрам.



Рис. 55. Схема взаимодействия в инфраструктуре Российской виртуальной обсерватории.

В отличие от других предлагаемых концепций (NVO, Astrovirtel и др.) в качестве базовых принципов построения РВО предлагается:

- объединение в распределенной системе экспериментальных комплексов, архивов и центров данных РВО со стандартизованными интерфейсами и средствами сетевого доступа;
- организация для запросов на получение информации единого входного портала, реализующего удовлетворение запроса в существующей информационной базе, а при невозможности этого постановку в очередь на проведение эксперимента на адекватном запросу инструментальном комплексе РВО;

- реализация процедуры «сетевой транспортировки» исследователя к источникам данных, а не данных к исследователю, подразумевающая под этим расширенный доступ пользователя к информационным, вычислительным и инструментальным ресурсам, включающий возможность использования на базе РВО собственных программных и аппаратных средств.
- создание на базе РВО открытой виртуальной среды астрономического образования, выполняющей функции обучения, общения и энциклопедии.

Структура РВО должна включать следующие основные компоненты:

- архивы, базы и банки астрономических данных;
- автоматические телескопы (робот-телескопы с Интернет-доступом, on-line заявки на крупные телескопы) и системы сбора данных;
- развитые средства удаленного доступа к информационным и экспериментальным ресурсам с адекватными телекоммуникационными каналами;
- адекватные потокам данных вычислительные системы и/или средства удаленного доступа к суперкомпьютерным центрам;
- распределенную систему контроля и диспетчеризации ресурсов;
- самообучающиеся экспертные системы;
- программные средства обработки данных и поиска новых закономерностей;
- открытую виртуальную среду астрономического образования;
- многоуровневую сеть веб-сайтов с главным порталом «Российская виртуальная обсерватория».

Основой взаимодействия пользователя с РВО будет являться портал «Российская виртуальная обсерватория», который удовлетворит все запросы на имеющиеся ресурсы. Так первичный запрос детализируется, уточняется и корректируется в ходе интерактивного взаимодействия с порталом, после чего производится сканирование существующих баз данных. Если запрос не может быть удовлетворен существующими данными, производится подбор доступных инструментов, составляется заявка на наблюдение. Заявка включается в расписание наблюдений, и пользователь получает данные в ходе или после проведения наблюдений. Если выбранный инструмент полностью автоматизирован, процедура выполняется автоматически. Если же инструмент автоматизирован частично или существует программный комитет, распределяющий его ресурсы, то пользователь получает возможность составления требуемой заявки. К оформленной заявке автоматически добавляется заключение об оригинальности запрашиваемых данных. Данные, выбранные в базах или получаемые в ходе эксперимента, могут быть обработаны стандартными программами из библиотеки РВО или собственными программами пользователя.

Функционирование РВО должно основываться на быстро развивающихся технологиях телекоммуникаций и информатики. Чтобы обеспечить постоянную жизнеспособность, РВО необходимо:

- *формироваться как распределенная структура*, поскольку основная исследовательская работа, создание новых центров и развитие новых направлений в существующих центрах происходит и будет происходить в географически разнесенных местах;
- *эволюционировать*, то есть с самого своего основания быстро реагировать на изменение технических и научных возможностей, а также потребностей астрономического сообщества;

- *действовать объединяюще* для всех возможных средств наблюдений, поиска, обработки и интерпретации данных;
- *быть открытой* для образовательных и познавательных целей;
- *ориентироваться на глобализацию* в смысле сотрудничества с другими странами в подобных проектах.

Существенный прогресс в телекоммуникациях и информатизации науки и образования в России делает реальным создание РВО. Обеспечение доступа к имеющимся в стране и существующим в мире информационным и экспериментальным ресурсам является основной задачей, решение которой в значительной степени улучшит возможности проведения научных исследований и астрономического образования в нашей стране.



Рис. 56. Веб-сайт трансляции полного солнечного затмения.

Проблема создания географически распределенных мониторинговых систем актуальна для многих областей науки - астрономии, геофизики, метеорологии и др. Построение специализированных сетей для таких систем в настоящее время нереально по экономическим причинам. Решением проблемы может быть разработка и реализация методов обеспечения взаимодействия в режиме реального времени эксперимента географически распределенных наблюдательных комплексов через Интернет. В рамках этой работы в 2008 г. была построена и протестирована модель сетевого взаимодействия роботизированных телескопов с общими и частными очередями заданий на наблюдения (В. Витковский, Н. Дмитриев). Впервые в России в 2006 г. в качестве иллюстрации

возможностей географически распределенных астрономических систем лабораторией была осуществлена интернет-трансляция полного солнечного затмения, повторенная в 2008 г. с веб-доступом на сайте *main.sao.ru/eclipse-2008* (рис. 56).

Развитие современных компьютерных технологий – распределенных вычислительных систем, объектно-реляционных баз данных, веб-ориентированных средств доступа к экспериментальным данным – требует нового подхода к информационно-вычислительному обеспечению наземных астрономических экспериментов. Необходимо учитывать информационную открытость мирового астрономического сообщества, которая определяет выбор форматов данных, пакетов обработки данных, методологию и технологию организации наблюдательного процесса. На повышение эффективности использования телескопов оказывает влияние не только их техническое оснащение, но и правильная организация потоков данных: научных данных – для хранения и эффективного доступа, технических данных – для отслеживания состояния инструментов.

В настоящее время чаще всего через Интернет осуществляется доступ к информационным ресурсам, фактор времени доступа к которым не играет особенной роли. Такие ресурсы можно считать стационарными. В то же время с развитием скоростных каналов связи появляется возможность Интернет-доступа к экспериментальным комплексам, работа с которыми требует выполнения условий реального времени. Такие ресурсы можно отнести к динамическим, и работа с ними связана с реальным временем в смысле управления физическим экспериментом. Задача создания подобного рода динамического ресурса возникла при разработке системы дистанционного доступа к информационным и экспериментальным ресурсам САО РАН.

Основной целью проведения астрофизических экспериментов является получение информации о небесных объектах. Вся цепочку – от постановки научной задачи, проведения эксперимента и до получения научного результата – мы рассматриваем как единый технологический цикл. Наиболее важной частью этого цикла является проведение эксперимента (наблюдения), что включает в себя управление телескопом, управление приемниками излучения, регистрацию и сбор наблюдательных данных. Под реальным временем наблюдательного цикла мы понимаем такой ограниченный промежуток времени, в течение которого происходит изменение информации о состоянии телескопа, системах сбора данных, климатических условиях. И эти изменения могут повлиять на проводимый наблюдательный эксперимент. Каждый тип информации имеет свой период старения, к примеру, для положения телескопа этот интервал – минуты, изменение метеопараметров – часы. В целом режим реального времени должен обеспечивать оптимальную работу телескопа в течение ночи. В частности, допускать замену объектов наблюдения или изменение режимов наблюдения. Существенным является обеспечение возможности активного и оперативного влияния астронома на наблюдательный процесс в зависимости от изменяющихся параметров. К ним относятся локальные метеопараметры и метеобстановка, движение и положение телескопа, качество изображения и др.

Для обеспечения наблюдательного процесса постоянно развивается и модернизируется комплекс программно-аппаратных средств системы управления БТА и телевизионного комплекса обсерватории. Информацию и телевизионные изображения телескопа и местных метеоусловий можно получить в режиме реального времени (live push stream image mode) на странице «БТА-on-line» (<http://www.sao.ru/BTAcontrol>). Реальное управление телескопом имеет много особенностей, в частности, изменение режимов его работы нельзя предоставлять любому желающему. Разработана

веб-система составления расписания, веб-приложение для интерактивного заполнения журнала наблюдений БТА и архивизации протоколов ночи. Для решения проблемы несанкционированного вмешательства в работу телескопа предусмотрены несколько уровней доступа к функциям управления, защищенные паролями.

По функциональным возможностям и удаленности доступа интерфейсы, обеспечивающие управление телескопом, можно условно разделить на три зоны. Интерфейс с максимальной функциональностью предоставляется в локальной сети телескопа. Это самая ближняя зона, где управление инструментом осуществляется мультикастинговой рассылкой UDP-пакетов. Именно в этой зоне работают операторы телескопа, для которых разработан специализированный графический интерфейс с полным набором функций управления телескопом. Ограниченная функциональность предусмотрена для астронома, проводящего наблюдения, что отражено в соответствующем интерфейсе наблюдателя. Это средняя зона, где информация по управлению телескопом передается с организацией TSP-сессии на любом компьютере внутренней сети обсерватории. Эти интерфейсы могли бы использоваться из внешней сети, но эта возможность закрыта из соображений безопасности. Для стороннего заявителя возможны только функции мониторинга, который может выполняться с помощью стандартного веб-браузера. Эти функции немаловажны для заявителя наблюдательной программы, который по разным причинам не может присутствовать на наблюдениях. Таким образом, он может контролировать наблюдаемые объекты, качество изображения и т.п. Число динамических ресурсов с Интернет-доступом неуклонно возрастает, и на любом современном крупном наземном телескопе должны обеспечиваться подобного рода сервисы. Для системы удаленного доступа к АСУ телескопов предложена спецификация программно-аппаратного интерфейса, позволяющего пользователю осуществлять управление телескопами во время проведения экспериментов и получать необходимые для последующей обработки результатов данные АСУ о координатных, климатических и прочих условиях проведения эксперимента, а также текущие инструментальные параметры.

РАЗРАБОТКА КОНЦЕПЦИИ СОЗДАНИЯ, АДАПТАЦИИ И ВНЕДРЕНИЯ ИКТ

В астрономии с конца 20-го века происходит четвертая «революция», которая кардинально меняет способы получения и представления информации, методов накопления, объемы данных, а также обработку и анализ наблюдений. Поменялись способы и технологические средства, применяемые при хранении данных, изменились и способы обмена информацией. Однако и сейчас нужно прилагать значительные усилия для организации, сортировки и обработки данных.

Анализ больших объемов данных остается сложной, трудоемкой и ресурсоемкой задачей. Ожидаемые объемы цифровой информации в астрономии заставляют обратить внимание и на жизненный цикл данных, который можно представить в виде следующих этапов: получение и накопление данных, хранение, обмен и доступ к данным, обработка, анализ данных. Стандартизация этих этапов могла бы существенно повысить эффективность исследований, принимая во внимание присутствующий контекст Больших Данных (Big Data). Решением этих задач является систематическое использование новых технологий интернета – cloud и grid, распределенных систем управления базами данных, оборудования с инновационными методами хранения и параллельных вычислений.

Проведен обзор текущего состояния инфокоммуникационных технологий в части как оборудования, так и программных компонентов. Выполнены разработки и исследования методов анализа данных большого объема средствами когнитивной визуализации с использованием средств НРС на базе GPU, а также их приложения для решения задач фундаментальной и прикладной науки (В. Витковский, С. Комаринский).

Разработана и реализована в алгоритмах и программах концепция когнитивной визуализации многомерных данных для баз данных большого объема. Разработана и программно реализована концепция когнитивной 6D-визуализации многомерных данных для баз данных большого объема.

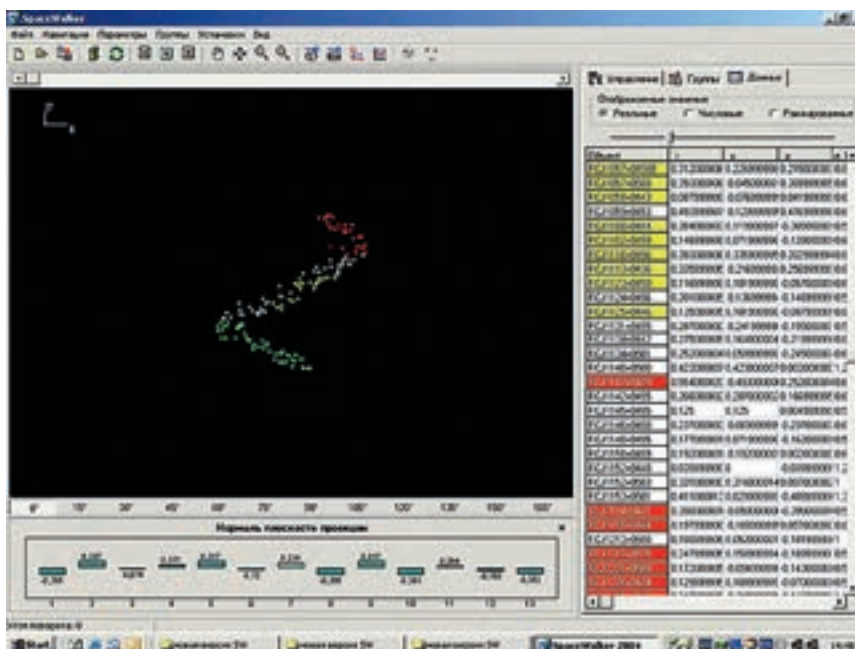


Рис. 57. Интерфейс динамического проецирования N -мерных данных программы Space Hedgehog.

Исследованы возможности и применимость архитектуры CUDA в программных системах когнитивной визуализации многопараметрических данных (рис. 57), в частности, для оптимизации алгоритма редукции на nVIDIA GPU (алгоритм динамического проецирования N -мерных данных программы Space Hedgehog).

Рассмотрены разработки IVOA, а также применяемые стандарты и технологии в коммуникационной инфраструктуре виртуальной обсерватории. Рассмотрены этапы жизненного цикла астрономических данных (В. Витковский, О. Желенкова), их обеспеченность стандартами в контексте постоянно растущего объема данных.

Общий архив наблюдений

Желенкова О.П.,

старший научный сотрудник ЛИ, к.ф.-м.н.; zhe@sao.ru

Витковский В.В.,

заведующий ЛИ, к.ф.-м.н.; vvv@sao.ru

Пляскина Т.А.,

ведущий инженер ЛИ; таар@sao.ru

Малькова Г.А.,

ведущий инженер ЛИ; mga@sao.ru

Шергин В.С.,

старший научный сотрудник ЛИ; vsher@sao.ru

Черненко В.Н.

старший научный сотрудник ЛИ, к.ф.-м.н.; vch@sao.ru

С начала 80-х годов прошлого века регистрация данных, получаемых в процессе наблюдений на радиотелескопе РАТАН-600, а на оптическом телескопе БТА – с конца 80-х стала производиться в основном в цифровом виде. К этому же времени относится и разработка концепции банка астрономических данных обсерватории (БАД) [1], который должен был объединить наблюдательные данные, астрономические каталоги, цифровые обзоры, технические документы, статьи. Телескопы обсерватории являются инструментами коллективного пользования, что предполагает интенсивный обмен получаемой на них информации. Реализация веб-доступа к разнородным электронным коллекциям и объединение информационных ресурсов обсерватории - это задачи интегрированного банка данных (ИБД), который развивает концепцию БАД с учетом современных тенденций в информационных и компьютерных технологиях. В этом контексте общий архив наблюдений является частью ИБД САО РАН.

За время своего существования архив прошел несколько этапов модернизации [2–5], обусловленных изменениями как требований к набору сервисных функций, так и методами представления информации, а также способами хранения данных, которые определяются разными цифровыми носителями (от магнитных бобинных лент, дат-кассет, стримерных лент к оптическим дискам и RAID-массивам). Эти этапы связаны как с развитием компьютерных технологий, так и изменениями методов наблюдений.

Учитывая полученный опыт работы с цифровыми коллекциями, на текущий момент архитектура архивной системы включает в себя каскадную систему архивизации для накопления файлов, хранилище и информационно-поисковую систему (ИПС). На сегодняшний момент общий архив наблюдений САО РАН – едва ли не единственный в нашей стране астрономический архив с возможностью оперативного копирования данных по сети Интернет.

На телескопах обсерватории постоянно ведется разработка приборов и внедрение новых методов наблюдений. Метод наблюдений связан с определенным компьютерно-аппаратным комплексом – системой сбора данных, которая обеспечивает их регистрацию с прибора, установленного на телескопе. Каждый файл кроме цифровых данных обязательно содержит набор параметров, которые однозначно

характеризуют наблюдение: метеоусловия, объект наблюдений и др., что важно для дальнейшей обработки и получения научного результата. Источниками значений этих параметров являются система управления телескоп, система сбора данных и сам наблюдатель. Часть параметров поступает в заголовок файла автоматически, часть заносится наблюдателем.

Формат цифровых данных, регистрируемых системой сбора, обычно разрабатывается группой исследователей, которая реализует эту систему. Представление информации, особенно в части описания параметров наблюдений, в разных системах сбора – разное. Для описания процесса наблюдения разные системы сбора данных используют от десятков до нескольких сотен параметров. Они постоянно модернизируются, что часто приводит к изменению этих параметров, поэтому каждый архив включает в себя не одну версию форматов. Таким образом, в архиве хранятся разнородные по представлению данных цифровые коллекции. Каждая коллекция называется локальным архивом и включает в себя данные, полученные с помощью одного метода наблюдений. Общий архив наблюдений – это коллекция локальных архивов.

Архивная система состоит из трех взаимосвязанных подсистем – каскадной системы архивизации, хранилища и информационно-поисковой системы.

Следующие принципы определяют правила работы с файлами, которые помещаются в общий архив наблюдений:

- формат наблюдательного файла не меняется;
- в архиве хранятся необработанные наблюдения в том виде, в каком они были получены на телескопе;
- физическая единица хранения – оптический диск;
- оптический диск имеет следующую структуру – метка диска и каталоги с файлами, где в каждом каталоге хранятся наблюдения, полученные в течение одной даты, имя каталога содержит дату наблюдения;
- логическая единица хранения – наблюдение;
- согласно положению об архиве наблюдательных данных САО РАН заявители наблюдательной программы имеют право на двухлетний период исключительного доступа к данным, затем данные открываются для свободного доступа.

Наблюдательные данные, полученные на инструментах обсерватории, хранятся на оптических дисках. Чтобы обеспечить запись данных на оптический диск, информация, полученная в течение серии или сета наблюдений, накапливается на компьютере системы сбора данных – это первый уровень системы архивизации. В ходе наблюдательного сета или по его завершении файлы с исходными данными наблюдений копируются на выделенный файл-сервер, который является вторым уровнем архивизации, в каталог, соответствующий методу наблюдений. Когда данных накапливается достаточно по объему, администратор формирует образ диска, а затем записывает его на оптический диск, который входит в третий уровень системы архивизации – хранилище.

Хранилище общего архива наблюдений физически имеет два уровня для того, чтобы с одной стороны обеспечить долговременное надежное хранение информации, а с другой стороны – иметь оперативный доступ к файлам.

Первый уровень – хранилище, которое включает оптические диски и их дубликаты. Доступ к этой информации возможен только в off-line-режиме и реализуется администратором. Диски имеют сквозную нумерацию. Номер последовательно

присваивается каждому диску по мере их создания. Архивный диск включает метку тома и каталоги с наблюдениями (иногда имеются вложенные каталоги), причем данные одной наблюдательной ночи записываются в один каталог, и название каталога содержит дату наблюдения. На диск записываются наблюдательные данные, а именно: файлы с наблюдениями объектов, сервисные файлы, используемые для коррекции инструментальных ошибок и привязок, журналы наблюдений, сопутствующая информация, подготовленная наблюдателем, а также дополнительная информация – текстовые справочные файлы, информация, используемая для идентификации диска.

Второй уровень – оперативное хранилище, организованное на дисковом RAID-массиве. В него скопированы все оптические диски из off-line-хранилища, а также сюда записано содержимое этих дисков, но уже обработанное программами-фильтрами согласно правилам, описанным далее, для того, чтобы обеспечить работу информационно-поисковой системы с имеющейся информацией. Эта часть оперативного хранилища имеет логическую организацию согласно поддерживаемым цифровым коллекциям – локальным архивам и оптическим дискам, помещенным в ИПС.

Перед тем, как поместить CD/DVD-диск в ИПС, он копируется в оперативное хранилище, а затем проводится процедура верификации, которая проверяет:

- количество локальных архивов, записанных на диске;
- содержит ли имя каталога с данными одной ночи дату наблюдений;
- соблюдается ли хранение данных одной ночи в одном каталоге;
- выполняется ли правило записи наблюдения в один файл.

Затем диск проверяется на соответствие принятым в архивной системе правилам. Если они не выполнены, то выполняются следующие преобразования:

- при наличии нескольких локальных архивов CD-диск обрабатывается несколько раз;
- наблюдения одной ночи переписываются в один каталог, если это не соблюдено;
- каталоги переименовываются таким образом, чтобы название содержало дату наблюдения, если это так;
- извлекаются файлы из tar-архивов, если таковые имеются;
- производится повторная компрессия при отличии метода компрессии от bzip2;
- файлы, хранящиеся во внутреннем формате системы MIDAS, преобразовываются в файлы FITS-формата [6];
- анализируются FITS-заголовки, и, если название инструмента отличается от того, к которому относится диск, то изменяется принадлежность файла к локальному архиву.

На текущий момент объем данных в общем архиве обсерватории составляет около 1.5 ТБ (без компрессии). Происходит пополнение пяти локальных архивов, остальные коллекции хранят данные, которые получены на приборах, выведенных из использования. Еще архивная система включает три локальных архива с прямыми снимками, для которых выполнена координатная калибровка.

Разработка и реализация ИПС общего архива наблюдений САО РАН проводилась поэтапно. В 1999–2000 гг. отделом информатики (О.П. Желенкова, В.В. Витковский) совместно с ЮгИнфо (бывший вычислительный центр РГУ) был разработан прототип ИПС с применением системы управления базами данных (СУБД) Oracle для небольшого архива радионаблюдений [2]. В запросах использовался весь набор

параметров из заголовков файлов. При применении этой системы к другим коллекциям выяснилось, что в некоторых локальных архивах набор параметров очень ограничен, особенно для самых ранних данных. Тогда набор параметров был сокращен до минимума для того, чтобы стало возможным производить запросы ко всем коллекциям. В 2003 г. это было реализовано в первой рабочей версии ИПС (О.П. Желенкова), где выполнялись запросы по дате наблюдений и выбранному локальному архиву, можно было копировать данные по http-протоколу, просматривать заголовки и содержимое файлов. Эта версия в качестве СУБД также использовала Oracle; веб-интерфейс поддерживался на основе спецификаций CGI и DBD/DBI.

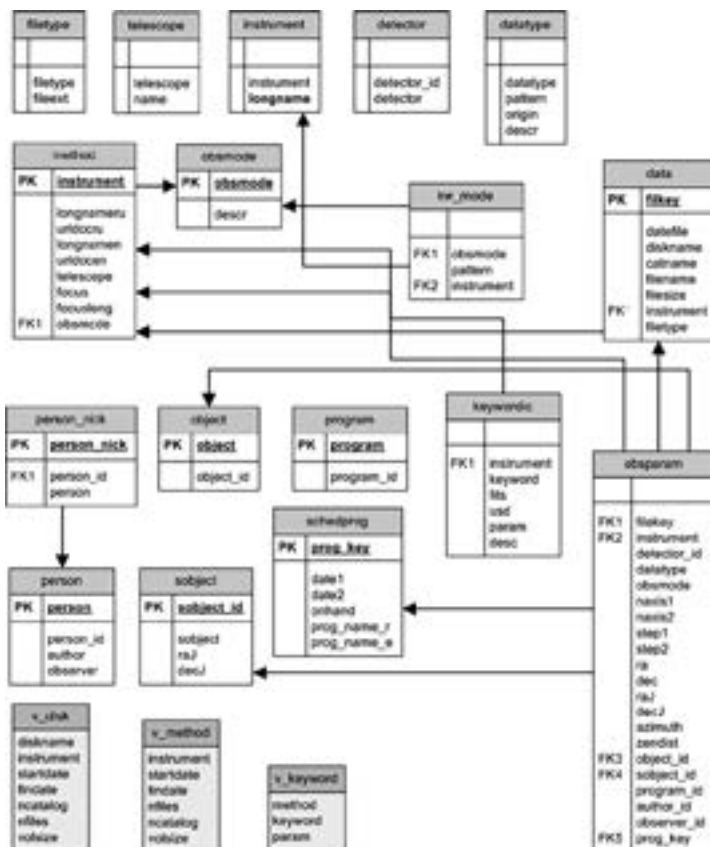


Рис. 58. Схема таблиц информационно-поисковой системы OASIS (Observation Archive Search Information System) общего архива наблюдений.

В следующей версии ИПС [3, 4] был расширен набор сервисов для того, чтобы обеспечивать наиболее часто используемые запросы к архиву – по дате наблюдения, прибору, типам файлов, координатам наблюдаемого поля/объекта, имени астрономического объекта, программе наблюдений, заявителю программы и наблюдателям, принимавшим участие в наблюдениях. Этот вариант ИПС уже был построен на СУБД PostgreSQL, веб-интерфейс реализован с помощью Perl-скриптов

(Т.А. Пляскина, О.П. Желенкова). Была модернизирована схема таблиц (рис. 58), добавлены представления и ограничения целостности, обеспечивающие непротиворечивость данных [5].

Таблицы ИПС можно разбить на три группы по частоте обновления и способу занесения новых данных:

- справочные таблицы, которые наполняются при создании схемы базы данных. Новые записи заносятся только при добавлении нового локального архива;
- справочные таблицы, которые пополняются при внесении в ИПС нового CD/DVD-диска. Записи вносятся в таблицу при программном анализе заголовков файлов. В некоторых случаях они могут быть скорректированы администратором после обнаружения противоречий или ошибок при проверке журнала с результатами загрузки, где фиксируется процесс анализа диска;
- таблицы с данными о каждом архивированном файле. Записи добавляются при внесении нового CD/DVD-носителя, при заполнении полей этих записей используются таблицы первых двух групп.

При загрузке нового диска в ИПС таблицы заполняются параметрами, необходимыми для стандартных запросов. Однако существуют определенные трудности из-за того, что:

- после модернизации систем сбора данных могут изменяться форматы данных, что приводит к тому, что в локальном архиве хранится несколько версий заголовков файлов, отличающихся набором ключевых слов и форматом записи величин;
- в разных локальных архивах в заголовке файла могут быть разные по названию ключевые слова (поскольку файлы формируются разными системами сбора данных), но обозначающие одну и ту же физическую величину.

Поэтому при выполнении синтаксического разбора заголовка файла и извлечении значений параметров используется специальная таблица в схеме базы данных, в которой связываются названия ключевых слов и атрибуты ИПС. В эту таблицу включены все ключевые слова из локальных архивов, которые обнаружены при разборе заголовков FITS-файлов, а также их семантические значения, определяющие физический смысл величины и стандартное описание величины, так называемый UCD [6].

Астрономическое сообщество заинтересовано в свободном доступе к архивным наблюдениям. В 2003 г. Комиссия 5 МАС приняла резолюцию об открытом Интернет-доступе к архивам, полученным в обсерваториях, которые финансируются из государственного бюджета. В начале 21 века реализована инфокоммуникационная структура для эффективного доступа к астрономическим цифровым данным, получившая название «виртуальная обсерватория».

Методы работы с данными в ней определяются стандартами IVOA, предъявляющими определенные требования к уровню подготовки данных, отдавая предпочтение информации, готовой для научного анализа. Реализация как рекомендации МАС, так и стандартов IVOA применительно к любому цифровому архиву включает существенный объем работ по организации информационного ресурса и стандартизации данных.

ИПС OASIS общего архива наблюдений обсерватории начала функционировать с 2003 г. Она постоянно модернизируется как в части оборудования, так и программного обеспечения. В русле этих работ, а также методов и стандартов IVOA разработан программный инструмент автоматической координатной привязки прямых снимков (В.С. Шергин), где в качестве опорных каталогов используются HST GSC, USNO-A2,

2MASS PSC, GSC-2.3 и SDSS-III, что позволяет реализовывать точность координатной привязки кадров до 0.2" (в среднем 0.5") [7]. Программа проверяет ключевые слова в FITS-заголовках и, где возможно, корректирует ошибки. Результат работы записывается в новый файл с FITS-заголовком, который может использоваться в качестве стандарта для прямых снимков БТА. Он соответствует FITS-стандарту версии 3.0 и включает набор параметров WCS (World Coordinate System). Файл при этом распознается подавляющим большинством астрономических приложений.

Расширена область постоянного хранения общего архива – добавлена область для накопления обработанных данных, куда добавлены 3 новых локальных архива с координатной привязкой. С применением дополнительно разработанных скриптов и программы автоматической координатной привязки проведена массовая обработка файлов, хранящихся в локальных архивах SCORPIO, CCD и ZMCCD (Т.А. Пляскина, О.П. Желенкова).

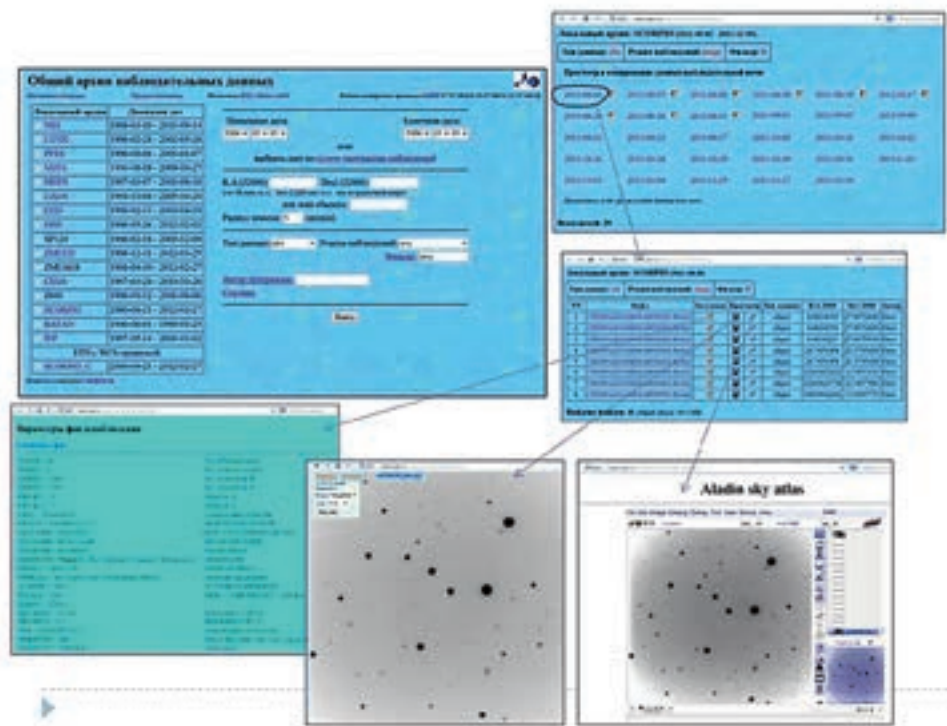


Рис. 59. Веб-интерфейс информационно-поисковой системы OASIS.

Вместо FITS-заголовка, подготовливаемого системой сбора данных, файл записывается в область хранения с новым FITS-заголовком, где произведена проверка значений ключевых слов на корректность значений и их синтаксис, а для прямых снимков добавляется еще набор WCS-параметров, полученных в результате астрометрической калибровки. Такая координатная привязка изображений может выполняться как с учетом, так и без учета геометрических искажений по полю.

Модернизирован веб-интерфейс архива (рис. 59), куда добавлены новые локальные архивы – SCORPIO_C (C – уточненная координатная привязка), ZMCCD_C, ZMUAGS_C, и обновлен сервис on-fly-визуализации наблюдательных данных на базе новой программной разработки (В.С. Шергин). С его помощью выполняется визуализация любых типов файлов, полученных на оптических телескопах обсерватории, а для файлов с координатной привязкой производится наложение объектов из каталогов GSC-2.3, HST GSC, Tycho-2, USNO-A2, 2MASS или SDSS-III. Координатная привязка выполнена для более 300 тысяч файлов.

Архивные данные часто повторно используются в исследованиях небесных объектов не только для изучения переменности блеска, но и из-за изменения методов обработки и анализа данных. Возникновение новых направлений исследований здесь также играет роль. По этой причине неограниченное по срокам хранение данных входит в компетенцию обсерваторий. Задача гарантированной сохранности цифровых данных на интервалах от 2–3 десятков лет и более не является решенной. Любые современные носители, включая DVD-диски, флеш-память, накопители на жестких дисках, системы хранения данных, облачные хранилища, не годятся для долгосрочного архивного хранения. Это относится и к программному обеспечению, и к оборудованию ввода-вывода.

Архив САО РАН располагает цифровыми коллекциями с охватом интервала дат в несколько десятилетий. Как любая достаточно долгоживущая система архив, принципы его организации и хранения меняются по сравнению с тем, что было в самом начале. Из-за эволюции методов наблюдений на телескопах обсерватории и появления новых цифровых коллекций нам необходимо унифицировать хранение данных, погружение новых коллекций и доступ к данным. При проведении миграции архива радиоастрономических наблюдений эти стратегии будут опробованы и проверены. Это послужит основой для поддержки на базе архивной системы обсерватории хостинга новых цифровых коллекций наблюдений, не исключая и архивы других обсерваторий.

ПУБЛИКАЦИИ

- [1] Кононов В.К., Моносов М.Л., Витковский В.В., Липовецкий В.А. Архивы наблюдательных данных САО АН СССР. Принципы организации. Сообщения САО, т. 65, 32-44 (1990).
- [2] Vitkovskij V., Chernenkov V., Kalinina N., et. al, Baltic Astronomy, 2000, 9, 578-582 (2000).
- [3] Витковский В.В., Желенкова О.П., Малькова Г.А. и др. Bulletin SAO, т. 58, 52-63 (2005).
- [4] Желенкова О.П., Витковский В.В., Пляскина Т.А. и др. препринт САО РАН N219, 37с. (2007); <https://www.sao.ru/Doc-k8/Science/Public/Preprints/2007/N219.pdf>.
- [5] Желенкова О.П., Витковский В.В., Пляскина Т.А., Электронные библиотеки, т. 13, вып. 4 (2010).
- [6] Желенкова О.П., Черненко В.Н., Шергин В.С., Пляскина Т.А., Витковский В.В. Программные системы и информационные ресурсы для обеспечения астрофизических исследований. Инфраструктура спутниковых геоинформационных ресурсов и их интеграция. Сб. научных статей под ред. М.А.Попова и Е.Б.Кудашева, Киев, Карбон-Сервис, 2013. -192 стр. С. 167-173.
- [7] Черненко В.Н., Шергин В.С., Желенкова О.П. Технология автоматической координатной привязки прямых изображений с использованием веб-сервисов IVOA. Отчет САО РАН N329, 2013, 36с.



АСТРОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Физика звезд

Спекл-интерферометрия

Балега Ю.Ю.,

научный руководитель САО РАН, руководитель группы МАВР, академик РАН, д.ф.-м.н.;
balega@sao.ru

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ

Спекл-интерферометрия является методом, позволяющим реализовать на телескопе с зеркалом большого диаметра дифракционное угловое разрешение при наблюдениях компактных объектов сквозь турбулентную атмосферу. Для БТА дифракционный предел в зеленом цвете ($\lambda \approx 0.5$ мкм) составляет $0.''02$. Этот предел почти в 50 раз превышает разрешение, получаемое на телескопе с применением обычных методов.

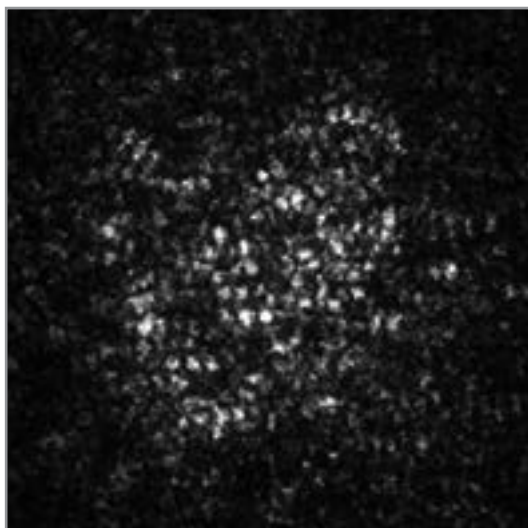


Рис. 59. Спекл-изображение звезды, полученное на 6-м телескопе БТА с экспозицией 20 мс в фильтре с полосой пропускания 20 нм (размер кадра $2'' \times 2''$).

На снимках с короткими экспозициями изображение звезды в большой телескоп (рис. 59) имеет характерную «зернистую» структуру (от английского слова «speckle» – зерно, пятно). Как формируются такие изображения, и почему они имеют вид пятен? Для объяснения феномена рассмотрим опыты Янга на непрозрачном экране с отверстиями, когда при прохождении света сквозь отверстия ψ_1 и ψ_2 в плоскости регистрации формируется картинка интерференционных полос (рис. 60). Расстояние между полосами определяется соотношением λ/d , где λ – длина волны, d – расстояние между отверстиями. В синем свете полосы расположены чаще, чем в красном.

Если перед объективом, формирующим изображение, волновой фронт окажется не плоским, а искаженным, то картина полос изменится. Искажения фронта могут возникнуть при его прохождении сквозь неоднородную среду. Можно установить перед объективом нагреватель, создающий вертикальные тепловые потоки. Разница в температурах ячеек воздуха вызовет изменения показателя преломления для световой волны, т.е. искажения формы волнового фронта. Поскольку движение воздушной массы турбулентно, то форма интерференционных полос будет нестабильной – чем быстрее движение воздуха, тем быстрее изменяется картина полос.

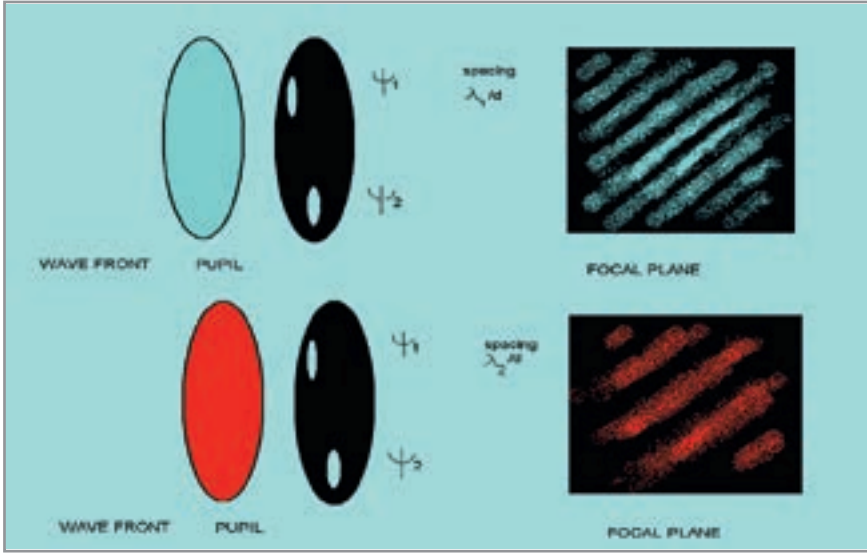


Рис. 60. Формирование интерференционных полос при наложении непрозрачного экрана с двумя отверстиями на зрачок.

Теперь добавим в экране еще одно отверстие ψ_3 (рис. 61). Итоговая интерференционная картинка теперь будет состоять из трех систем полос от пар отверстий $\psi_1-\psi_2$, $\psi_1-\psi_3$ и $\psi_2-\psi_3$. В местах пересечения полос появятся максимумы яркости, причем их положение из-за нестабильности фронта волны на входе будет постоянно меняться. Эти максимумы и являются «спеклами» при короткой экспозиции изображения, формируемого тремя апертурами.

Апертуру большого телескопа можно представить как совокупность множества субапертур с постоянно меняющимся расположением, тогда выходная структура изображения определяется интерференцией от всего множества субапертур, попадающих на входной зрачок. Количество этих виртуальных субапертур определяется состоянием атмосферы на пути волнового фронта.

При обычных условиях характерный размер неоднородностей волнового фронта в видимом свете составляет около 10 см, поэтому для 6-метрового телескопа количество отдельных участков на зрачке составляет несколько тысяч. Обратим внимание на то, что итоговая картинка переменна, так как формируется атмосферными неоднородностями, переносимыми ветром в разных направлениях, с различной скоростью и на разных высотах. Характерное время жизни (замороженности) картинки составляет 0.01 с.

Несколько сотен метров приземного слоя атмосферы вносят основной вклад в искажение изображений в телескопе, однако для полного учета необходимо принимать во внимание высоты до 10 км.

Из характеристик спекл-изображений вытекают следующие требования к инструменту, который устанавливается на телескопе для спекл-интерферометрии:

- детектор для регистрации изображений должен работать с короткими экспозициями (~ 0.01 с) и иметь высокую квантовую эффективность;

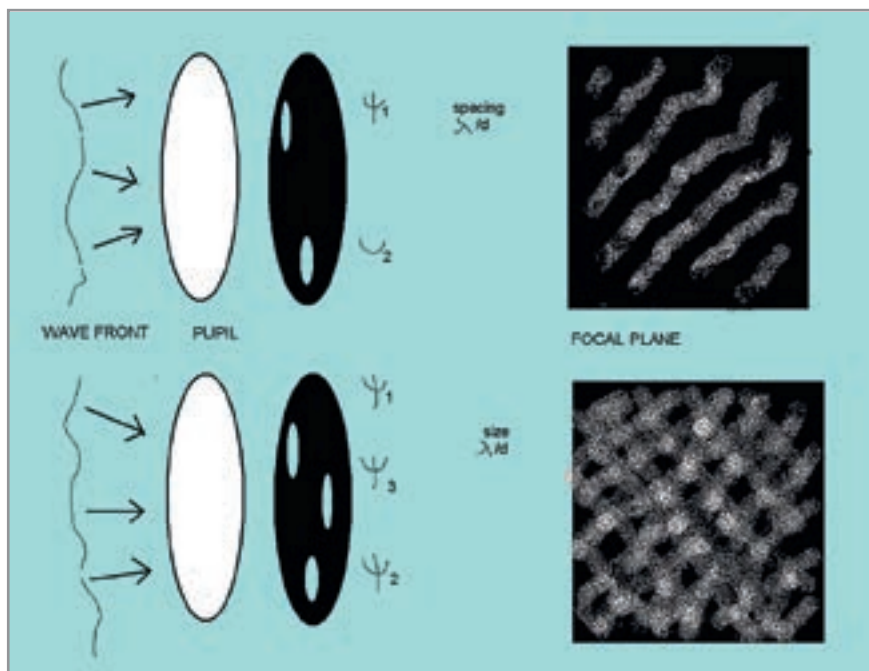


Рис. 61. Формирование интерференционных полос в эксперименте Янга при наличии искажений волнового фронта перед зрачком и добавлении третьего отверстия ψ_3 в экране.

- размер пятна (спекла) в первичном фокусе телескопа определяется размером зеркала D , фокусным расстоянием F и длиной волны λ . Этот размер соответствует диаметру пятна дифракции на зрачке. В видимом свете в первичном фокусе БТА спеклы имеют размер ~ 2 мкм, а размер элемента ПЗС-приемника обычно составляет 6–20 мкм. Для согласования необходимо использовать микрообъективы, чтобы увеличить изображение спекла в 10–20 раз;
- контрастные интерференционные картинки формируются в узких спектральных полосах, что требует применения интерференционных фильтров с полосой пропускания от 10 нм (в синей области спектра) до 50 нм (в красной части);
- дополнительным оптическим элементом в системе является призма компенсации атмосферной дисперсии. Хроматизм атмосферы даже на умеренных высотах над горизонтом приводит к вытягиванию спекл-структуры по вертикали и, значит, к потере пространственного разрешения в этом направлении. Призмы компенсации

должны обеспечивать разную величину хроматизма для разных зенитных расстояний.

Основы метода спекл-интерферометрии были изложены в работе А. Лабейри (Labeugie, 1970). В этом методе при регистрации изображений используются короткие экспозиции, ~ 0.01 с, что позволяет «заморозить» искаженную атмосферой картинку. В отличие от простого накопления изображения, которое применяется при обычных наблюдениях, в спекл-интерферометрии накапливается длинная серия из нескольких тысяч кадров с короткой экспозицией.

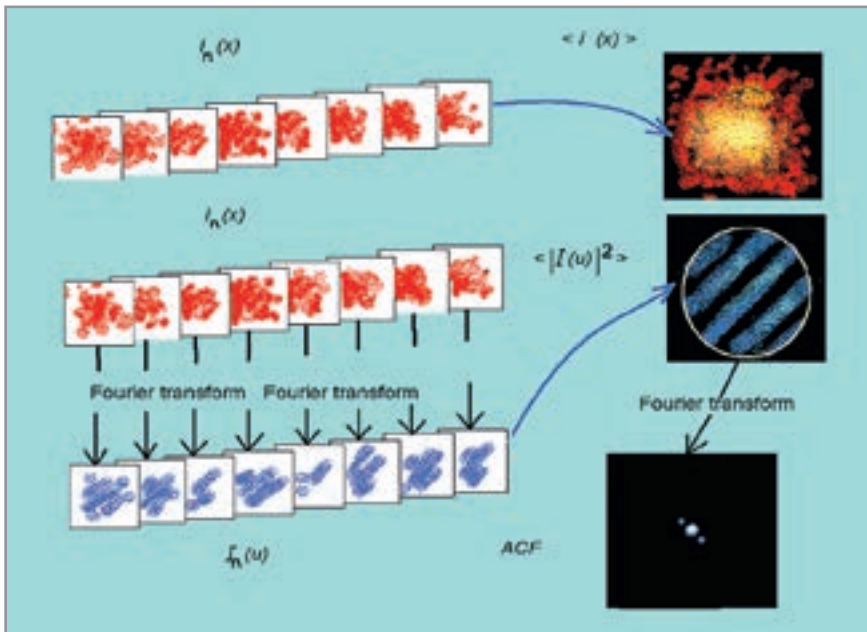


Рис. 62. Усреднение изображений $i_n(x)$ с большой экспозицией дает изображение $\langle i(x) \rangle$ с потерей пространственного разрешения (верхний ряд). Усреднение Фурье-преобразований $I_n(u)$ снимков позволяет сохранить высокую пространственную частоту в спекл-изображениях и получить на выходе восстановленное с дифракционным разрешением изображение (нижний ряд). Приведен пример наблюдений тесной двойной звезды.

Затем для каждого снимка с помощью Фурье-преобразования вычисляется двумерный спектр мощности – картинка, показывающая, с каким весом каждая пространственная частота входит в исходное изображение.

Оказывается, что при коротких экспозициях самые высокие пространственные частоты, соответствующие дифракционному пределу на апертуре, сохраняются в «замороженном» изображении.

В Фурье-плоскости эти высокие частоты присутствуют с очень малой амплитудой, но накопление нескольких тысяч Фурье-преобразований позволяет повысить отношение сигнала к шуму до значений, необходимых для восстановления тонкой структуры изображения. На рисунке 62 показано различие между обычным накоплением (усреднением) изображения и усреднением спектров мощностей по методу

Лабейри. Этот метод позволяет определить только спектр мощности изображения объекта $\langle |I(u)|^2 \rangle$. Фаза изображения объекта $\varphi(u)$ при такой процедуре утеряна, и восстановление возможно только для объектов с центральной симметрией – двойные звезды, видимые звездные диски (рис. 63).

Даже для простых изображений двойных звезд возникает проблема неопределенности в определении левого и правого компонентов, поэтому приходится привлекать дополнительную информацию. Используется метод восстановления фазы изображения (Weigelt, 1977) на основе вычисления тройной корреляции (в пространственной плоскости) или биспектра (в частотной плоскости) спекл-изображений. При вычислениях используются рекурсивные алгоритмы, которые требуют значительного компьютерного времени для расчетов. Восстановленная в результате такого оценивания фаза совмещается с модулем изображения, определенного по методу Лабейри, что позволяет получить изображение объекта любой конфигурации.

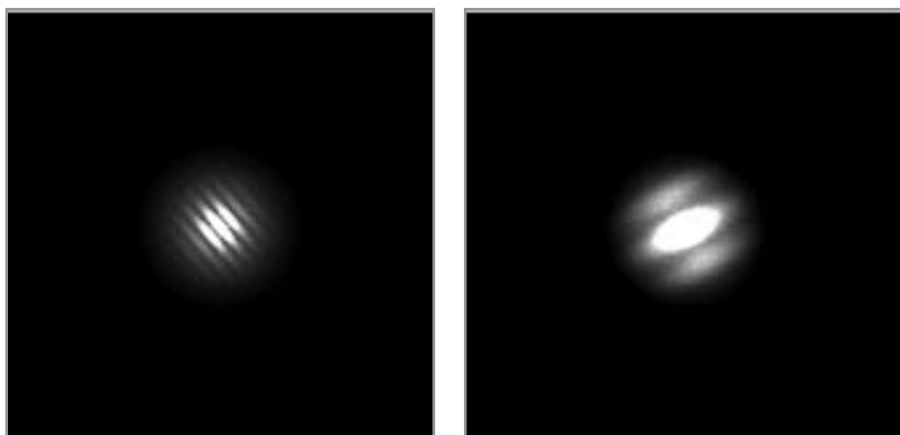


Рис. 63. Спектры мощности двойных звезд: слева - HIP 10928 с расстоянием между компонентами $0''.100$; справа - CHARA 112 с расстоянием между компонентами $0''.042$.

ИСТОРИЯ МЕТОДА НА БТА

Первые работы на телескопе БТА с применением спекл-интерферометрии были выполнены Ю.Ю. Балегой и Н.А. Тихоновым в 1977 г. В первичном фокусе телескопа была установлена простая система с закрепленным микрообъективом и красным стеклянным фильтром. В фокальной плоскости микрообъектива крепился фотоаппарат Prastika, произведенный в ГДР, а регистрация велась на высокочувствительные изопанхроматические аэрофото пленки (1000 единиц DIN).

Из-за малого поля зрения в несколько угловых секунд самым сложным в наблюдениях было наведение на звезду и удержание ее в поле зрения. Далее проявленная пленка с серией кадров с короткой экспозицией устанавливалась в плоскости большого объектива, выполнявшего функцию Фурье-преобразования изображений. Когерентное освещение изображений выполнялось с помощью гелий-неонового лазера ЛГ-38.

Усредненный спектр мощности обычно накапливался по 20 кадрам, хотя даже по нескольким снимкам Фурье-образ восстановленного изображения отождествлялся

вполне уверенно. Так удалось впервые получить автокорреляционные функции изображений трех звезд: α Aul (Капелла), α Boo (Арктур) и α Ori (Бетельгейзе) с дифракционным разрешением $\sim 0.''025$ (Balega, Tikhonov, 1977).

В 1978 г. в обсерваторию для наблюдений приехали французские астрономы А. Лабейри, Р. Фуа и Д. Бонно (рис. 64). Они привезли цифровой спекл-интерферометр, где в качестве светоприемника использовалась система счета фотонов, реализованная на базе микроканального электронно-оптического преобразователя, который был сочленен с телевизионной трубкой типа супер-кремникон. Наблюдения записывались на магнитную ленту и затем обрабатывались с помощью цифрового коррелятора.



Рис. 64. Французские астрономы Р. Фуа, Л. Кочли и А. Лабейри готовят спекл-камеру для наблюдений на БТА во время первого визита в 1978 г.

Эта система имела существенные преимущества по чувствительности и линейному отклику перед фотографическим способом регистрации. Поэтому в САО РАН было решено создать аналогичный спекл-интерферометр с использованием отечественных компонентов.

Работа велась несколько лет, и в 1983 г. были проведены первые наблюдения с применением цифровых технологий (Balega, Ryadchenko, 1984). Затем система цифровой регистрации и обработки спекл-изображений подвергалась многократной модернизации, однако основные принципы работы, заложенные более 30 лет назад, остались неизменными.

Следует отметить, что в 80-е годы лабораторией астросветоприемников САО РАН под руководством В.С. Рылова также велись работы в области фотографической спекл-интерферометрии в кооперации с сотрудниками Астрономической обсерватории Харьковского государственного университета В.Н. Дудиновым и В.С. Цветковой. Однако в дальнейшем преимущества цифровых методов регистрации стали очевидными, и фотографическая методика не получила дальнейшего развития.

Следует отметить, что существенный вклад в развитие спекл-интерферометрии в стране еще сделали А.А. Токовинин (ГАИШ МГУ), Н. Бакут и К.В. Свиридов из НПО «Астрофизика». Последние преимущественно вели обзоры зарубежных работ в этой области. В Харьковском институте радиоэлектроники теоретические работы по восстановлению фазы в интерферометрии выполнили Брук и Содин.



Рис. 65. Г. Вайгельт и Ю.Ю. Балеха в аппаратной БТА в ходе наблюдений (1995 г.).

Большое влияние на развитие метода на нашем телескопе оказало сотрудничество с Боннским институтом радиоастрономии (Германия), который предоставил для совместных работ систему с инфракрасным приемником HAWAII-2, обладающим чувствительностью в инфракрасной области спектра до 2.2 мкм. Это позволило изучать объекты, излучающие в основном в инфракрасном диапазоне: молодые звезды в пылевых оболочках, звезды на последних стадиях эволюции, коричневые и красные карлики, спрятанные в пылевых торах ядра активных галактик.

Руководитель боннской группы Г. Вайгельт разработал метод биспектрального восстановления фазы изображения, который расширил возможности спекл-интерферометрии, что позволило восстанавливать изображения объектов произвольной формы по реконструированному модулю и фазе. Этот метод наиболее интенсивно использовался в наблюдениях на 6-м телескопе БТА в совместных научных

программах с астрономами Боннского института радиоастрономии. С его применением получены изображения звездных скоплений, клочковатых структур вокруг проэволюционировавших звезд, газовых облаков в ядерных областях активных галактик и пр. В качестве иллюстрации (рис. 66) приведено восстановленное по биспектру изображение биполярного истечения в массивном ($\sim 20 M_{\odot}$) протозвездном объекте S140 IRS1. Наблюдения выполнены на БТА в инфракрасной полосе K (2.0–2.2 мкм). S140 – это III-область на удалении порядка одного килопарсека от наблюдателя, которая находится в темном облаке L1204 в кольце Цефея, образовавшемся при взрыве сверхновой.

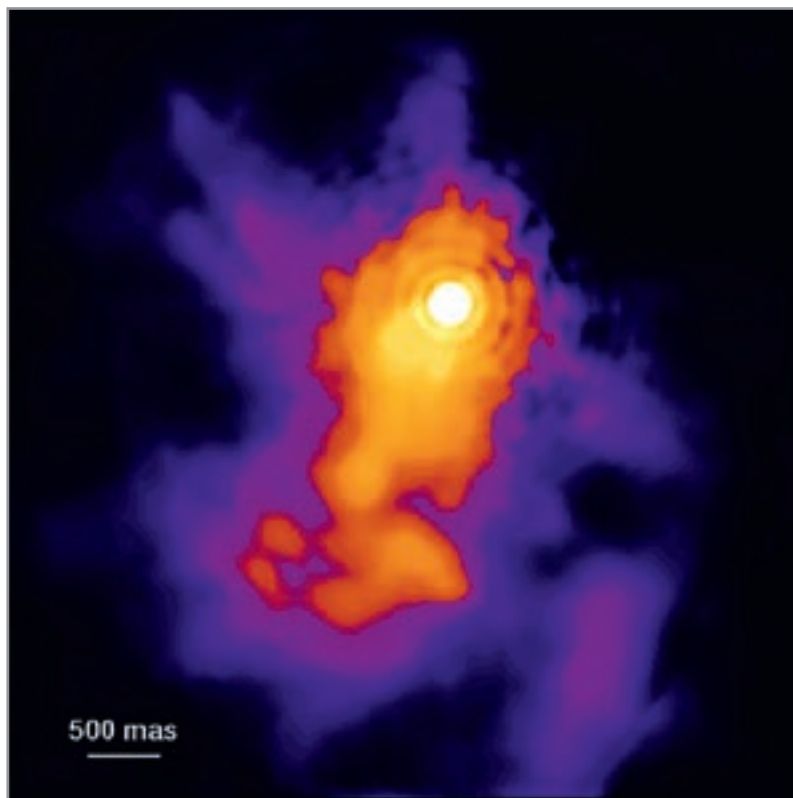


Рис. 66. Изображение центральной части биполярного истечения молодой звезды S140 IRS1, полученное на БТА с применением биспектрального оценивания спекл-изображений в фильтре 2.2 мкм. Размер картинка 5"×5". Динамический диапазон восстановленного изображения составляет 8 звездных величин.

Результатом многолетних совместных наблюдений и сотрудничества с этим немецким коллективом стала публикация более 40 научных статей в ведущих астрономических журналах мира.

Значительное внимание уделялось нами созданию и внедрению новых методов на основе спекл-интерферометрии. Совместно с французскими астрономами из университета Ниццы (R. Petrov, J. Borgnino, S. Lagarde) на 6-м телескопе БТА был

внедрен метод дифференциальной спекл-интерферометрии, который использует кросс-анализ спекл-изображений, зарегистрированных одновременно на нескольких длинах волн. В основе метода лежит измерение векторной функции, представляющей собой смещение фотоцентра изображения в зависимости от длины волны с сохранением высокого спектрального разрешения. Метод позволяет определить ориентацию оси вращения звезды или определить расстояние между компонентами в двойной системе с угловым разрешением на порядок выше дифракционного предела. К сожалению, отсутствие в конце 80-х годов высокоэффективных и, главное, очень стабильных приемников не позволило получить на БТА существенных результатов.

При совместных работах с астрономами обсерватории Лионского университета под руководством Р. Фуа коллективом было затрачено много сил для установки на 6-м телескопе дифференциального спекл-интерферометра (SPID), созданного этой группой. Этот уникальный инструмент сочетает в себе функции спектрографа высокого разрешения и спекл-интерферометра. Он предназначен для получения изображений объектов с высоким угловым разрешением в узких спектральных полосах, до 1Å. Камера SPID в настоящее время находится в САО РАН, но пока не введена в эксплуатацию.

Значительное влияние на методическое развитие интерферометрии, как и на всю инструментальную базу САО РАН, имело сотрудничество в 80-е годы с астрономами Марсельской обсерватории, в первую очередь, с Ж. Буллестексом. Для регистрации спекл-кадров мы на протяжении длительного периода времени использовали систему счета фотонов на основе суперкремникона, сочлененного с микроканальным усилителем яркости. Прообраз этого приемника был разработан впервые французскими коллегами.

В настоящее время работы в области интерферометрии ведутся на телескопе с использованием современных ПЗС-приемников, сочетающих в себе высокую эффективность (до 100% в максимуме чувствительности) и скорость считывания изображений (до 1 мс). Эти специальные ПЗС, так называемые EMCCD (Electron Multiplying Charge Coupled Device), имеют секцию усиления под каждым элементом матрицы, что гарантирует возможность регистрации изображений в режиме счета отдельных фотонов. По сравнению с фотографической регистрацией в интерферометрических исследованиях звезд новые детекторы дают выигрыш на 10 звездных величин и более.

РЕЗУЛЬТАТЫ

С применением интерферометрии в видимом и инфракрасном диапазонах на 6-м телескопе БТА за три десятилетия наблюдений получены многие результаты мирового уровня. Отметим некоторые из них.

- Обнаружение близких спутников у десятков звезд нижней части главной последовательности и построение видимых орбит, определение точных масс и светимостей компонентов. Эти данные позволили уточнить фундаментальные свойства ближайших к нам маломассивных звезд – основного по численности населения Галактики. Некоторые из изученных систем обладают уникальными характеристиками. Например, квадрупольная звезда 40-41 Дракона включает пару с периодом 3 года и самым большим эксцентриситетом (0.985) среди всех известных двойных.
- Первое прямое определение масс двойных коричневых карликов.

- Определение видимых диаметров и асимметрий дисков нескольких звезд класса Мира Кита (R Leo, R Cas, α Ceti и др.). Сравнение наблюдаемых диаметров этих звезд в разных длинах волн с теоретическими моделями.
- Изучение строения газопылевых оболочек вокруг звезд на последних фазах эволюции и построение соответствующих моделей. Эти наблюдения выполнялись преимущественно в ближнем инфракрасном диапазоне спектра 1.1–2.2 мкм.
- Изучение молодых кратных систем с очень массивными компонентами. Определение эмпирических масс и светимостей для звезд в Трапедии Ориона. Наиболее подробно изучена пара Θ^1 Ori C с компонентами массой 35 и 11 масс Солнца и наличием глобального магнитного поля у главной звезды.
- Оценка степени кратных систем среди различных классов звезд: старые звезды второго поколения, звезды с магнитными компонентами, звезды в молодых ассоциациях.



Рис. 67. Группа методов астрономии высокого разрешения (МАВР) в 2008 г. Нижний ряд (слева направо): И.И. Балегга, З.У. Шагаешева; верхний ряд: Е.В. Малоголовец, Д.А. Растегаев, Ю.Ю. Балегга, В.В. Дьяченко, А.Ф. Максимов.

КОМАНДА

За десятилетия применения метода на БТА в работах по созданию системы, ее внедрению и эксплуатации принимали участие десятки научных сотрудников, инженеров и техников. Мы приводим их список, который, конечно, не является полным. Должности и место работы для некоторых участников указаны на период их участия в разработках и исследованиях в обсерватории:

- Ю.Ю. Балега – д.ф.-м.н., академик РАН, руководитель работ;
- Н.А. Тихонов – д.ф.-м.н., руководитель группы;
- Н.Н. Сомов – к.ф.-м.н., старший научный сотрудник;
- В.П. Рядченко – к.ф.-м.н., старший научный сотрудник;
- С.В. Маркелов – к.т.н., заведующий лабораторией;
- В.С. Нощенко (к.т.н., руководитель отдела ВНИИТ, г. Ленинград);
- И.И. Цуккерман (д.т.н., ВНИИТ);
- Б.М. Кац (к.т.н., ВНИИТ);
- В.И. Удодов – инженер;
- И.И. Балега – инженер-программист;
- С.В. Моисеев – ведущий инженер;
- В.А. Васюк – научный сотрудник;
- И.Н. Белкин – к.ф.-м.н., научный сотрудник;
- Е.А. Плужник – к.ф.-м.н., старший научный сотрудник;
- З.У. Шхагошева – научный сотрудник;
- В. Г. Орлов – к.ф.-м.н., старший научный сотрудник;
- J.J. McManus – визитер (США);
- N. Devaney – визитер (Франция);
- M. Al-Wardat – к.ф.-м.н., визитер (Иордания);
- А.Ф. Максимов – к.т.н., старший научный сотрудник;
- Р.Я. Жучков – к.ф.-м.н., научный сотрудник (КФУ);
- Е.В. Малоголовец – к.ф.-м.н., старший научный сотрудник;
- Д.А. Растегаев – к.ф.-м.н., старший научный сотрудник;
- В.В. Дьяченко – научный сотрудник;
- С.Л. Комаринский – инженер-программист;
- А.С. Бескакетов – магистр (Университет ИТМО, Санкт-Петербург).

ПУБЛИКАЦИИ

- [1] Labeyrie, A., *Astronomy and Astrophysics*, Vol. 6, p. 85 (1970).
- [2] Weigelt, G. P., *Optics Communications*, vol. 21, p. 55–59 (1977).
- [3] Balega, Y. Y.; Tikhonov, N. A., *Pis'ma v Astronomicheskii Zhurnal*, vol. 3, p. 497 (1977).
- [4] Balega, Y. Y.; Ryadchenko, V. P., *Pisma v Astronomicheskii Zhurnal*, vol. 10, p. 229–234 (1984).

Спектроскопия звезд высокой светимости на БТА: результаты 2005–2015 гг.

Клочкова В.Г.,

заведующая ЛАС, д.ф.-м.н., профессор; valenta@sao.ru

ВВЕДЕНИЕ

В сборнике, посвященном 40-летию САО РАН, были обобщены основные сведения о пекулярных сверхгигантах с большими избытками потока в ИК-диапазоне, которые относятся преимущественно к эволюционной стадии после асимптотической ветви гигантов (post Asymptotic Giant Branch, post-AGB), и приведены результаты их исследований, полученные на первом этапе спектроскопических наблюдений на 6-м телескопе (Клочкова, 2006). Здесь мы дополним обзор, представляя основные результаты, полученные в 2005–2016 гг.

Напомним основные признаки post-AGB звезд, называемых также протопланетарными туманностями (protoplanetary nebula, PPN), затем приведем обоснование актуальности детального изучения этих объектов и укажем основные результаты, полученные по этой программе в предыдущее десятилетие.

На стадии PPN наблюдаются далеко проэволюционировавшие звезды малых и промежуточных масс, чьи исходные массы на главной последовательности (ГП) менее 8–9 M_{\odot} . На предшествующей стадии – асимптотической ветви гигантов – эти звезды наблюдаются в виде холодных (эффективная температура $T_{eff} \sim 3000$ К) красных сверхгигантов. После истощения гелия в ядре AGB-звезды образуется вырожденное углеродно-кислородное (C–O)-ядро, окруженное сменяющимися активными слоями горения гелия и водорода. Большую часть времени энерговыделение обеспечивает водородный слой, однако в определенные моменты, по мере присоединения продуктов горения водорода к гелиевому слою, в последнем происходит кратковременное возгорание гелия. Такое внутреннее строение звезды является неустойчивым. Теория предсказывает достаточно эффективное перемешивание вещества, которое переработано в ядерных реакциях, сопровождающих процессы энерговыделения, и вынос его в атмосферу звезды за счет проникающей конвекции. Вынос вещества, обусловленный многократно повторяющимся чередованием тонких активных слоев горения водорода и гелия, принято называть третьим перемешиванием.

ПОИСК ПРОЯВЛЕНИЙ НУКЛЕОСИНТЕЗА

Первичный газ в ранней Вселенной представлял собой смесь, которая образовалась благодаря синтезу ядер водорода и гелия с примесью легких элементов (Li, Be, B). Позже, в ходе эволюции и взрывов массивных звезд первого поколения началось формирование ядер более тяжелых химических элементов (C, O, Ne, Mg, Si и Fe). Все разнообразие содержания химических элементов, наблюдаемое ныне, создано за счет синтеза ядер в процессе эволюции нескольких звездных поколений. Повышенный интерес к AGB-звездам объясняется тем, что именно в недрах этих звезд, находящихся на кратковременной эволюционной стадии, создаются физические условия для синтеза

ядер тяжелых металлов и для выноса продуктов ядерных реакций в звездную атмосферу. Расчеты показывают, что AGB-звезды являются основными поставщиками тяжелых металлов (>50% всех элементов тяжелее железа) в межзвездную среду, причем более эффективными поставщиками являются AGB-звезды с исходными массами ниже $3 M_{\odot}$. Синтез ядер тяжелых металлов осуществляется за счет так называемого s-процесса, суть которого состоит в медленной (по сравнению с β -распадом) нейтронизации ядер (Ибен и Рензини, 1983). Затравочными ядрами для цепочки реакций s-процесса служат ядра железа. У звезд с исходной массой ниже $4 M_{\odot}$ необходимый поток нейтронов обеспечивает реакция $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$, а в случае более массивных звезд с начальными массами более $4\text{--}5 M_{\odot}$ аналогичная реакция идет на ядрах ^{22}Ne . Результаты современных расчетов синтеза и выноса элементов s-процесса приведены Кеппелером и др. (2015).

Вещество оболочки AGB-звезды теряется за счет двух процессов. Во-первых, наработанные в процессе нуклеосинтеза углерод и кислород присоединяются к вырожденному (C–O)-ядру, что изменяет характер энерговыделения. Во-вторых, вещество теряется за счет ветра с поверхности звезды. Вследствие сброса вещества вокруг звезды образуется оптически толстая оболочка, и звезда становится трудно наблюдаемой в оптике. В какой-то момент жизни AGB-звезды темп потери ее массы резко возрастает. Одним из следствий этого процесса может быть пульсационная нестабильность сверхгигантов, присущая, согласно Аикаве (2010), звездам на этой стадии эволюции в достаточно широком интервале фундаментальных параметров. Два физических явления – синтез тяжелых металлов и пульсационная активность, свойственные звездам на стадиях AGB и после нее, определяют основной интерес к этим объектам.

Сложность теоретического изучения звездного нуклеосинтеза связана с тем, что эффективность синтеза и выноса свежих ядер на поверхность звезды зависит от большого числа факторов: исходной массы звезды на ГП, металличности, параметров истечения вещества, деталей процесса нуклеосинтеза и неопределенностей численного описания процесса перемешивания. Помимо классической проблемы исследования химического состава звезд на нетривиальных стадиях эволюции самостоятельный интерес представляют возможности изучения процессов обмена веществом между звездной атмосферой и околозвездной пылевой оболочкой, а также поиск механизмов, объясняющих peculiarity химического состава атмосфер звезд, которые окружены пылевыми оболочками. Принято считать, что в газопылевой оболочке могут быть достаточно эффективны процессы селективной конденсации ядер металлов на пылинки. По мере формирования пылевых частиц из газовой составляющей преимущественно уходят элементы с высокой температурой конденсации. Этот селективный процесс искажает картину третьего перемешивания, увеличивая отношение C/O, C/Fe, N/Fe, O/Fe и понижая отношение S/Fe. Основной аргумент, подтверждающий работу механизма селективной конденсации ядер металлов на пылинки, – это зависимость содержания химических элементов от температуры конденсации (Бонд, 1992). Содержание Fe, Mg, Si, Ca в атмосферах таких звезд понижено на несколько порядков, в то время как C, N, O, S и даже элемент группы железа Zn имеют солнечные содержания (Уилкинс и др., 1991a,b; Уилкинс и др., 1992; Уилкинс и др., 1996). Стоит подчеркнуть, что эта картина аналогична поведению химического состава газовой компоненты межзвездной среды. Атмосфера звезды должна быть достаточно стабильной для того, чтобы перемешивание или звездный ветер не замывали картину распределения химических элементов. Однако есть свидетельства, что атмосферы post-AGB звезд

нестабильны. Для большинства этих объектов отмечаются пульсации, истечение вещества, что проявляется в наличии переменной эмиссии, преимущественно в линиях водорода.

Теоретическое изучение эволюции звезд вблизи фазы AGB затруднено из-за сложности этой системы, включающей по крайней мере две компоненты: продолжающую свою эволюцию центральную звезду и остывающую оболочку, которая может иметь достаточно сложную конфигурацию. Много неясностей остается в понимании природы звездного ветра, процессов конвекции и выноса вещества. Однако сформировалось представление о том, что, наряду с исходной массой звезды, темп потери массы в ходе ее эволюции является важнейшим параметром и определяет не только окончательную массу после фазы AGB, но и внутреннюю структуру звезды, характерные времена эволюции на заключительных фазах, а также изменения химического состава звездной атмосферы.

СПЕКТРОСКОПИЯ НА БТА ЗВЕЗД, НАХОДЯЩИХСЯ ВБЛИЗИ ФАЗЫ AGB

Важной вехой в исследованиях звезд с большими избытками инфракрасного потока была орбитальная миссия IRAS (1983 г.), в ходе которой был выполнен обзор 95% всей небесной сферы. Одним из результатов этого обзора явилось обнаружение на высоких широтах Галактики источников, представляющих собой околозвездные оболочки с температурами от 200 до 1000 К. Часть этих объектов отождествлена со звездами высокой светимости предположительно на эволюционных стадиях AGB и post-AGB. Небольшая часть из них доступна для спектроскопических наблюдений с высоким спектральным разрешением в оптическом диапазоне, что обеспечивает эмпирическую базу в исследовании звездного нуклеосинтеза. После выделения нового типа далеко проэволюционировавших звезд с большими избытками ИК-потока на нескольких крупных телескопах мира были начаты программы спектроскопии звезд-кандидатов на стадии post-AGB и AGB. Их целью было изучения особенностей аномальных спектров, кинематического состояния истекающих атмосфер и протяженных околозвездных оболочек, и прежде всего – изучение процесса звездного нуклеосинтеза и выноса его продуктов в звездную атмосферу.

Такого рода наблюдательная программа выполняется под руководством автора на БТА с современными эшелльными спектрографами. В результате многолетних наблюдений (спектроскопия каждого из объектов проводилась неоднократно) мы получили несколько принципиально новых результатов. Химический состав изучен у двадцати сверхгигантов с ИК-избытками, которые являются кандидатами в звезды на стадии post-AGB и AGB и находятся преимущественно в галактическом поле. Обзор ранее полученных результатов был представлен Ключковой (2006).

Начиная с 1998 г. наблюдения выполняются на спектрографе НЭС (Панчук и др. 2009) с ПЗС-камерами формата 1К×1К, с 2000 г. – 2К×2К, с 2011 г. – 2К×4.5К. В результате получена коллекция высококачественных спектров, предназначенных в первую очередь для поиска аномалий химического состава, которые обусловлены ядерным синтезом химических элементов в недрах звезд малых и средних масс и последующим выносом продуктов синтеза в звездные атмосферы. Этот наблюдательный материал используется и для поиска пекулярностей спектров PPN, анализа поля скоростей в оболочках звезд с истечением массы, а также для поиска ожидаемой долговременной переменности деталей спектров и вариаций поля скоростей. На рисунке 68 приведен эшелльный спектр красного сверхгиганта на стадии AGB.

На основании изученной выборки PPN-кандидатов и с привлечением опубликованных данных можно говорить о неоднородности химического состава выборки. Избыток элементов s -процесса, который ожидался для звезд на стадии post-AGB как следствие предшествующей эволюции звезды и процесса третьего перемешивания, обнаруживается пока крайне редко. К примеру, мы выявили избыток углерода и элементов s -процесса в атмосфере первой же изученной нами post-AGB звезды CY CMi – IRAS 07134+1005 (Клочкова, 1995). В то же время у родственного объекта V887 Her (ИК-источник IRAS 18095+2704) избыток элементов s -процесса не обнаружен. К настоящему времени достоверный избыток элементов s -процесса обнаружен только у 7 исследованных на БТА объектов: IRAS 04296+3429 (Клочкова и др., 1999), IRAS 07134+1005 (Клочкова, 1995), IRAS 20000+3239 (Клочкова и Киппер, 2006), IRAS 22272+5435 (Зач и др., 1995), IRAS 23304+6147 (Клочкова и др., 2000a), AFGL 2688 (Клочкова и др., 2000b) и у виргиниды V1 K307 (Клочкова и др., 2003) в шаровом скоплении M12.

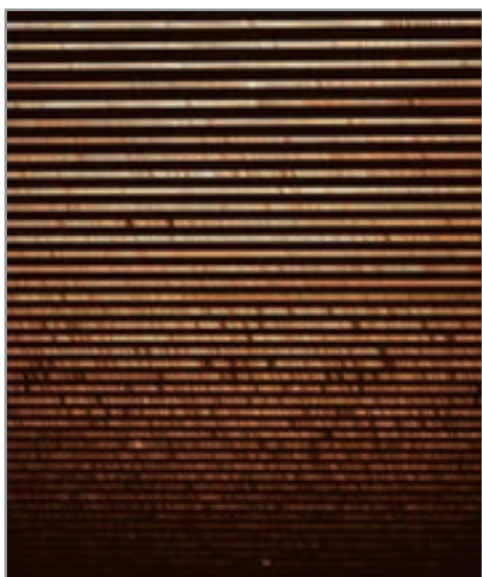


Рис. 68. Эшельный спектр красного сверхгиганта R Cam в интервале длин волн 3550–6980 Å со спектральным разрешением $R=60000$, полученный на спектрографе НЭС БТА с ПЗС-системой формата 2K×4.5K элементов. Две узкие эмиссии в нижней половине кадра – линии нейтрального водорода H δ и H γ . Две сильные абсорбции в 13-м порядке сверху – линии резонансного дублета NaI. Спектр получен с резателем изображения, поэтому каждый эшельный порядок повторяется трижды.

Кроме того, аналогичные выводы опубликованы еще для нескольких кандидатов в PPN: HD 158616 (ван Винкель и др., 1995), IRAS 19500–1709=HD 187885 (ван Винкель и Рейнерс, 2000) и IRAS 05341+0852 (Редди и др., 1997).

На основе первых же фактов обнаружения избытков тяжелых металлов в работах Клочковой (1997), Десин и др. (1998) был сделан вывод о взаимосвязи наличия эмиссии вблизи 21 мкм в ИК-спектрах звезд на стадии PPN и проявлений избытка тяжелых металлов в их атмосферах. Наши результаты, полученные для AFGL 2688, усиливают этот вывод, поскольку для этого объекта характерны и слабый избыток элементов s -процесса и полоса 21 мкм, практически невыделяемая на фоне монотонно возрастающего ИК-континуума. До настоящего времени этот результат остается одним из наиболее весомых, но не объясненных, в картине проявлений звездного нуклеосинтеза на стадиях AGB и post-AGB. Свойства околозвездной оболочки, определяемые, возможно, гигантскими углеродосодержащими молекулами,

чувствительны к небольшим изменениям в концентрации тяжелых металлов, доля которых по отношению к водороду ниже 10^{-10} .

Рейнерс и ван Винкель (2000) предприняли повторное исследование всех 6 известных звезд с деталью 21 мкм и на однородном спектральном материале подтвердили вывод Ключковой (1997) об эффективности s -процесса для этой группы звезд. Эти авторы получили строгую корреляцию между величиной нейтронной экспозиции, оцениваемой из наблюдений как отношение (hs/ls) (избытка тяжелых ядер s -процесса к более легким) и величины (s/Fe) , а также менее выраженную антикорреляцию между величиной (hs/ls) и металличностью (Fe/H) .

На рисунке 69 показан фрагмент спектра слабой в оптике $post$ -AGB звезды CGCS 6857, отождествляемой с ИК-источником IRAS 20000+3239. Эта звезда входит в небольшую выборку $post$ -AGB звезд с эмиссией на 21 мкм. Ключкова и Киппер (2006) по спектрам БТА определили химический состав атмосферы CGCS 6857 и нашли большие избытки металлов, синтезированных в ходе s -процесса.

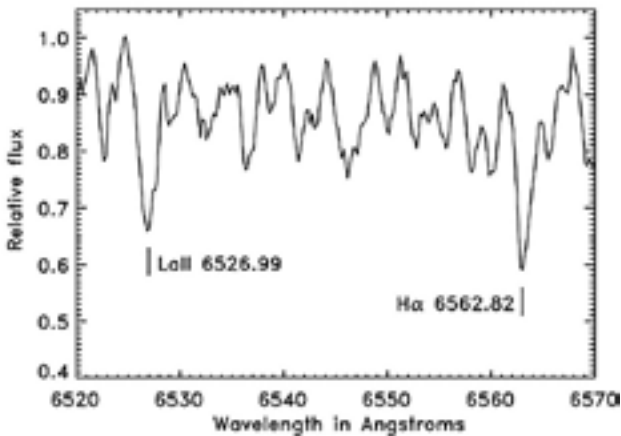


Рис. 69. Фрагмент спектра слабой в оптике звезды CGC S6857 (Ключкова и Киппер, 2006).

На рисунке 69 присутствует сильная линия одного из редкоземельных элементов LaII, интенсивность которой в спектре этой звезды сопоставима с интенсивностью линии H α (концентрация ядер лантана по отношению к водороду почти на 11 порядков выше нормальной).

Как правило, в атмосферах кандидатов в PPN наблюдается сверхдефицит (относительно их металличности) тяжелых ядер (Ключкова, 1995; Ван Винкель и др., 1996а, 1996б; Ключкова и Панчук, 1996; ван Винкель, 1997), существование которого в атмосферах маломассивных сверхгигантов на стадии $post$ -AGB пока не находит однозначного объяснения. Имеется ряд физических (дефицит водорода в атмосферах, сверхионизация атомов, имеющих низкий потенциал второй ионизации) и методических (ошибки параметров) эффектов, которые могли бы объяснить наблюдаемый сверхдефицит элементов s -процесса в атмосферах маломассивных сверхгигантов. Однако ни одно из предложенных объяснений не согласуется с полной картиной химического состава этих объектов. Мы считаем, что наличие или отсутствие избытка элементов s -процесса зависит от детальной эволюции данной звезды на стадии AGB, что, в свою очередь, определяется первоначальной массой звезды, поскольку именно масса влияет на пульсационную активность и скорость потери вещества.

РЕЗУЛЬТАТЫ 2005-2015 ГГ.: НЕОДНОРОДНОСТЬ ВЫБОРКИ

Важным свойством, определяющим достоверность результатов исследований AGB и post-AGB звезд в САО РАН, является качество спектров высокого разрешения, которые получены на эшелных спектрографах БТА. Для большинства звезд программы материал такого качества получен впервые, что позволило сделать ряд новых выводов относительно эволюционного статуса отдельных объектов, особенностей спектра, поля скоростей и химического состава атмосфер.

Прежде всего, упомянем **наш вывод о неоднородности исследуемой выборки** объектов. Оказалось, что среди звезд с большими избытками ИК-потока, помимо AGB и post-AGB звезд, присутствуют массивные звезды высокой светимости с протяженными и структурированными околосветными оболочками. Наиболее известным объектом, который много лет рассматривали как звезду на стадии post-AGB, является V1302 Aql, обладающая многочисленными пекулярностями спектра.

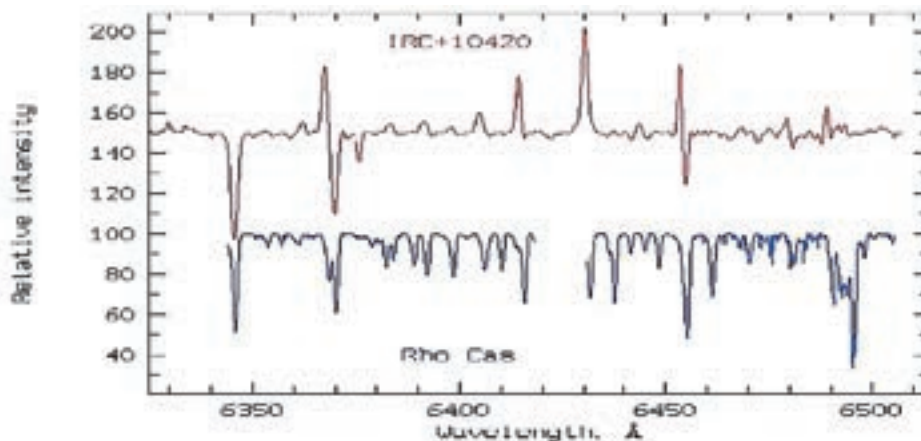


Рис. 70. Сопоставление фрагментов спектров двух желтых гипергигантов: IRC+10420 и ρ Cas (БТА/НЭС).

Долгое время эволюционный статус сверхгиганта V1302 Aql, ассоциированного с мощным источником ИК-излучения IRC+10420, был неясен. Совокупность наблюдаемых свойств звезды позволяла рассматривать ее как звезду на стадии post-AGB или как очень массивную звезду, прошедшую стадию красного сверхгиганта. В зависимости от принятого статуса, а, следовательно, и светимости объекта, оценка его удаленности от наблюдателя может различаться в несколько раз.

Однако сведения, полученные в последние десятилетия, а также новые оптические спектры не оставляют сомнений в принадлежности V1302 Aql к крайне редко наблюдаемым объектам – желтым гипергигантам. Более того, V1302 Aql, светимость которого составляет $L \approx 5 \times 10^5 L_{\odot}$, бесспорно рассматривается теперь как наиболее массивный объект в Галактике (с исходной массой $M \approx 20\text{--}40 M_{\odot}$) с рекордным темпом потери вещества, находящийся на кратковременном эволюционном переходе от массивных красных сверхгигантов к звездам Вольфа-Райе.

Пекулярность оптического спектра V1302 Aql (IRC+10420), насыщенного сложными эмиссионно-абсорбционными профилями линий, хорошо видна на

рисунке 70 в сравнении с родственным объектом – желтым гипергигантом ρ Cas, спектр которого преимущественно абсорбционный. На рисунке 71 мы представляем все разновидности профилей в спектре V1302 Aql.

Один из решающих аргументов, подтверждающий статус массивной звезды высокой светимости, был получен на основе спектральных данных БТА, когда мы впервые определили химический состав атмосферы V1302 Aql и обнаружили значительный избыток азота, что является признаком массивной звезды (Клочкова и др., 1997).

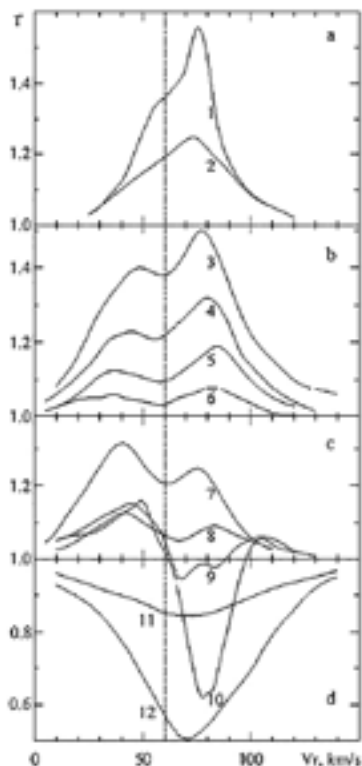


Рис. 71. Спектры V1302 Aql в 2012–2014 гг. Профили линий (сверху вниз):

a) запрещенные эмиссии: 1 – (FeII) 14F 7155 Å и 2 – (OI) 1F 6300 Å;

b) 3, 4, 5 – эмиссии FeII (46) 5991, 6084, 6113 ÅÅ и 6 – среднее из FeI (168) 6394 и TiII (112) 6718 ÅÅ;

c) эмиссия 7 – FeII (74) 6417 Å, 8 – среднее из эмиссий CrII (50) 5502 и 5511 ÅÅ и эмиссионно-абсорбционные линии: 9 – TiII (69) 5337 и 10 – TiII (70) 5154 ÅÅ;

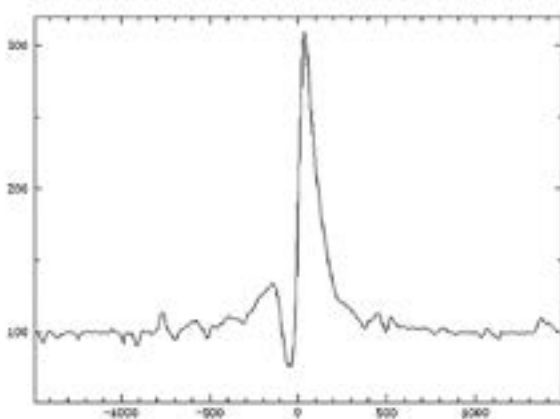
d) абсорбции: 11 – SiII (5) 5056 и 12 – SiII(2) 6347 ÅÅ. Штриховой линией нанесена системная скорость $V_{\text{sys}} \sim 60$ км/с (Оудмайер, 1996). Рисунок из статьи Клочковой и др. (2016).

Интерес к гипергиганту V1302 Aql не ослабевает в связи с обнаружением быстрого роста эффективной температуры (Оудмайер и др. 1996; Клочкова и др., 1997; Оудмайер, 1998), что позволило предположить, что звезда быстро эволюционирует, приближаясь к стадии Вольфа-Райе с темпом увеличения T_{eff} около 120 K за год. Хэмфрис с соавторами (2002) указывают, что V1302 Aql – звезда на стадии после красного сверхгиганта, пересекающая на диаграмме Герцшпрунга-Рассела (ГР) критическую область, называемую Желтым войдом. Обнаружение роста температуры V1302 Aql явилось стимулом для продолжения спектрального мониторинга этого загадочного объекта. Данные спектроскопии высокого разрешения необходимы для уточнения строения и кинематики его околосредной оболочки. Наиболее адекватной кинематическим данным нам представляется «дождевая» модель, предложенная Хэмфрисом и др. (2002).

Используя массив спектров V1302 Aql, полученных на БТА с высоким спектральным разрешением в 2001–2014 гг., Клочкова и др. (2016) провели

спектрофотометрические и позиционные измерения спектральных деталей различного типа (все их разновидности показаны на рис. 71). Продолжительный ряд наблюдений позволяет изучить поведение профилей деталей со временем, а также состояние поля скоростей в протяженной атмосфере и околозвездной среде. Сделан вывод о близости величин скоростей, измеренных по абсорбциям ионов группы железа в синей части спектра, и по абсорбционным компонентам линий с обратными P Cуг-профилями. Положение абсорбционных компонентов линий с обратными P Cуг-профилями, которые отражают наличие сгустков вещества, падающих на звезду со скоростью около 20 км/с, оставалось стабильным для всех дат наблюдений. Положения сильных абсорбций SiII (мультиплет 2) и абсорбционных компонентов линий Na и H β изменялись за период наблюдений незначительно, оставаясь, соответственно, около значений 63.7 и 70.5 км/с.

Удалось выявить близость скоростей, которые измерены по слабейшим абсорбциям, формирующимся в наиболее глубоких из доступных нам слоев фотосферы (или псевдофотосферы), и по запрещенным эмиссиям, формирующимся в протяженной газовой оболочке (63.7 и 65.2 км/с соответственно). Средняя скорость по разрешенным эмиссиям также мало отличается от скорости по чистым абсорбциям. По всем датам наблюдений ее среднее значение составляет 62.0 км/с. Средняя по всем моментам наблюдений скорость по межзвездным деталям составляет $V_r(DIB) = 4.6 \pm 0.2$ км/с.



Профиль линии Na в координатах пельная интенсивность – лучевая» в спектре сверхгиганта V510 Pup а и Ченцов, 2004).

Сопоставление профилей спектральных деталей в данных V1302 Aql за период 2001–2014 гг. указывает на отсутствие существенной переменности спектра. Основной вывод, полученный Ключковой и др. (2016) в результате многолетнего спектрального мониторинга, состоит в том, что желтый гипергигант вошел в фазу замедления или прекращения роста эффективной температуры и приблизился на диаграмме ГР к высокотемпературной границе Желтого войда. Очевидно, что необходим дальнейший мониторинг этой звезды предельно высокой светимости, наблюдаемой на эволюционном переходе, направление которого априори предсказать невозможно.

Еще один из объектов программы – сверхгигант V510 Pup является наглядным примером спектральной мимикрии. Светимость этой звезды, ассоциируемой с ИК-источником IRAS 08005-2356, едва достигает уровня светимости нормального сверхгиганта, в то же время, как показали Ключкова и Ченцов (2004), параметры ее ветра близки к параметрам ветра гипергигантов и даже LBV-звезд. В спектре V510 Pup аномально сильны абсорбции YII и других элементов s-процесса. Все абсорбционные

компоненты смещены в коротковолновую область спектра, что указывает на истечение звездного вещества. Околзвездная оболочка сверхгиганта проявляется в оптическом спектре в виде молекулярных полос углеродсодержащих молекул C_2 и CN. Линия Na имеет профиль типа P Cyg (рис. 72). Эмиссия в Na многократно превышает уровень континуума, что свидетельствует о мощном звездном ветре. Различия V_r в пределах одного спектра достигают 100 км/с в основном за счет дифференциальных сдвигов эмиссионных и абсорбционных компонент, а также вследствие систематического изменения скорости с интенсивностью и длиной волны линии. Такие большие дифференциальные сдвиги линий говорят о градиенте скорости в тех слоях атмосферы V510 Pup, где эти линии образуются, а множество профилей типа P Cyg – о расширении атмосферы.

Впервые выполнена оптическая спектроскопия (БТА/НЭС) с высоким спектральным разрешением переменной V2324 Cyg, ассоциируемой с ИК-источником IRAS 20572+4919 (Клочкова и др., 2008). В области длин волн 4549–7880 Å отождествлено свыше 200 абсорбций (в основном FeII, TiII, CrII, YII, BaII, YII). Определены спектральный класс – F0 III и скорость вращения $V \sin i = 69$ км/с. Линии нейтрального водорода и D-линии NaI имеют сложный профиль типа P Cyg. Не обнаружены ни систематический ход лучевой скорости с глубиной линии, ни переменность V_r . Определено среднее значение гелиоцентрической лучевой скорости $V_r = -16.8 \pm 0.6$ км/с. Скорости по ядрам абсорбционных компонент ветровых линий H β и NaI колеблются от -140 до -225 км/с, а скорости расширения соответствующих слоев – от 120 до 210 км/с. Максимальная скорость расширения $V_r = 450$ км/с получена по синей компоненте расщепленной абсорбции Na для даты 12.12.1995. Методом моделей атмосфер определены эффективная температура $T_{eff} = 7500^\circ\text{K}$, ускорение силы тяжести $\log g = 2.0$, микротурбулентная скорость $V_t = 6.0$ км/сек и солнечная металличность. Основной особенностью химического состава звезды является избыток лития и натрия. Принадлежность V2324 Cyg к post-AGB звездам поставлена авторами под сомнение. Со стадией post-AGB не согласуются ряд свойств звезды и прежде всего невысокая светимость звезды. Спектральная классификация указывает на класс светимости III. Не сочетаются со статусом post-AGB звезды профиль линии Na и очень высокая скорость ветра, присущие обычно сверхгигантам. Упомянутый выше избыток лития в атмосфере звезды невысокой светимости подсказывает альтернативную эволюционную фазу для V2324 Cyg. Феномен избыточного содержания лития в атмосферах F-гигантов с ИК-избытками уже известен. Часть этих обогащенных литием гигантов, еще не достигших стадии AGB и наблюдаемых на красной ветви гигантов, имеют низкие массы $M < 2.5 M_\odot$. В качестве механизма производства лития для них предлагается так называемый «cool bottom process», в основе которого лежит синтез бериллия, перенос его ядер к основанию конвективной оболочки и последующее разрушение до ядер лития в приповерхностных слоях звезды. Здесь уместно сослаться на работу Жесниевича и др. (2006), в которой определено содержание Li для выборки G–K-гигантов и субгигантов с солнечной металличностью, и где наибольшие величины содержания Li получены для быстровращающихся звезд $V \sin i > 30$ км/с. Однако спектральные особенности V2324 Cyg в виде сильных эмиссий HII не позволяют отнести ее к красным гигантам. Перспективу дальнейшего уточнения расстояния, массы и природы V2324 Cyg мы видим в накоплении информации не только о самом объекте, но и о звездах в направлении на ассоциацию Cas OB7, членом которой звезда, по-видимому, является.

РЕЗУЛЬТАТЫ 2005–2015 гг.: НОВЫЙ ФЕНОМЕН В СПЕКТРАХ POST-AGB ЗВЕЗД

Важным результатом спектроскопического исследования post-AGB звезд является то, что на основании изученной к настоящему времени выборки можно говорить о ее неоднородности по химическому составу. Избыток элементов s-процесса, ожидаемый для звезд на стадии post-AGB как следствие предшествующей эволюции звезды и процесса третьего перемешивания, встречается пока крайне редко. За два десятилетия поисков нам удалось обнаружить избытки элементов s-процесса лишь у семи таких звезд, детально исследовав около полусотни объектов. Анализ совокупности наблюдаемых свойств тех post-AGB объектов, в атмосферах центральных звезд которых выявлены большие избытки углерода и тяжелых металлов, свидетельствует о том, что околозвездные оболочки этих избранных звезд имеют сложную морфологию. Кроме того, их оболочки также обогащены углеродом, что проявляется в ИК-, радио и оптических спектрах в наличии молекулярных линий и полос C_2 , C_3 , CN, CO. Кроме того, все эти объекты содержат в ИК-спектрах не отождествленную пока эмиссию на длине волны 21 мкм. Ее присутствие в спектрах post-AGB звезд с оболочками, обогащенными углеродом, позволяет в качестве основного агента предполагать наличие какой-то сложной молекулы, содержащей атомы углерода.

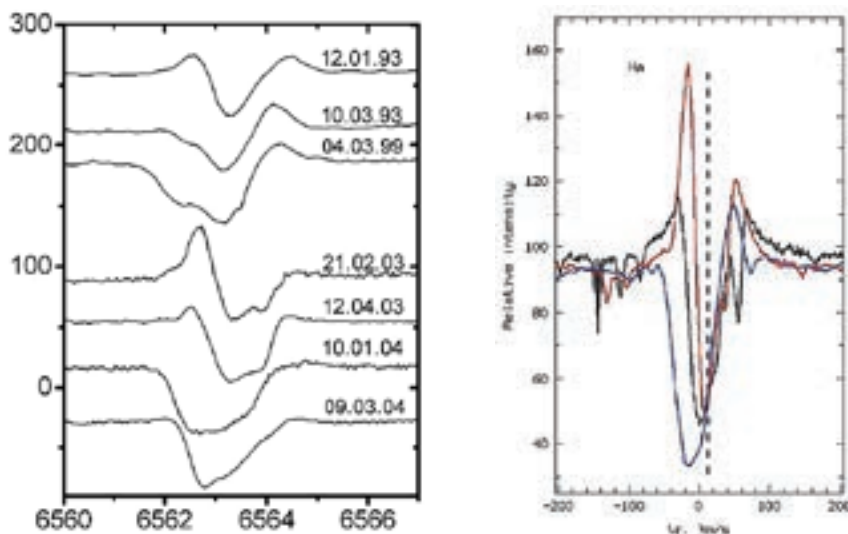


Рис. 73. Слева – переменность профиля Na в спектре HD 56126 (Клочкова и Ченцов, 2007). Справа – профиль линии Na в координатах «относительная интенсивность – лучевая скорость Vr» для нескольких моментов регистрации спектра post-AGB звезды V5112 Sgr (Клочкова, 2013).

Мы предполагаем, что редкая встречаемость этой формы обогащения атмосфер является следствием отличий в эволюции AGB-звезд, различающихся по массе. В настоящее время установлено, что поверхностные слои менее массивных AGB-звезд (с начальными массами ниже $4-5 M_{\odot}$) обогащаются углеродом – так возникают C-rich звезды, а более массивные избегают обогащения углеродом и остаются O-rich звездами на последующих этапах эволюции.

Коллекция данных, полученных в результате многолетней спектроскопии на БТА, послужила основой для изучения переменности спектров и поля скоростей в атмосфере и оболочке звезды. Переменность объясняется истечением протяженных атмосфер в сочетании с пульсациями более глубоких слоев. Клочкова и Ченцов (2007) детально изучили оптические спектры (БТА/НЭС) post-AGB звезды HD 56126 (IRAS 07134+1005) в области длин волн 4012–8790 Å. Выявлена сложная и переменная форма профилей сильных линий (H α , абсорбций FeII, YII, BaII и др.), формирующихся в расширяющейся атмосфере (в основании ветра) звезды. На рисунке 73 (слева) представлены профили H α в спектрах HD 56126, полученные в различные даты. Показано, что для изучения кинематики атмосферы необходимо измерение скоростей по отдельным деталям этих профилей. По линиям металлов и молекулярным деталям обнаружены дифференциальные сдвиги линий, достигающие $\Delta V_r = 15\text{--}30$ км/с. В атмосфере звезды одновременно присутствуют как расширяющиеся слои, так и слои, падающие на звезду.

Сопоставление данных для разных моментов наблюдений приводит к выводу о переменности лучевой скорости и картины скоростей в целом. Положение молекулярного спектра стабильно во времени, что указывает на устойчивость процесса расширения околозвездной оболочки HD 56126, наблюдаемой в линиях C $_2$ и NaI.

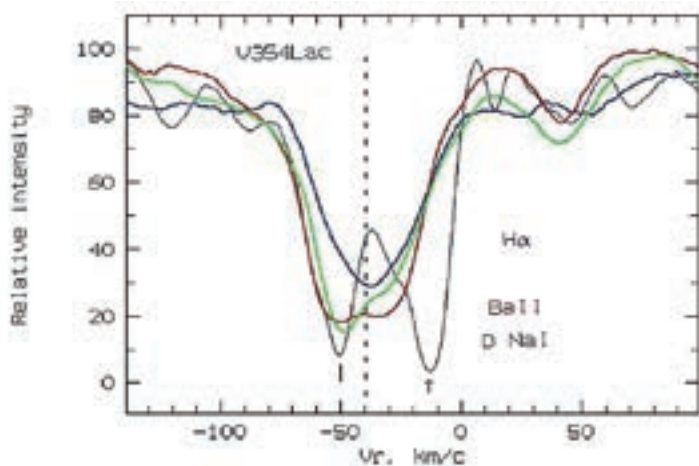


Рис. 74. Асимметрия профиля линии BaII 6141 Å за две даты наблюдений (красная и зеленая линии) в спектре V354 Lac в сопоставлении с профилями H α и раздвоенным профилем D-линии NaI (Клочкова, 2009).

Как видно на рисунке 73 (справа), в спектре post-AGB звезды V5112 Sgr со временем изменяется тип профиля H α , соотношение интенсивностей его эмиссионных компонент и положение абсорбционного ядра. Для нескольких избранных объектов программы нами обнаружено неизвестное ранее для спектров post-AGB-звезд явление – **асимметрия и/или расщепление** сильнейших абсорбций с низким потенциалом возбуждения нижнего уровня. Пример такого явления приведен на рисунке 74.

Рассмотрим подробнее этот эффект на примере спектра post-AGB сверхгиганта V5112 Sgr, изученного Клочковой (2013). V5112 Sgr имеет обогащенную за счет третьего перемешивания оболочку, эмиссию на длине волны 21 мкм, мощную и

структурированную ИК-оболочку. Найденный эффект расщепления абсорбций максимален у линий ионов BaII, профиль которых в случае V5112 Sgr расщеплен на три компонента (см. пример такого редкого явления на рис. 75). Отметим, что форма профилей расщепленных линий и положение ее атмосферного («звездного») компонента меняется со временем, а положение околозвездных компонент практически неизменно.

Анализ картины скоростей, проведенный с использованием данных радиоспектроскопии объекта, позволил нам сделать вывод о том, что коротковолновые компоненты расщепленных абсорбций BaII формируются в структурированной околозвездной оболочке, расширяющейся со скоростями $V_{exp} \approx 20$ и 30 км/с. Обнаружение оболочечных компонентов тяжелых металлов указывает на эффективный вынос в оболочку вещества, синтезированного в предшествующий этап эволюции звезды. Таким образом, впервые обнаружено обогащение оболочки звезды тяжелыми металлами, синтезированными на стадии AGB.

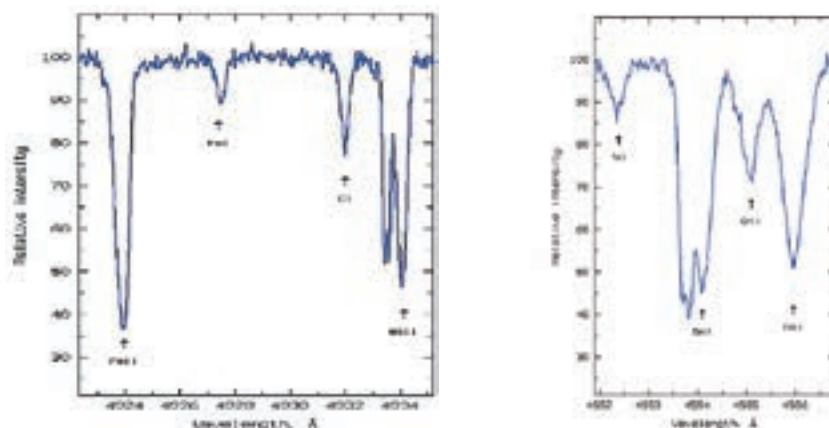


Рис. 75. Линии BaII 4934 и 4554 Å в спектре post-AGB звезды V5112 Sgr, расщепленные на три компонента (Клочкова, 2013).

Также хорошим примером является IRAS 23304+6147. Ранее по спектрам центральной звезды (слабой в оптике, $B = 15.52$, $V = 13.15$, $Sp = G2Ia$) Клочковой и др. (2000) был найден избыток углерода и тяжелых металлов. Согласно наблюдениям с высоким пространственным разрешением на HST околозвездная оболочка в этой системе имеет сложную структуру, включающую мультиполь и протяженное гало с дугообразными деталями.

Последующий спектральный мониторинг (БТА/НЭС) привел к новым результатам (Клочкова и др., 2015a). Сравнение лучевой скорости $V_r = -25.7$ км/с, полученной по многочисленным симметричным абсорбциям слабой и умеренной интенсивности, с ранее опубликованными данными указывает на отсутствие значимых изменений скорости и ее совпадение с системной скоростью по данным радиоспектроскопии. Высокое спектральное разрешение позволило измерить положения 24 вращательных линий полосы (0;0) $\lambda 5165$ Å системы Свана молекулы C_2 . В результате определена типичная для звезд на стадии post-AGB скорость расширения околозвездной оболочки, $V_{exp} = 15.5$ км/с. Кроме того, у полосы (0;1) 5635 Å системы Свана обнаружен сложный

эмиссионно-абсорбционный профиль. Впервые в оптическом спектре источника IRAS 23304+6347 обнаружена асимметрия профилей сильных абсорбций ионизованных металлов (YII, BaII, LaII, SiII), которая обусловлена наличием у этих линий коротковолновой компоненты, формирующейся в околосветной оболочке.

На рисунке 76 приведены профили абсорбций в спектре этого объекта. Как видно из рисунка, профили этих линий содержат длинноволновый компонент, скорость по которому совпадает как со скоростью по симметричным абсорбциям, так и с системной скоростью. Положение же коротковолнового компонента соответствует скорости по полосе Свана молекулы C_2 .

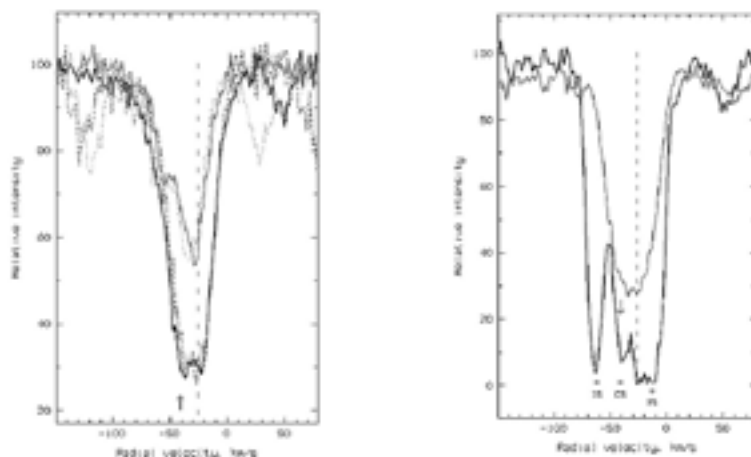


Рис. 76. Сложные профили избранных линий в спектре центральной звезды источника IRAS 23304+6147. Слева в нижней группе профилей: BaII 6141 Å (сплошная жирная), BaII 6496 Å (точечная), YII 5200 Å (штриховая). Верхняя группа линий: LaII 6390 Å (сплошная тонкая) и SiII 6347 Å (точечная). Справа показан многокомпонентный профиль D-линии NaI (жирная линия), включающий межзвездные компоненты (IS) и околосветный компонент (CS). Тонкой линией нанесен профиль Na. Стрелкой отмечена скорость оболочки по полосе системы Свана, а вертикальная штриховая линия указывает системную скорость (Клочкова и др. 2015а).

Предложенная трактовка сложного профиля подтверждается сравнением профилей линий на обеих панелях рисунка 76. Положение коротковолнового компонента совпадает также с положением околосветного компонента профиля Na D1. Избыток кремния, синтез которого возможен за счет «hot bottom process» в горячих слоях конвективной оболочки у массивных AGB-звезд, позволяет говорить о принадлежности исследуемого объекта к звездам с исходными массами выше $4 M_{\odot}$.

К настоящему времени тяжелые металлы s-процесса обнаружены в структурированных околосветных оболочках лишь у трех из тех post-AGB звезд, в атмосферах которых найдены продукты третьего перемешивания. Таким образом, в результате многолетнего спектрального мониторинга (БТА/НЭС) обнаружен канал, по которому идет обогащение тяжелыми металлами s-процесса структурированной оболочки звезды, находящейся на стадии post-AGB.

Принципиально новый результат получен также в отношении формирования загадочных спектральных деталей, отождествляемых с так называемыми диффузными межзвездными полосами (diffuse interstellar bands, DIBs). Оказалось, что в спектре V5112 Sgr значение лучевой скорости по DIBs совпадает со скоростью по коротковолновой оболочечной компоненте D-линий NaI, что позволило сделать вывод о формировании DIBs в околозвездной оболочке (Клочкова, 2013). Известны несколько программ, нацеленных на поиск DIBs в околозвездных оболочках, однако все попытки были безуспешны, найденные оболочечные детали впоследствии подтверждения не нашли. Основываясь на обширном и высококачественном спектральном материале, обеспечивающем высокую точность позиционных измерений, а также имея большой опыт работы с такими данными, мы впервые получили положительный результат в долговременном поиске аналогов DIBs в околозвездной среде.

Отметим, что Клочкова и др. (2015a) измерили в спектре центральной звезды IRAS 23304+6347 положения 5 абсорбций, которые можно отождествить с DIBs: 5797, 6196, 6203, 6207, 6613 Å. Среднее для них значение скорости $V_r(DIBs) = -15$ км/с. Если же отбросить полосу 6613 Å, которая блендирована в спектре исследуемого сверхгиганта сильной линией YII, то получаем $V_r(DIBs) = -14.0 \pm 1.3$ км/с, близкую к скорости по самому длинноволновому компоненту D-линий NaI, $V_r = -13.2$ км/с. Таким образом, приходим к выводу, что в случае IRAS 23304+6347 полосы DIBs формируются в межзвездной среде. Итак, звезда V5112 Sgr пока остается единственной на стадии post-AGB, в спектре которой найдены полосы DIBs, формирующиеся в околозвездной оболочке (Клочкова, 2013).

СТРУКТУРИРОВАННЫЕ ОБОЛОЧКИ POST-AGB ЗВЕЗД

Получив новые результаты, касающиеся особенностей химического состава выборки post-AGB звезд, которые окружены сложными оболочками, мы попытались найти взаимосвязь между особенностями химического состава атмосфер и строения их околозвездных оболочек. Звездный ветер у объектов на стадии AGB обычно обладает сферической симметрией, что и определяет преимущественно сферическую форму медленно расширяющихся оболочек у этих звезд. Однако их ближайшие потомки – post-AGB-звезды, чья центральная звезда окружена, как правило, несферичной оболочкой сложной структуры (биполярной и даже квадрупольной формы). Переход к этой сложной морфологии от преимущественно сферических оболочек AGB-звезд происходит именно на стадии post-AGB, что и обуславливает необходимость детального и многостороннего изучения этих объектов. Качественно новый уровень понимания структуры и динамики оболочек вокруг далеко проэволюционировавших звезд обеспечивают наблюдения с космическим телескопом HST. Именно они выявили биполярную структуру и джеты у многих объектов, ранее наблюдавшихся как точечные. На рисунке 77 представлено изображение биполярной туманности Egg (RAFGL2688). Это неоднородное асимметричное изображение туманности, окружающей слабый в оптике F-сверхгигант V1610 Cyg, получено с широкоугольной камерой HST. Туманность Egg, имеющая большую пространственную протяженность (основные детали ее структуры можно наблюдать и с наземным телескопом) и демонстрирующая иерархию деталей различного масштаба, хорошо иллюстрирует сложность строения оболочек post-AGB звезд.

По мере накопления детальных изображений выяснилось, что так называемые дуги, наблюдаемые в оболочках нескольких post-AGB-звезд, указывают на эпизодические

изменения темпа потери массы, происходившие на стадии AGB. То обстоятельство, что дуги не замкнуты и не симметричны относительно центральной звезды, свидетельствует о том, что потеря массы происходила в ходе нескольких эпизодов усиления ветра, при этом у выбросов нет преобладающей направленности в телесных углах.

На основе наблюдений с высоким спектральным разрешением на БТА репрезентативной выборки звезд Клочкова (2014) рассмотрела особенности оптических спектров *post*-AGB звезд с атмосферами, обогащенными углеродом и тяжелыми металлами *s*-процесса и с обогащенными углеродом околозвездными оболочками. Сделан вывод о том, что пекулярности профилей линий – наличие эмиссионного компонента в D-линиях дублета NaI, характер молекулярных деталей, асимметрия и расщепление профилей сильных абсорбций с низким потенциалом возбуждения нижнего уровня – связаны с кинематическими и химическими свойствами околозвездной оболочки и с типом ее морфологии.



*Рис. 77. Изображение биполярной туманности Egg, отождествляемой с *post*-AGB звездой V1610 Cyg. Центральная звезда в системе перекрыта пылевым диском. Изображение получено из архива космического телескопа HST (север – справа).*

В частности, переменность наблюдаемых профилей абсорбционно-эмиссионной линии Na и линий металлов, а также наблюдаемая у нескольких объектов смена типа (абсорбция/эмиссия) полос Свана молекулы C_2 обязаны изменениям в структуре околозвездной оболочки. Тип профиля Na (чисто абсорбционный, чисто эмиссионный, типа P Cyg или инверсного P Cyg с двумя эмиссионными компонентами в крыльях) не связан с химическим составом атмосферы центральной звезды. Основными факторами, влияющими на тип профиля Na и его переменность, являются темп потери вещества, скорость звездного ветра, кинематика и оптическая толщина оболочки.

Описанное выше расщепление на компоненты профилей сильнейших абсорбций тяжелых металлов в спектрах сверхгигантов V5112 Sgr и V354 Lac позволяет предположить, что процесс формирования структурированной околосредной оболочки сопровождается обогащением продуктами звездного нуклеосинтеза. Напомним, что в спектрах именно этих двух родственных объектов, V5112 Sgr и V354 Lac, мы обнаружили оболочечные абсорбции, аналогичные межзвездным DIBs. Попытки найти взаимосвязь между особенностями оптического спектра и морфологией околосредной среды затруднены тем, что наблюдаемая структура оболочки сильно зависит от наклона оси симметрии к лучу зрения и от степени углового разрешения аппаратуры как спектральной, так и используемой для получения прямых изображений.

ОСОБЫЕ ПРЕДСТАВИТЕЛИ СЕМЕЙСТВА POST-AGB ЗВЕЗД

В заключение остановимся на некоторых особых типах звезд, наблюдаемых на стадии post-AGB. Первым этапом в изучении post-AGB-кандидатов были F-сверхгиганты на высоких галактических широтах. Звездой-прототипом для них является пекулярный сверхгигант UU Her. В 80-е годы этим странным объектам уделялось много внимания, что было связано с внутренним противоречием изначального представления о них как о классических сверхгигантах, пребывающих на столь высоких широтах Галактики. Однако последующее изучение химического состава и иных наблюдаемых свойств этих звезд показало, что UU Her и родственные ему объекты являются далеко проэволюционировавшими маломассивными звездами, принадлежащими к старому населению Галактики. Таким образом, было устранено противоречие между высокой светимостью звезд типа UU Her и их высокоширотным расположением.

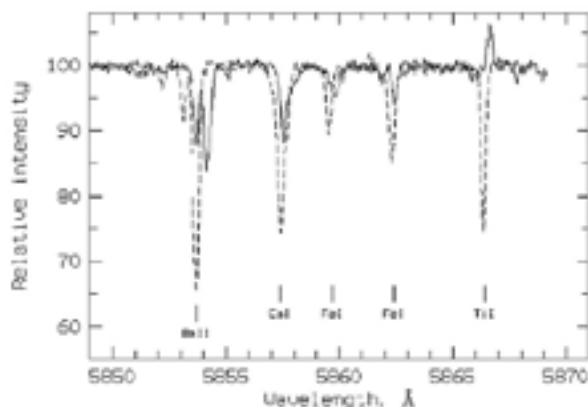


Рис. 78. Сравнение фрагментов в спектрах LN Her. Штриховая линия – наблюдения 04.2010 г., сплошная линия – 06.2010 г. (Клочкова, Панчук, 2012).

Высокоширотный F-сверхгигант LN Her относится к полуправильным переменным, которые являются далеко проэволюционировавшими звездами на стадии post-AGB. Наблюдения сверхгиганта, проведенные на 6-м телескопе с высоким спектральным разрешением в 2003–2011 гг., позволили детально изучить особенности его оптического спектра и поля скоростей в атмосфере.

По слабым симметричным фотосферным абсорбциям Клочковой и Панчуком (2012) найдены изменения лучевой скорости от даты к дате с амплитудой до 3 км/с, что

является следствием слабых пульсаций. Долгое время эмиссия в $\text{H}\alpha$ считалась единственной пекулярностью спектра LN Hya. Однако за счет спектрального мониторинга обнаружена пекулярность и переменность профилей сильных линий FeI , FeII , BaII , SiII , и др. Впервые выявлена асимметричная форма профилей этих линий: их коротковолновые крылья вытянуты, а ядра либо раздвоены, либо искажены эмиссией.

Наиболее интересным для нас оказался наблюдательный сезон 2010 г., в течение которого от спектра к спектру изменялись положение и глубина абсорбционного компонента $\text{H}\alpha$, интенсивность коротковолнового и длинноволнового эмиссионных компонентов, а также отношение их интенсивностей. В спектре 01.06.2010 г. появились слабые эмиссии нейтральных атомов (VI , MnI , CoI , NiI , FeI), что хорошо видно на спектральном фрагменте (рис. 78).

На рисунке 79 приведен пример переменности профилей избранных линий в спектре LN Hya. Эти особенности спектра, зарегистрированные впервые, дают основание предполагать, что в 2010 г. нам удалось зафиксировать кратковременное изменение физических условий в верхних слоях атмосферы LN Hya.

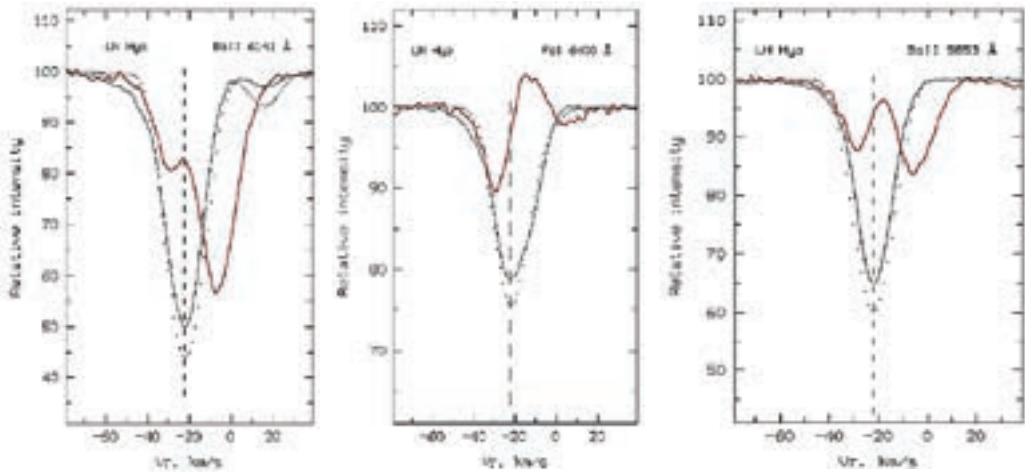


рис. 17. профили линии BaII 5853 Å и FeI 6101 Å в спектрах LN Hya, полученные 01.06.2010 (красная линия) и 12.01.2011 (тонкая линия), в сопоставлении с теоретическим профилем каждой из этих линий (точки), рассчитанным с параметрами $T_{\text{eff}} = 6000 \text{ K}$, $\log g = 1.0$, (Клочкова, Панчук, 2012).

Тесные двойные с большим дефицитом водорода. Особой подгруппой звезд на стадии post-AGB является крайне малочисленная группа двойных систем с большим дефицитом водорода (Hydrogen-deficient binaries, HdBs). Прототип этих тесных двойных – достаточно яркая звезда ν Sgr. В настоящее время известны только 4 HdBs звезды, причем все они имеют очень близкие эффективные температуры $\approx 10000 \text{ K}$. Предполагается, что post-AGB компаньон в составе этих двойных систем находится в фазе горения гелия в слое, окружающем вырожденное C–O-ядро. Время жизни гелиевого сверхгиганта всего около 10^4 лет, что и объясняет редкую встречаемость HdBs-звезд. Природа второго, невидимого компонента системы остается пока неизвестной. Пристальный интерес к этим объектам вызван тем, что, согласно современным представлениям, они считаются предшественниками сверхновых SN Ia. Хорошо изучены в настоящее время A-сверхгиганты ν Sgr и KS Per. Основными

R Sct - полуправильная переменная типа RV Tau. Переменные сверхгиганты типа RV Tau находятся в полосе нестабильности для звезд II типа населения. R Sct – ярчайший и самый иррегулярный представитель этих звезд имеет период переменности около 142^d. Киппер и Клочкова (2013), используя спектры R Sct (БТА/НЭС и архив TBL/NARVAL), определили фундаментальные параметры, изучили особенности спектра и кинематической картины, а также рассчитали детальный химический состав атмосферы. Металличность звезды $Fe/H = -0.5$, при этом обнаружен очень большой избыток углерода ($C/Fe = 0.84$). Избыток тяжелых металлов s-процесса не наблюдается, поэтому высказано предположение, что звезда еще не испытала третьего перемешивания. Полученная эффективная температура $T_{eff} = 4500^\circ K$ также указывает на то, что R Sct еще находится на стадии AGB. В спектре звезды обнаружено расщепление сильнейших абсорбций, а также присутствие слабой и переменной эмиссии в линиях FeI и TiI. Вблизи минимума блеска эмиссия наблюдается и в линиях H α , H β . Лучевая скорость, измеренная по слабым симметричным абсорбциям, изменяется с большой амплитудой. Картина лучевых скоростей, определенная по спектральным деталям различного типа, изменяется со временем, а для избранных фаз наблюдается стратификация скорости. На рисунке 81, где для двух моментов наблюдений показана картина лучевых скоростей, измеренных по линиям различной природы, хорошо видна значительная переменность скорости.

СПЕКТРАЛЬНЫЕ АТЛАСЫ

Работая с высококачественным спектральным материалом, полученным на БТА для звезд самых разных типов (различные спектральные классы, классы светимости, стадия эволюции, особенности химического состава), мы считали необходимым этапом нашей работы создание спектральных атласов. Опубликованные в доступном виде спектральные атласы способствуют сохранению наблюдательных данных и бесспорно облегчают работу спектроскопистов.

Наши атласы содержат спектральный материал как в графическом представлении, так и в виде таблиц с подробным отождествлением всех спектральных деталей. Большая часть этих атласов доступна в цифровом виде в Интернете.

На рисунке 82 для примера приведен один из 28 фрагментов атласа спектров (Клочкова и др., 2015b) A-сверхгигантов различного статуса: postAGB звезды BD+48°1220 (IRAS 05040+4820), пекулярного сверхгиганта 3Pup (IRAS 07418–2850) и массивного сверхгиганта α Cyг (IRC+50337).

Не останавливаясь в деталях на каждом из опубликованных атласов, мы лишь перечислим их для полноты картины:

- Киппер и Клочкова (Kipper T.A., Klochkova V.G.) An atlas of the spectrum of Aldebaran 4000–6720 Å. Tallinn, Valgus, 1987. p.1–50;
- Ченцов и др. (Chentsov E.L., Klochkova V.G., Mal'kova G.A.) Spectral atlas of the symbiotic star MWC 560. Bull. Spec. Astrophys. Observ., 1997, v.43, p.18–29;
- Клочкова В.Г., Ермаков С.В., Панчук В.Е. Атлас спектров F-, G-звезд. Препринт CAO 2001, No.157;
- Ченцов и др. (Chentsov E.L., Ermakov S.V., Klochkova V.G., Panchuk V.E., Bjorkman K.S., Miroshnichenko A.S.) An atlas of spectra of B6-A2 hypergiants and supergiants from 4800 to 6700 Å. Preprint Spec. Astrophys. Observ. No. 161. 2001;
- Ченцов и др. (Chentsov E.L., Ermakov S.V., Klochkova V.G., Panchuk V.E., Bjorkman

- K.S., Miroschnichenko A.S.) An atlas of spectra of B6-A2 hypergiants and supergiants from 4800 to 6700 Å. *Astron. & Astrophys.*, 2003, v.397, p.1035–1042;
- Панчук В.Е., Ермаков С.В., Клочкова В.Г. Исследование звезд гало. I. Атлас спектров в диапазоне 3500-5000 Å. Препринт САО, No. 172. 2002;
 - Клочкова и др. (Klochkova V.G., Zhao G., Panchuk V.E., Ermakov S.V.) A spectral atlas of F and G stars. *Chin. J. Astron. Astrophys.* 2004, v.4, No.3, P. 279–283;
 - Ченцов и Саркисян (Chentsov E.L., Sarkisyan A.N.) Spectral atlas of O9.5-A1-Type supergiants. *Astrophys. Bull.*, v.62, 257, 2007;
 - Клочкова и др. (Klochkova V.G., Chentsov E.L., Tavolgenskaya N.S., Shapovalov M.V.) Optical spectrum of the post-AGB Star HD56126 in the wavelength interval 4010-8790 Å. *Astrophys. Bull.*, v.62, 162, 2007;
 - Ченцов и др. (Chentsov E.L., Klochkova V.G., Kipper T., Tavolgenskaya N.S., Panchuk V.E., Yushkin M.V.) Atlas of spectra of selected stars in the ground-based ultraviolet. *Astrophys. Bull.*, v.66, 466, 2011;
 - Клочкова и др. (V.G. Klochkova, E.G. Sendzikas, E.L. Chentsov.) Spectral atlas of A-type supergiants, *Astrophys. Bull.*, v.70, No.1, 89–108, 2015b.

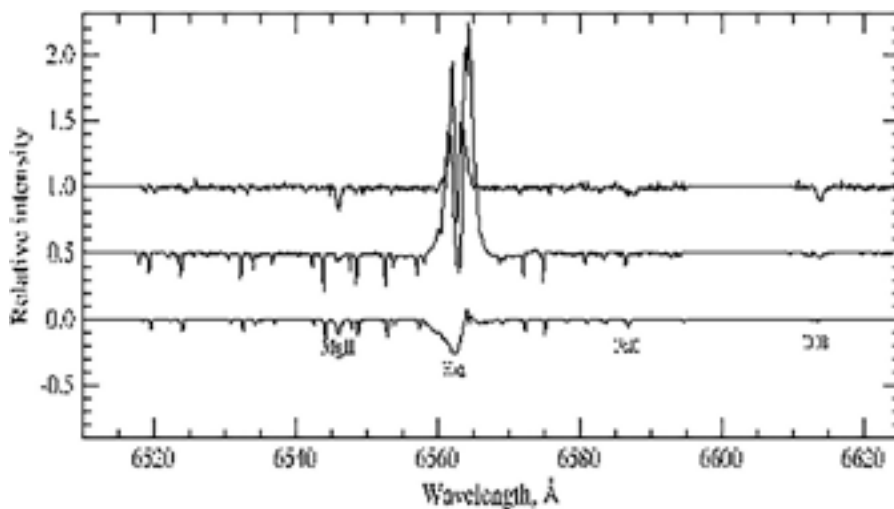


Рис. 82. Фрагмент атласа в области линии $H\alpha$ для спектров А-сверхгигантов. Сверху вниз: BD+48°1220, 3Pир, α Суг (Клочкова и др., 2015b).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе кратко рассмотрены важнейшие проблемы и сведения, касающиеся заключительных стадий эволюции звезд промежуточных масс и процессов нуклеосинтеза в ходе их эволюции. Приведены основные результаты, полученные в ходе выполнения на БТА спектрального исследования выборки пекулярных сверхгигантов, отождествляемых с галактическими ИК-источниками. Основным аспектом нашей программы является поиск эволюционных изменений химического состава звезд, прошедших стадию AGB и третье перемешивание, а также анализ спектральных проявлений кинематических процессов в их протяженных атмосферах и

оболочках. Наиболее значительным результатом программы является обнаружение избытков элементов s-процесса у семи post-AGB звезд, что эмпирически подтверждает теорию эволюции звезд данного типа. У трех из этих звезд впервые обнаружен вынос тяжелых металлов s-процесса в околосветные оболочки. Результаты исследования кинематики атмосфер и оболочек послужат уточнению баланса вещества, производимого звездами на стадиях AGB и post-AGB и поставляемого в межзвездную среду. До сих пор в моделях химической эволюции Галактики используется приближение, где в сферически-симметричных оболочках звезд вещество движется только в одном направлении.

Подчеркнем, что программа мониторинга сверхгигантов различной природы является предельной для спектроскопии высокого спектрального разрешения даже на самых крупных телескопах. С наблюдательной точки зрения задача усложняется необходимостью многократных наблюдений переменных объектов, а также высокими требованиями к стабильности аппаратуры и, в частности, к высокой точности позиционных измерений.

Новый аспект спектроскопии звезд высокой светимости с ИК-избытками, состоящий в исследовании околосветных оболочек, включая молекулярную спектроскопию, выдвигает, в частности, требования увеличить долю спектрополяриметрии и обеспечить сверхвысокое разрешение $R > 10^5$. Таким образом, наша программа стимулирует дальнейшее развитие и совершенствование спектрального комплекса БТА (см. статью В.Е. Панчука, данный сборник), а также систем обработки спектральных данных и методов их анализа.

Автор благодарен своим соавторам, участвовавшим в выполнении программы спектроскопии сверхгигантов с ИК-избытками на БТА и в подготовке совместных публикаций.

Исследования по спектроскопии сверхгигантов с ИК-избытками были поддержаны грантами РФФИ (проекты 08-02-00072а, 11-02-00319а и 14-02-00291а).

ПУБЛИКАЦИИ

- [1] Аикава (Aikawa T.) *Astron. & Astrophys.*, **514**, A45, 2010.
- [2] Бонд (Bond H.E.), 1992, *Nature*, **356**, 474
- [3] ван Винкель (van Winckel H.), *Astron. & Astrophys.*, **319**, 561, 1997.
- [4] ван Винкель и Рейнепс (van Winckel H., Reyniers M.) *Astron. & Astrophys.*, **354**, 135, 2000.
- [5] ван Винкель и др. (van Winckel H., Waelkens C., Waters L.B.F.M.), *Astron. & Astrophys.*, **293**, L25, 1995.
- [6] ван Винкель и др. (van Winckel H., Waelkens C., Waters L.B.F.M.) *Astron. & Astrophys.*, **306**, L37, 1996a.
- [7] ван Винкель и др. (van Winckel H., Oudmaijer R.D., Trams N.R.) *Astron. & Astrophys.*, **312**, 553, 1996b.
- [8] Десин и др. (Decin L., van Winckel H., Waelkens C., Bakker E.J.) *Astron. & Astrophys.*, **332**, 928, 1998.
- [9] Жесниевич и др. (Jasniewicz G., Recio-Blanco A., de Laverny P., Parthasarathy P., de Medeiros J. R.) *Astron. & Astrophys.*, **453**, 717 (2006)
- [10] Зач и др. (Zacs L., Klochkova V.G., Panchuk V.E.), *MNRAS*, **275**, 764, 1995.
- [11] Ибен и Рензини (Iben I., Rensini A.) *Ann Rev Astron. & Astrophys.*, **21**, p.271, 1983.
- [12] Кеппелер и др. (Käppeler F., Gallino R., Bisterzo S., Aoki W.) *Rev. Modern Physics*, **83**, p.157, 2011.
- [13] Киппер и Клочкова (Kipper T. and Klochkova V.G.), *Baltic Astron.*, **21** p.219, 2012.
- [14] Киппер и Клочкова (Kipper T. and Klochkova V.G.), *Baltic Astron.*, **22** p.77, 2013.

- [15] Клочкова (Klochkova V.G.) MNRAS, **272**, p.710, 1995.
- [16] Клочкова (Klochkova V.G.) Bull. SAO, **44**, 5, 1997.
- [17] Клочкова В.Г. в сб. «40 лет САО РАН», Нижний Архыз, по ред. Ю.Ю.Балеги. с.107, 2006.
- [18] Клочкова В.Г. Письма в Астрон. ж., **35**, 507, 2009.
- [19] Клочкова В.Г. Письма в Астрон. ж., **39**, 849, 2013.
- [20] Клочкова В.Г. (Klochkova V.G.) Astrophys. Bull., **69**, 279, 2014.
- [21] Клочкова и Киппер (Klochkova V., Kipper T.) Baltic Astronomy, **15**, 395, 2006.
- [22] Клочкова и Панчук (Klochkova V.G., Panchuk V.E.) Bull. SAO, **41**, 5, 1996.
- [23] Клочкова В.Г., Панчук В.Е., Астрон. ж., **89**, 128, 2012.
- [24] Клочкова В.Г., Панчук В.Е., Астрон. ж., **93**, 308, 2016.
- [25] Клочкова В.Г., Ченцов Е.Л. Астрон. ж., **81**, 333, 2004.
- [26] Клочкова В.Г., Ченцов Е.Л. Астрон. ж., **84**, 12, 2007.
- [27] Клочкова и др. (Klochkova V.G., Chentsov E.L., Panchuk V.E.) MNRAS, **292**, 19 1997.
- [28] Клочкова и др. (Klochkova V.G., Szczerba R., Panchuk V.E., Volk K.), Astron. & Astrophys., **345**, 1999.
- [29] Клочкова В.Г., Щерба Р., Панчук В.Е. Письма в Астрон. ж., **26**, 115, 2000а.
- [30] Клочкова В.Г., Щерба Р., Панчук В.Е. Письма в Астрон. ж., **26**, 510, 2000b.
- [31] Клочкова В.Г., Панчук В.Е., Таволжанская Н.С., Ковтюх В.В. Письма в Астрон. ж., **29**, 842, 2003.
- [32] Клочкова В.Г., Ченцов Е.Л., Панчук В.Е. Письма в Астрон. ж., **63**, 119, 2008.
- [33] Клочкова В.Г., Панчук В.Е., Таволжанская Н.С. Письма в Астрон. ж., **35**, 507, 2015а.
- [34] Клочкова и др. (V.G. Klochkova, E.G. Sendzikas, E.L. Chentsov). Astrophys. Bull., v.70, No.1, 89-108, 2015b
- [35] Клочкова и др. (Klochkova V.G., Chentsov E.L., Miroshnichenko A.S., Panchuk V.E., Yushkin M.V.) MNRAS, v.459, p4183-4190, 2016.
- [36] Оудмайер (Oudmaijer R.D.) A&A Suppl, **129**, 541 1998.
- [37] Оудмайер (Oudmaijer R.D., Groenewegen M.A.T., Matthews H.E., et al.) MNRAS, **280**, 1062 1996.
- [38] Панчук В.Е., Клочкова В.Г., Юшкин М.В., Найденов И.Д., Оптический журн., **76**, 42, 2009.
- [39] Редди и др. (Reddy V.E., Parthasarathy M., Gonzalez G., Bakker E.J.) Astron. & Astrophys., **328**, 331, 1997.
- [40] Хэмфрис и др. (Humphreys R.M., Davidson K., Smith N.) Astron. J., **124** 1026, 2002.
- [41] Ченцов и Саркисян (Chentsov E.L., Sarkisyan A.N.) Astrophys. Bull., **62**, 257, 2007.

Лаборатория физики звезд

Фабрика С.Н.,

заведующий ЛФЗ, д.ф.-м.н., профессор; fabrika@sao.ru

Лаборатория физики звезд (ЛФЗ) создана 12 февраля 1992 г. Это одна из трех научных лабораторий, возникших на базе отдела физики и эволюции звезд, который возглавлял первый директор обсерватории И.М. Копылов. Основные направления исследований ЛФЗ – эволюция массивных звезд, тесные двойные системы с черными дырами (ЧД) и измерения магнитных полей у звезд разных типов.



Рис. 83. Сотрудники лаборатории физики звезд (ноябрь 2016 г.). Нижний ряд, слева направо: Е.А. Барсукова, Л.В. Бычкова, О.Н. Шолухова, Ю.Н. Соловьева; верхний ряд: А.Ф. Валеев, А.С. Винокуров, С.Н. Фабрика, К.Е. Атапин, В.Д. Бычков, А.Е. Костенков.

За последние 10 лет в лаборатории были проведены успешные и результативные исследования объекта SS 433, который является единственной известной в нашей Галактике двойной системой с ЧД со сверхкритическим аккреционным диском, ультраярких рентгеновских источников. Были открыты новые LBV-звезды – массивные звезды на критических стадиях эволюции, новые и сверхновые звезды, исследовались магнитные поля звезд.

ОБНАРУЖЕНИЕ НОВЫХ ЗВЕЗД LBV

Массивные звезды играют очень важную роль во Вселенной – они поставляют металлы и тяжелые элементы, на которых основана жизнь. Когда в недрах звезд заканчивается ядерное топливо – водород, они взрываются как сверхновые и выбрасывают элементы в космос. Все химические элементы, из которых состоит Земля

и все, что нас окружает, были когда-то выброшены из массивных звезд, кроме водорода и гелия, которые образовались при рождении Вселенной. Глубже понять эволюцию массивных звезд – очень важная задача. Особенно интересны для исследований массивные звезды, находящиеся на конечном этапе эволюции, когда в их недрах заканчивается водород, и они становятся нестационарными. Такие звезды называются яркими голубыми переменными (Luminous Blue Variables, LBV).

LBV – это наиболее массивные звезды с массами 40–120 M_{\odot} . Они находятся на короткой эволюционной фазе сброса водородной оболочки перед взрывом сверхновой. Это чрезвычайно редкие объекты. Известно немногим более десятка LBV в Галактике. Теория предсказывает, что в нашей Галактике их должно быть всего несколько десятков.

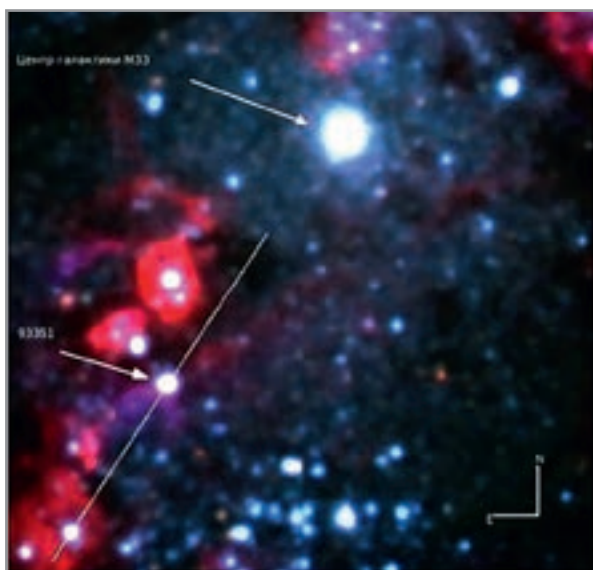


Рис. 84. Новая звезда LBV N93351. Самый яркий объект на снимке – ядро M 33 – компактное скопление звезд, в котором находится сверхмассивная черная дыра. N 93351 находится на расстоянии 400 световых лет от ядра в зоне его гравитационного влияния. Белой линией показано положение щели спектрографа при наблюдениях.

Время эволюции массивных звезд по космическим масштабам малó – несколько миллионов лет, поэтому таких звезд мало, и их надо искать специально. В нашей Галактике массивные звезды находятся в тонком диске, где большое количество газа и пыли, и еще идет процесс звездообразования. Близкие массивные LBV в Галактике уже открыты, а далекие скрыты слоем пыли.

Массивные звезды можно искать в других близких галактиках, где не мешает пыль диска Галактики. Несмотря на то, что ближайшие галактики находятся на расстояниях миллионов световых лет, эти звезды настолько ярки, что их можно изучать даже на таких расстояниях. В 50-х годах прошлого века астрофизик Э. Хаббл с коллегами обнаружил четыре звезды LBV в ближайшей галактике Туманность Андромеды (M 31) и пять в галактике Треугольник (M 33).

В ЛФЗ было найдено три новых LBV в M 31 и еще четыре – в M 33. Одна из этих звезд – N 93351 (рис. 84) находится очень близко к ядру галактики M 33. Она в 2 миллиона раз ярче Солнца, ее масса около 100 M_{\odot} , температура – 16000°. Другая звезда LBV в галактике M 33 – V532 или звезда Романо. Она сжимается и нагревается до температуры 41000°, а при расширении почти до размеров земной орбиты звезда, соответственно, охлаждается до 15000°. При этом болометрическая светимость звезды,

то есть полное энерговыделение, не меняется, потому что внутренние слои звезды, где идут термоядерные реакции, «ничего не знают» о внешних слоях, где мы видим атмосферу и фотосферу звезды. Однако в атмосфере звезды LBV даже при незначительных изменениях темпа потери вещества в ветре может существенно меняться прозрачность газа, определяемая взаимодействием вещества и излучения.

Метод поиска звезд LBV основан на свойстве, присущем только таким объектам, – когда звезда уменьшается в размере, то ее фотосфера сжимается, температура фотосферы увеличивается, непрозрачность уменьшается, блеск звезды в оптическом диапазоне падает. Когда звезда расширяется, ее температура уменьшается, непрозрачность растет, яркость звезды увеличивается. Это «игра на непрозрачности» в ветрах и фотосфере LBV определяется изменениями в интенсивности звездного ветра, истекающего с поверхности звезды. Термоядерные источники в центре звезды не могут меняться быстрее, чем за несколько десятков тысяч лет, в то время как внешний вид LBV может измениться всего за несколько лет.

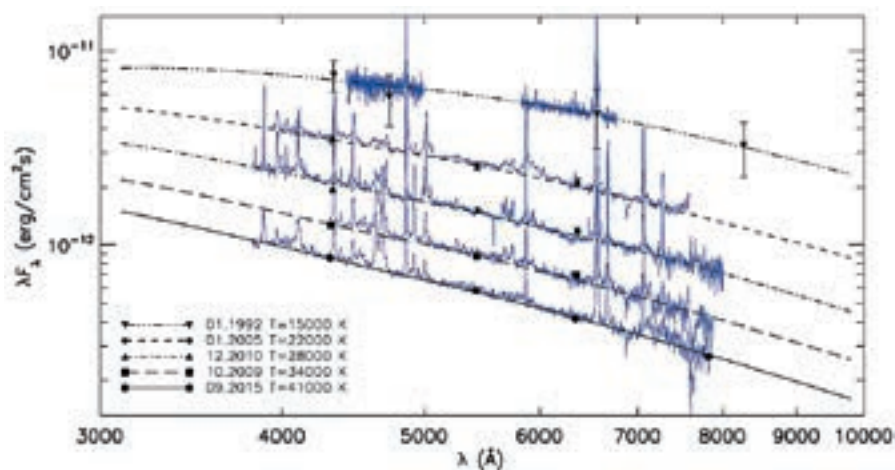


Рис. 85. LBV-звезда V532 (звезда *Rotano*). Эта переменная звезда была известна давно, но по спектрам была подтверждена как LBV в ЛФЗ. Ее спектры показаны синим цветом, соответствующая им фотометрия – черными точками. Спектры располагаются сверху вниз с 1992 по 2015 гг. Блеск звезды (вертикальная ось) ослаблялся, температура фотосферы звезды, соответственно, возрастала. После яркой фазы в 1992 г. значительно увеличилось покраснение звезды ($0.^m4$) за счет образования пыли. По мере увеличения температуры звезды (2015 г.) пыль постепенно разрушалась.

В звездах LBV должна быть заметная переменность блеска с соответствующим изменением температуры звезды. На этом свойстве были основаны открытия звезд LBV в 50-х годах прошлого века и недавно – в нашей лаборатории. Оно является самым надежным доказательством того, что это – звезда LBV, а не горячий гипергигант.

В галактиках M 31 и M 33 еще были обнаружены интересные звезды – V[e]-сверхгиганты, которые, фактически, те же LBV, но находятся в тесных двойных системах. Их отличие от LBV можно обнаружить только по инфракрасным избыткам цвета. Еще V[e]-сверхгиганты меняют свой блеск в диапазоне $0.^m2$, а

LBV-звезды – больше, чем на 1^m . Из-за тесной двойственности В[e]-сверхгигантов происходит сильное перетекание на второй компонент системы, и выбрасывается огромное количество вещества в орбитальной плоскости. У них появляются мощные пылевые дископодобные оболочки, и наблюдается сильная линейная поляризация.

Наши оптические спектры для исследования LBV-звезд были получены на телескопе БТА. Одновременно для этих же объектов Д. Бизяевым были получены инфракрасные спектры (Apache Point Observatory, США).

Изучая карты неба, полученные на инфракрасной космической обсерватории Spitzer на длине волны 24 микрона, где пыль Галактики уже прозрачна, В. Гварамадзе (ГАИШ МГУ) составил список кандидатов, которые могут быть LBV. После спектроскопии на телескопе БТА нескольких десятков звезд из этого списка была открыта новая звезда LBV в нашей Галактике, названная MN 112. Она оказалась двойником знаменитой LBV-звезды Р Лебеда, которая 400 лет назад была одной из самых ярких звезд на небе. MN 112 оказалась немного ярче и горячее, ее масса больше, а скорость ее ветра оказалась в 2 раза выше (около 400 км/с) по сравнению со звездой Р Лебеда. Было также открыто несколько уникальных звезд типа WN8-9h. Это звезды Вольф-Райе (WR), находящиеся на азотной последовательности.

Исследованием звезд LBV занимаются О. Шолухова, А. Валеев и А. Саркисян.

SS 433 И СВЕРХКРИТИЧЕСКИЕ АККРЕЦИОННЫЕ ДИСКИ

Сверхкритический режим аккреции на черные дыры (ЧД) принципиально важен для астрофизики. В первые полмиллиарда лет после рождения Вселенной в центрах молодых галактик стали появляться и расти сверхмассивные ЧД – квазары. За этот «короткий» срок они набрали огромную массу в несколько миллиардов масс Солнца, что возможно только в режиме сверхкритической аккреции. Наблюдать быстрый рост квазаров пока не удалось, так как при этом выбрасывается столько газа и пыли, что самого квазара не видно. Однако в нашей Галактике есть микрокопия молодых квазаров – SS 433. Именно поэтому так важно изучать этот уникальный объект. Падение газа на черные дыры в нашей Галактике встречается редко, всего в ней было обнаружено около 20 систем с ЧД. Это самые яркие рентгеновские источники Галактики. Эффективное выделение энергии происходит при падении газа на ЧД, при этом выделяется около 10% энергии от всем известной $E = Mc^2$. Еще реже встречается ситуация, когда газ падает на ЧД в сверхкритическом или сверх-Эддингтоновском режиме. В таком случае возникает сверхкритический аккреционный диск.

Микроквазар SS 433 – система из двух близких звезд, одна – ЧД с массой около $10 M_{\odot}$, вторая – звезда-донор (сверхгигант), которая буквально заваливает дыру своим материалом с темпом в 6×10^{15} тонн в секунду – одна масса Земли за 11 дней (рис. 86). Даже ЧД «не справляется» с таким потоком вещества – возникает сверхкритический аккреционный диск, избыточный газ раскаляется до десятков тысяч градусов и выбрасывается из диска со скоростью в несколько тысяч километров в секунду. По оси диска образуется огромная воронка из истекающего газа. Астрофизики полагают, что сверхкритические диски есть, однако прямых доказательств этого нет из-за того, что ЧД полностью закрыта газом. Фонтан газа от ЧД является единственным признаком сверхкритической аккреции.

По спектральным наблюдениям SS 433, полученным на телескопах БТА и Subaru (Гавайи), была определена температура звезды-донора (8500 ± 500 К) и его спектральный класс (A15–7). Обнаружен эффект прогрева донора – сторона, обращенная к

сверхкритическому аккреционному диску, имеет температуру 20000–25000 К. Измерено орбитальное движение этой звезды и сверхкритического диска, найдены массы компонент системы. Из-за сильнейшего эффекта прогрева звезды-донора трудно надежно определить массу ЧД в этой системе. Тем не менее, было найдено, что масса ЧД составляет примерно $10 M_{\odot}$. Эти данные были получены совместно с группой А.М. Черепашука (ГАИШ МГУ) и Y. Ueda (Япония).

Недавно нам удалось обнаружить новое свойство SS 433 – сверхширокие линии в спектре. При сверхкритической аккреции газ падает на ЧД, но дыра не принимает его весь – часть падающей материи вылетает со скоростью более 4000 км/с, но основная доля газа выбрасывается со скоростью около 1000 км/с. В ЛФЗ впервые была создана компьютерная модель ветра от сверхкритического диска, которая объясняет все основные наблюдения. Сверхкритический аккреционный диск SS 433 обладает самым мощным ветром среди всех звезд нашей Галактики.

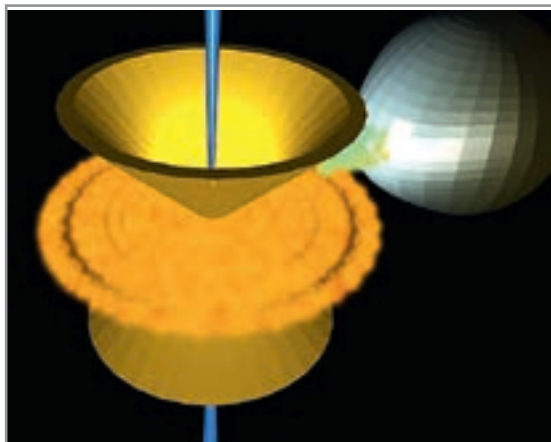


Рис. 86. Модель двойной системы SS 433. Звезда-донор поставляет газ на внешний край аккреционного диска. Во внутренних областях диск становится сверхкритическим, при этом выбрасывается избыточный газ в виде ветра со скоростью около 1000 км/с. Ветер формирует два конуса, по оси конусов вылетают релятивистские струи.

Мы исследовали рентгеновскую и оптическую переменность (кривые блеска) SS 433 по наблюдениям, полученным одновременно в рентгеновском диапазоне на обсерватории RXTE (Rossi X-ray Time Explorer) и в оптическом диапазоне на 6-метровом телескопе БТА. На основе анализа спектров мощности исследовалась стохастическая переменность блеска SS 433, которая определяется процессами, происходящими в аккреционном диске. Было найдено интересное свойство этого объекта, которое свидетельствует о сверхкритической аккреции. Стохастическая переменность в диске, которая определяется флуктуациями турбулентной вязкости, происходящими на разных масштабах, формируется в виде белого шума. На спектре мощности это выглядит как плоский спектр.

В стандартном диске (Ю. Любарский, 1997 г.) флуктуации вязкости сглаживаются за счет достаточно долгого времени прохождения вещества через диск. Точнее, на более далеких расстояниях от ЧД, где стохастические флуктуации крупные, они все передаются в центр, где возникает рентгеновское излучение. На тех же расстояниях, но с более мелкими стохастическими флуктуациями, они сглаживаются. При этом мы наблюдаем степенные спектры мощности. В сверхкритическом диске на расстоянии от ЧД дальше некоторого критического радиуса, диск «не знает», что он сверхкритический, и тоже формируется степенной спектр мощности. Подходя ближе к ЧД, на критическом

расстоянии выделяется уже столько энергии, что давление излучения превышает силу гравитационного притяжения, и диск резко расширяется. Это расстояние называется радиусом сферизации диска. Ниже радиуса сферизации возникает мощный ветер, выше – стандартный степенной спектр мощности. При этом на радиусе сферизации вся информация о флуктуациях вязкости быстро переносится к ЧД, и появляется плоский спектр мощности. Плоский спектр мощности реально наблюдается в SS 433, а также в объектах ULX, и это есть свидетельство сверхкритической аккреции. Мы нашли, что положение плоского участка в спектре мощности зависит от массы ЧД, темпа аккреции и вязкости в диске, однако его протяженность зависит только от изменения вязкости в подкритической и сверхкритической областях диска.

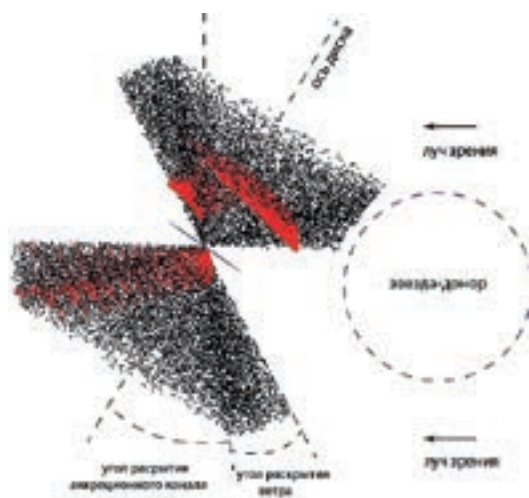


Рис. 87. Компьютерная модель SS 433. Изображена звезда-донор, тонкий диск и два ветровых канала. По оси диска распространяются релятивистские струи. Ветер сверхкритического диска изображен черными точками, красным показана фотосфера ветра, как ее видит наблюдатель.

По этим же данным было найдено, что мягкое рентгеновское излучение формируется по большей части в струях. Жесткое рентгеновское излучение формируется близко к ЧД, но оно также отражается от наружных стенок ветрового канала. Оптическое излучение – это тоже излучение стенок ветрового канала сверхкритического диска за счет переработки жесткого рентгеновского излучения. Ориентация SS 433 такова, что мы видим релятивистские струи (мягкий рентген), видим отраженное излучение от внешних стенок канала (жесткий рентген и оптика), но мы не видим дна канала. Если бы мы его видели, то объект был бы ярче в рентгеновском диапазоне примерно в 1000 раз, как в случае ULX.

Струи SS 433 вылетают из самых внутренних частей рядом с ЧД и движутся со скоростью примерно в четверть скорости света. Когда мы их начинаем видеть из-за стенок канала, они запаздывают по отношению к жесткому рентгеновскому излучению, которое тоже выходит из внутренних частей, но движется со скоростью света. По запаздыванию излучения между разными диапазонами энергии, которое составляет примерно 50 с, с помощью моделирования спектров мощности мы определили размер и раствор ветрового канала. Размер оказался 2×10^{12} см (около 30 радиусов Солнца), а полный раствор – около 100° .

По теме SS 433 в ЛФЗ работают молодые сотрудники и аспиранты, некоторые из них сейчас работают в других институтах, это – А. Медведев, К. Атапин и П. Медведев.

УЛЬТРАЯРКИЕ РЕНТГЕНОВСКИЕ ИСТОЧНИКИ КАК СВЕРХКРИТИЧЕСКИЕ АККРЕЦИОННЫЕ ДИСКИ

В 2000 г. начались исследования объектов, которые называются «ультраяркие рентгеновские источники» (ultraluminous X-ray sources, ULX). В оптическом диапазоне это – чрезвычайно слабые объекты, труднодоступные для наблюдений даже на крупнейших телескопах мира. Они были предсказаны в ЛФЗ в 2000 г. совместно с А. Мещеряковым (ИКИ РАН). Если бы мы могли увидеть SS 433 непосредственно в канал сверхкритического диска, то в рентгеновском диапазоне, он оказался бы ярче в тысячи раз. Это связано еще и с тем, что канал сверхкритического диска геометрически коллимирует излучение. В других галактиках должны быть рентгеновские источники, подобные SS 433, но наблюдаемые в пределах 30–50 градусов от оси сверхкритического диска. Эти объекты действительно были обнаружены в 2000 г. с помощью рентгеновской обсерватории Chandra, обладающей превосходным угловым разрешением.



Рис. 88. Изображение туманности, связанной с объектом ULX, в галактике Holmberg II. Его оптический двойник расположен в центре яркой части туманности, где проявляются кольцевые области, образованные за счет струй или ветров. Рядом с ULX расположено молодое скопление звезд. Снимок получен на телескопе HST и подготовлен в ЛФЗ.

Природа ULX интерпретировалась по-разному. Сейчас считается, что это – объекты со сверхкритическими аккреционными дисками, как у SS 433. Они находятся во внешних галактиках и имеют рентгеновские светимости порядка 10^{39} – 10^{41} эрг/с, что в тысячи раз больше, чем светимости ярчайших черных дыр (ЧД) нашей Галактики.

ULX могут быть сверхкритическими аккреционными дисками вокруг ЧД звездных масс ($\sim 10 M_{\odot}$) по типу SS 433 или гипотетическими ЧД промежуточных масс (intermediate mass black hole, IMBH) с массами от сотен до тысяч масс Солнца со стандартными аккреционными дисками, причем IMBH тоже должны быть в двойной системе с массивной звездой-донором, чтобы вторая звезда поставляла много вещества в ЧД для обеспечения огромных рентгеновских светимостей. Такие гипотетические объекты должны были образоваться из первых звезд (Население III) вскоре после рождения Вселенной на красных смещениях 15–25. IMBH должны оказываться в образующихся галактиках и, в конечном итоге, захватывать массивные звезды. Получается, что в любом случае объекты ULX – самые лучшие кандидаты в ЧД.

Исследование туманностей, окружающих ULX, показало, что они динамически возмущены за счет струй и мощных ветров.

На БТА мы начали исследования туманностей, которые связаны с ULX. В области ультраяркого рентгеновского источника в галактике Holmberg II был найден оптический объект, изучена структура и поле скоростей этой туманности в линии HeII. Обнаружен градиент скорости в HeII ± 50 км/с на масштабе 50–70 пк. Динамическое воздействие на среду на масштабах десятки парсек возможно только в случае струйной активности микроквара типа SS 433 или в случае мощных ветров. ИМВН со стандартным аккреционным диском не в состоянии оказать такое динамическое воздействие

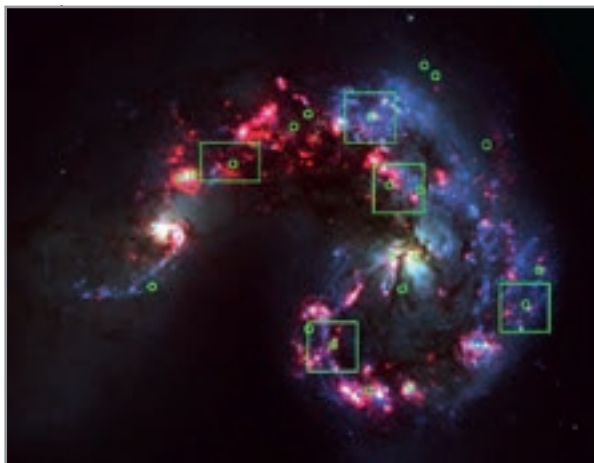


Рис. 89. Взаимодействующие галактики Антенны, в которых наблюдается много ULX. Красным цветом показано излучение в линии H-альфа, голубым – молодые массивные звезды, коричневым – пыль. 5 зеленых прямоугольников – области панорамных спектров, полученных нами на 8-м телескопе VLT. Зеленые кружки – рентгеновские источники. Изображение получено на телескопе HST и подготовлено в ЛФЗ.

В ЛФЗ совместно с Ю. Поутаненом (Финляндия) было сделано неожиданное открытие. Были проведены наблюдения на телескопе VLT (Very Large Telescope) Европейской южной обсерватории (Чили) ультраярких рентгеновских источников в галактиках Антенны на южном небе. Использовался мультизрачковый панорамный спектрограф VIMOS телескопа Melipal. Галактики Антенны сливаются, поэтому в них очень большой темп звездообразования (star-formation rate, SFR). Известно, что чем выше SFR, тем больше в галактике рентгеновских источников с массивными звездами и ULX. В Антеннах найдено 8 ULX и довольно много ярчайших рентгеновских источников. Мы обнаружили, что все ULX и ярчайшие рентгеновские источники располагаются в пределах 200 пк от очень молодых скоплений звезд, возраст которых не более 5 млн лет. Вероятность случайной ассоциации ULX со скоплениями крайне мала (0.0000001), и она еще меньше для молодых скоплений звезд. Следовательно, ULX каким-то образом связаны с самыми молодыми звездными скоплениями, которые находятся в стадии формирования. Был сделан вывод, что предшественники ULX – тесные двойные системы, масса звезд которых не менее 50–100 M_{\odot} . ULX – это ЧД звездных масс, находящиеся в режиме сверхкритической дисковой аккреции. Объекты ULX были выброшены из молодых скоплений. Выброс звезд за счет взрыва сверхновой не объясняет наблюдения ULX, так как не хватает времени на эволюцию звезд и на их транспортировку из скопления наружу. Выброс происходит в результате механизма трехкратных и более тесных сближений звезд в центрах скоплений на самых начальных этапах сжатия скоплений. Из результатов компьютерного моделирования формирующихся звездных скоплений известно, что выброс двойных систем происходит

из-за сближений звезд в центрах скоплений. На этой стадии сжатия в скоплении формируется очень плотное ядро из самых массивных звезд. Из скоплений выбрасываются тесные двойные звезды, дальше они летят в пространстве, эволюционируют, одна из звезд взрывается как сверхновая, и в системе появляется ЧД. Так возникает ULX. Предшественники ULX – это наиболее массивные тесные двойные системы. Черную дыру типа IMBH невозможно выбросить из скопления, и если она попала туда, то такой массивный объект будет оставаться в центре скопления. Подтверждаются современные идеи о формировании молодых скоплений звезд. Действительно, самые массивные звезды (LBV, В[е]-сверхгиганты, ULX) выбрасываются из скоплений, при этом до половины или более массивных звезд должны вылетать из центров скоплений. Этот же механизм объясняет хорошо известную проблему массивных «звезд-бегунов». Для нашей Галактики доказать это очень трудно, так как мы сами находимся в ней. Мы не знаем точные расстояния между звездами-бегунами и скоплениями.



Рис. 90. Области в галактиках Антенны, которые отмечены на рис. 89. Молодые скопления звезд располагаются рядом с ULX (зеленые кружки), черточками показаны направления на скопления. Объекты ULX выброшены из скоплений. Голубым фоном показаны массивные звезды, их скопления уже распались.

В Антеннах все хорошо видно, что ULX всегда находится рядом со скоплением, состоящим из голубых звезд. Мы также провели наблюдения (спектрограф MOS телескопа VLT) 9 ULX во взаимодействующих галактиках NGC 3256 на южном небе и еще 6 ULX на телескопе БТА (SCORPIO) во взаимодействующих галактиках NGC 4485/4490 на северном небе. Во всех этих галактиках ULX оказались рядом с молодыми скоплениями.

С помощью оптической спектроскопии удалось найти новое свидетельство того, что объекты ULX – сверхкритические аккреционные диски по типу SS 433. Мы обработали архивные спектры ближайших ULX – четыре объекта, полученные на телескопе Subaru (Гавайи), два объекта на телескопе БТА и три объекта на телескопе VLT (южное небо). Это все ULX, спектры которых были получены в мире (на рис. 91 показано 7 спектров из них). Получить спектры таких объектов непросто, так как в оптическом диапазоне они очень слабые – от 21^м до 24^м и слабее. Такие наблюдения возможны только на самых крупных оптических телескопах.

Оказалось, что все 9 объектов обладают уникальным спектром звезд редкого типа WNLh. Отметим, что такой же спектр наблюдается у звезд LBV, когда они находятся в горячей фазе, а также наблюдается у SS 433 – единственного в Галактике объекта со сверхкритическим аккреционным диском. У SS 433 и звезд LBV наблюдаются очень

горячие и плотные ветра. Поскольку все известные объекты ULX обладают одним и тем же редким типом спектра, можно заключить, что они относятся к одному классу.

Удалось выяснить, что оптические спектры не могут быть сформированы на звезде-доноре, хотя спектры ULX весьма похожи на звезды Вольфа-Райе типа WNLh. Такие звезды не могут заполнять полость Роша, следовательно, количество газа, поступающего на ЧД незначительно, и этот газ не может обеспечить требуемую рентгеновскую светимость ULX. Также они не могут быть IMBH с прогретыми дисками – у таких объектов оптический спектр другого типа – более горячий газ, например, линия HeII 4686Å широкая, она формируется ближе к IMBH, а более холодный газ, например, линии водорода, узкие, они формируются дальше от IMBH. В спектрах ULX ситуация обратная – линия HeII 4686Å узкая, а линии водорода широкие. Это происходит во всех горячих сверхгигантах и в SS 433. Следовательно, мы видим горячий и плотный ветер. Ветер в плотных атмосферах ускоряется постепенно и, когда он набирает максимальную скорость, газ ветра уже охлаждается достаточно, чтобы появились линии водорода. Можно считать, что мы объяснили природу ULX – это сверхкритические аккреционные диски в двойных системах с ЧД звездных масс.

Ультраяркие рентгеновские источники в ЛФЗ изучались П. Аболмасовым, А. Винокуровым, А. Валеевым.

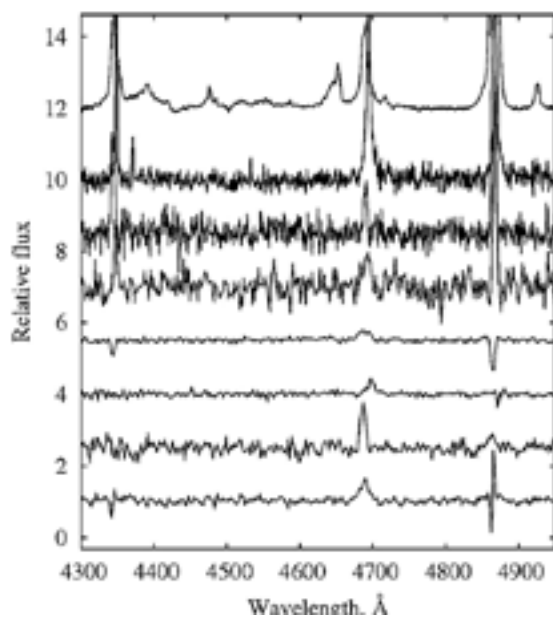


Рис. 91. Сверху вниз показаны спектры SS 433, NGC 5408 X-1 (VLT), NGC 4395 X-1 (BTA), NGC 1313 X-2 (VLT), NGC 5204 X-1, NGC 4559 X-7, Holmberg IX X-1, Holmberg II X-1 (Subaru). Все спектры обладают одной и той же особенностью – широкие эмиссии у линий HeII и водорода. Узкие абсорбционные линии появляются в результате перевычитания линий окружающей туманности (см. рис. 88).

ЦЕНТРАЛЬНЫЕ ОБЪЕКТЫ В МОЛОДЫХ СКОПЛЕНИЯХ

Недавно в ЛФЗ мы поставили задачу по исследованию молодых скоплений звезд в ближайших галактиках. Когда формируется новое скопление, наиболее массивные звезды опускаются в центр, при этом в первые один-два миллиона лет происходит выброс звезд, но в центре остается самая массивная звезда. Такая звезда называется very massive star (VMS). Она образуется в процессе динамического слияния звезд. Звезда с массой от нескольких сотен до тысячи масс Солнца эволюционирует за один-два

миллиона лет, далее она должна превратиться в ИМВН, и следующие один-два миллиона лет такая дыра может находиться в режиме сверхкритической аккреции. VMS – одни из самых ярких объектов в галактиках. По результатам исследований молодых звездных скоплений у нас возникло предположение, что такие объекты существуют, и мы начали программу наблюдений на БТА.

За 2 года наблюдений нам пока не удалось надежно доказать, что объекты типа VMS или ИМВН существуют. Тем не менее, мы уже выделили около трех десятков кандидатов. Среди них было найдено несколько новых LBV звезд в молодых скоплениях в близких галактиках (на расстояниях менее 10 Мпк). Некоторые объекты оказались весьма подозрительными, они похожи на звезды типа VMS или ИМВН, их светимости около $10^8 L_{\odot}$ (рис. 92). При таких светимостях звезда VMS может иметь массу порядка $1000 M_{\odot}$. Как выяснилось, это еще и переменные объекты, по спектроскопии мы видим профили типа Р Лебеда. Однако необходимы более детальные исследования. Все эти объекты слабые, поэтому нужна спектроскопия при очень хороших изображениях.

Объекты в молодых скоплениях исследуются Ю. Соловьевой и А. Винокуровым.

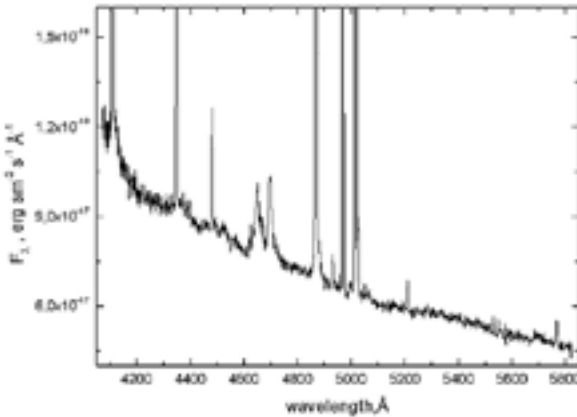


Рис. 92. Спектр ядра молодого скопления звезд в галактике M 74. Видны широкие линии водорода, HeII, HeI, множество линий NIII, [FeIII], [NII]. Узкие линии водорода, [OIII] 4959, 5007 Å, а также другие линии высокой ионизации являются линиями окружающей горячей туманности. Светимость объекта составляет $10^8 L_{\odot}$.

ПЕКУЛЯРНЫЕ КРАСНЫЕ НОВЫЕ

Пекулярные красные новые звезды – это редчайший класс объектов, которые были выделены как новый тип звезд всего пятнадцать лет назад. Звезды V838 Mon (Новая Единорога 2002 г.) и V4332 Sgr (Новая Стрельца 1994 г.) находятся в нашей Галактике и принадлежат этому классу. Пекулярные красные новые быстро увеличивают свою светимость – это массивные звезды, которые по какой-то причине стали быстро расширяться и охлаждаться. Чаще всего, пекулярные красные новые – это результат слияния звезд в тесных двойных системах. Они проявляют они себя во вспышке, как холодные сверхгиганты кислородного типа.

Во время вспышки V838 Mon был зарегистрирован спектр холодного красного сверхгиганта. Вспышка произошла в 2002 г. и сопровождалась световым эхом в плотной межзвездной среде. Скорость распространения границы светового эха для земного наблюдателя превышала скорость света, при этом скорость эха постепенно уменьшалась, приближаясь к скорости света. Видимое сверхсветовое расширение эха от вспышки объясняется окружающей межзвездной средой – свет вспышки отражает новые и новые слои пылевой материи (рис. 93).

Было установлено, что V838 Mon является двойной системой с нормальным химическим составом компонентов. В пике вспышки эта звезда была одной из самых ярких звезд в нашей Галактике, а после вспышки она на короткое время стала единственным в своем роде «коричневым» сверхгигантом класса L с температурой 1200 К. Радиус расширяющейся оболочки превосходит 440 радиусов Солнца. По архивным фотографиям обнаружилось, что до вспышки V838 Mon была широкой парой молодых и горячих массивных звезд спектрального класса В3V. Были получены оценки межзвездного поглощения и найдено расстояние до объекта 6.1 кпк.

Самой распространенной гипотезой о природе пекулярных красных новых является слияние двух звезд. В тесной двойной системе в процессе сближения компонентов возникает общая оболочка, они сливаются, и система проявляет себя как холодный красный сверхгигант.

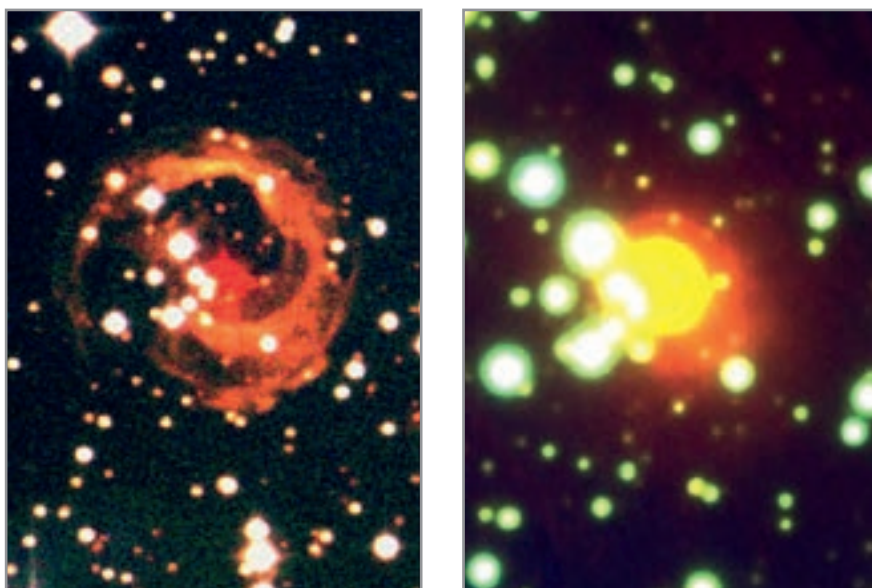


Рис. 93. Световое эхо красной новой V838 Mon, снимок получен в декабре 2003 г. на телескопе Цейсс-1000 в фильтрах В, V и R (слева); снимок эха V838 Mon, полученный на телескопе БТА в фильтрах V, R и I в декабре 2015 г., в увеличенном масштабе (справа). Здесь эхо обнаружено только в фильтре I и выделено красным цветом. Пылевая туманность (красный цвет) отражает свет холодного М-сверхгиганта – остатка взрыва пекулярной красной новой, который увеличивает свою светимость с 2005 г.

В случае V838 Mon один горячий компонент исчез сразу после вспышки, т.е. исчез его вклад в распределении энергии в оптическом диапазоне, затем он превратился в холодный сверхгигант класса М и, расширяясь, через 6 лет после вспышки поглотил второй горячий компонент. Сама V838 Mon, хоть и считается прототипом красных новых, является уникальной двойной системой. Ее взорвавшийся компонент был молодой звездой главной последовательности нулевого возраста. Система связана со

скоплением горячих В-звезд и погружена в пылевую туманность. Третий компонент в этой системе не наблюдался.

В нашей Галактике открыты три такие звезды, одна из которых V4332 Sgr. В этой системе горячий компонент также исчез после вспышки. Однако в ней наблюдался еще и холодный М-гигант, который был до вспышки. Остатком взрыва в системе V4332 Sgr является холодное облако разреженного газа, которое излучает в атомных и молекулярных линиях.

В 2015 г. были открыты две пекулярные красные новые, одна – в галактике Туманность Андромеды, вторая – в более далекой галактике M 101. Первый объект обнаружен российскими астрофизиками (МАСТЕР, Кисловодск), причем идентификация его как звезды такого класса сделана по спектроскопии на БТА. Спектры типичны для красной новой. Вторым объектом в M 101 также интенсивно наблюдался в САО РАН и ГАИШ МГУ. На БТА получен спектр, по которому объект надежно идентифицирован как красная новая. После окончания вспышек в оптическом диапазоне оба объекта были обнаружены в далеком ИК диапазоне в стадии L-сверхгиганта.

ТРАНЗИЕНТНЫЕ ИСТОЧНИКИ, НОВЫЕ ЗВЕЗДЫ И СВЕРХНОВЫЕ

Рентгеновский транзиентный источник CI Cam открыт в 1998 г. Его первые спектры были получены на БТА. С тех пор его исследования продолжаются. Впервые было обнаружено орбитальное движение компактного компонента рентгеновского транзиента, определен орбитальный период (19.^d41), эксцентриситет (0.62), оценены массы звезд системы. Компактный компонент системы с большой вероятностью является белым карликом. Второй более массивный компонент системы оказался звездой типа В[e].

В ЛФЗ исследуются новые звезды. Например, в галактике Туманность Андромеды (M 31) на телескопе БТА были получены и классифицированы спектры 47 новых звезд. Новые звезды – это белые карлики в тесных двойных системах. В белых карликах не идут ядерные реакции. Размер белого карлика примерно равен размерам Земли, но масса почти такая же, как у Солнца. Однако, если белый карлик входит в тесную двойную систему, а звезда-соседка (донор) заполняет свою критическую полость Роша, то на поверхность белого карлика выпадает газ – в основном водород. Ударяясь о поверхность белого карлика, водород разогревается до огромных температур. Когда водорода набирается достаточно, то происходит термоядерный взрыв. Новые звезды внезапно увеличивают свою яркость в тысячи раз. При взрыве выбрасывается газ со скоростью в несколько тысяч километров в секунду. После вспышки их блеск быстро ослабевает в течение нескольких дней или нескольких десятков дней. Такие белые карлики (новые звезды) могут оказаться впоследствии сверхновыми типа Ia.

Как для нашей Галактики, так и для галактики M 31 количество новых звезд примерно одинаковое, но пыль в балдже Галактики не позволяет нам видеть новые звезды, что не влияет на обнаружение новых M 31, где мы видим всю галактику. Поэтому в нашей Галактике новые наблюдаются намного реже, зато их можно наблюдать более продолжительное время.

Через несколько десятков–сотен дней новая звезда может проявить себя в виде сверхмягкого рентгеновского источника (Super Soft X-ray Source). Это тлеющий рентгеновский источник, его можно считать природным открытым термоядерным реактором. Водород продолжает поступать на поверхность белого карлика, хотя уже в значительно меньших количествах, поддерживая термоядерное горение.

В нашей Галактике новая V1494 Aql прошла стадию SSS в период между 218 и 516 днями после максимума видимого блеска. В спектре этой новой, полученном на БТА в июне 2013 г., обнаружена пространственно разрешенная структура около эмиссионной линии водорода H α . Такая структура образована оболочкой, выброшенной при вспышке 13.5 лет назад и расширяющейся со скоростью 1300 км/с. Размер оболочки оказался равным 0.12 световых лет. Зная скорость оболочки и время, прошедшее после вспышки, удалось определить точное расстояние до V1494 Aql – 1.2 ± 0.2 кпк.

V1494 Aql является затменной системой. Уточнен ее орбитальный период ($3^h 13^m$), продолжительность затмения составляет около 40 минут, глубина затмения – 2^m . Удивительно, что при таких глубоких затмениях в видимом диапазоне в мягком рентгеновском диапазоне (телескоп Chandra) отсутствуют даже следы затмений. Это возможно в том случае, когда источник рентгеновского излучения не виден напрямую, а регистрируется его излучение, рассеянное в оболочке, которая расположена на большом расстоянии от него.

По спектрам, полученным на телескопе БТА, был зарегистрирован момент появления термоядерного источника на поверхности белого карлика у известной классической новой V2468 Лебедя. Через несколько лет после вспышки ее спектр показал наличие ионов железа (до девятой стадии ионизации), а также кальция, аргона и кислорода при очень высокой ионизации.

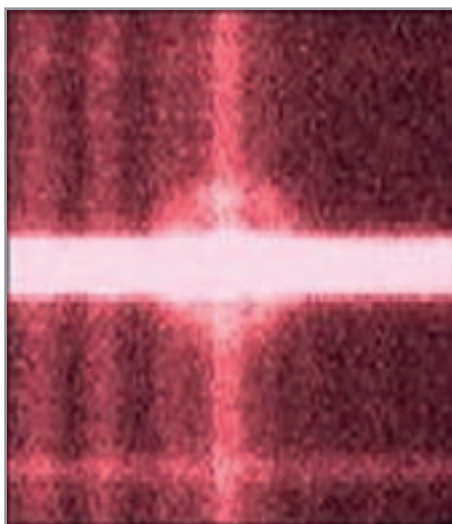


Рис. 94. 2D-спектр новой V1494 Aql через 13.5 лет после вспышки. Кружок вокруг V1494 Aql – расширяющаяся оболочка новой. По горизонтальной оси – лучевая скорость, оболочка расширяется со скоростью около 1300 км/с, по вертикальной оси – секунды дуги или световые годы. Полный размер оболочки через 13.5 лет после взрыва составляет 0.12 светового года.

По спектрам была измерена температура на поверхности белого карлика, которая поднялась со ста тысяч до полумиллиона градусов, в это же самое время звезда стала SSS-источником. У V2468 Лебедя удалось измерить не только температуру термоядерного котла и детально изучить его спектр, был найден даже период вращения объекта – 3.5 часа. С этим периодом белый карлик меняет свой блеск. Некоторые SSS могут находиться в стадии открытого термоядерного горения десятилетиями, например, новая V723 Кассиопеи, которая вспыхнула в 1995 г.

Особый интерес для нас представляют сверхновые звезды, причем не обычные, а так называемые импосторы сверхновых (SN-impostor или «обманщик»). Такие объекты встречаются редко, но с появлением обзоров всего неба, когда количество

обнаруженных сверхновых звезд резко увеличилось, в последние годы найдено уже несколько импосторов сверхновых. Например, сверхновая SN 2009ip вспыхивала несколько раз, пока не произошла действительная вспышка сверхновой. Перед настоящей вспышкой звезда увеличила свой блеск в несколько раз, потом он ослаб, потом менее чем через месяц последовал взрыв. Оказалось, что это – не импосторы сверхновых, а звезды LBV. Они могут увеличивать свой блеск до сотни раз, при этом они выживают, несмотря на катастрофическое увеличение яркости. Такое явление у LBV-звезд называют гигантским взрывом (giant eruption). Так вели себя известные LBV в нашей Галактике. В начале 19 века гигантский взрыв произвела известная звезда Eta Car, еще раньше, в 17 веке люди наблюдали резкое увеличение блеска знаменитой звезды P Cug.

Совместно с группой А. Пасторелло (Италия) исследовался объект LSQ13zm, который был открыт 13 апреля 2013 г. на подъеме блеска. Абсолютная звездная величина в максимуме вспышки составила $-18^m.46$, максимальная скорость выброса, выявленная по спектру БТА/SCORPIO, – 20000 км/с, что подтверждает вывод о том, что это был взрыв сверхновой. По архивным данным обнаружена менее мощная вспышка этой звезды за 3 недели до главного взрыва. На самом деле мы не знаем насколько она поярчала как импостор до вспышки сверхновой, до открытия она была слабее 21^m . Спектры этой звезды на стадии импостора не были получены. Абсолютная звездная величина $-14^m.87$ в первой вспышке сравнима со значениями для гигантских вспышек LBV. Это позволяет отнести транзиент LSQ13zm к новому подклассу оптических транзиентов промежуточной светимости, которые вскоре после вспышки как импосторы, взрывались окончательно как сверхновые. Пока известно только 5 таких транзиентов. Такая же картина наблюдалась в галактике NGC 2770, где после вспышки звезды LBV как импостора, менее чем через месяц произошла реальная вспышка сверхновой SN 2015bh. Были получены детальные спектры этого объекта во время вспышки LBV, в максимуме блеска сверхновой и после максимума.

Красные пекулярные новые и транзиентные источники в ЛФЗ исследуются Е. Барсуковой, А. Валеевым и В. Горанским (ГАИШ/МГУ).

МАГНЕТИЗМ ЗВЕЗД

В ЛФЗ создан наиболее полный каталог среднеквадратичных величин магнитных полей звезд. На основании каталога впервые найдена надежная количественная связь между величиной магнитного поля и типом химической пекулярности атмосфер звезд. Получены аналитические зависимости, описывающие частоту встречаемости звезд с определенной напряженностью магнитного поля для каждого типа пекулярности. Также создан каталог средних магнитных полей (магнитные кривые) в зависимости от фазы периода вращения. Это самые цитируемые каталоги магнитных полей, общее количество цитирования – более 150.

Была детально изучена самая медленно вращающаяся магнитная звезда γ Equ.. Самые первые ее наблюдения начались 67 лет назад, что совпадает с началом эры измерений магнитных полей звезд. Период вращения звезды оказался равным 97 ± 3 годам. Для его оценки использовалась экстраполяция, однако весьма надежная, поскольку магнитная кривая звезды очень хорошо описывается синусоидой. Магнитное поле этой звезды прошло максимум (около +500 Гс) и минимум (около –1000 Гс). Фактически, звезду можно назвать остановившейся. Мы полагаем, что такой большой период вращения γ Equ является результатом торможения (потери углового момента)

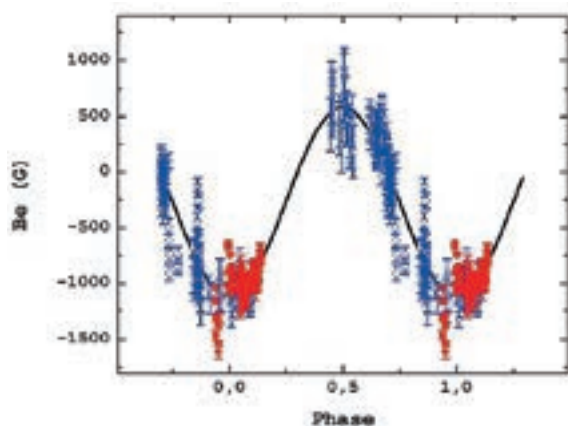


Рис. 95. Изменение магнитного поля с фазой вращения самой медленно вращающейся звезды γ Eri. Ее наблюдения начались почти 70 лет назад (синий цвет) и продолжены в ЛФЗ (красный цвет).

вследствие работы «пропеллерного» механизма. Возможно, что на ранних этапах формирования звезды ее магнитное поле очень эффективно взаимодействовало с окружающим газом. Вероятно, что это – самый яркий пример магнитного торможения посредством пропеллерного механизма среди химически пекулярных магнитных Ар-звезд, который известен на настоящее время.

Составление каталогов магнитных полей звезд и исследования звезды γ Eri проведены В. Бычковым и Л. Бычковой совместно в J. Madej (Варшавский университет).

Впервые с беспрецедентной точностью проведено прямое измерение крупномасштабного магнитного поля на звездах типа Т Тельца. Эти молодые звезды имеют аккреционные диски и выбрасывают струи газа. В современных моделях для ускорения струй требуется наличие крупномасштабных магнитных полей на поверхности звезды величиной не менее 1 кГс. На самой Т Тельца (прототипе таких звезд) продольное магнитное поле оказалось равным 150 ± 40 Гс. Известно, что поверхностное (мелкомасштабное) магнитное поле этой звезды составляет 2400 Гс, однако для работы магнитогидродинамических механизмов требуются крупномасштабные поля. Был сделан вывод, что магнитные поля звезд типа Т Тельца имеют существенно недипольный характер и не играют заметной роли в формировании струй. Для ускорения и коллимации струй необходимо привлекать магнитные поля аккреционных дисков.

Были получены верхние пределы на магнитные поля звезды FU Ori – прототип звезд, называемых фуорами, которые по своему типу близки к звездам Т Тельца. Они могут испытывать вспышки огромной яркости до 6^m , а потом оставаться примерно в таком же состоянии десятки лет. Фуоры могут очень медленно увеличивать свою яркость, а затем уменьшать. По линиям поглощения, формирующимся в аккреционном диске, был получен верхний предел на величину их магнитного поля, который составляет от 50 до 100 Гс.

Работа по молодым звездам (Т Тельца, FU Ориона) была выполнена совместно с С.А. Ламзиным (ГАИШ МГУ).

ДРУГИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

На телескопе БТА была открыта первая мирида (звезда типа Миры Кита) в галактике Треугольник (M 33). Мириды – долгопериодические переменные звезды,

находящиеся на конечной стадии эволюции. Они меняют свой блеск в сотни раз, за сотни дней расширяясь и сжимаясь со скоростью десятки километров в секунду. Мириды демонстрируют большую амплитуду переменности – до 11^m в полосе R. На основе сведений о большой амплитуде переменности и высоком показателе цвета $R-I=4^m$ мы заподозрили, что звезда в галактике M 33, которая раньше считалась новой, является миридой. Для уточнения ее типа мы получили спектр этой звезды, построили кривую блеска. Период изменений блеска в фильтре R оказался равным 665 дням. Величину минимума не удалось выделить из-за слабого блеска звезды, и амплитуду переменности была оценена больше, чем 7^m . Спектр оказался типичным для мириды класса M2–M3 Ib, в максимуме блеска наблюдались узкие эмиссии водорода. Таким образом, мы подтвердили исследуемую в M 33 звезду, как мириду большой светимости с экстремальной амплитудой переменности. Еще одно необычное свойство этой звезды – она вылетает из галактики M 33 со скоростью 175 км/с.

Совместно с А.И. Копыловым и Н.А. Тихоновым была открыта новая близкая галактика, которая принадлежит Местной группе галактик. Местная группа состоит из двух массивных спиральных галактик – нашей Галактики, видимой как Млечный Путь, и галактики Андромеды. В состав группы входит еще около 50 галактик меньшего размера и массы. Размеры Местной группы около одного мегапарсека. Это небольшое расстояние по масштабам Вселенной, поэтому входящие в Местную группу галактики изучены подробно. Поиском новых галактик в Местной группе занимается много астрофизиков. На основе обзоров неба был сделан вывод, что в Местной группе уже открыты все яркие галактики, и открытие новой галактики возможно только среди очень слабых, маломассивных карликовых галактик. Однако случилось почти невероятное – в Местной группе была открыта новая яркая галактика VV 124 (UGC 4879). Масса только самой центральной части VV 124 составляет $10^8 M_{\odot}$. Эта иррегулярная галактика изучалась и раньше, но из-за ряда случайных ошибок считалось, что она расположена далеко, и расстояние до нее оценивалось в 10 Мпк.

По данным обзора SDSS (Sloan Digital Sky Survey) было заподозрено, что галактика на самом деле очень близкая. В центре галактики видна россыпь голубых звезд, это молодые массивные звезды сверхгиганты – результат недавнего звездообразования. Исходя из этого, опытный астрофизик А.И. Копылов предположил, что галактика существенно ближе, чем считалось. Специальное исследование подтвердило, что VV 124 действительно находится на самом краю Местной группы. Галактика «падает» на Местную группу со скоростью около 12 км/с. Для такой маленькой скорости расстояние должно быть небольшим. VV 124 никогда не находилась внутри Местной группы и не взаимодействовала с другими галактиками группы – ее свойства не искажены такими взаимодействиями, что дает нам пример «чистой» эволюции.

Астрофизика высокого временного разрешения

Бескин Г.М.,

руководитель ГРА, ведущий научный сотрудник, д.ф.-м.н.; beskin@sao.ru

Карпов С.В.,

старший научный сотрудник ГРА, к.ф.-м.н.; karpov.sv@dmil.com

Плохотниченко В.Л.,

старший научный сотрудник ГРА, к.ф.-м.н.; pvl@sao.ru

ИДЕИ И ЗАДАЧИ ЭКСПЕРИМЕНТА МАНИЯ

В начале 70-х годов в астрономии родилось новое направление исследований. Г. Бонди в своей статье «Астрономия будущего» обратил внимание научной общественности на практически неизученную область – быстрые вариации оптического излучения астрофизических объектов, известной и не известной локализации – и назвал ее «Short-constant astronomy», астрономией коротких времен. Практически в это же время В. Шварцман в статье в Астрономическом журнале сформулировал критический тест для обнаружения черных дыр (ЧД) звездной массы – переменность излучения аккрецирующей на ЧД плазмы с характерными временами $\tau_v \sim r_g/c \sim 10^{-5}c$, где r_g – гравитационный радиус. Он определил широкий круг задач по исследованию релятивистских и быстропеременных объектов разных типов с высоким временным разрешением. В 1972 г. в САО начался эксперимент МАНИЯ (Многоканальный Анализ Наносекундных Изменений Яркости). Со времени своего возникновения астрономия высокого временного разрешения из направления, о будущем которого было очень трудно судить, превратилась в обширную область науки со своими специфическими инструментами и детекторами, обеспечивающими однофотонную регистрацию, методами накопления и анализа данных, учитывающими гигантские объемы последних, и, конечно, с нестандартными физическими задачами. Речь идет об изучении экстремальных состояний, не реализуемых в земных условиях, для которых характерны предельные напряженности магнитного ($H \sim 10^5 - 10^{13} \text{Гс}$) и гравитационного ($\phi/c^2 \rightarrow 1$) полей, высокие температуры ($10^7 - 10^{12} \text{К}$), скорости ($\gamma \sim 1 - 10^7$) и плотности вещества (вплоть до 10^{16}г/см^3). Астрономические объекты, где такого рода условия реализуются, относятся к релятивистским объектам (иногда их называют «компактными», подчеркивая и минимальность их размеров в астрономии) – черным дырам (ЧД) и нейтронным звездам (НЗ). Феноменологически они проявляются как пульсары, аккрецирующие и выбрасывающие вещество, рентгеновские источники разных типов в тесных двойных системах, гамма-всплески. Отметим для полноты картины, что ЧД, как конфигурации, ограниченные горизонтом событий (ГС), в некотором смысле еще не открыты. На данный момент нет однозначных свидетельств обнаружения проявлений ГС. И в ядрах активных галактик, и в тесных двойных рентгеновских системах, где присутствие ЧД является практически общепризнанным, регистрируются фотоны разных энергий, рождающиеся, однако, весьма далеко от горизонта событий – на расстояниях $(10 - 100) \times r_g$, окрестности же его самого экранируются аккрецирующим веществом. В то же время нестационарные процессы, связанные с «обычными» переменными звездами, могут быть релятивистскими. Так, есть основания полагать, что

вспышки красных карликов связаны с потоками релятивистских электронов ($\gamma \sim 10^3$). Общим свойством экстремальных состояний, процессов, объектов в астрофизике является взаимная трансформация различных видов энергии полей и частиц – магнитной, электрической, кинетической (поступательной и вращательной). В силу высокой степени компактности объемов, где происходят эти преобразования, высоких скоростей движения вещества, характерные временные шкалы могут достигать весьма малых величин, вплоть до 10^{-5} – 10^{-6} с. Поскольку в конечном итоге именно излучение этих объектов изучается в экспериментах, то вариации его интенсивности должны исследоваться с предельно высоким временным разрешением. При этом, разумеется, должен определяться максимальный набор параметров фотонов, их спектральные и поляризационные характеристики. Необходимо подчеркнуть, что, несмотря на почти 50-летнюю историю изучения упомянутых явлений и объектов, понимание их природы и физических особенностей весьма далеко от полноты и однозначности. Отчасти эта ситуация обусловлена разрывом между глубиной и многообразием теоретических построений в астрофизике, многие из которых не доведены до формулировки *experimentum crucis*, и ограниченностью возможностей существующих наблюдательных систем и методов высокого временного разрешения. В частности, весьма скудна статистика вспышек звезд типа UV Cet, зарегистрированных с временным разрешением лучше 10 с. В силу этого пока нет возможности определиться с ролью нетепловых процессов в оптическом диапазоне, процессами ускорения электронов и протонов, механизмами «запуска» вспышечных явлений. До сих пор не утихли дискуссии о характере аккреции в различного типа рентгеновских двойных системах, соотношении тепловых и нетепловых процессов при генерации излучения в разных диапазонах. Результаты многочастотных исследований пульсара в Крабовидной туманности (имеющего блеск около 15^m) до сих пор не позволили определить основные особенности его природы – области и способы генерации фотонов разных энергий и связь между их характеристиками, параметры (плотность, скорость движения) плазмы в магнитосфере и механизмы ее ускорения. Более того, некоторые недавние теоретические и экспериментальные результаты (обнаружение пульсирующего излучения с энергией выше 100 ГэВ) свидетельствуют о необходимости кардинального пересмотра сложившихся модельных представлений об этом объекте.

Особое место в астрофизике высокого временного разрешения занимает проблема тестирования теорий гравитации в сильных гравитационных полях. Есть основания полагать, что лишь обнаружение горизонта событий (или доказательство его отсутствия) у релятивистских объектов с массой, превышающей предел ОТО для нейтронных звезд, и исследование свойств пространства-времени вблизи него позволит сделать выбор из «выживших» при проверке в слабых полях теорий гравитации. В. Шварцман показал, что роль такого полигона могут играть одиночные ЧД (массивные нейтронные звезды Бранса-Дикке?), поскольку при аккреции межзвездного газа из-за ее низкого темпа горизонт событий (или поверхность нейтронной звезды) не экранируется. Собственно, обнаружение стохастической оптической переменности на временах 10^{-6} – 10^{-2} с у объектов-кандидатов в ЧД и является целью эксперимента МАНИЯ.

Наконец, переходя к гамма-всплескам, чья релятивистская природа не вызывает сомнений, укажем, что с большой вероятностью лишь обнаружение и исследование с высоким временным разрешением синхронных с гамма-эмиссией оптических вспышек может позволить построить детальную модель «центральной машины» и (будем надеяться!) обнаружить признаки горизонта событий. Прямым подтверждением этих надежд явилось обнаружение нами оптической вспышки GRB 080319B, самого яркого

из наблюдавшихся всплесков (известного в англоязычной литературе как Naked Eye Burst), которое сразу привело к пересмотру многих сложившихся представлений о природе гамма-всплесков. Подчеркнем, что в настоящее время лишь в оптическом диапазоне можно измерять поляризацию излучения всплеска – критическую характеристику для выбора механизмов его генерации.

Судя по всему, начатый В. Шварцманом эксперимент МАНИЯ действительно открыл упоминавшееся Г. Бонди направление в астрономии, которое сейчас получило название астрофизики высокого временного разрешения. Не вызывает сомнений, что эти исследования будут активно развиваться. Они запланированы, в том числе, в будущих программах наблюдений на 39-м оптическом телескопе E-ELT.

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ

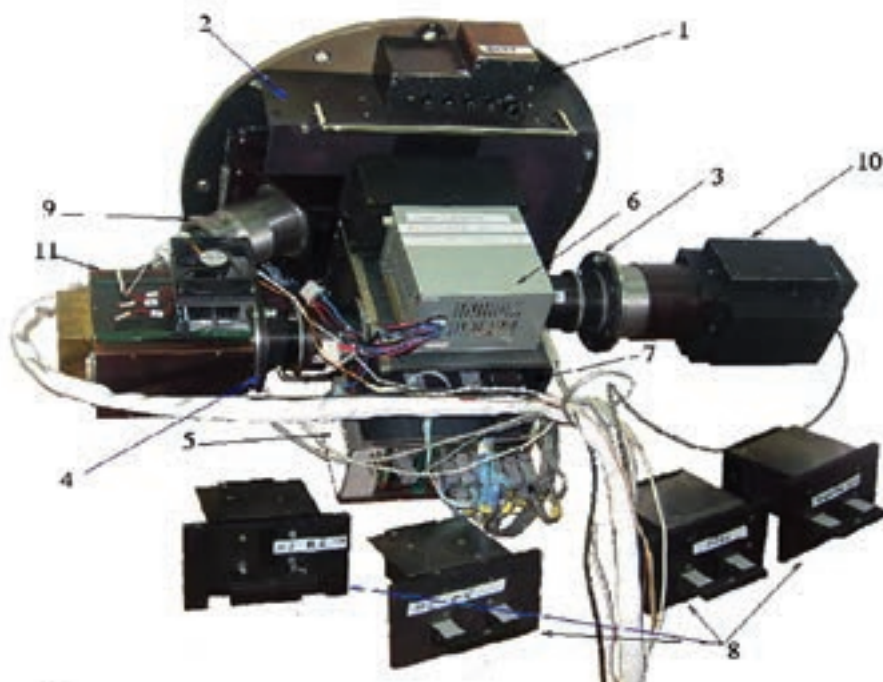


Рис. 96. Двухканальный многомодовый панорамный спектрофотополариметр: 1 – фланец ПФ БТА, 2 – платформа с зеркальным целевым узлом и перископом, 3, 4 – фланцы КЧД, 5 – блок управления, 6 – источник питания, 7 – бокс для сменных блоков, 8 – сменные блоки, 9 – объектив камеры подсмотра, 10, 11 – «синий» и «красный» КЧД.

С самого начала в рамках наших исследований использовались приемники излучения, основанные на счете отдельных фотонов. Только они позволяют исследовать переменность на шкале короче миллисекунд. На начальных этапах эксперимента МАНИЯ наблюдения проводились со стандартными фотометрами на базе фотоэлектронных умножителей. Однако, будучи принципиально одноканальными детекторами, т.е. регистрируя все кванты, попадавшие в диафрагму, которая в несколько

раз превосходила размер объекта, они позволяли исследовать лишь достаточно яркие (ярче 17^m – 18^m) источники даже на 6-м телескопе. Необходимость изучения предельно слабых оптических объектов (так, к примеру, все оптические пульсары, кроме Краба, слабее 22^m) потребовала перехода к панорамным приемникам, которые регистрируют координаты отдельных квантов с высоким временным разрешением, недостижимым для приемников на основе приборов с зарядовой связью.

Сейчас в наблюдениях на БТА используется фотоспектрополяриметр со сменными блоками, реализующими различные режимы наблюдений – многополосную фотополариметрию, спектрополяриметрию низкого спектрального разрешения, многополосную фотометрию. Во всех модах излучение регистрируется параллельно двумя панорамными КЧД с различными фотокатодами, стандартным мультищелочным типа S20 и арсенид-галлиевым – ориентированными на синий и красный диапазоны спектра (рис. 96), соответственно.

Для регистрации данных в приборах эксперимента МАНИЯ используется преобразователь «время–код» Квантохрон 4-48, позволяющий измерять координаты прихода, а также моменты регистрации квантов в абсолютной временной шкале (обычно используется UTC). При этом суммарная точность измерения моментов времени оказывается около нескольких десятков наносекунд, что проверено прямыми экспериментами с лабораторными периодическими сигналами. Закодированные последовательности моментов регистрации отдельных фотонов поступали в долговременную память компьютера, переносились на внешние носители в первых поколениях ЭВМ (ЕС1035, СМ-4) и сохранялись на жестких дисках современных персональных компьютеров.

При поиске и исследовании переменности использовались различные методы обработки наблюдательной информации. На начальных этапах эксперимента метод u_2 -функций, предложенный В. Шварцманом вариант интервального анализа, был основным средством анализа данных. В дальнейшем, когда объемы обрабатываемой информации возросли в тысячи раз, как и быстродействие компьютеров, стали использоваться Фурье-анализ, фазирование временных рядов для поиска периодов, анализ кривых блеска с помощью нормированных невязок.

Наблюдения проводились на 60-см и 6-м телескопах САО РАН, 2.15-м телескопе обсерватории CASLEO (Аргентина), 4.2-м телескопе WHT (Ла Пальма, Испания).

ВСПЫХИВАЮЩИЕ ЗВЕЗДЫ

В рамках исследования вспыхивающих звезд типа UV Cet (1982–1985 гг.) было обнаружено 118 вспышек у семи объектов. Моменты прихода фотонов, зарегистрированных в полосе U с временным разрешением 3×10^{-7} с в течение 72 наиболее мощных событий у звезд V577 Mon (26 вспышек), Wolf 424 (22 вспышки), UV Cet (11 вспышек) и CN Leo (13 вспышек) были записаны на магнитную ленту для дальнейшего анализа. У этих событий был проведен поиск тонкой временной структуры на шкале от 5×10^{-7} до 1 с, выделенные детали в этом диапазоне времен неизменно отсутствовали, что является свидетельством в пользу тепловой природы вспышек.

Были проанализированы длительности передних фронтов 65 вспышек. Оказалось, что у 90% событий время нарастания блеска не превышает 10 с. Такого рода закономерность обнаружена впервые. Ясно, что это обусловлено использованием в исследованиях высокого временного разрешения. Зарегистрированы 4 вспышки (у каждой из звезд) продолжительностью 2–4 с, длительности же их передних фронтов

составили 0.3–0.8 с (рис. 97, 98). Было проведено сопоставление этих результатов с предсказаниями, полученными в рамках различных теоретических моделей. Показано, что минимальные длительности фронтов зарегистрированных событий согласуются с выводами тепловой газодинамической модели, а реализация нетепловых механизмов их генерации, по-видимому, исключена.

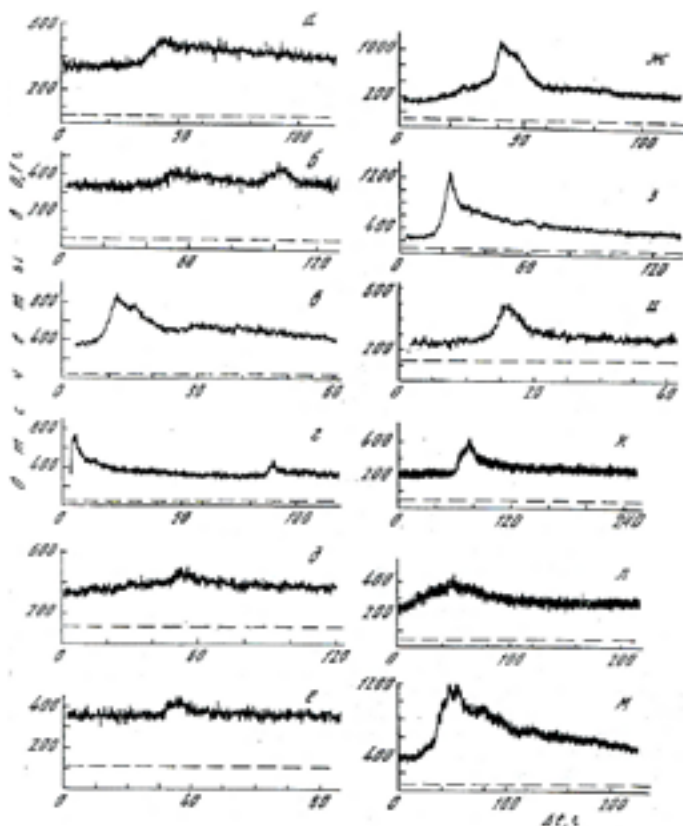


Рис. 97. Вспышки звезды V577 Mon.

С другой стороны, установлено, что продолжительность фазы затухания самых быстрых вспышек с большой вероятностью определяется временем релаксации нагретого в них газа. Установлено, что энергия самых слабых вспышек у самых слабых звезд (CN Leo и UV Cet) составляла 10^{27} – 10^{28} эрг, т.е. была близка к энерговыведению в солнечных субвспышках.

Было получено ограничение на суммарную мощность микровспышек, которое показывает, что их влияние на нагрев звездных корон не должно превышать влияния сильных, отдельно регистрируемых вспышек.

ТЕСНЫЕ РЕНТГЕНОВСКИЕ ДВОЙНЫЕ СИСТЕМЫ

В течение 1977–1996 гг. проводились наблюдения 14 маломассивных рентгеновских систем с целью обнаружения вариаций их излучения в диапазоне времен 5×10^{-7} – 10^2 с. В исследовавшихся двойных системах нормальный компаньон является звездой позднего спектрального класса с массой и светимостью меньше солнечной. При

этом рентгеновая светимость в 10^3 – 10^4 раз превышает оптическую, т.е. именно аккрецирующая плазма вносит подавляющий вклад в излучение системы. С другой стороны, в оптическом диапазоне часто обнаруживается ультрафиолетовый избыток, несомненно связанный с аккреционной структурой. Эти обстоятельства определили выделенность маломассивных рентгеновских двойных систем с точки зрения поиска в их излучении быстрых вариаций, связанных с нестационарными (нетепловыми?) процессами в аккрецирующей плазме. В то же время для первоочередных наблюдений отбирались системы с массивным компактным компаньоном (черной дырой?) в надежде обнаружить прямые проявления сверхсильного гравитационного поля вблизи горизонта событий. Такая возможность может реализоваться, если происходит фрагментация аккреционной структуры, предсказываемая в некоторых моделях, и горизонт событий становится доступен для наблюдений.

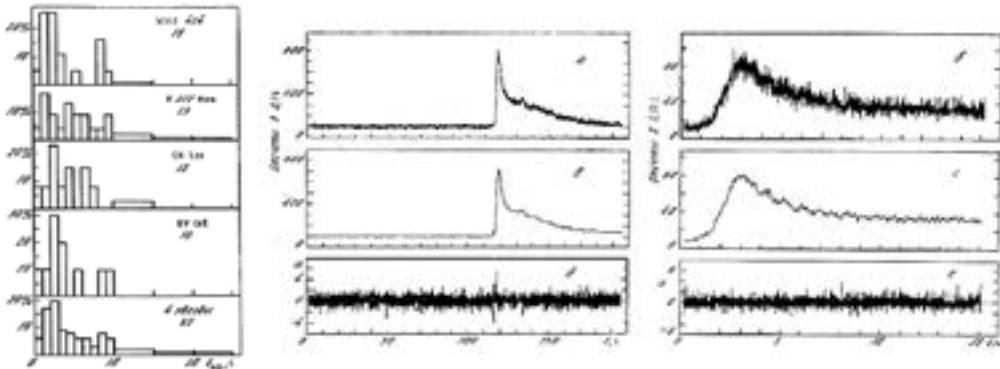


Рис. 98. Слева – распределение длительности передних фронтов вспышек звезд типа UV Cet. Справа – кривые блеска быстрой вспышки Wolf 424, построенные с начальным временным разрешением 0.1с (а) и 0.01с (б), соответствующие кривые, сглаженные по 11 окнам (в, г) и нормированные невязки (д, е).

Мы провели поиск переменности и UBVR-фотометрию (БТА) у двойных систем X0041+33, X1728-169, X1813-14, X1957+11. Для всех объектов получены ограничения мощности переменной компоненты излучения в диапазоне характерных времен 5×10^{-7} – 10^2 с на уровне от 80% до 4%.

Наиболее важным итогом исследований маломассивных рентгеновских двойных систем является обнаружение быстрой переменности у трех объектов – A0620-00 (V616 Mon), MXB 1735-44 и GRO J0422+32 (Nova Per 1992). При наблюдениях A0620-00 были зарегистрированы 4 вспышки, сгруппированные попарно, с интервалом между ними 15 с (рис. 99, слева). Промежуток между событиями в первой паре составляет 10 мс, их длительность 3 и 5 мс, а продолжительность передних фронтов – 1 и 2 мс. Вторая пара еще короче – каждая вспышка продолжалась 0.4–0.5 мс при длительности передних фронтов около 0.1 мс. Амплитуда событий превышает $4^{m.5}$, поскольку реальная интенсивность превосходила предел пропускной способности аппаратуры. Специальный анализ показал, что ни сбой электроники, ни пролет метеора или спутника не могли породить обнаруженные события. Оценки нижних границ яркостных температур в области генерации вспышек составили 10^9 и 10^{11} К. Полученные характеристики обнаруженных событий свидетельствуют об их нетепловом происхождении. Таким образом в системе A0620-00 реализуются (очень

редко!) отклонения от газодинамического режима аккреции, которые можно объяснить в рамках магнито-вспышечных механизмов ускорения частиц и генерации их излучения.

Наблюдения барстера MXB 1735-44 проводились на телескопе обсерватории CASLEO (Аргентина) с помощью комплекса МАНИЯ. По результатам мониторинга в течение часа были получены ограничения на относительную мощность переменной компоненты излучения. В диапазоне 10^{-6} –10 с они составили 40%–3%. Были зарегистрированы две вспышки длительностью 0.25 с. При продолжительности фронтов 0.1–0.12 с интервал между вспышками составил 0.5 с. Профили событий состоят из отдельных деталей, длящихся 5–10 мс. Яркостные температуры в зонах формирования передних фронтов вспышек превышали 10^8 К, а в областях генерации элементов тонкой структуры превосходили 10^{10} К. Сопоставление этих данных с результатами предыдущих рентгеновских и оптических наблюдений позволило сделать вывод о нетепловой природе зарегистрированных вспышек.

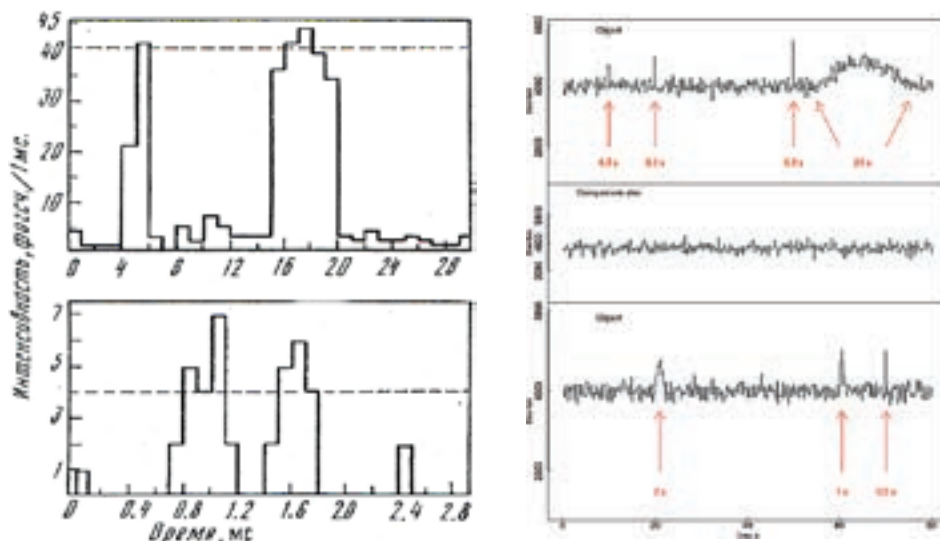


Рис. 99. Слева – сверхкороткие вспышки A0620-00. Наблюдения 12.02.1986 г., диафрагма 4".3, изображения 1".5. Штриховая линия – уровень максимальной интенсивности, соответствующей предельной скорости обмена данными с ЭВМ СМ-4. Справа – фрагменты кривых блеска GRO J0422+32 (Nova Per 1992) и звезды сравнения.

Рентгеновская новая GRO J0422+32 (Nova Per 1992) наблюдалась в 1992–1993 гг. на БТА и 1.5-м телескопе обсерватории Лояно (Италия). Она продемонстрировала существенные отличия своих наблюдательных проявлений от других объектов этого типа. Ее блеск неоднократно уменьшался и возрастал на 4^m – 5^m в течение нескольких часов. Поток излучения Nova Per 1992 вблизи своего максимума изменялся как на шкале часы–дни, так и на временах от нескольких миллисекунд до нескольких минут (рис. 99, справа). Амплитуды этих событий, синхронно наблюдавшихся в парах фильтров BV и BR, лежали в диапазоне значений 0.5^m – 4^m . Яркостные температуры для самых коротких событий с передними фронтами в 4–5 мс превысили 10^9 К. На основе этих результатов было сформулировано заключение, что, по крайней мере, самые быстрые оптические вспышки GRO J0422+32 имеют нетепловое происхождение.

ПОИСКИ ОДИНОЧНЫХ ЧЕРНЫХ ДЫР ЗВЕЗДНЫХ МАСС

Одиноким ЧД звездных масс являются наилучшими «полигонами» для проверки теорий гравитации в сильных полях. Остается их обнаружить. Хотя можно полагать, что, действительно, и компактные компаньоны в тесных двойных системах, чья масса превышает $3 M_{\odot}$, и центральные области в галактиках с массой в миллионы и миллиарды солнечных являются с большой вероятностью ЧД. Однако до тех пор, пока не будут найдены доказательства присутствия у таких объектов горизонта событий, в их отождествлении с ЧД будут оставаться сомнения.

Как было показано В. Шварцманом, критическим экспериментом для отождествления ЧД звездных масс было бы обнаружение сверхбыстрой переменности излучения аккрецирующего на них вещества, порождаемой процессами вблизи горизонта событий. Мы провели теоретический анализ сферической аккреции межзвездного газа на ЧД звездных масс с учетом процессов диссипации энергии усиливающегося магнитного поля.

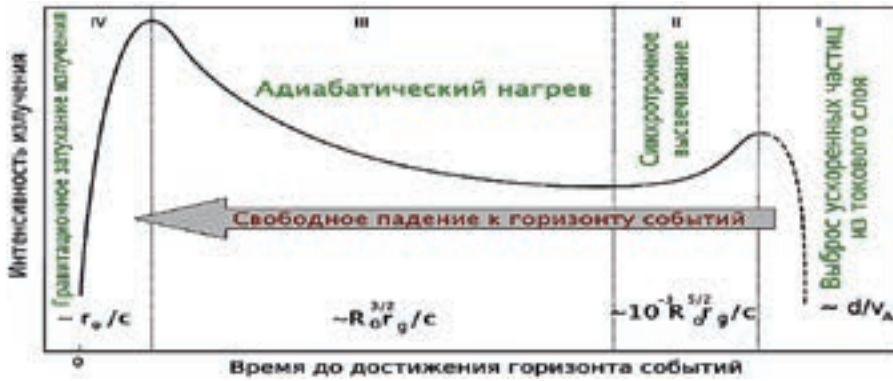


Рис. 100. Внутренняя структура отдельной вспышки как отражение эволюции электронного пучка. Показаны доминирующие физические механизмы, а также длительности соответствующих этапов.

Был рассмотрен один из возможных механизмов этого явления – перезамыкание магнитных силовых линий в турбулентных токовых слоях, в результате которого формируются пучки ускоренных электронов. При этом спектр излучения падающей на ЧД плазмы имеет комбинированный характер (тепловая и нетепловая компоненты), а пучки электронов высвечивают вблизи горизонта событий свою энергию в виде коротких вспышек (рис. 100). Их параметры (длительность, интенсивность, спектр) несут информацию о физических условиях в окрестностях горизонта событий.

Из проведенного анализа вытекает программа наблюдений – поиск переменности на временах от 1 мкс до 100 с у объектов, чьи наблюдательные проявления наиболее близки к ожидаемым у одиночных ЧД звездных масс. Главным критерием для отбора является отсутствие линий в оптическом спектре, что подчеркивал еще В. Шварцман. В число объектов-кандидатов были включены DC-карлики (белые карлики без линий в спектрах) и радиообъекты с континуальными оптическими спектрами (РОКОС), локализация которых неизвестна. Некоторые из РОКОСов излучают еще и в рентгеновском диапазоне. Из общих списков отбирались для наблюдений наиболее

интересные объекты – с обнаруженной переменностью, пекулярными цветами или формой спектра (близкими к характерным для нетепловых источников).

У 40 особенно интересных объектов был проведен поиск переменности на 6-м телескопе, в котором сверхбыстрая переменность не была обнаружена. Мы получили ограничения на параметры быстрой переменности в диапазоне времен 5×10^{-7} –10 с, верхние пределы для относительной мощности переменной компоненты лежат в диапазоне 90%–2%, соответственно. Таким образом ЧД среди наблюдавшихся объектов не обнаружены. Этот вывод для подвыборки DC-карликов позволил ограничить число ЧД – их доля среди близких звезд не превышает 5×10^{-4} .

ПУЛЬСАР В КРАБОВИДНОЙ ТУМАННОСТИ

Было установлено, что импульсное излучение пульсара в Крабовидной туманности весьма стабильно (рис. 101, сверху) и с большой вероятностью должно генерироваться в областях магнитосферы со стационарными физическими условиями. Это следует из следующих результатов анализа – вариации интенсивности отдельных пульсов не отклоняются от пуассоновской статистики с уровнем значимости лучше 10^{-2} , что соответствует 10% для главного пульса и 15% для вторичного, а тонкая временная структура на шкале 1×10^{-4} – 3×10^{-2} с неизменно отсутствует с верхними пределами для амплитуды в диапазоне 50%–5%, соответственно (уровень значимости лучше 1%).

С 1980 г. пульсар в Крабовидной туманности наблюдался в течение 9 сетов на БТА и телескопе WHT с использованием фотометров на основе ФЭУ, панорамных детекторов и лавинно-пролетных диодов, общее время экспозиции составило около 90000 с. При этом с максимальным временным разрешением (до 5×10^{-7} с) изучалась структура кривых блеска, определялись цветовые (спектральные) характеристики излучения в разных интервалах сфазированной кривой блеска, исследовались ее вековые изменения.

Аналогичная ситуация была зафиксирована и при анализе структуры сфазированных кривых блеска (в разные эпохи и в различных цветовых полосах). Тонкая временная структура в главном и вторичном пульсах в диапазоне характерных времен от 3.3 до 100 мкс отсутствовала при верхних пределах на относительную амплитуду вариаций от 10% до 2% в главном пульсе и от 15% до 3% – во вторичном. Аналогичные ограничения для межпульсного и внепульсного интервалов составили 100%–20%.

Вершина главного пульса имеет уплощенный участок (уровень 0.5% от максимума) длительностью около 50 мкс. Эти результаты практически отвергают когерентные механизмы генерации оптического излучения, а также таковые с «комканием» плазмы и образованием пучков с малыми питч-углами. В части изучения цветовых характеристик пульсара в разных фазах его периода было установлено, что уровень потока для переднего крыла главного импульса на 5% выше в полосе R, чем в полосе B (достоверность – 6σ). Эффект аналогичен и для заднего крыла вторичного пульса. Другими словами, общая ширина диаграммы направленности излучения пульсара в Крабовидной туманности возрастает с увеличением длины волны. Это ее свойство не предсказывается существующими моделями генерации высокочастотного излучения пульсаров. Наконец, было обнаружено, что цвета во внепульсном интервале существенно краснее средних по периоду и соответствуют показателю спектра $\alpha \sim -0.6 \pm 0.4$ (при среднем показателе ~ 0.0), хотя точность этой оценки и невелика. При сравнении формы кривой блеска пульсара в разные сеты наблюдений было установлено,

что ее вековые вариации (появление и исчезновение деталей длительностью 3.3–20 мкс) не превышают 10% в полном соответствии с допустимым пуассоновской статистикой уровнем.

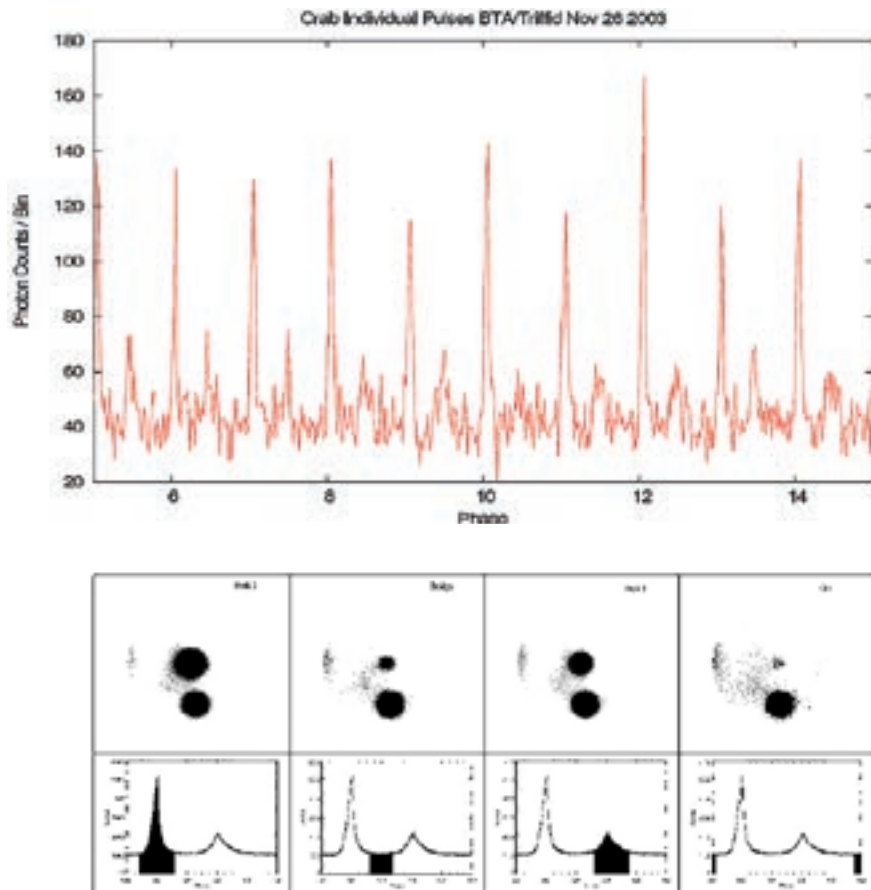


Рис. 101. Вверху – кривая блеска пульсара в Крабовидной туманности с временным разрешением 6.6 мкс. Внизу – изображения пульсара и звезды-соседки в различных фазовых интервалах кривой блеска.

ОТКРЫТИЕ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ У ПУЛЬСАРОВ СРЕДНЕГО ВОЗРАСТА

Мы провели поиск на БТА пульсирующего оптического излучения у двух гамма-пульсаров среднего возраста – PSR 0656+14 (период 0.237 с) и GEMINGA (период 0.285 с). Многочасовой мониторинг областей локализации этих объектов в полосе В с панорамным фотометром, имеющим временное разрешение 1 мкс, позволил обнаружить пульсации (рис. 102), чей уровень составил около 25^m и 26^m соответственно. Было установлено соответствие форм кривых блеска этих объектов в оптическом и гамма-диапазонах, что свидетельствует о магнитосферном происхождении их оптического излучения (в отличие от рентгеновского).

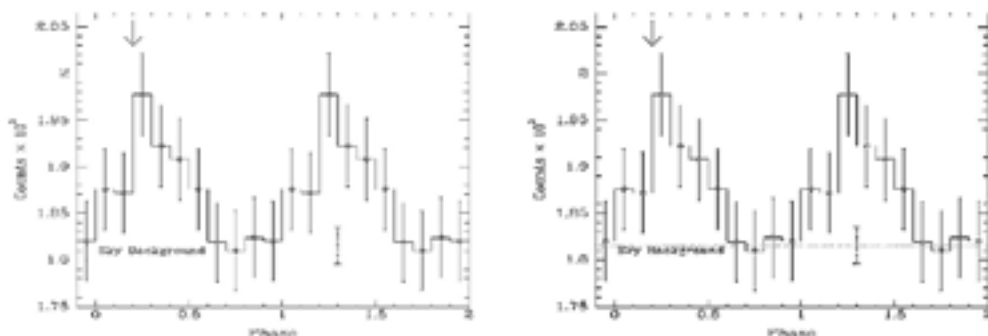


Рис. 102. Сфазированные кривые блеска пульсаров PSR 0656+14 (слева) и GEMINGA (справа). Стрелки указывают положение гамма-пульсов.

ПОИСК И ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ТРАНЗИЕНТОВ ПРИ ШИРОКОУГОЛЬНОМ МОНИТОРИНГЕ С ВЫСОКИМ ВРЕМЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ



Рис. 103. Слева – быстрая широкопольная камера-прототип FAVOR (станция НИИ ПП, САО РАН); справа – камеры TORTORA, установленной на автоматическом телескопе REM (обсерватория Ла-Силла, ESO, Чили).

С конца 90-х в связи с открытием оптических компаньонов гамма-всплесков мы начали развивать естественное продолжение эксперимента МАНИЯ – поиск быстропеременных объектов заранее неизвестной локализации, появляющихся в произвольный момент времени. Таковыми могут быть источники излучения искусственного происхождения – спутники, элементы конструкций ракет-носителей и межпланетных кораблей, мелкий космический мусор; объекты, движущиеся внутри Солнечной системы – астероиды, кометы, метеорные тела, в том числе представляющие опасность для человеческой деятельности; астрофизические объекты, как галактической, так и внегалактической локализации – переменные и вспыхивающие звезды, новые и сверхновые, явления гравитационного линзирования и покрытия звезд планетами, активные ядра галактик и квазары, оптические вспышки, связанные со всплесками высокоэнергичного излучения.

Для изучения указанных феноменов необходимо в наблюдениях использовать сочетание двух методических требований – мониторинга достаточно больших областей небесной сферы (сотни квадратных градусов) и реализации высокого временного разрешения (меньше 1 с) при его проведении.

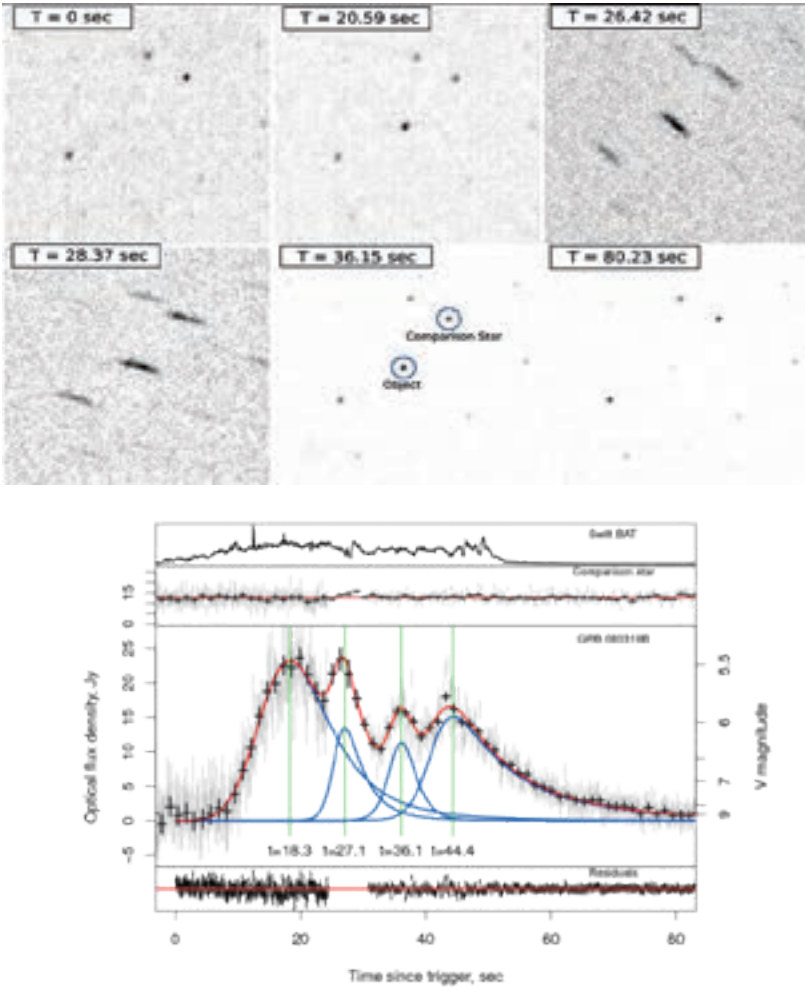


Рис. 104. Гамма-всплеск GRB 080319B. Вверху – фрагмент серии из 450 кадров длительностью 0.13 с, полученных при регистрации оптической вспышки; внизу – кривая блеска оптической вспышки в сравнении с его поведением в гамма-диапазоне, а также после редуциции за переменность на нескольких секундах (четыре вспышки).

Сама идея методов такого рода возникла с целью обнаружения и изучения оптического излучения гамма-всплесков, синхронного с гамма-эмиссией, независимо от данных, полученных с гамма-телескопов.

Были разработаны и изготовлены два инструмента такого типа (рис. 103) – FAVOR, созданный в сотрудничестве с ИКИ РАН и НИИ ПП, и TORTORA – проект САО РАН, Болонского университета и НИИ ПП. Обработка поступающей информации (7.5 кадров в секунду) проводится в реальном времени, и за доли секунды определяется тип обнаруженного транзиента.

Эта программа принесла важный результат – 19.03.2008 г. при независимом мониторинге поля зрения гамма-телескопа SWIFT камера TORTORA зарегистрировала яркую вспышку ($5^m.5$), сопровождавшую гамма-всплеск GRB 080319B (рис. 104, вверху). Впервые были обнаружены вариации блеска подобного объекта с характерными временами в несколько секунд. Структуры кривых блеска в оптическом и гамма-диапазоне коррелируют с коэффициентом 0.82 при запаздывании оптического излучения на 2 с (рис. 104, внизу). Этот результат приводит к необходимости во многом пересмотреть сложившиеся представления о природе излучения гамма-всплесков.

В 2014 г. мы совместно с КФУ создали и ввели в строй новую широкопольную мониторинговую систему – MiniMegaTORTORA или ММТ-9, состоящую из девяти отдельных каналов, каждый из которых снабжен целостатным зеркалом для быстрого перенаведения на обнаруженный транзиентный объект. Каналы получают изображения небесной сферы в поле $30^\circ \times 30^\circ$ с временным разрешением 10 кадров в секунду и пределом обнаружения вплоть до $11^m.5$.

Многоканальность ММТ-9 позволяет после обнаружения всплеска в течение секунд перенавестись на него всеми девятью каналами, установив на них цветные и поляризационные фильтры, для детального изучения транзиента. Помимо этого, высокое временное разрешение и широкое поле зрения системы позволяет массово наблюдать слабые метеоры (на пять звездных величин слабее видимых другими камерами!), а также искусственные спутники Земли и космический мусор на околоземной орбите.

Исследования с высоким временным разрешением, начатые в САО РАН более 40 лет назад, до сих пор продолжаются, и по-прежнему обнаружение черных дыр (горизонтов событий) является их самой главной задачей.

МАНИЯки надеются на удачу!

История и перспективы исследований звездного магнетизма в САО РАН

Глаголевский Ю.В.,

главный научный сотрудник ЛИЗМ, д.ф.-м.н.; glagol@sao.ru

Романюк И.И.,

заведующий ЛИЗМ, д.ф.-м.н.; roman@sao.ru

ВВЕДЕНИЕ

Влияние магнитного поля на физические процессы в звездах огромно. В большинстве случаев оно является причиной различных вспышек, взрывов и других проявлений нестационарности, но имеются и обратные случаи – когда магнитное поле служит стабилизирующим фактором, «замораживая» состояние вещества. Исследование механизмов формирования и поддержания космических магнитных полей, а также их роли в эволюции звезд и галактик – одно из важнейших направлений в астрофизике. Наиболее надежным и эффективным способом изучения звездного магнетизма является анализ проявлений эффекта Зеемана методами спектрополяриметрии.

Магнитные поля звезд были обнаружены Г. Бэбкоком в 1947 г. на 5-м телескопе Паломарской обсерватории с помощью разработанных им анализаторов круговой поляризации. К середине 60-х его фотографический метод оставался единственным способом исследований магнитных полей звезд. В начале шестидесятых Дж. Престон и С. Вольф стали использовать в наблюдениях на 3-м Ликском телескопе зеемановский анализатор. Они обнаружили почти сотню магнитных звезд, которые оказались химически пекулярными (chemically peculiar, CP).

В СССР исследованиями магнитных CP-звезд занимались в нескольких институтах: Н.С. Полосухина в КрАО, В.Л. Хохлова и ее группа в Астросовете (ныне ИНАСАН), в Алма-Атинской обсерватории – Ю.В. Глаголевский, обнаруживший депрессии в континууме, уменьшение бальмеровского скачка и несоответствие спектральной классификации температуре для этих объектов.

В научном обосновании проекта создания БТА изучение магнитных полей звезд было особо выделено. В 1968 г. еще до ввода 6-м телескопа в эксплуатацию для этих исследований была создана группа под руководством Ю.В. Глаголевского. К началу плановых наблюдений на БТА в 1977 г. ее сотрудники разработали и внедрили аппаратуру для наблюдения звездных магнитных полей. Сейчас на эти исследования ежегодно выделяется 10–15% рабочего времени БТА, а САО РАН считается одним из ведущих институтов в области изучения звездного магнетизма.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МАГНИТНЫХ ЗВЕЗДАХ

Магнитные поля у большинства звезд, по-видимому, присутствуют на всех стадиях эволюции. Они могут быть глобальными и охватывать всю звезду или носить локальный характер. Последнее характерно для конвективных атмосфер холодных звезд. Например, пятна на Солнце – это области выхода на поверхность трубок сильного,

величиной до 2–3 кГс, магнитного поля. При близком прохождении трубок с полями разной полярности возникает перезамыкание магнитных линий, и энергия поля превращается в тепловую в виде солнечной вспышки. Такой механизм вспышечной активности у звезд очень распространен. Но есть и другой вид магнитных звезд. Сильное магнитное поле (величиной более 1 кГс), если оно покрывает всю поверхность звезды, способно вызвать эффект «замораживания» атмосферы – прекращения крупномасштабных движений плазмы. Общее поле пекулярных звезд имеет вид диполя. Кроме дипольной составляющей, иногда обнаруживается вклад квадрупольной компоненты или присутствие мультиполей более высоких порядков.

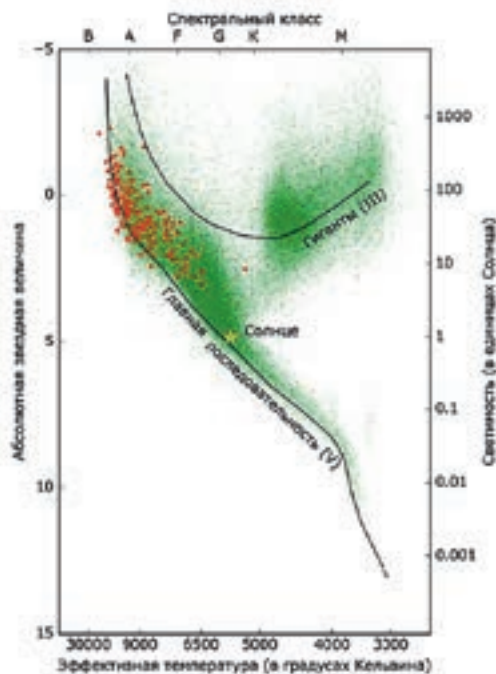


Рис. 105. Ar- и Vr-звезды на диаграмме Герцшпрунга-Рассела по данным спутника Hipparcos.

Магнитное поле пекулярных звезд почти всегда сопровождается аномальным – усиленным или ослабленным содержанием отдельных химических элементов. Отмечается повышенное по сравнению с Солнцем содержание кремния, хрома, стронция и редкоземельных элементов, таких как европий, гадолиний, неодим и др. Наиболее многочисленная группа химически пекулярных звезд имеет спектральные классы A и B, поэтому эти объекты называют еще Ar- и Vr-звездами.

Во второй половине 20 века выяснилось, что отклонения химического состава характеризуют не всю звезду, а только ее атмосферу, где элементы концентрируются в виде пятен. Вне пятен содержание указанных элементов нормальное или даже пониженное. В ряде случаев было установлено, что расположение химических пятен на поверхности зависит от топологии магнитного поля. Канадский астрофизик Ж. Мишо (1970 г.) предложил объяснение этого феномена. Неоднородности химического состава порождаются крупномасштабным магнитным полем, которое подавляет движение плазмы в направлении, перпендикулярном силовым линиям поля. В таких условиях атомы и ионы химических элементов под действием лучистого давления в

гравитационном поле звезды очень медленно дрейфуют в глубокие или в верхние слои атмосферы. Химические элементы, по-разному чувствительные к магнитному полю, могут дрейфовать по поверхности в области с разным расположением силовых линий поля. Данное явление получило название магнитной диффузии атомов.

На рисунке 105 представлена диаграмма Герцшпрунга-Рассела (ГР), где Ар- и Вр-звезды обозначены красными точками. Они лежат на главной последовательности. Исследования показали, что по массам и температурам магнитные звезды не отличаются от нормальных А- и В-звезд, однако вращаются существенно медленнее, с угловыми скоростями в 3–4 раза меньшими, чем у последних.

Атмосферы Ар- и Вр-звезд удивительно стабильны. На протяжении десятков лет, в течение которых проводятся наблюдения, не удалось обнаружить ни изменений структуры, ни положения пятен химического состава на поверхности, ни изменений топологии поля. Причина такой стабильности – магнитное поле, охватывающее всю атмосферу звезды. На Солнце такое общее поле тоже найдено, оно имеет дипольную структуру, но его величина достигает всего несколько гаусс. В сравнении с Солнцем магнитная Ар/Вр-звезда – это «монстр» с более горячей, но «замороженной» магнитным полем атмосферой.

До сих пор остается невыясненным механизм генерации столь сильных магнитных полей. Чтобы ответить на этот вопрос, необходимо исследовать молодые звезды, только начинающие свою жизнь на ГП. Наиболее подходящими для этого являются рассеянные звездные скопления и ОВ-ассоциации звезд. Главное преимущество, которое дает этот выбор, состоит в возможности оценивать с высокой точностью возраст звезд, поскольку в скоплениях и ассоциациях они образуются практически одновременно.

ИСТОРИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ МАГНИТНЫХ ЗВЕЗД В САО

Для проведения исследований звездного магнетизма первый директор САО РАН И.М. Копылов пригласил на работу из Алма-атинской обсерватории Ю.В. Глаголевского. В 1968 г. была создана рабочая группа «Магнитные звезды», которую он и возглавил.

В сборнике, посвященном 40-летию САО [1], подробно изложена история магнитных исследований в обсерватории до 2005 г. Теперь он стал библиографической редкостью, поэтому мы здесь приведем результаты прежних лет и более подробно остановимся на результатах последнего десятилетия.

1968–1972: САО без телескопов. В 1969 г. в КрАО А.Б. Северным, В.М. Кувшиновым и Н.С. Никулиным был создан первый в мире звездный магнитометр для ЗТШ. В то же время Дж. Ландстрит построил фотоэлектрический балмеровский магнитометр и приступил к регулярным измерениям магнитных полей звезд.

Сотрудники группы наблюдали на инструментах других обсерваторий. Для изучения химического состава и параметров атмосфер магнитных звезд требуются высокодисперсионные спектры. Такой материал можно было получить на ЗТШ и на 2-м телескопе обсерватории в Шемахе. По спектрам, полученным на этих телескопах, было обнаружено, что соотношение температуры возбуждения к температуре ионизации у Ар и Ам-звезд нормальное, а электронные плотности соответствуют положению звезд на ГП. Такой вывод имел большое значение, так как позволял использовать в первом приближении теорию нормальных звездных атмосфер [2].

Сотрудники группы принимали участие в составлении технического задания на изготовление основного звездного спектрографа (ОЗСП) для БТА, а также в его приемке и исследованиях.

1973-1977: начало наблюдений на телескопе Цейсс-600. В 1973 г. вступил в строй телескоп Цейсс-600, оборудованный фотоэлектрическим фотометром. На базе спектрографа UAGS В.Г. Штоль вместе с нашей группой создал спектрофотометр для наблюдений переменности в ядрах водородных линий [3]. С добавленным к нему поляризационным блоком (разработка В.Г. Штоля) мы получили водородный магнитометр [4]. Основные идеи этого прибора были использованы в конструкции спектрополяриметра с возможностью измерения четырех параметров Стокса на БТА.



Рис. 106. Слева: Ю.В. Глаголевский – первый руководитель группы «Магнитные звезды», заведующий ЛИЗМ 1991–2003 гг. Справа: И.И. Романюк – заведующий ЛИЗМ с 2003 г. по настоящее время.

Для измерения магнитных полей звезд Ю.В. Глаголевский, Г.А. Чунтонов и И.Д. Найденов изготовили анализаторы круговой поляризации для ОЗСП по классической схеме Бэбкока с дополнительной слюдяной четвертьволновой фазовой пластинкой на выходе, что позволило устранить сильные инструментальные поляризационные эффекты. Позже был разработан и изготовлен ахроматический анализатор круговой поляризации, в качестве фазосдвигающих элементов в нем впервые были применены ромбы Френеля [5]. Этот анализатор в течение 40 лет работает на телескопе. В это же время для БТА велась разработка фотоэлектрического звездного магнитометра с интерферометром Фабри-Перо, идея которого была предложена Ю.В. Глаголевским и др. [6].

Первые плановые наблюдения с анализатором круговой поляризации были проведены на БТА 05.01.1977 г. Ю.В. Глаголевским и И.И. Романюком [7]. Они положили начало систематическим измерениям магнитных полей звезд на на первой и второй камерах ОЗСП, которые продолжаются уже почти 40 лет. В качестве светоприемника использовались фотографические пластинки.

Основные публикации были посвящены разработке, изготовлению и испытанию приборов для измерения магнитных полей на БТА. Ю.В. Глаголевским, Г.А. Чунтоновым, И.Д. Найденовым и И.И. Романюком были проведены исследования инструментальных ошибок, влияющих на точность измерений. Изготовлены калибровочные устройства, позволяющие исследовать степень поляризации и/или деполяризации света при прохождении разных оптических элементов и узлов системы телескоп-спектрограф. Было определено, что инструментальная поляризация в фокусе

Нэсмита имеет малую величину (не более нескольких процентов), что делает БТА чрезвычайно удобным телескопом для измерения магнитных полей. Из-за разных поляризационных эффектов величина магнитного поля уменьшается на 5%, что должно учитываться в результатах измерений.

Ю.В. Глаголевский, К.И. Козлова и Н.С. Полосухина впервые выполнили работу по картированию поверхности звезды 21 Peg. Были получены данные, подтверждающие предположение, что спектральные аномалии вызваны, прежде всего, химическими аномалиями, а не физическими условиями в атмосферах [9].

1978–1982: детальные исследования магнитных звезд, начало работы по поиску новых магнитных звезд. Много времени было уделено доводке и испытаниям магнитометра с интерферометром Фабри-Перо (ИФП) [8]. Первые наблюдения на нем были выполнены в 1978г. [10] с рекордной точностью ~ 10 Гс. В.Г. Штоль провел модернизацию спектрофотометра, снабдив его поляриметрическим блоком. Прибор показал высокую чувствительность при измерениях магнитного поля по линиям водорода [11]. В 1980 г. водородный магнитометр был установлен в первичном фокусе БТА. Впервые в СССР появилась возможность измерять все четыре параметра Стокса [12]. С 1982 по 1996 г. водородный магнитометр был основным штатным прибором БТА. Было получено несколько сотен фотографических зеэмановских спектров. Анализ фотографических наблюдений и данных, полученных с помощью разработанных приборов, привел к интересным результатам.

По линиям металлов и водорода было измерено магнитное поле звезды HD 119213 и связано с фазой периода вращения. Обнаружено, что разные химические элементы образуют разные фазовые зависимости из-за неравномерного распределения химических элементов по поверхности [13].

Исследован радиальный градиент магнитного поля у звезд β CrV и α^2 CVn. У последней поле растет с глубиной с градиентом порядка 0.1–1 Гс/км. Он значительно превышает дипольный, что указывает на необходимость усовершенствования модели магнитного поля этой звезды. Для β CRV такие изменения не обнаружены [14].

Обнаружено слабое магнитное поле у ярчайшей пекулярной звезды ν UMa. Так гипотеза о том, что бывают Ar-звезды, не имеющие магнитного поля, лишилась весомого аргумента [15].

В ходе наблюдений со спектрополяриметром на телескопе Цейсс-600 не обнаружена быстрая переменность в ядрах водородных линий у нескольких Ar-звезд, что подтвердило стабильность верхних слоев их атмосферы [16].

Впервые по относительному распределению интенсивности зеэмановских компонент была изучена конфигурация магнитного поля звезды Бэбкока HD 215441, обладающей сильнейшим магнитным полем, и определены ее основные параметры [17].

Начались наблюдения по программе поиска магнитных звезд среди объектов с большими Z-параметрами женеvской фотометрической системы. Обнаружены магнитные поля у девяти звезд. Впервые была обнаружена связь между депрессиями в непрерывном спектре и величиной магнитного поля [18].

1983–1987: выполнение научных программ на БТА. По программе поиска магнитных звезд были получены фотографические зеэмановские спектры 100 кандидатов. Магнитное поле было обнаружено у 20 из них. Использование Z-параметра женеvской фотометрической системы оказалось весьма эффективным для поиска

кандидатов, однако заменять прямые измерения результатами косвенных определений, основанных на феноменологической зависимости, не следует [19].

С высокой точностью на магнитометре с ИФП было измерено магнитное поле ярчайшей пекулярной ртутно-марганцевой звезды α And, которое оказалось равным $B_e = +33 \pm 19$ Гс. Хотя результат статистически незначим, есть другие косвенные указания на то, что магнитное поле у α And все же имеется [20].



Рис. 107. Слева – И.И. Романюк с участниками конференции в Риге в 1984 г. Справа – И.И. Романюк и его ученики (слева направо): И.А. Якунин, Е.А. Семенко, И.И. Романюк, Д.О. Кудрявцев и В.Г. Елькин на конференции в Потсдаме (Германия) в 2011 г.

С ахроматическим анализатором круговой поляризации проведены наблюдения нескольких звезд в области бальмеровского скачка. Для $\alpha^2\text{Cv}\eta$ найдено, что величина магнитного поля и амплитуда его изменений в области длин волн короче, чем бальмеровский скачок (3646 \AA), на 30% меньше, чем в визуальной области спектра. Это указывает на уменьшение магнитного поля с высотой (радиальный градиент поля) и требует усовершенствования простой дипольной модели магнитного поля $\alpha^2\text{Cv}\eta$ [21].

Проанализированы данные для более сотни магнитных звезд в рассеянных скоплениях разного возраста. Оказалось, что полный магнитный поток звезды почти не меняется с возрастом, потому что время диссипации поля в стабильной атмосфере составляет 10^{10} лет. Таким образом, поле диссипирует только вследствие омических потерь [22].

Чтобы объяснить потери момента вращения SP-звезд, проанализирована зависимость среднего периода вращения от возраста. Показано, что звезды с аномальными линиями гелия практически не отличаются от нормальных, но чем больше возраст, тем медленнее вращение. Зависимость поверхностного поля от периода вращения имеет максимум при периоде в 8^d [23].

Составлен список из 330 звезд, и произведены оценки их эффективных температур T_{eff} в системе Адельмана, основанной на моделях Куруча, где учитывается покровный эффект и переизлучение энергии из УФ-области. Система температур существенно уточнена [24].

Исследована связь магнитного усиления линий и избытка химического состава в магнитных звездах. Обнаружено, что с увеличением фактора Ланде растет степень пекулярности. Магнитным усилением линий можно объяснить зависимость интенсивности депрессии на 5200 \AA от величины магнитного поля [25].

Проведена модернизация водородного магнитометра. Изменена конструкция поляриметрической приставки, расширен набор движущихся щелей. Выполнены исследования инструментальной линейной поляризации в первичном фокусе БТА. Она оказалась постоянной в пределах нескольких сотых долей процента [26].

1988–1992: конец фотографической эры. В конце 80-х годов закупки импортных фотопластинок прекратились. Наблюдения магнитных полей выполнялись на водородном магнитометре, который работал в первичном фокусе БТА, с фотоэлектрическим светоприемником. Если бы такой аппаратуры не было, то наблюдать магнитные поля было бы не на чем. Проводились эксперименты с различными цифровыми светоприемниками (телевизионный сканер, диокон и др.), но для наблюдений магнитных полей они так и не были использованы.

По уточненному списку эффективных температур для 100 CP-звезд, исследовавшихся на БТА, оценены болометрические звездные величины и построена диаграмма ГР. CP-звезды оказались равномерно распределены по полосе ГП, совпадая с распределением для звезд без магнитных полей [27].

Составлен второй список магнитных звезд. Вместе с предыдущим списком они составили более представительную выборку. Однако по этим данным не была найдена зависимость величины поля B_e от температуры, что является важным результатом для теории происхождения и эволюции CP-звезд. Оказалось, что B_e по линиям металлов в среднем на 200 Гс больше, чем по линиям водорода, что объясняется концентрацией металлов вокруг магнитных полюсов звезды [28].

На водородном магнитометре проводился поиск магнитных полей у нескольких звезд типа λ Воо. Поле не было зарегистрировано ни у одной из них. Тот факт, что звезды типа λ Воо не относятся к магнитным, был подтвержден позже в обзоре, выполненном Дж. Ландстритом и др. [27], который включал больше звезд этого типа.

Были проведены наблюдения уникальной звезды HD 37776 с магнитным полем сложной конфигурации. Обнаружены расщепленные зеемановские компоненты, указывающие на существование сверхсильного магнитного поля величиной 70–80 кГс, квадрупольный компонент которого сильнее дипольного. Были измерены четыре параметра Стокса, найдена очень сильная линейная поляризация в континууме и эмиссия в линии H α , указывающие на то, что звезда окружена оболочкой [28].

Исследовалась связь между величиной магнитного поля и содержанием гелия у звезд типа He-г. Полагаем, что вблизи начала эволюции на ГП содержание гелия у He-г и He-wk звезд нормальное. Далее на содержание гелия влияют следующие эффекты: 1) ветер, 2) рост аномалий с возрастом в начальных стадиях на ГП, 3) уменьшение содержания гелия из-за увеличения радиуса и уменьшения поля на поверхности [29].

С водородным магнитометром и зеемановским анализатором (БТА) была предпринята попытка обнаружить магнитное поле у сверхгигантов. В некоторых наблюдениях регистрировалось поле порядка 1 кГс. Эта проблема представляет большой интерес с точки зрения возможности генерации локальных магнитных полей в турбулентной атмосфере сверхгиганта. Из-за сложности профилей линий полученные результаты не являются достаточно надежными [30].

1993–1997: ПЗС-наблюдения, моделирование параметров магнитных звезд.

Первые наблюдения с зеемановским анализатором и ПЗС-приемником были выполнены в октябре 1994 г. на ОЗСП. В 1994–1995 гг. в наблюдениях использовался детектор формата 530×580 с лучшей чувствительностью в красной части спектра, в 1995–1997 гг. детектор большего формата – 1040×1160 элементов, адаптированный к излучению в синей части спектра. Г.А. Чунтонов разработал и внедрил анализатор круговой поляризации на основе ромбов Муни.



Рис. 108. Слева – Т.А. Рябчикова, Джон Ландстрит и И.И. Романюк в Домбае в 1989 г. Справа – Д.О. Кудряцев (2016 г.).

Получена фазовая кривая переменности продольного магнитного поля звезды 21 Per. Эта звезда служит образцом немагнитной Ар-звезды с сильными неоднородностями в распределении химических элементов по поверхности. Мы обнаружили, что на ее поверхности существует магнитное поле величиной в несколько сотен Гс, а продольный компонент меняется с периодом вращения звезды. При детальном изучении все Ар-звезды могут оказаться магнитными, поэтому нет необходимости в некоторых экзотических теориях образования пятен химического состава [31].

На ОЗСП получено более 50 зеемановских спектров уникальной уникальной магнитной звезды HD 37776 с сильным полем недипольной топологии. Моменты наблюдений были равномерно распределены вдоль фазы вращения звезды. Изучена переменность профилей круговой поляризации. Анализ тонкой структуры поляризованных профилей линий подтвердил наличие сверхсильного (более 70 кГс) магнитного поля на поверхности звезды, построена его модель [32].

В кооперации с обсерваториями США, Канады и Чили были выполнены магнитные исследования трех звезд: HD 192678, HD 184927 и HD 200311 [33–35]. Поскольку система магнитных измерений на БТА полностью соответствует международным стандартам, удалось обобщить все результаты в единой системе. Для звезд построены модели магнитных полей в виде комбинации диполя, квадруполя и октуполя. Оказалось, что преимущественный вклад вносит дипольная компонента. В работе использовались данные широкополосной линейной поляриметрии, полученные Леруа (1995). Для звезды HD 192678 в районе магнитного экватора найдена область, где магнитное поле значительно отклоняется от общей дипольной конфигурации. У звезды HD 184927 структура поля близка к дипольной, однако в области магнитных полюсов

величина квадрупольной компоненты сравнима с дипольной. Магнитное поле HD 200311 моделируется нецентральной диполем.

Разработан метод «магнитных диполей», позволяющий моделировать магнитное поле звезды путем распределения диполей внутри звезды. Он позволяет вычислять поля на поверхности звезды и производить сравнение с наблюдениями [36].

1998–2002: поиск магнитных звезд, картирование звездных магнитных полей, каталог магнитных звезд. Начались наблюдения с зеэмановским анализатором на эшелле-спектрометре НЭС (разработка В.Е. Панчука). Высокое спектральное разрешение этого прибора позволяет выполнять доплер-зеэмановское картирование звезд [37]. Одновременно продолжались наблюдения на ОЗСП, для которого Г.А. Чунтонов изготовил новый анализатор круговой поляризации с поворачивающимися четвертьволновыми пластинками и резателем изображения. Он давал существенный выигрыш в точности измерений поля и проницаемости. В 1999 г. водородный магнитометр был исключен из списка штатных приборов БТА в связи с изношенностью, отсутствием запасных частей и уходом В.Г. Штоля на пенсию. С 2000 г. магнитные измерения выполняются по спектрам, полученным на ПЗС-детекторах.

Выполнены наблюдения (БТА/ОЗСП) ряда магнитных звезд с узкими линиями, в спектрах которых наблюдаются расщепленные зеэмановские компоненты. Работа выполнялась совместно с учеными ESO (Чили). Споставление измерений поверхностного поля (ESO) и его продольной компоненты (БТА) позволяет построить надежную модель магнитного поля звезды. Оказалось, что случаи несимметричного магнитного диполя встречаются часто. Например, магнитное поле HD 12288 можно описать моделью центрального диполя, в то время как в HD 14437 диполь является нецентральной и смещенным на 0.23 радиуса [38].

Возобновлена программа по поиску магнитных звезд. По сравнению с 80-ми годами прошлого века для обнаружения магнитных звезд нам пришлось изменить методику, так как объекты с большими Z-параметрами женеэвской системы, которые рассматривались в качестве кандидатов, уже были отобраны и просмотрены. Мы обнаружили, что звезды, имеющие характерные особенности в профиле депрессии на 5200 Å, являются магнитными, и использовали это в качестве критерия для селекции кандидатов. Метод отбора состоит в следующем: сначала на Цейсс-1000 получают спектры низкого разрешения, затем объекты, аномалии в депрессиях которых превышают определенную величину, наблюдаются с зеэмановским анализатором на БТА. Так было обнаружено около 20 магнитных звезд [39, 40].

По 50 зеэмановским спектрам (БТА) впервые выполнено доплер-зеэмановское картирование поверхности уникальной магнитной звезды HD 37776, построена модель ее магнитного поля и получено распределение химических элементов по поверхности. Магнитное поле звезды имеет квадрупольную структуру, в максимуме оно достигает ~60 кГс, что является рекордно большой величиной. Гелий концентрируется на поверхности в областях с наибольшей радиальной величиной поля, в то время как максимальные концентрации кремния и железа совпадают с максимумами тангенциальной составляющей. Впервые прямым методом показана связь между конфигурацией магнитного поля и распределением химических элементов по поверхности [41].

Создан каталог магнитных CP-звезд, где собраны сведения для 212 объектов. В нем приведены как результаты наших измерений магнитных полей, так и данные из опубликованных статей. С помощью БТА обнаружено 40% всех магнитных звезд и

получено более 30% всех магнитных кривых. Каталог постоянно обновляется и служит базой для статистических исследований [42].

Получены спектры (НЭС) в области бальмеровского скачка для ряда магнитных звезд. На одном и том же спектре можно измерить магнитное поле на разной высоте в атмосфере по линиям до и после скачка, которые образуются на разных высотах в атмосфере. Для звезды α^2 CVn было подтверждено увеличение магнитного поля вглубь атмосферы с градиентом, превышающим дипольный [43].

Изучался химический состав звезд со слабым (нескольких сотен Гс) магнитным полем. Обнаружено, что у некоторых звезд степень аномальности химсостава такая же, как и у звезд с сильным полем [44].

Получены интересные результаты при моделировании магнитных полей звезд методом «магнитных зарядов». Так, фазовую кривую у β СтВ можно воспроизвести, если предположить наличие двух диполей внутри звезды; для звезды α^2 CVn подходит модель смещенного диполя; для ϵ UMa – модель центрального диполя; у HD 147010 диполь смещен на 0.45 радиусов от центра звезды. Особенно сложная конфигурация поля у звезды HD 37776, где наблюдательные данные могут быть описанными тремя смещенными от центра диполями, которые приблизительно параллельны оси вращения. Среднее смещение «зарядов» от центра – около 0.18 радиуса. Звезда HD 126515 имеет значительную ангармоничность фазовых кривых. Наилучшие результаты дает модель при сильно смещенном диполе – 0.49 радиуса в сторону отрицательного магнитного полюса. Для CU Vir смещение диполя составляет 0.3 радиуса, тоже в сторону отрицательного полюса [45–47].

Проведены исследования звезд, находящихся на поздних стадиях эволюции. По современным представлениям, на стадии сверхгигантов звезды должны испытывать полное перемешивание, и магнитное поле должно исчезнуть. На асимптотической ветви гигантов они испытывают внутреннюю перестройку. Произведен поиск магнитного поля у звезд, находящихся на промежуточной стадии эволюции на диаграмме ГР между ГП и белыми карликами. Выбраны звезды А и В горизонтальной ветви и субкарлики. Эти объекты, так же как и СР-звезды, медленно вращаются и имеют химические аномалии. Из восьми изученных звезд две показали наличие магнитного поля [47].

2003–2007: магнитное картирование, поиски радиального градиента поля, магнитные катаклизмические переменные.

Мы проводим наблюдения с зеемановским анализатором в области бальмеровского скачка (3400–4100 Å). В этой области по линиям до и после скачка, которые образуются на разной оптической глубине, можно измерить магнитное поле на разных высотах в атмосфере. В настоящее время по техническим причинам на других телескопах этот метод не используется, и наши зеемановские спектры в области бальмеровского скачка остаются единственными.

Продолжались поиски магнитных звезд. Было обнаружено около 80 магнитных звезд, что больше, чем было открыто во всех обсерваториях мира за 2003–2007 гг. У некоторых объектов (HD 178892, HD 45583, HD 293764, HD 343872, HD 349321) измеренный продольный компонент поля превышает 4 кГс, т.е. поле на их поверхности более 10 кГс. Звезды с самыми сильными полями изучались подробно. Так, продольное поле HD 178892 меняется от +1.5 до +7.5 кГс с периодом около 8^d. Моделирование показало, что поле на поверхности этой звезды превышает 25 кГс [49].

Проведен анализ всех имеющихся наблюдений α^2 CVn. Продольное магнитное поле этой звезды увеличивается в глубину примерно на 30% на масштабах порядка толщины атмосферы [50].

Исследовалась зависимость параметров магнитного поля CP-звезд от скорости вращения. Отмечено, что среди звезд с известными периодами вращения медленные ротаторы не обладают сильными магнитными полями, а сложная структура поля наблюдается преимущественно у быстрых ротаторов. Наибольшей величины эффективное магнитное поле достигает у CP-звезд с периодами вращения 5^d – 10^d . Внутри достаточно узких температурных интервалов фотометрические индексы, описывающие степень аномальности распределения энергии в континууме, растут с увеличением периода в каждом из них. Фотометрический индекс Δa , связанный с глубиной депрессии континуума на 5200 \AA , увеличивается с ростом периода вращения (в интервале температур 8000 – 11000 K), таким образом, степень аномальности континуума больше для медленных ротаторов [51].

В спектре холодной магнитной звезды HD 178892, магнитное поле у которой впервые было измерено по наблюдениям на БТА/ОЗСП, обнаружены расщепленные поляризованные зеемановские компоненты некоторых линий. Результат был подтвержден по спектрам высокого разрешения, полученным на НЭС (БТА) и HARPS (телескоп 3.6 м, ESO). Расщепление соответствует поверхностному магнитному полю $B_s = 17.5 \text{ кГс}$. Такое магнитное поле является рекордно сильным для холодных магнитных звезд. С привлечением фотометрических данных уточнен период вращения звезды $P = 8.^d2478$. Фазы магнитного и фотометрического максимумов совпадают. Определена эффективная температура звезды ($T_e = 7700 \pm 500 \text{ K}$) и проведен анализ химического состава, показывающего характерные для пекулярных звезд обилия химических элементов [52].

Проведены наблюдения (БТА/НЭС) резонансной линии HgII 3984 \AA для быстровращающихся HgMn-звезд с параметрами, похожими на параметры атмосферы α And. Для звезды HR 8723 по двум спектрам, разделенным по времени наблюдения двумя сутками, обнаружена переменность профиля линии Hg. Для обнаружения горизонтальных неоднородностей атмосферы было проведено доплеровское картирование. Явное присутствие пятен обнаружено по профилям линии HgII 3984 \AA у звезд HR 1185 и HR 8723. Мы пришли к заключению, что неравномерное распределение Hg является распространенным явлением для быстровращающихся HgMn-звезд с интервалом температур 13000 – 13800 K и не зависит от стадии эволюции звезды. Такие звезды мы выделили в новый класс спектрально-переменных пятнистых В-звезд. Полагаем, что наблюдаемые неоднородности Hg являются следствием динамических нестабильностей в процессах химической диффузии и не связаны с магнитными явлениями [53].

По спектрам (БТА/ОЗСП) определены лучевые скорости и скорости вращения 32 обнаруженных нами магнитных CP-звезд. Систематических различий в лучевых скоростях между нашими и ранее опубликованными данными не обнаружено. 8 из 32 магнитных звезд являются двойными, еще 4 заподозрены в двойственности. Для 27 звезд с известными параллаксами определены компоненты тангенциальной скорости. У объектов оценены проекции скоростей вращения на луч зрения ($V_e \sin i$). Они попадают в интервал от 18 км/с (нижняя граница определяется инструментальным профилем) до 65 км/с [54].

Продолжались исследования химсостава CP-звезд со слабыми магнитными полями. Полагаем, что величина поля не является определяющей в механизме образования

химических аномалий, хотя и влияет на степень неравномерности распределения элементов по поверхности. Самые сильные аномалии образуются в области магнитных полюсов, где возникают наиболее благоприятные условия для диффузии из-за вертикального направления магнитных силовых линий. Содержание гелия и других химических элементов меняется по мере эволюционного увеличения радиуса и снижения температуры. Условия, при которых гелий наиболее эффективно погружается в атмосферу, улучшаются при низких температурах, так как ветер, выдувающий гелий наружу, ослабевает [55].

Опубликованы две работы, посвященные магнитным CP-звездам ГП. В первой из них [54] рассмотрена история исследований звездного магнетизма и различные методы определения магнитных полей, проведено сравнение этих методов. Разработанные в нашей обсерватории методы наблюдений и анализа магнитных полей звезд дают результаты, которые совпадают с международными стандартами. Получаемые по наблюдениям на БТА результаты на протяжении четверти века сохраняют стабильное качество. Во второй работе [50] проведен обзор основных физических параметров (температура, масса, светимость, переменность, двойственность, частота встречаемости, принадлежность к скоплениям и др.), рассмотрены методы анализа химического состава и моделирования атмосфер CP-звезд.

2008–2012: магнетизм массивных звезд и белых карликов, магнитное картирование и анализ химического состава CP-звезд, двойственность.

Продолжалась работа по поиску магнитных CP-звезд. Наблюдения с широкоформатным ПЗС-детектором позволили расширить спектральный диапазон и включить для анализа водородные линии. Наш наблюдательный материал позволяет выполнять измерения как V-параметра Стокса в крыльях линии водорода (по аналогии с наблюдениями на водородных магнитометрах), так и зеемановского сдвига (по аналогии с линиями металлов). Для 26 из 30 наблюдавшихся звезд обнаружено, что величина продольной компоненты поля, измеренная по линии водорода H β , существенно меньше величины поля, измеренной по линиям металлов. Эффект трудно объяснить – возможно наблюдается радиальный градиент магнитного поля в атмосферах магнитных звезд [56].

На основании наблюдений на БТА и опубликованных данных проведен сравнительный анализ магнитных полей и параметров вращения магнитных CP-звезд с сильными и слабыми аномалиями (в частности, депрессией на 5200 Å) в распределении энергии в континууме. Депрессию с глубиной более 0.^m035 мы считали большой. Обнаружено, что звезды, имеющие сильную депрессию на 5200 Å, обладают в среднем в два раза более интенсивными полями, чем объекты со слабой депрессией. Звезды с сильными аномалиями чаще встречаются среди медленных ротаторов. В среднем, периоды их вращения имеют величину 10^d, что в три раза больше периодов звезд со слабыми депрессиями (в среднем 3^d). Статистическая достоверность различий превышает 6 σ . Это указывает на то, что степень аномальности непрерывного спектра магнитных звезд уменьшается с ростом скорости их вращения [57].

По нашим измерениям и публикациям составлен каталог магнитных CP-звезд из 326 объектов с достоверно обнаруженными магнитными полями и 29 – с большой вероятностью имеющих магнитное поле. Информация о магнетизме подавляющего числа звезд получена из анализа продольной компоненты поля V_e . Поверхностное магнитное поле V_s измерено лишь у 49 объектов. Обнаружено, что количество магнитных CP-звезд убывает с увеличением поля по экспоненте, так звезды, у которых

B_e превышает 5 кГс, встречаются редко (3% объектов из нашего списка). У 90% магнитных звезд величина поля на поверхности B_s не превышает 10 кГс. Видимо, на уровне нескольких десятков кГс и проходит граница, где более сильные крупномасштабные поля в атмосферах звезд ГП существовать не могут [58].

В результате фотометрического, спектрального и магнитного мониторинга на интервале в 31 год уникальной магнитной звезды с полем сложной структуры HD 37776, выполненном на разных телескопах (в т.ч. на БТА), обнаружено увеличение периода осевого вращения на 17.7 ± 0.7 с или $dP/P = 4.0 \times 10^{-6}$ в год. Увеличение периода вращения звезды наиболее реалистично объясняется тем, что наблюдается магнитное торможение (по крайней мере, ее поверхностных слоев) вследствие потери углового момента из-за звездного ветра, контролируемого магнитным полем. Ранее магнитное торможение во время пребывания CP-звезды на ГП не отмечалось. Отметим, что HD 37776 не является стандартной магнитной звездой: она молодая (возраст не более 1 млн лет), окружена туманностью (в спектре наблюдаются эмиссии, непрерывный спектр линейно поляризован), имеет уникально сильное магнитное поле [59].

Начата новая программа по исследованию магнитных полей горячих звезд. Так как стандартные индикаторы поля – депрессии континуума – у горячих звезд отсутствуют, то мы отбирали кандидатов по наличию аномалий в содержании гелия. По опубликованным данным создана выборка из 360 кандидатов, и проведены наблюдения (БТА) для 40 звезд. Магнитное поле обнаружено у 8 объектов, в т.ч. с большой величиной продольного поля (до 6кГс в экстремуме). Магнитная звезда HD 35298 детально исследовалась с фазой периода вращения. Сложные профили линий свидетельствуют о сложной структуре ее поля [60–61].

Проведены комплексные исследования CP-звезды HD 45583, которые показали необычную переменность продольной компоненты магнитного поля, а именно: вторичный минимум. Период спектральной и магнитной переменности совпадает с периодом вращения $1.^d177$. Удовлетворительную модель ее магнитного поля построить не удалось, поскольку измеренная по зеемановским сдвигам величина продольной компоненты находится в противоречии с оценкой поверхностного поля, которое получено из анализа профилей линий. Химический состав звезды характеризуется дефицитом гелия и значительным избытком хрома, железа и кремния [62].

Совместно с сотрудниками группы методов астрономии высокого разрешения начаты работы по поиску двойных магнитных звезд. В декабре 2009 г. с пространственным разрешением около $0.''02$ в визуальной области проведены спекл-интерферометрические наблюдения выборки из 117 CP-звезд, обладающих глобальными магнитными полями, с целью поиска у них спутников. Разрешено на компоненты 29 звезд, причем 14 из них разрешены впервые: HD 965, HD 5797, HD 8855, HD 10783, HD 16605, HD 21699, HD 35502, HD 51418, HD 64486, HD 79158, HD 103498, HD 108651, HD 213918, HD 293764. В 12 случаях спутник оказался на $2^m - 4^m$ слабее главного компонента – магнитной звезды. Исключение составляют молодые горячие Vp-звезды HD 35502 и HD 213918, спутники которых слабее примерно на 1^m . Во всех случаях расстояние от звезды до спутника в момент наблюдений в картинной плоскости превышает 10^9 км [63].

Методом «магнитных зарядов» исследована структура магнитного поля ряда звезд. Вид фазовой зависимости магнитного поля у HD 32633 отличается от синусоидальной. Структура поля хорошо описывается двумя диполями, расположенными в противоположных частях звезды вблизи экватора вращения. Они создают по две пары близко расположенных магнитных пятен разного знака, подобных солнечным. Диполи

расположены на расстоянии $d_a=0.6$ радиуса звезды от центра. Величина поля на полюсах равна 42 и 10 кГс. Для HD 45583 наблюдения хорошо описываются конфигурацией из двух магнитных диполей, расположенных на противоположных сторонах относительно центра звезды, причем их оси имеют радиальное направление. Положительные «монополи» оказываются ближе к поверхности, а отрицательные - ближе к центру. По этой причине на поверхности звезды оказываются два положительных магнитных полюса и отсутствуют полюса отрицательного знака. Звезды HD 18296, HD 19832, HD 22470, HD 24712, HD 11503, HD 12098, HD 12447, HD 14437, HD 34452, HD 40312, HD 178892 имеют структуру поля, близкую к центральному диполю [64–66].

По спектрам звезды HD 21699, полученным в разных фазах периода вращения, исследовано распределение химических элементов He и Si по поверхности. Гелий по всей поверхности ослаблен, но в области магнитных полюсов он сильнее из-за влияния ветра. Как и следует из теории, кремний скапливается в области с горизонтальным расположением магнитных силовых линий. Содержание гелия и кремния увеличивается с глубиной, причем эта граница практически не изменяется с фазой периода вращения. Учет стратификации химических элементов заметно искажает модельное распределение температуры с глубиной, а также форму профилей линий водорода [67].

Начат поиск фотометрической переменности у изолированных магнитных белых карликов с целью обнаружения локальных магнитных структур с более сильными полями, чем общее поле белого карлика. Для одного карлика найдена магнитная структура, которая имеет вид гигантской силовой магнитной трубки, выходящей на поверхность звезды и покрывающей более 10% ее поверхности. Ранее найденная фотометрическая переменность этой звезды связана с тем, что в области формирования трубки температура на 30% ниже, чем в окружающих ее областях [68].

2013–2016: магнитные звезд в ассоциации Орион OB1, магнитные белые карлики и экзопланеты. Начата программа по исследованию магнитных звезд в группировках разного возраста. Изучалась ассоциация Орион OB1, где 85 из 814 объектов оказались CP-звездами разных типов. Найдено, что доля CP-звезд уменьшается с возрастом для разных подгрупп звездного населения ассоциации: от 15.1% в самой молодой подгруппе до 7.7% в самой старой. Из химически пекулярных звезд 59 относятся к Vp-звездам, составляя 13.4% от общего количества V-звезд ассоциации. Магнитные звезды имеют выраженную тенденцию концентрироваться в центральной части ассоциации в области «пояса» Ориона. Не обнаружено значимых различий в величине поля магнитных V-звезд ассоциации и Vp-звезд поля в целом, однако отмечено, что магнитное поле звезд с усиленными линиями гелия (He-rich) больше, чем звезд с ослабленными линиями гелия (He-wk) [69].

Проведены наблюдения (БТА) всех 59 Vp-звезд ассоциации Орион OB1. Всего в ней найдено 33 магнитных Vp-звезды, для 18 из которых наличие магнитного поля было подтверждено. Поле у 15 звезд измерено впервые. Наблюдения наиболее интересных объектов с фазой периода продолжаются. Одна из них, HD 34736, показала уникальные характеристики: звезда является двойной с орбитальным периодом 83^d , а продольный компонент магнитного поля меняется с периодом $1^d.29$ и амплитудой 5 кГс. Магнитным полем обладает главный компонент, спутник находится на достаточно близком расстоянии, сравнимом с диаметром звезд. В спектре были найдены линии второго компонента. Моделирование спектров позволило оценить эффективную

температуру главной звезды (13700 К) и ее спутника (11500 К) и их проекции скоростей вращения на луч зрения $v \sin i = 73$ км/с и >90 км/с, соответственно [70].

В 2000–2015 гг. получено более 30 спектров с зеемановским анализатором круговой поляризации для CP-звезды HD 965. В положительном экстремуме величина ее продольного поля достигает +600 Гс, а в отрицательном уходит ниже до –1300 Гс. Период переменности продольного поля (период вращения звезды) превышает 15 лет. Таким образом, HD 965 входит в пятерку самых медленных ротаторов среди магнитных звезд. Получено важное доказательство отсутствия генерации поля во время жизни звезды на ГП [71].

В результате наблюдений, выполненных в САО РАН (БТА), СФНТ (телескоп 3.6 м), обсерваториях Китт-Пик и От-Прованс, обнаружено, что CP-звезда HD 18078 является медленным ротатором с периодом вращения в 1358^d и необычной структурой магнитного поля в виде диполя с осью вне центра звезды. Звезда входит в пятерку звезд с периодом вращения $>1000^d$. Для нее точно определен период и построена фазовая кривая переменности продольного поля. Сильная ангармоничность магнитной кривой, а также сдвиг между его экстремумами продольного и поверхностного полей указывают на необычную конфигурацию магнитного поля звезды [72].

Ю.В. Глаголевским с помощью авторской методики проведено моделирование магнитных полей CP-звезд. Общее число звезд, для которых построены такие модели, достигло 100. На основе собственных и опубликованных данных разработан сценарий происхождения и эволюции магнитных звезд. Различие между нормальными и магнитными звездами состоит в разных скоростях вращения. Магнитные особенности у звезд формируются до фазы Хаяши. В этот же период протозвездные облака тормозятся магнитным полем, и одновременно выделяются звезды с преимущественной ориентацией магнитных диполей. Нормальные звезды отделяются вследствие их быстрого вращения и возникающего дифференциального вращения, которое закручивает поле в ненаблюдаемую тороидальную форму [73].

Часовые наблюдения (БТА и СФНТ) параметров Стокса I и V у белого карлика 40 Eri B позволили получить точность измерения магнитного поля в 85 Гс, ранее недостижимую. Удалось установить лишь верхний предел на величину магнитного поля этого объекта, он не превышает 250 Гс [74].

Получена серия из нескольких десятков спектров умеренного спектрального разрешения HD 189733 – родительской звезды экзопланеты HD 189733b. Спектры имеют высокое отношение сигнал/шум (~ 700) и покрывают значительную долю орбитального периода планеты. Исследование динамических спектров с характерным значением 5×10^{-4} в качестве предела детектирования не выявило явных следов присутствия света родительской звезды, отраженного от планеты [75].

ПЕРСПЕКТИВЫ

Прогресс в исследованиях звездного магнетизма зависят от развития инструментальной базы. Конечно, важно продолжать регулярные наблюдения объектов, что дает много полезной информации об их физических свойствах. Но знания, кардинально меняющие наши представления, можно получить только на новых крупных телескопах. В следующем десятилетии будут построены телескопы-интерферометры с базой в несколько километров, позволяющие в оптическом диапазоне разрешать диски магнитных CP-звезд и регистрировать неоднородности на их поверхности. Магнитные и химические карты, полученные

методами доплер-зеemanовского картирования по спектральным линиям, можно будет проверить по прямым изображениями.

Высокостабильные спектрополяриметры высокого разрешения на крупных телескопах позволят систематически изучать магнитные поля с точностью ~ 1 Гс, что предоставит возможность исследовать яркие звезды всех типов на наличие у них магнитного поля. Это даст целостную картину проявлений звездного магнетизма в Галактике, а в некоторых случаях и за ее пределами. Строящийся волоконный спектрополяриметр для БТА позволит значительно расширить наблюдательные возможности.

Начинает развиваться новое научное направление – поиск экзопланет у магнитных звезд. В основе этих исследований лежат заманчивые идеи, которые связаны с поисками внеземной жизни.

Более близкая перспектива – массовые изучения магнитных звезд в скоплениях разного возраста для понимания их эволюции. Точность измерений лучше 10 Гс будет достигнута во многих обсерваториях, что позволит резко расширить класс объектов, у которых измеряются магнитные поля. На наш взгляд, основное внимание будет уделено двойным и кратным магнитным звездам с целью исследования связей между магнетизмом и двойственностью.

Хроники лаборатории 1968–2016 гг.

3 июня 1966 г. Создана Специальная астрофизическая обсерватория АН СССР.

1968 г. Директор обсерватории И.М. Копылов пригласил на работу из Алма-атинской обсерватории к.ф.-м.н. Ю.В. Глаголевского, который возглавил вновь созданную рабочую группу «Магнитные звезды». Первыми ее сотрудниками стали старшие научные сотрудники – к.ф.-м.н. К.И. Козлова, к.ф.-м.н. Р.Н. Кумайгородская и младший научный сотрудник Н.М. Чунакова.

1968–1972 гг. Для исследований химического состава и параметров атмосфер магнитных звезд, которые вела группа, нужны были высокодисперсионные спектры. Их получали в КраО на ЗТШ и на 2-м телескопе обсерватории в Шемахе.

Основной задачей было создание приборов для измерения магнитных полей звезд на 6-м телескопе. В 1971 г. в лабораторию астроприборостроения (ЛАСП) был принят выпускник и аспирант МФТИ Г.А. Чунтонов, который совместно с Ю.В. Глаголевским приступил к разработке приборов для измерений магнитных полей звезд.

В 1969–1972 гг. в тесном сотрудничестве с группой работал м.н.с. В.В. Леушин, сначала аспирант, а затем сотрудник группы И.М. Копылова.

Ю.В. Глаголевский и К.И. Козлова активно занимались подготовкой кадров для обсерватории. Некоторые их ученики впоследствии стали известными астрономами. Так, Ю.В. Глаголевский руководил дипломной работой В.Л. Афанасьева (ныне д.ф.-м.н., профессор), читал лекции в Ростовском университете В.Г. Клочковой (ныне д.ф.-м.н., профессор), а К.И. Козлова вела практические занятия по спектроскопии.

1973–1977 гг. Заработал первый телескоп Цейсс-600, который был оборудован фотоэлектрическим фотометром. С его помощью Н.М. Чунакова изучала переменность блеска магнитных звезд. Сотрудники группы продолжали обработку наблюдательного материала, полученного в КраО. Р.Н. Кумайгородская изучала переменность водородных линий.

Велась подготовка к наблюдениям на крупнейшем в мире телескопе. Ю.В. Глаголевский, Г.А. Чунтонов и И.Д. Найденов, поступивший на работу в 1974 г. инженером, изготовили анализаторы круговой поляризации для ОЗСП. Проводилась разработка и изготовление фотоэлектрического звездного магнитометра с интерферометром Фабри-Перо. В этом активно участвовали Г.А. Чунтонов и сотрудники других подразделений - В.П. Рядченко, А.Н. Борисенко, С.В. Драбек и др.



Рис. 109. Первые сотрудники группы исследования магнитных звезд (1968 г.). Слева – с.н.с., к.ф.-м.н. К.И. Козлова, справа – с.н.с., к.ф.-м.н. Р.Н. Кумайгородская.

Первые плановые наблюдения с анализатором круговой поляризации были выполнены на телескопа БТА 5 января 1977 г. Ю.В. Глаголевским и И.И. Романюком, что положило начало систематическим измерениям магнитных полей звезд на на первой и второй камерах камер ОЗСП. В качестве светоприемника использовались фотографические пластинки. Ю.Ф. Антроповым была изготовлена осциллокопическая приставка, позволяющая совмещать прямые и инвертированные изображения линии, что позволило с высокой точностью определять ее положение. Основную часть измерений зеемановских спектров выполнял И.И. Романюк. Ю.В. Глаголевский, Г.А. Чунтонов, И.Д. Найденов и И.И. Романюк провели работы, связанные с исследованием инструментальной поляризации ОЗСП.

Изменения в группе: В 1973 г. Ю.В. Глаголевский был назначен научным секретарем САО и исполнял эти обязанности 10 лет, продолжая оставаться руководителем группы ГИЗМ. В 1973 г. был принят В.С. Лебедев (м.н.с.), в 1975 г. – И.И. Романюк (ст. лаборант), в 1977 г. – В.Д. Бычков.

1978–1982 гг. Велась регулярные наблюдения на БТА, выполнялись программы, поддержанные Комитетом по тематике шестиметрового телескопа.

В 1978 г. выполнены первые наблюдения на фотоэлектрическом магнитометре с интерферометром Фабри-Перо. Наблюдения с зеемановским анализатором выполнялись в штатном режиме: получено несколько сотен фотографических

зеemanовских спектров. В этот же период В.Г. Штоль провел полную модернизацию спектрофотометра, снабдив его поляриметрическим блоком.

В 1979 г. сдан новый лабораторный корпус, и сотрудники получили просторные кабинеты.

В 1980 г. группа провела международное совещание «Магнитные звезды», где 50 участников, включая астрономов из шести социалистических стран, представили более 60 докладов, тезисы которых были изданы в журнале «Сообщения САО» [76].

В 1980 г. водородный магнитометр был установлен в первичном фокусе БТА, с 1982 по 1996 гг. он входил в число основных штатных приборов. Наблюдения на нем проводили В.Г. Штоль, И.И. Романюк и В.Д. Бычков.

В 1984 г. Г.А. Чунтонов защитил кандидатскую диссертацию по результатам работ, связанных с созданием магнитометра с интерферометром Фабри-Перо.

Изменения в группе: И.И. Романюк – м.н.с. (1979 г.); К.И. Козлова вышла на пенсию (1980 г.), Р.Н. Кумайгородская перешла в другое подразделение; И.Д. Найденев перешел в группу исследований звездного магнетизма из лаборатории астроприборостроения.

1983–1987 гг. В стране началась перестройка. Директором обсерватории в 1985 г. был назначен В.Л. Афанасьев.

В 1986 г. И.И. Романюк защитил кандидатскую диссертацию «Исследования проявлений тонкой структуры магнитного поля в спектрах химически пекулярных звезд» (рук. Ю.В. Глаголевский).

В сентябре 1987 г. группа организовала и провела международную конференцию «Магнитные звезды», где участвовало более 50 человек из пяти стран. Участники конференции выступили более чем с 50 устными и стендовыми докладами, которые были опубликованы в сборнике трудов [77].

Изменения в группе: В.Г. Елькин принят старшим лаборантом (1984 г.); В.С. Лебедев перешел в другое подразделение; Н.М. Чунакова уволилась из САО (1985 г.); И.И. Романюк – н.с. (1986 г.).

1988–1992 гг. Развал Советского Союза и процессы, связанные с этим, повлекли за собой сокращение финансирования фундаментальной науки. Была образована Российская академия наук. Указанный период знаменует собой конец «фотографической эры» на БТА. Появились первые персональные компьютеры.

В 1991 г. лаборатория организовала III Международную конференцию «Магнитные звезды». В ее работе приняли участие около 40 человек из восьми стран мира. На конференции было представлено около 50 устных и постерных докладов. Материалы опубликованы в виде сборника докладов [78].

В 1989 г. Ю.В. Глаголевский защитил докторскую диссертацию «Проблемы происхождения и эволюции магнитных полей химически пекулярных звезд».

В 1992 г. В.Д. Бычков защитил кандидатскую диссертацию «Проблемы ориентации и структуры магнитных полей звезд» (рук. Ю.В. Глаголевский).

Изменения в группе: В 1988 г. старшим лаборантом принята Ф.Г. Копылова; И.И. Романюк – с.н.с. (1989 г.); В.Г. Елькин – м.н.с. (1989 г.); в 1991 г. группа преобразована в лабораторию исследований звездного магнетизма под руководством Ю.В. Глаголевского. В состав ЛИЗМ вошли д.ф.-м.н., с.н.с. Н.Ф. Войханская и н.с. Т.А. Карташева. В 1991 г. В.Д. Бычков ушел в другое подразделение.

1993–1997 гг. Происходил переход от наблюдений с водородным магнитометром к наблюдениям с зеемановским анализатором и ПЗС-приемником (октябрь 1994 г.) на ОЗСП.

В 1993 г. директором обсерватории был избран Ю.Ю. Балега. Работа лаборатории стала активно поддерживаться администрацией обсерватории, появились гранты РФФИ и других фондов.

В мае 1996 г. лаборатория провела IV Международную конференцию «Магнитные звезды», в которой приняли участие 40 человек из семи стран мира. Это была первая конференция после развала СССР. 45 устных и стендовых докладов были опубликованы в сборнике [79].

С мая по ноябрь 1995 г. И.И. Романюк работал в качестве приглашенного сотрудника в университете Западного Онтарио (Канада).



Рис. 110. Слева – Ф.Г. Копылова, в 1988 г. старший лаборант ГИЗМ; справа – К.И. Козлова.

Изменения в лаборатории: С 1993 г. И.И. Романюк, продолжая работы в лаборатории, приступил к исполнению обязанностей ученого секретаря КТШТ. В лабораторию вернулся н.с. Г.А. Чунтонов (1993 г.); И.Д. Найденов перешел в другое подразделение (1996 г.). В сентябре 1996 г. появился студент-практикант Д.О. Кудрявцев, который в 1997 г. был принят в аспирантуру (рук. И.И. Романюк).

1998–2002 гг. В 1999 г. водородный магнитометр исключен из списка штатных приборов БТА в связи с изношенностью прибора, отсутствием запасных частей и уходом В.Г. Штоля на пенсию. С 2000 г. измерения магнитных полей звезд выполняются по спектрам, полученным на ПЗС-приемниках.

В сентябре 1999 г. лаборатория провела V Международную конференцию «Магнитные звезды». В работе приняло участие 40 астрономов из 8 стран мира. 55 докладов опубликованы в сборнике работ конференции [80].

В 1999 г. В.Г. Елькин защитил кандидатскую диссертацию «Исследование магнитных полей некоторых типов звезд с химическими аномалиями» (рук. Ю.В. Глаголевский).

В 2002 г. Д.О. Кудрявцев защитил кандидатскую диссертацию «Поиск и исследование магнитных полей различной конфигурации у химически пекулярных звезд» (рук. И.И. Романюк).

Изменения в лаборатории: В.Г. Елькин – н.с. (2000 г.); после окончания аспирантуры в 2002 г. Д.О. Кудрявцев был принят м.н.с. В 2002 г. В.Г. Елькин уволился из САО РАН и переехал в Великобританию.

2003–2007 гг. В августе 2006 г. группа организовала VI Международное совещание «Магнитные звезды». В совещании приняли участие более 40 человек из Канады, Австрии, Чехии, Швеции, Германии, Южной Кореи, Украины и разных научных учреждений России. 50 устных и стендовых докладов опубликованы в сборнике материалов конференции [81].

В 2004 г. И.И. Романюк защитил докторскую диссертацию «Магнитные поля химически пекулярных звезд главной последовательности».

В 2003 г. И.И. Романюк, В.Г. Елькин и Д.О. Кудрявцев получили премию им. И.М. Копылова за цикл работ по поиску новых магнитных звезд.

Изменения в группе: В 2003 г. в связи со структурными преобразованиями в обсерватории лаборатория была преобразована в группу по руководством с.н.с. И.И. Романюка в составе отдела физики звезд; Ю.В. Глаголевский – г.н.с. В группу были приняты с.н.с., к.ф.-м.н. Т.А. Сомова и с.н.с., к.ф.-м.н. Н.Н. Сомов. Они пришли со своей тематикой – магнитные катаклизмические переменные. В 2006 г. оба уволились из обсерватории и уехали в США. В 2003 г. Н.Ф. Войханская и Т.А. Карташева вышли на пенсию. В 2004 г. в аспирантуру был принят Е.А. Семенко (рук. И.И. Романюк). В 2004 г. Д.О. Кудрявцев – н.с.; в 2005 г. И.И. Романюк – в.н.с.; в 2007 г. Д.О. Кудрявцев – с.н.с.

2008–2012 гг. В 2009 г. Е.А. Семенко защитил кандидатскую диссертацию «Исследование физических параметров и кинематики выборки новых магнитных химически пекулярных звезд» (рук. И.И. Романюк).

В августе 2010 г. лаборатория провела VIII Международную конференцию «Магнитные звезды». В ней приняли участие 50 астрономов из восьми стран мира. Материалы конференции опубликованы в сборнике [82].

Изменения в лаборатории: Е.А. Семенко – м.н.с. (2008 г.); И.А. Якунин принят в аспирантуру обсерватории (2009 г.); Е.А. Семенко – н.с. (2010 г.). В 2011 г. группа была вновь преобразована в лабораторию под руководством д.ф.-м.н. И.И. Романюка. В 2012 г. в лабораторию перешли с.н.с., к.ф.-м.н. Г.Г. Валявин, м.н.с., к.ф.-м.н. Т.Е. Бурлакова и инженер А.Н. Саркисян. Расширена научная тематика лаборатории, включена новая тема «Магнитные белые карлики».

2013–2016 гг. Лаборатория организовала и провела в августе 2014 г. IX Международную конференцию «Physics and Evolution of Magnetic and Related Stars». В конференции участвовали 60 астрономов из девяти стран мира. 40 докладов опубликованы в виде материалов конференции в журнале ASP Conference Series [83].

В 2014 г. обсерватория получила большой грант РФФИ (14-50-0043). Два направления из трех в этом гранте («Экзопланеты» и «Магнитометрия звезд»)

обеспечиваются сотрудниками лаборатории. Работы лаборатории поддержаны еще 2 грантами РФФИ, руководителями которых являются И.И. Романюк и Г.Г. Валявин.

В 2014 г. И.А. Якунин защитил кандидатскую диссертацию «Поиск и исследование магнитных Вр-звезд главной последовательности» (рук. И.И. Романюк).

В конце 2015 г. Ю.Ю. Балега завершил свою деятельность на посту директора и был назначен научным руководителем обсерватории. Новым директором САО РАН коллектив избрал В.В. Власюка.

Изменения в лаборатории: В 2013 г. в аспирантуру поступил Д.Р. Гадельшин (рук. Г.Г. Валявин), в 2014 г. – А.В. Моисеева (рук. И.И. Романюк), в 2015 г. – А.О. Граужанина (рук. Г.Г. Валявин). И.А. Якунин – м.н.с. (2012 г.); Е.А. Семенко – с.н.с. (2013 г.); в 2015 г. И.А. Якунин – н.с. и по совместительству зав. редакционной группой; Д.О. Кудрявцев – заместитель директора обсерватории по научной работе (2015 г.).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В течение почти 50 лет сотрудники ЛИЗМ создавали научную аппаратуру, принимали активное участие в наблюдениях на БТА и других телескопах, проводили теоретические исследования. Магнитные измерения на БТА охватывают три периода:

- 1) фотографический (1977–1991 гг.),
- 2) фотоэлектрический (1987–1995 гг.),
- 3) твердотельные светоприемные устройства (с 1994 г. по настоящее время).

Методика измерений и обработки данных менялась кардинальным образом. Однако мы сохранили систему магнитных измерений на БТА, которая совпадает с международной.

Научная работа в лаборатории проводится на высоком уровне, в кооперации с международным сообществом, результаты исследований печатаются в ведущих мировых и отечественных журналах. В последнее время ежегодно мы публикуем более 20 статей. За 50 лет работы сотрудниками было опубликовано более 500 работ, из них около 100 в ведущих изданиях мира.

Начиная с 1997 г. научные исследования лаборатории неизменно поддерживались грантами Российского фонда фундаментальных исследований, а в последнее десятилетие – также грантами фонда Президента РФ, проектами Минобрнауки по поддержке научных школ. Среди прочего, это финансирование позволило сотрудникам лаборатории принять участие во многих международных и российских астрономических конференциях.

Лаборатория организовала и провела в обсерватории девять международных конференций (<http://www.sao.ru/hq/lizm/conferences/en/history.html>), посвященных исследованию магнитных звезд [76–82].

Сотрудники ЛИЗМ принимают участие в работе различных международных организаций, Ю.В. Глаголевский, И.И. Романюк и Д.О. Кудрявцев являются членами Международного астрономического союза (МАС), И.И. Романюк избран членом оргкомитета рабочей группы МАС «Physics of Ap and related stars» (2014–2016 гг.).

Были защищены 2 докторские диссертации: Ю.В. Глаголевский (1988 г.), И.И. Романюк (2004 г.); 8 кандидатских: Г.А. Чунтонов (1984 г.), И.И. Романюк (1986 г.), И.Д. Найденов (1987 г.), В.Д. Бычков (1992 г.), В.Г. Елькин (1999 г.), Д.О. Кудрявцев (2002 г.), Е.А. Семенко (2009 г.), И.А. Якунин (2014 г.).

Ю.В. Глаголевский в течение 10 лет (1974–1984 гг.) был ученым секретарем САО АН СССР, И.И. Романюк 23 года (1993–2015 гг.) исполнял обязанности ученого секретаря КТШТ/КТБТ, с конца 2015 г. Д.О. Кудрявцев – заместитель директора САО РАН по научной работе.

Ю.В. Глаголевский и И.И. Романюк в течение многих лет являются членами ученого совета САО и членами диссертационного совета обсерватории. Ю.В. Глаголевский, И.И. Романюк и Д.О. Кудрявцев многократно назначались оппонентами при защитах диссертаций.

И.И. Романюк с 2006 г. – заместитель главного редактора журнала «Астрофизический бюллетень», переводимого на английский язык и распространяемого по подписке компанией Pleiades Publishing издательского дома Springer. Д.О. Кудрявцев с 2012 по 2015 гг. исполнял обязанности руководителя редакционно-издательской группой и научного редактора английской версии журнала.

С 2008 г. Е.А. Семенко – секретарь технического совета САО РАН.

Производственную практику в лаборатории проходило около 50 студентов из разных ВУЗов.

Лаборатория встречает 50-летие Специальной астрофизической обсерватории с энергичным желанием достичь новых успехов в исследованиях космического магнетизма.

ПУБЛИКАЦИИ

- [1] Специальная астрофизическая обсерватория РАН: 40 лет: Юбилейный сб./Отв. ред. Ю.Ю. Балега - Нижний Архыз, 2006, 464 стр.
- [2] Глаголевский Ю.В., Леушин В.В., Козлова К.И., Чунакова Н.М., АЖ 48, 942 (1971).
- [3] Карташева Т.А., Снежко Л.И., Халиуллин Х.Ф., Чунакова Н.М., Сообщ. САО 13, 5 (1975).
- [4] Vuchkov V.D., et al., Soobshch. SAO. 32, 33 (1981).
- [5] Глаголевский Ю.В., Найденов И.Д., Романюк И.И. и др., Сообщ. САО 23, 61(1978).
- [6] Глаголевский Ю.В., Рылов В.С., Щеглов П.В., Чунтонов Г.А., в сб. «Новая техника в астрономии», том 5, 7 (1975).
- [7] Глаголевский Ю.В., Козлова К.И., Копылов И.М. и др., ПАЖ 3, 500 (1977).
- [8] Глаголевский Ю.В., Чунтонов Г.А., Найденов И.Д. и др., Сообщ. САО 25, 5 (1979).
- [9] Глаголевский Ю.В., Козлова К.И., Полосухина Н.С., Астрофизика 10, 517 (1974).
- [10] Штоль В.Г., Бычков В.Д., Викульев Н.А. и др., Астрофиз. исслед. 19, 66 (1985).
- [11] Glagolevskij Yu.V., Elkin V.G., Romanyuk I.I., Shtol V.G., In: «Magnetic Stars», Proc. of Conf. (eds: Yu.V. Glagolevskij and I.M. Kopylov), Nizhny Arkhys, p.22 (1988).
- [12] Глаголевский Ю.В., Романюк И.И., Бычков В.Д., Лебедев В.С., Астрофиз. исслед. 18, 26 (1985).
- [13] Романюк И.И., Письма в АЖ 10, 443 (1984).
- [14] Глаголевский Ю.В., Бычков В.Д., Илиев И.Х. и др., Астрофиз. исслед. 15, 12 (1983).
- [15] Глаголевский Ю.В., Романюк И.И., Штоль В.Г., Бычков В.Д., Астрофиз. исслед. 13, 12 (1981).
- [16] Глаголевский Ю.В., Козлова К.И., Кумайгородская Р.Н. и др., Астрофиз. исслед. 13, 3 (1981).
- [17] Глаголевский Ю.В., Бычков В.Д., Илиев И.Х. и др., ПАЖ 8, 26 (1982).
- [18] Глаголевский Ю.В., Бычков В.Д., Романюк И.И., Чунакова Н.М., Астрофиз. исслед. 19, 28 (1985).
- [19] Глаголевский Ю.В., Романюк И.И., Бычков В.Д., Найденов И.Д., ПАЖ 11, 107 (1985).
- [20] Романюк И.И., Астрофиз. исслед. 22, 25 (1986).
- [21] Глаголевский Ю.В., Клочкова В.Г., Копылов И.М., Астрон. ж. 64, 360 (1987).
- [22] Глаголевский Ю.В., Сообщ. САО 54, 73 (1987).

- [23] Глаголевский Ю.В., Чунакова Н.М., *Астрофиз. исслед.* 22, 35 (1987).
- [24] Романюк И.И., *Астрофиз. исслед.* 18, 37 (1984).
- [25] Glagolevskij Yu.V., *Bulletin of SAO* 38, 152 (1994).
- [26] Бычков В.Д., Глаголевский Ю.В., Елькин В.Г. и др., *Bulletin of SAO* 30, 75 (1990).
- [27] Iliev I.Kh, Barzova I.S., Glagolevskij Yu.V. et al., In «Magnetic stars», *Conf. Proc.*, eds: I.M. Kopylov and Yu.V. Glagolevskij, Leningrad, Nauka, p.32 (1988).
- [28] Romanyuk I.I., Elkin V.G. Shtol V.G., 1992, In «Stellar magnetism», *Conf. Proc.*, eds: Yu.V. Glagolevskij and I.I. Romanyuk, S.Petersburg, 57 (1992).
- [29] Глаголевский Ю.В., Копылова Ф.Г., Любимков Л.С., *Астрофизика* 33, 363 (1990).
- [30] Gerth E., Scholz G., Glagolevskij Yu.V., Romanyuk I.I., *Astron. Nachr.* 312, 107 (1991).
- [31] Глаголевский Ю.В., Романюк И.И., Елькин В.Г. Штоль В.Г., *Письма в АЖ* 21, 190 (1995).
- [32] Romanyuk I.I., Elkin V.G., Wade G.A. et al., *IAUS* 176, 153 (1995).
- [33] Wade G.A., Elkin V.G., Landstreet J.D., et al., *Astron. Astrophys.* 313, 209 (1996).
- [34] Wade G.A., Bohlender D.A., Brown D.N. et al, *Astron. Astrophys.* 320, 172 (1997).
- [35] Wade G.A., Landstreet J.D., Elkin V.G., Romanyuk I.I., *MNRAS* 292, 748 (1997).
- [36] Gerth E., Glagolevskij Yu.V. Scholz G., *Scalinate Pleso Contr.* 27, 455 (1998).
- [37] Panchuk V.E., Romanyuk I.I., Kudryavtsev D.O., 2000, In: *Magnetic Fields of CP and related stars*, eds: Yu.V. Glagolevskij and I.I. Romanyuk, Moscow, 51 (2000).
- [38] Wade G.A., Kudryavtsev D.O., Romanyuk I.I. et al., *Astron. & Astrophys* 355, 1080 (2000).
- [39] Елькин В.Г., Кудрявцев Д.О., Романюк И.И., *Письма в АЖ* т.28, 195 (2002).
- [40] Елькин В.Г., Кудрявцев Д.О., Романюк И.И., *Письма в АЖ* 29, 455 (2003).
- [41] Хохлова В.Л., Васильченко Д.В., Степанов В.В., Романюк И.И., *Письма в АЖ* 26, 217 (2000).
- [42] Romanyuk I.I., 2000, In: *Magnetic Fields of CP and related stars*, eds: Yu.V. Glagolevskij and I.I. Romanyuk, Moscow, 18 (2000).
- [43] Глаголевский Ю.В. и Чунтонов Г.А., *Астрофизика* 45, 408 (2002).
- [44] Glagolevskij, Yu.V., *Bull. SAO* 50, 70 (2000).
- [45] Gerth E., Glagolevskij, Yu.V., *ASPC* 248, 333 (2001).
- [46] Glagolevskij, Yu.V., Gerth E., *Astron. & Astrophys.* 382, 925 (2002).
- [47] Elkin V.G., *Scalinate Pleso Contr.* 27, 452 (1998).
- [48] Kudryavtsev D.O., Romanyuk I.I., Elkin V.G., Paunzen E., *MNRAS* 372, 1804 (2006).
- [49] Романюк И.И., Пanchuk В.Е., Пискунов Н.Е., Кудрявцев Д.О., *Астрофиз. бюлл.* 62, 32 (2007).
- [50] Романюк И.И., *Астрофиз. бюлл.* 62, 72 (2007).
- [51] Ryabchikova T.A., Kochukhov O.P., Kudryavtsev D.O., et al, *Astron. Astrophys.* 445, 47 (2006).
- [52] Kochukhov O.P., Piskunov N.E., Sachkov M.E. Kudryavtsev D.O., *Astron. Astrophys.* 439, 1093 (2006).
- [53] Романюк И.И., *Бюллетень САО* 58, 64 (2005).
- [54] Кудрявцев Д.О., Романюк И.И., Семенко Е.А., Соловьев Г.А., *Астрофиз. бюлл.* 62, 162 (2007).
- [55] Глаголевский Ю.В., Леушин В.В., Чунтонов Г.А., *Письма в АЖ* 30, 843 (2004).
- [56] Kudryavtsev D.O., Romanyuk I.I., *Astron. Nachr.* 331, 41 (2012).
- [57] Романюк И.И., Кудрявцев Д.О., Семенко Е.А., *Астрофиз. бюлл.* 64, 247 (2009).
- [58] Романюк И.И., Кудрявцев Д.О., *Астрофиз. бюлл.* 63, 136 (2008).
- [59] Mikulasek Z., Krtichka, J., Henry, G. W. et al., *Astron. Astrophys.* 485, 585 (2008).
- [60] Романюк И.И., Якунин И.А., *Астрофиз. бюлл.* 67, 186 (2012).
- [61] Якунин И.А., *Астрофиз. бюлл.* 68, 226 (2013).
- [62] Семенко Е.А., Кудрявцев Д.О., Рябчикова Т.А., Романюк И.И., *Астрофиз. бюлл.* 63, 136 (2008).
- [63] Балега Ю.Ю., Дьяченко В.В., Максимов А.Ф. и др., *Астрофиз. бюлл.* 67, 48 (2012).
- [64] Глаголевский Ю.В., Герт Э., *Астрофиз. бюлл.* 63, 259 (2008).
- [65] Глаголевский Ю.В., Герт Э., *Астрофизика* 52, 112 (2009).
- [66] Глаголевский Ю.В., Герт Э., *Астрофиз. бюлл.* 65, 164 (2010).
- [67] Shavrina A.V., Silvester J, Glagolevskij Yu.V., et al., *MNRAS* 401, 1882 (2010).
- [68] Valyavin G.G, Shulyak D., Wade G.A., *Nature* 515, 88 (2014).

- [69] Романюк И.И., Семенко Е.А., Якунин И.А. Кудрявцев Д.О., *Астрофиз. бюлл.* 68, 318 (2013).
- [70] Семенко Е.А., Романюк И.И., Кудрявцев Д.О., Якунин И.А., *Астрофиз. бюлл.* 69, 203 (2014).
- [71] Романюк И.И., Кудрявцев Д.О., Семенко Е.А., Якунин И.А., *Астрофиз. бюлл.* 70, 482 (2015).
- [72] Mathys G, Romanyuk I.I., Kudryavtsev D.O., et al., *Astron & Astrophys* 586A, 85 (2016).
- [73] Глаголевский Ю.В., *Астрофизика* 59, 191 (2016).
- [74] Landstreet J.D., Vagnulo S., Valyavin G.G et al., *Astron. & Astrophys* 580A. 120 (2015).
- [75] Валявин Г.Г., Граужанина А.О., Галазутдинов Г.А., и др., *Астрофиз. бюлл.* 70, 493 (2015).
- [76] Proc. Conf «Magnetic Stars» Soobshch. SAO, No.32 (1981).
- [77] Magnetic Stars, Proc. of an International Meeting: «Physics and Evolution of Stars», held in Nizhny Arkhyz, October 12-17, 1987. Edited by Yu. V. Glagolevsky. Leningrad: Nauka, p.321 (1988).
- [78] Proc. of an International Meeting «Physics and evolution of stars», held 30 September - 5 October 1991. Edited by Yu.V. Glagolevskij, & I.I. Romanyuk. ISBN 5-02-024744-8. Published by (Sankt Petersburg: NAUKA), Sankt-Petersburg branch (1992).
- [79] Magnetic Fields of Chemically Peculiar and Related Stars, Proc. of the International Meeting, held in SAO RAS, September 23 - 27, 1999, Moscow, Eds.: Yu.V. Glagolevskij, I.I. Romanyuk, p.274 (2000)
- [80] Physics of Magnetic Stars. Proc. of the International Conference, held in SAO RAS, August 28-31, 2006, Eds: I. I. Romanyuk and D. O. Kudryavtsev, p. 368 (2007).
- [81] Magnetic Stars. Proc. of the International Conference, held in SAO RAS, Aug. 27- Sep. 1, 2010, Eds: I. I. Romanyuk and D. O. Kudryavtsev, p. 486 (2011).
- [82] Physics and Evolution of Magnetic and Related Stars, ASP Vol. 494, Proc. of a conference held at SAO RAS, Nizhny Arkhyz, Russia, 25-31 August 2014. Edited by Yu.Yu. Balega, I.I. Romanyuk, and D. O. Kudryavtsev. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, p. 370 (2015).



Внегалактическая астрономия

Исследование галактик с полярными кольцами на БТА

Моисеев А.В.,

ведущий научный сотрудник ЛСФВО, д.ф.-м.н.; moisav@sao.ru

ВВЕДЕНИЕ

Галактики с полярными кольцами (ГПК) представляют собой интересный случай пекулярных систем, в которых наблюдаются внешние кольца или диски из газа, пыли и звезд, вращающиеся в плоскости примерно перпендикулярной к диску основной галактики. Образование ГПК вызвано неким внешним событием, принесшим вещество с иным орбитальным моментом: слиянием двух галактик с соответствующим направлением момента вращения, либо аккрецией хозяйской галактикой вещества спутника или газовых филаментов из межгалактической среды. В случае сплюснутого или трехосного гравитационного потенциала в полярной плоскости существуют устойчивые орбиты, поэтому захваченное вещество будет вращаться здесь достаточно долго (десятки оборотов). Если же плоскость орбиты заметно отличается от полярной, то образующееся кольцо относительно быстро прецессирует к плоскости галактики.

Детальное рассмотрение структуры и динамики ГПК позволяет не только уточнить роль внешних взаимодействий и слияний в эволюции галактик, но и изучить особенности распределения гравитационного потенциала на больших радиусах. Так как здесь наблюдается круговое вращение в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, то появляется возможность изучить трехмерное распределение массы в галактике, в том числе определить форму темного гало: сплюснутость, вытянутость, отклонения от осевой симметрии.

Первые наблюдательные подтверждения существования ортогонально вращающихся подсистем в нескольких близких галактиках (NGC 2685, NGC 4650A и т.д.) были получены еще в 70–80-х годах. Новый импульс эти исследования получили после выхода каталога PRC (Whitmore et al. 1990). Он содержал 157 объектов, из них только 6 (PRC A) уже имели кинематическое подтверждение, а 27 галактик относились к категории «хороших кандидатов» (PRC B). Большую же часть списка составляли «возможные кандидаты» (PRC C) и «родственные объекты» (PRC D). Тем не менее, используя PRC, уже можно было изучать статистические закономерности в характеристиках ГПК, их фотометрические параметры, а также исследовать внутреннюю кинематику объектов каталога. Этим стали заниматься несколько групп в мире, включая и российских астрономов.

НАБЛЮДЕНИЯ НА БТА: КЛАССИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

У астрономов СПбГУ уже имелся опыт наблюдений пекулярных и взаимодействующих галактик, включая некоторые ГПК, на телескопах среднего размера, таких как 2.6-м рефлектор БАО (например, исследование NGC 2685 (PRC A-3))

в статье Гаген-Торна и др., 1983). После выхода каталога PRC такие работы, связанные, в том числе, с визитерством в САО РАН В.П. Решетникова (СПбГУ) в 1991–1992 гг., начали выполняться и на БТА. Применялись классические методы наблюдений в первичном фокусе БТА: ПЗС-фотометр и спектрограф с длинной щелью UAGS, адаптированный под ПЗС-детектор. Несмотря на весьма скромный формат детекторов – всего 530×580 пикселей, удалось получить интересные результаты.

На рисунке 111 приведено изображение UGC 7576 – одной из первых ГПК, изученных на БТА. Анализ наблюдений, а также сравнение с литературными данными, проведенные в статье Reshetnikov et al. (1994), показали, что цвет и светимость центрального тела соответствует нормальным линзовидным (S0) галактикам, в то время как радиальная шкала экспоненциальных дисков центральных галактик значительно короче, чем у S0. Фотометрические характеристики полярного кольца близки к наблюдаемым у спиралей позднего морфологического типа. Эти выводы послужили серьезным аргументом в пользу формирования ГПК в результате взаимодействия галактик. Несколько позже группой из СПбГУ были представлены первые в мире численные расчеты формирования полярных структур в результате захвата вещества от близкого спутника (Reshetnikov & Sotnikova, 1997).

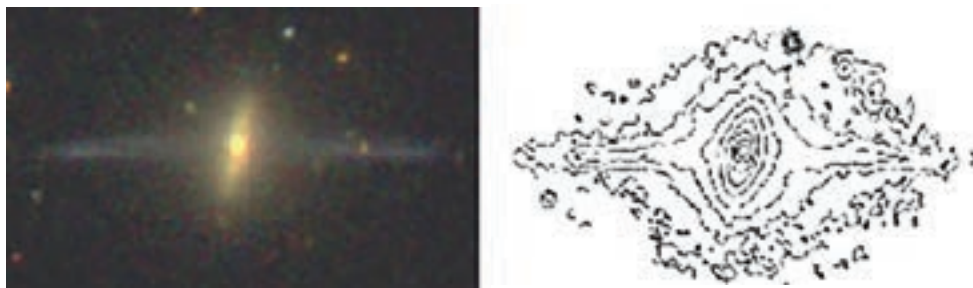


Рис. 111. Галактика с протяженным полярным кольцом UGC 7576 (PRC A-04). Слева – изображение из обзора SDSS DR12, справа – изофоты в полосе V, полученные на БТА (Reshetnikov et al., 1994).

Чтобы изучить особенности движения звезд и ионизованного газа в таких объектах на БТА проводились спектральные наблюдения. В ряде случаев удалось «кинематически подтвердить» принадлежность кандидатов из списков PRC к классу ГПК, т.е. обнаружить газ на орбитах, сильно наклоненных к центральной плоскости, как это было сделано в работе Hagen-Thorn & Reshetnikov (1997) для галактики IC 1689. Также были обнаружены и случайные проекции, когда системные скорости центральной галактики и предполагаемого полярного кольца заметно различаются.

НАБЛЮДЕНИЯ НА БТА: ПАНОРАМНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ

Даже в самом простом случае, когда и центральная галактика, и кольцо видны в положении «с ребра», требуется получить как минимум два спектральных разреза с длинной щелью, чтобы определить характер вращения обеих подсистем. Если же пространственная ориентация такова, что одна из плоскостей вращения видна под умеренным наклоном к лучу зрения, то возникает ряд трудностей с интерпретацией лучевых скоростей. Для детального изучения кинематики необходимо получить

значительно большее число разрезов с различной ориентацией щели спектрографа. В этом случае лучше построить двумерное поле скоростей, используя методы панорамной спектроскопии в оптическом диапазоне или радиоинтерферометрию в линиях молекулярного или атомарного газа. Хорошей иллюстрацией является пример галактики NGC 2655. В ней присутствие внутреннего полярного кольца было заподозрено благодаря мощной пылевой полосе, пересекающей диск галактики. Сравнение полей скоростей газа и звезд в околядерной области по данным наблюдений на БТА подтвердило правильность такой интерпретации (Sil'chenko & Afanasiev, 2004), а радионаблюдения в линии 21 см позволили детально проанализировать структуру и кинематику полярного кольца (Sparke et al., 2008).

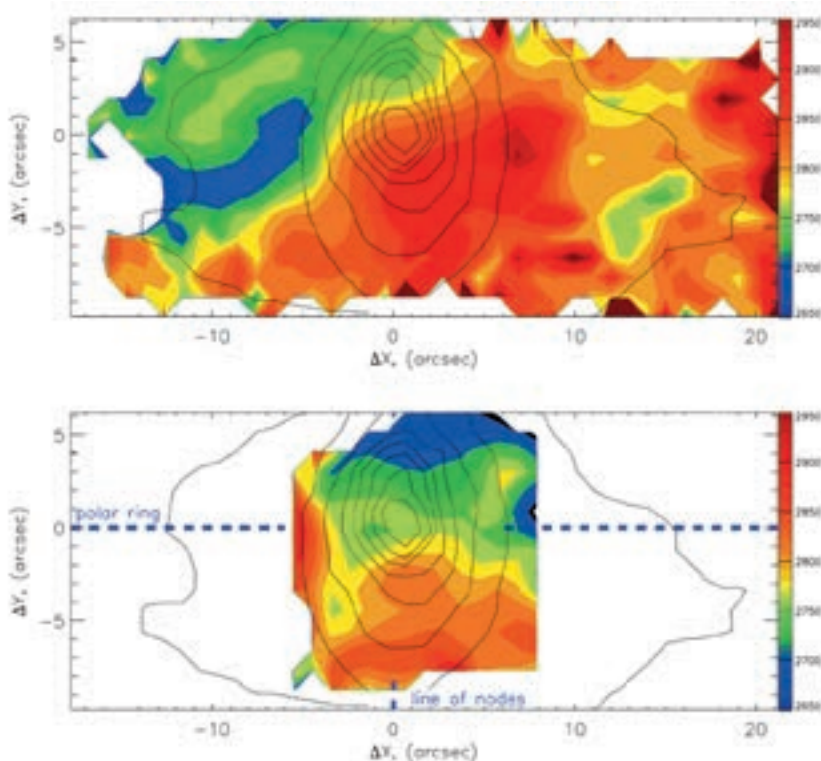


Рис. 112. Поля скоростей ионизованного газа (вверху) и звезд (внизу) в галактике UGC 5600, построенные по результатам наблюдений с MPFS (Шалапина и др., 2002). Цветная шкала – в км/сек. Черными контурами показаны изофоты галактики в континууме. Также на нижнем рисунке синим пунктиром схематично отмечено положение линии узлов диска галактики и большой оси полярного кольца.

Методы панорамной спектроскопии, которые активно развиваются в последнюю пару десятилетий, позволяют получать независимую спектральную информацию от всех участков протяженного объекта, заполняющих поле зрения прибора. После определенной обработки наблюдательные данные легко представить в виде «куба данных» (X, Y, Z). В этом кубе X и Y соответствуют координатам в картинной плоскости

(пространственные координаты), а длины волн или доплеровские скорости в определенной спектральной линии являются третьей (спектральной) координатой. К началу 2000-х годов усилиями сотрудников ЛСФВО на 6-м телескопе уже имелся целый «арсенал» аппаратуры для панорамной спектроскопии галактик: мультизрачковый волоконный спектрограф интегрального поля MPFS и сканирующий интерферометр Фабри-Перо.

Конструкция спектрографа MPFS основана на комбинации микролинзового раstra и световолокон. Идея такого прибора была предложена Ж. Куртесом на международной конференции в САО РАН (Courtés, 1982) и впервые в мире реализована именно на БТА (Афанасьев и др., 1990). К концу 90-х годов стараниями В.Л. Афанасьева с коллегами на БТА работал уже третий вариант такого спектрографа, позволяющий одновременно регистрировать спектры от 256 пространственных элементов, конструктивно выполненных в виде квадратного массива линз (16×16 элементов), при сменном масштабе от 0.5 до 1" на линзу. За каждой линзой располагалось световолокно, другой конец которого упакован в щель спектрографа (Afanasiev et al., 2001). Наблюдения с таким прибором позволяют строить поля скоростей как ионизованного газа (по эмиссионным линиям с разным механизмом возбуждения), так и абсорбционного звездного компонента.

Наблюдения ГПК методами 3D-спектроскопии начали проводиться автором в рамках заявок на БТА коллектива из СПбГУ (основной заявитель – В.А. Гаген-Торн). Активная роль принадлежала здесь Л.В. Шаляпиной, в кандидатскую диссертацию которой, защищенную под научным руководством В.А. Яковлевой, вошли результаты наших первых совместных статей. На рисунке 112 показан пример наблюдений с MPFS галактики UGC 5600 (PRC B-11) – поля скоростей газового и звездного компонентов в центральной части галактики. Поведение этих подсистем сильно различается. Звезды демонстрируют нормальное вращение в позиционном угле, совпадающим с положением большой оси внешних изофот на изображении галактики. Движение газа более сложное и обусловлено существованием двух компонент. Первая из них связана с нормальным вращением в плоскости диска галактики, а вторая – с вращением газа во внутреннем кольце. Используя полученные кинематические данные, мы оценили значение угла между плоскостями диска и кольца. Он оказался около 88° , т.е. внутреннее кольцо действительно ортогонально к плоскости внешнего диска.

Изучая ионизованный газ в UGC 5600, мы построили мозаику из трех совмещенных полей MPFS, размером $16'' \times 16''$ каждое. Сейчас подобные мозаики стали рутинной процедурой в мировой практике 3D-спектроскопии, но в 2001–2002 гг. нам пришлось серьезно потрудиться как на телескопе, так и при последующей обработке данных, с нуля отлаживая необходимую методику. В дальнейшем для изучения кинематики газа в больших полях мы чаще стали использовать сканирующий ИФП.

Спектрометры на основе сканирующего интерферометра Фабри-Перо на телескопах диаметром 2–10-м оказываются непревзойденными по одновременному сочетанию таких параметров – большое (несколько угловых минут) поле зрения с той же пространственной дискретизацией, как и для прямых изображений, и относительно высокое ($R > 10000$) спектральное разрешение. Плата за эти преимущества – узкий (обычно, менее 50 \AA) спектральный диапазон и необходимость последовательной регистрации отдельных кадров интерферограмм.

Изучение движений ионизованного газа в галактиках с помощью сканирующего ИФП на 6-м телескопе было начато еще в 80-х годах группой из марсельской обсерватории (J. Boulesteix et al.) в соавторстве с коллегами из ЛСФВО. Сменилось

несколько поколений детекторов, счетчики фотонов заменили ПЗС-приемниками, и к 2000 г. ИФП стал одним из режимов наблюдений универсального редуктора светосилы SCORPIO (Афанасьев, Моисеев, 2005). С его помощью мы могли изучать кинематику ионизованного газа в выбранной эмиссионной линии в поле зрения $6'$.

Комплексное исследование особенностей структуры и кинематики ГПК проводилось на основе сочетания наблюдений на БТА с несколькими приборами в различных доступных режимах: картирование звездной кинематики с MPFS для внутренних областей, поля скоростей газа с ИФП – для внешних, глубокие снимки – для выявления особенностей морфологии и деталей низкой поверхностной яркости, спектроскопия с длинной щелью – для изучения движения звезд за пределами центрального поля и для измерения металличности газа. Сходный подход применялся сотрудниками ЛСФВО и для изучения других объектов со сложной морфологией: активных галактических ядер, галактик с перемичками и т.д. (Moiseev et al., 2004). Такие наблюдения позволили разобраться со сложной структурой ряда пекулярных объектов из каталога PRC, например, обнаружить внутренний полярный диск в NGC 7468 (Шалапина и др., 2004). Подобные наблюдательные работы, позволяющие понять, как сформировался тот или иной пекулярный объект, родственной ГПК, продолжаются и сейчас на БТА группой из Санкт-Петербурга (Меркулова и др., 2012; Яковлева и др., 2016).

НОВЫЕ ГПК И РОДСТВЕННЫЕ ИМ ОБЪЕКТЫ

Среди возможных путей решения вопросов, связанных с формированием и эволюцией полярных колец, можно выделить два направления. Первое – детальное исследование уже известных кандидатов с привлечением данных о морфологии и кинематике в различных диапазонах спектра. Второе – расширение списка кандидатов как с целью уточнения функции светимости ГПК и продвижения в сторону больших красных смещений, так и с целью поиска объектов, в которых и кольцо и галактика «удобно» развернуты к лучу зрения (наклонение $i = 40^\circ - 70^\circ$), что позволяет одновременно исследовать и кинематику, и детали внутренней структуры. Работы по первому направлению, инициированные группой из Санкт-Петербурга описаны в предыдущих параграфах. В то же время, ко второй половине 2000-х годов нам стало понятно, что простые исследования по подтверждению кандидатов из PRC уже исчерпали себя, требуются новые идеи и новые подходы.

Некомпланарные структуры в галактиках поздних типов. В 2004–2005 гг. с помощью сканирующего ИФП мы изучали выборку голубых компактных карликовых галактик по заявке С. Muñoz-Tunón из Канарского института астрофизики. Анализ поля скоростей Apr 212 в эмиссионной линии H α показал, что здесь сосуществуют сразу две различные вращающиеся системы ионизованного газа: внутренний диск и внешние области НШ. Внутренняя система совпадает со звездным диском галактики, а внешние орбиты газовых облаков располагаются к нему под значительным углом (рис. 113). Имеющиеся данные о кинематике молекулярного, ионизованного и нейтрального газа можно объяснить тем, что большая часть газа в галактике собрана в широком кольце радиусом около 20 кпк. Внешние части кольца вращаются в плоскости, ортогональной к звездному диску. Орбиты газовых облаков прецессируют с уменьшением радиуса и приближаются к плоскости диска. Причина прецессии – трехосность в распределении гравитационного потенциала. При этом в диапазоне радиусов 2–3.5 кпк сосуществуют

обе газовые подсистемы, и наблюдается взаимодействие между газом полярного кольца и внутреннего диска. Столкновение газовых облаков сопровождается вспышкой звездообразования во внутренних областях изогнутого полярного кольца. Наиболее вероятная причина образования наклонного кольца – захват газа с близкого спутника UGC 12549 (Моисеев, 2008).

Вопрос о том, насколько долгоживущими являются системы, подобные Arp 212, пока является открытым. Из общих соображений ясно, что взаимодействие между газовыми подсистемами приведет к достаточно быстрому (10–100 млн лет) исчерпанию газа во внутренних областях наклонного кольца. Также очевидно, что события, связанные с захватом (аккрецией) вещества, в жизни конкретной галактики должны случаться чаще, чем редкое по «везению» выпадение газа в полярной плоскости. Но застать галактику в этом состоянии тяжело именно из-за кратковременности таких событий. Кроме того, требуется построение поля лучевых скоростей с угловым разрешением, достаточным для детального анализа.

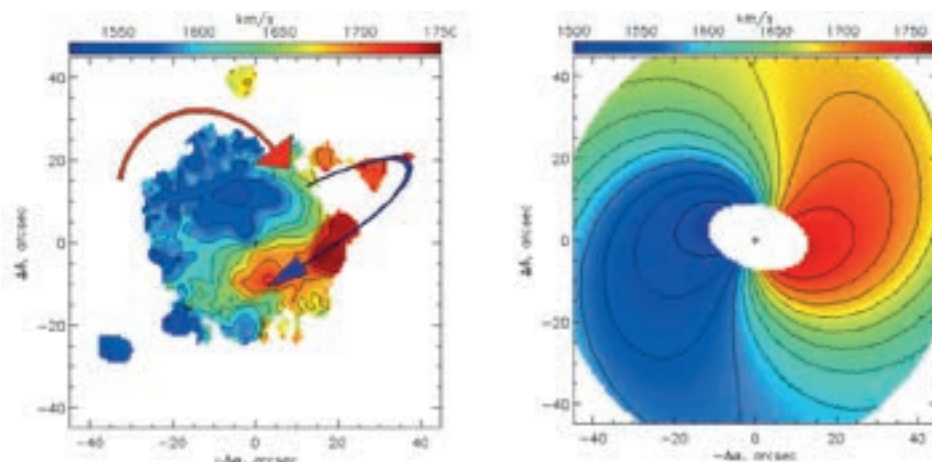


Рис. 113. Слева – поле скоростей ионизованного газа в галактике Arp 212 (БТА). Стрелками показаны направления вращения внутренних (красная) и внешних (синяя) областей. Справа – двумерная модель поля скоростей изогнутого газового кольца (Моисеев, 2008).

И здесь нами уже достигнуты определенные успехи. Так, с помощью сканирующего ИФП мы построили поля скоростей 25 близких (системные скорости меньше 1000 км/с) карликовых галактик (Моисеев, 2014). В трех галактиках (DDO 99, UGC 3672 и UGC 8508) позиционный угол кинематической оси в полях скоростей HII сильно (на десятки градусов) отличается от измерений в нейтральном водороде на больших расстояниях от центра или от ориентации большой оси оптических изофот. Получается, что доля объектов с наклонными газовыми структурами среди близких галактик составляет около 10%, что более чем на порядок превосходит имеющиеся оценки частоты встречаемости «обычных» ГПК. Вместе с современными космологическими расчетами это указывает на важную роль аккреции внешнего вещества в галактической эволюции.

Далекое полярное кольцо SDSS J075234.33+292049.8. Галактика SDSS J075234.33+292049.8 была случайно обнаружена E. Ofek (Caltech) при просмотре кандидатов в гравитационные линзы в цифровом обзоре неба SDSS. Объект действительно привлекает внимание. Он выглядит как контрастное голубое кольцо, окружающее относительно небольшой сфероид, большая ось которого почти перпендикулярна большой оси кольца. По внешнему виду эта система заметно отличается от кольцевых галактик, обычно встречающихся на снимках SDSS, большинство которых составляют кольца на резонансах баров. Но по оптическим снимкам не удалось понять, является ли объект пекулярным случаем галактики с перемычкой, столкновительной системой или ГПК. В последнем случае это было бы одно из самых больших и далеких среди известных полярных колец в соответствии с его красным смещением $z = 0.06$. Спектральные наблюдения, проведенные нами на БТА по заявке Noah Brosch (Tel-Aviv University) со спектрографом UAGS, а затем с прибором SCORPIO в режимах длиннощелевой спектроскопии и сканирующего ИФП подтвердили присутствие здесь полярного кольца (Brosch et al., 2010).

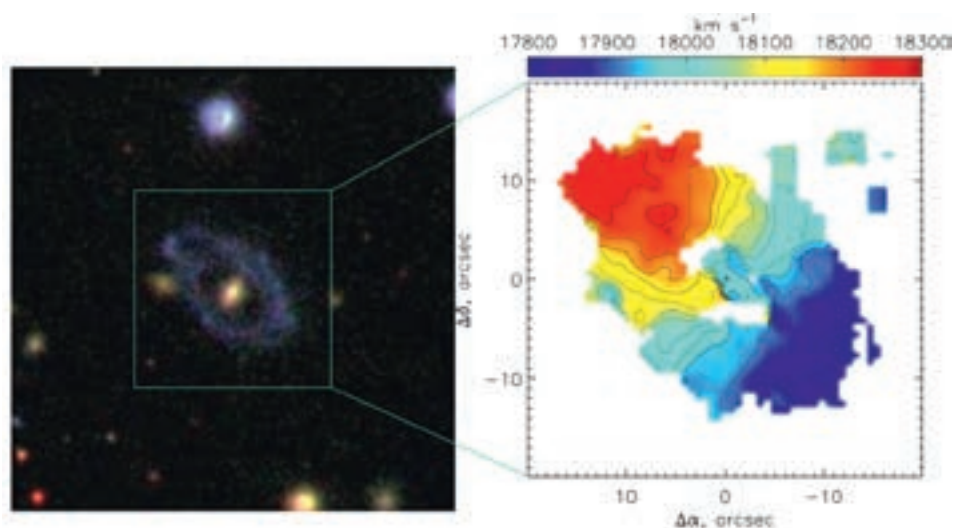


Рис. 114. Далекая галактика с полярным кольцом SDSS J075234.33+292049.8,. Слева – изображение из обзора SDSS. Справа – поле лучевых скоростей ионизованного газа, построенное на 6-м телескопе с помощью сканирующего интерферометра Фабри-Перо, установленного в приборе SCORPIO (Brosch et al., 2010).

Центральный объект, выделяющийся своим красным показателем цвета, является галактикой раннего типа. Внешнее кольцо, отличающееся синим цветом, состоит из более молодого звездного населения и излучает в эмиссионных линиях ионизованного газа. Анализ поля скоростей в линии H β показал, что это гигантское (около 48 кпк диаметром) кольцо вращается под заметным углом к плоскости центральной галактики (рис. 114). По разным оценкам угол между ними составляет $58^\circ \pm 10^\circ$ или $73^\circ \pm 11^\circ$. Согласно полученной нами кривой вращения масса галактики составляет около $4 \times 10^{11} M_\odot$, а большое отношение массы к светимости $M/L = 20$ указывает на существенный вклад темной материи в общую массу системы. О дальнейших

исследованиях этой галактики, позволивших сделать более точные заключения о роли темной материи в ее динамике, говорится в параграфе «Измерение «невидимого»: форма темного гало».

Каталог кандидатов в ГПК. Открытие галактики SDSS J075234.33+292049.8, самой далекой среди кинематически подтвержденных на тот момент ГПК, стимулировало нас заняться поиском новых кандидатов в полярные кольца, используя цифровой обзор неба SDSS. В условиях отсутствия надежных автоматических программ для классификации изображений галактик мы воспользовались результатами замечательного проекта Galaxy Zoo (<http://www.galaxyzoo.org/>), в рамках которого сотни тысяч добровольцев по всему миру выполняют классификацию галактик SDSS.

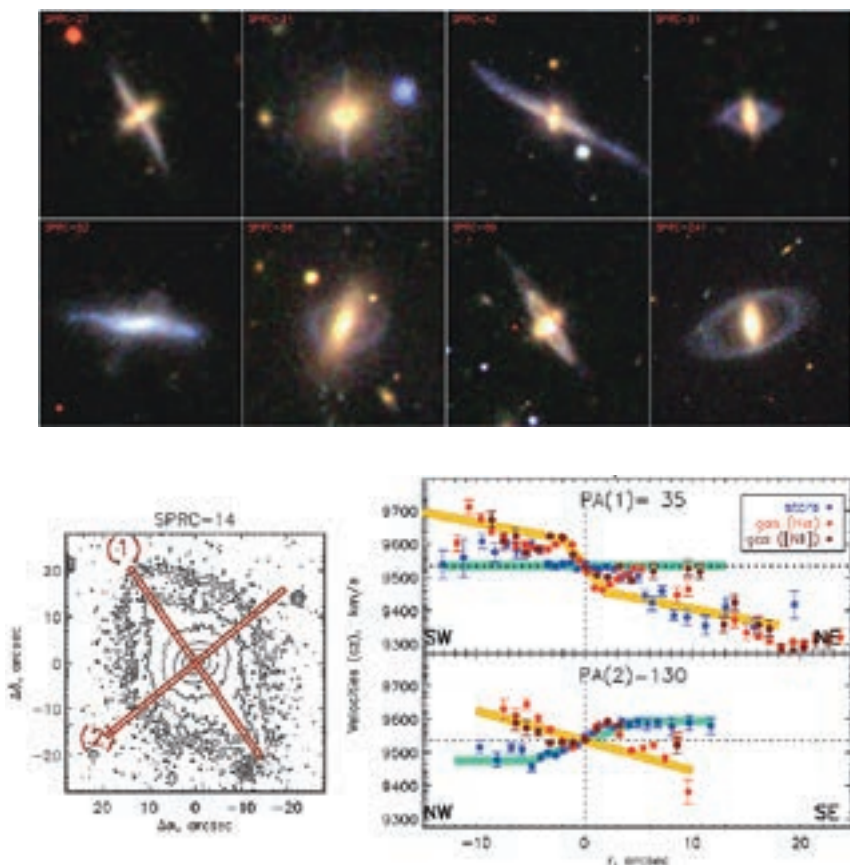


Рис. 115. Вверху – примеры объектов из каталога SPRC. Комбинация изображений в фильтрах g , r , i по данным SDSS. Внизу слева контурами показано изображение SDSS для галактики SPRC-14. Отмечены положения щели спектрографа. Справа – распределение лучевых скоростей газа и звезд в соответствующих разрезах. Пунктиром показан центр галактики и величина системной скорости. Толстые цветные линии отмечают кинематические компоненты, вращающиеся в разных плоскостях: голубые линии – центральная галактика, желтые – полярное кольцо.

Нам пришлось не только изучить все изображения на тематическом форуме Galaxy Zoo, но еще и просмотреть почти 42 тыс. снимков, отобранных по определенным критериям в SDSS. Подробно эта работа описана в нашей статье (Moiseev et al., 2011), в которой был представлен новый каталог ГПК–SPRC (Sloan-based Polar Rings Catalog).

Новый каталог содержит 275 галактик – кандидатов в ГПК, из которых 70 были отнесены к типу «лучшие», а 115 – к типу «хорошие». Таким образом, число известных кандидатов было увеличено в несколько раз по сравнению со старым фотографическим каталогом Whitmore et al. (1990). При этом все они находились в северной полусфере, а значит, были доступны для наблюдений на БТА! Первые же спектральные наблюдения шести новых кандидатов (БТА/SCORPIO/SCORPIO-2) подтвердили существование полярных колец в пяти галактиках (рис. 115), лишь один объект оказался проекцией пары взаимодействующих галактик. А обсуждаемая в параграфе «Далекое полярное кольцо SDSS J075234.33+292049.8» галактика SDSS J075234.33+292049.8 вошла в каталог под именем SPRC-7.

Наблюдения объектов SPRC на БТА преследовали сразу несколько целей. Это и кинематическое подтверждение (увеличение статистики параметров ГПК), и построение кривой вращения с целью измерения формы темного гало (см. параграф «Измерение «невидимого»: форма темного гало»), и оценка металличности газа в кольцах по измерению эмиссионных линий. Незадолго до выхода нашего каталога в литературе подняли вопрос о том, что часть наиболее массивных полярных колец могла образоваться в результате так называемой «холодной аккреции» из протяженных газовых филаментов.

Считается, что через эту стадию могло проходить едва ли не большинство достаточно массивных галактик, но только в случае полярных колец мы напрямую видим следы таких реликтовых структур. В статье Spravone et al. (2010) аргументировалось, что относительно низкая металличность газа в классической ГПК NGC 4650A вызвана именно таким сценарием образованием кольца. Однако наши наблюдения почти двух десятков галактик каталога SPRC показали, что содержание кислорода в их кольцах не ниже, чем 0.5–0.6 от солнечного (первые результаты представлены Moiseev et al., 2014). Таким образом, вопреки ряду оптимистичных прогнозов, только малая часть массивных полярных колец могла сформироваться в результате аккреции из низкометаллических филаментов. Либо же последующее звездообразование и обогащение межзвездной среды тяжелыми элементами полностью замывают следы этого процесса.

ИЗМЕРЕНИЕ «НЕВИДИМОГО»: ФОРМА ТЕМНОГО ГАЛО

Благодаря уникальной структуре галактик с полярными кольцами можно попытаться понять форму гравитационного потенциала, сравнивая кривые вращения, измеренные сразу в двух плоскостях – в центральном диске и в полярном кольце. Предложения использовать эту возможность уже высказывались многократно. Более того, статистическое сравнение максимальных скоростей вращения полярных колец и светимостей центральных галактик указывает на заметную сплюснутость темных гало. Но оценки этого параметра в отдельных объектах получались с большой неопределенностью и противоречили друг другу. Прежде всего, потому что для таких измерений необходимо не только хорошо знать геометрию системы, но также иметь надежные данные о движении звездного населения во внешних областях галактик, имеющих относительно низкую яркость.

Из каталога SPRC мы выбрали кинематически подтвержденные ГПК, которые хорошо подходили для таких измерений. Кинематика звезд в них изучалась на 6-м телескопе с помощью многорежимных спектрографов SCORPIO и SCORPIO-2 (Afanasiev & Moiseev, 2011).

Нами были получены распределения лучевых скоростей и дисперсии скоростей звезд в SPRC-7 и SPRC-33 (NGC 4262). Вращение газа в кольце SPRC-7 изучалось нами на 6-м телескопе ранее со сканирующим ИФП (см. параграф «Далекое полярное кольцо SDSS J075234.33+292049.8» и рис. 114), а для NGC 4262 мы использовали ранее опубликованные данные Oosterloo et al. (2010), изучавших кинематику HI на радиотелескопе WSRT.

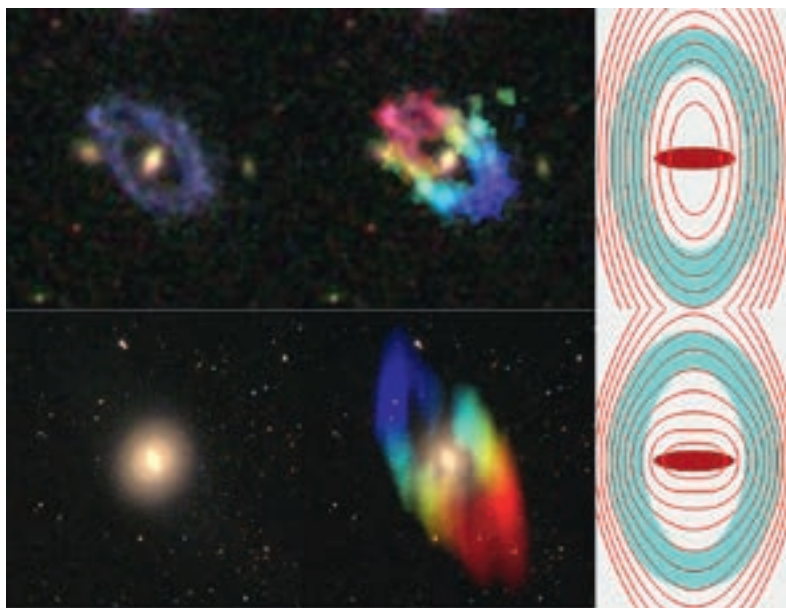


Рис. 116. Верхний ряд – галактика SPRC-7. Слева – комбинация изображений в фильтрах g , r , i (SDSS). Полярное кольцо, окружающее центральную линзовидную галактику, выделяется своим синим цветом, так как содержит заметную долю молодых звезд. В центре – изображение SDSS совмещено с полем скоростей ионизованного водорода (БТА/SCORPIO), цвета соответствуют наблюдаемым лучевым скоростям (синие точки – приближаются, красные – удаляются от наблюдателя), интенсивность калибрована в соответствии с распределением яркости в эмиссионной линии H α . Справа – распределение гравитационного потенциала темного гало, согласно численным расчетам. Схематично показаны центральный диск и полярное кольцо. Нижний ряд – аналогично для NGC 4262. Но здесь полярное кольцо практически не заметно на оптических снимках, так как состоит в основном из газа. Показано поле скоростей нейтрального водорода по данным наблюдений Oosterloo et al. (2010) в линии 21 см.

Кроме данных о движениях газа и звезд, детальная модель галактик включала также информацию о распределении плотности газа и яркости звездного компонента согласно изображениями из обзора SDSS. Форма темного гало в модели подбиралась так, чтобы добиться наилучшего согласия с наблюдаемым вращением как самих галактик, так и их

полярных колец. Как уже отмечалось SPRC-7 – одна из наиболее протяженных (диаметр кольца почти 50 кпк) и далеких среди подтвержденных ГПК. Массивное кольцо здесь состоит из газа и звезд и вращается не перпендикулярно плоскости диска галактики, а под углом 73° к нему. NGC 4262 – принадлежит близкому скоплению галактик Virgo, кольцо диаметром около 30 кпк почти не содержит звезд, состоит в основном из газа и ориентировано почти ортогонально к центральной галактике. Рассматриваемые галактики заметно отличаются друг от друга. Не удивительно, что и темные гало в них сильно различаются. В SPRC-7 гало заметно сплюснуто к плоскости кольца (отношение осей 1.5–1.7 в зависимости от принятой модели распределения плотности гало). В NGC 4262 ситуация более сложная, так как наблюдаемая картина может быть объяснена, если только отношение осей в распределении потенциала темного гало сильно меняется с расстоянием от центра, составляя около 0.4 во внутренних областях и 1.5–2.3 во внешних (рис. 116). Это первая галактика (за исключением Млечного Пути), где надежно зафиксировано изменение формы темного гало с радиусом. Эти результаты, опубликованные в статье Khorerskov et al. (2014), еще ожидают своей интерпретации в рамках различных космологических сценариев образования галактик.

ОКОЛОЯДЕРНЫЕ ПОЛЯРНЫЕ КОЛЬЦА И ДИСКИ

Несмотря на относительно редкую встречаемость среди близких галактик, внешние полярные кольца являются достаточно известным феноменом. И хотя нам не хватает детальной информации об их динамике, эволюции, истории звездообразования, все-таки основные ключевые вопросы можно считать решенными. Опубликованы оценки стабильности таких структур, моделируется их образование в результате тех или иных внешних событий.

Иначе обстоят дела с полярными образованиями на меньших пространственных масштабах, несмотря на то, что внутренние полярные структуры (ВПС) были известны еще до того, как феномен ГПК получил признание и подтверждение (под внутренними структурами мы имеем в виду масштабы меньшие или сравнимые с характерными размерами балджа или внешнего диска). При спектральных наблюдениях Sc-галактики NGC 3672 Rubin et al. (1977) обнаружили значительный градиент лучевых скоростей вдоль малой оси, что, по их мнению, указывало на вращения околядерного ($r < 350$ пк) газа под значительным углом к плоскости галактики. Позже Bettoni et al. (1990) по результатам длиннощелевой спектроскопии галактики NGC 2217 показали, что внутри центрального килопарсека диск ионизованного газа изгибается так, что вращение происходит в плоскости, перпендикулярной звездному диску галактики, причем ось вращения этого полярного диска практически совпадает с большой осью звездного бара NGC 2217.

В следующее десятилетие сходные кинематически выделенные структуры были обнаружены рядом авторов при рассмотрении внутренней кинематики других близких галактик ранних типов. Прежде всего, следует отметить работы О.К. Сильченко (ГАИШ МГУ) с коллегами, выполненные на 6-м телескопе САО РАН с помощью панорамной спектроскопии с MPFS (Silchenko et al., 1997; Silchenko & Afanasiev, 2004), а также работы группы из университета Падуи, опубликовавшей первый список галактик с подтвержденными ВПС, который содержит 17 объектов (Corsini et al., 2003). Впоследствии разными авторами был предоставлен довольно обширный наблюдательный материал, посвященный обнаружению и исследованию таких структур.

Этому во многом способствовал обзор кинематики и звездного населения близких галактик ранних типов, проводимый на 4.2-м телескопе WHT, а также исследование химически выделенных ядер галактик на БТА (основной заявитель – О.К. Сильченко), выполняемые с помощью интегральных полевых спектрографов SAURON и MPFS, соответственно. Пример результатов такого исследования для галактики NGC 4111 приведен на рисунке 117.

Новый каталог внутренних полярных структур (ВПС) был представлен автором настоящего обзора (Моисеев, 2012). Список включал 47 галактик всех морфологических типов – от E до Ir. Существенно, что более половины (60%) из них были обнаружены или подтверждены в результате наблюдений на 6-м телескопе САО РАН с помощью панорамного спектрографа MPFS или прибора SCORPIO в режиме сканирующего интерферометра Фабри-Перо. Подавляющее большинство ВПС имеют радиус менее 1.5 кпк. Самые внутренние области, как правило, расположены в полярной плоскости. С ростом расстояния от ядра часто наблюдается изгиб – приближение орбит к плоскости галактики.

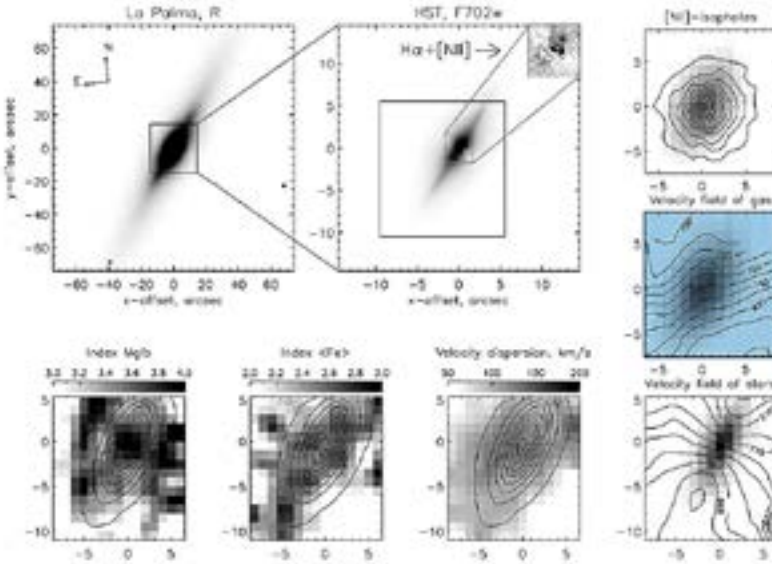


Рис. 117. NGC 4111 – одна из восьми галактик с внутренним полярным диском, исследованная в статье *Sil'chenko & Afanasiev (2004)*. Показаны крупномасштабное изображение (архив телескопа JKT/LaPalma) и центральная часть (HST), где отмечено квадратное поле БТА (MPFS). Слева и внизу показаны карты различных параметров, построенные по данным MPFS: интенсивность линий [NII] ионизованного газа; поля лучевых скоростей газа и звезд (звезды следуют нормальному вращению в плоскости диска, а орбиты газовых облаков сильно к ней наклонены); дисперсия скоростей звезд и карты индексов металличности звездного населения.

Внутренние полярные структуры одинаково часто встречаются как в галактиках с перемычками, так и без них. В то же время, если галактика обладает баром (или трехосным балджем), это приводит к стабилизации полярного диска так, что его ось

вращения, как правило, совпадает с большой осью бара (рис. 117). Примерно в 70% рассмотренных галактик заметны те или иные следы недавнего взаимодействия: газовые или звездные приливные структуры, противовращающиеся компоненты и т.п. Это указывает на прямую связь внешнего окружения с наличием ВПС.

На рисунке 118 показано распределение оптических размеров всех обсуждаемых в данном обзоре объектов – внутренних и внешних полярных структур согласно статье Смирновой и Моисеева (2013). Видно, что внутренние полярные структуры и внешние крупномасштабные полярные кольца образуют единое семейство в распределении по диаметру, нормированному на оптический размер галактики. В то же время имеет место бимодальность этого распределения, так как число объектов с $d_{ring} = (0.4-0.7) \times d_{disk}$ мало. Скорее всего, такое распределение размеров связано с тем, что устойчивость полярных орбит во внутренних областях галактик обеспечивается балджем или баром, а во внешних областях – сфероидальным (или трехосным) гало.

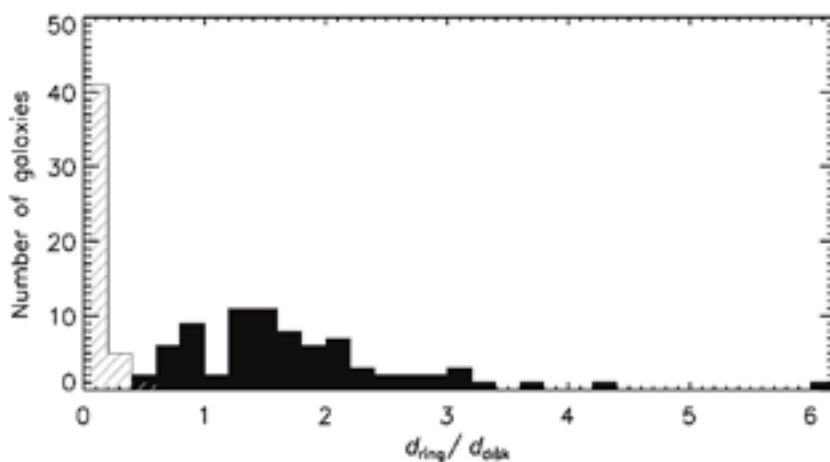


Рис. 118. Распределения полярных структур по диаметрам, нормированным на диаметр основного диска галактики. Черным на рисунке обозначены внешние структуры, штриховкой – внутренние кольца (Смирнова и Моисеев, 2013).

В отличие от внешних протяженных полярных колец, основные этапы формирования которых удастся воспроизвести в численных моделях, для внутренних структур такое моделирование пока не проводилось. Представленная статистика свойств ВПС указывает на то, что, как и классические ГПК, подавляющее большинство внутренних полярных колец и дисков сформировалось в результате захвата материи из внешнего окружения галактик. В работе Silchenko et al. (2011), основанной, в том числе, на данных наблюдений БТА, авторы, используя сетку моделей базы данных GalMer, продемонстрировали, что в результате взаимодействия гигантской S0-галактики с богатым газом карликовым спутником, в области балджа образуется кольцо звездообразования, сильно наклоненное к плоскости галактики. Отношение масс компаньонов 1:10, т.е. речь идет о малом слиянии. Требуются специфические условия взаимодействия – спутник должен изначально находиться на орбите с обратным (ретроградным) движением, в то время как плоскости дисков обоих компаньонов

должны быть почти ортогональны. Дальнейший прогресс с подобным моделированием позволит в дальнейшем лучше понять процесс формирования ВПС в конкретных галактиках и воспроизвести их наблюдаемые параметры. Тем более, что ожидаемая частота встречаемости этого феномена достаточно высока. Статистика, приведенная в недавней статье Sil'chenko (2016) показывает, что в ограниченной по объему выборке галактик ранних типов обзора ATLAS-3D (спектрограф SAURON) внутренние полярные диски встречаются в 10% близких линзовидных галактик.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Автор надеется, что в этом кратком обзоре ему удалось показать, что полярные кольца - это не только интересный феномен, наблюдаемый в отдельных пекулярных объектах. Их изучение позволяет пролить свет на многие важные этапы, через которые проходило большинство галактик: слияние и поглощение спутников, аккреция межгалактического газа и т.д. А детальное изучение вращения газа и звезд в них позволяет делать заключения не только о наличии в галактиках гало темной материи, но и о его форме. Поэтому активно продолжается изучение как классических ГПК, так и родственных им объектов. И наблюдательным данным, получаемым на 6-м телескопе САО РАН, принадлежит далеко не последняя роль в исследовании феномена кинематически выделенных галактических подсистем. Так, на проходившей в 2013 г. в Неаполе международной конференции «Multi-Spin Galaxies» почти в трети всех выступлений либо использовались, либо цитировались данные БТА. Это та область физики галактик, где российским астрономам удастся сказать свое веское слово. Очень хочется, чтобы и в дальнейшем наблюдательные возможности БТА оценивались коллегами также высоко. Необходимо подчеркнуть, что достигнутые успехи являются результатом сложения сразу нескольких важных факторов: наличия телескопа с большой апертурой, поставленных адекватно наблюдательных задач, имеющейся приборной базе, а также и оптимальной аппаратуры, создаваемой для конкретных видов наблюдений. Изучение внутренней кинематики галактик многие годы было одной из приоритетных задач лаборатории СФВО, силами которой разрабатывались и создавались соответствующие приборы для первичного фокуса 6-м телескопа САО РАН.

Автор благодарен всем своим соавторам, участвовавшим в изучении пекулярных галактик, а особенно В.Л. Афанасьеву за его огромный вклад в развитие новых наблюдательных методов на БТА. Наши исследования галактик с полярными кольцами поддерживались в разные годы грантами РФФИ (проекты 09-02-00870, 13-02-00416), грантом некоммерческого фонда «Династия», программами ОФН РАН и грантом Президента РФ (МД 3623.2015.2). Наблюдения на 6-м телескопе САО РАН проводятся при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение No. 14.619.21.0004, проект ID PRFMEFI61914X0004).

ПУБЛИКАЦИИ

- [1] Афанасьев В.Л., Власюк В.В., Додонов С.Н., Сильченко О.К., препринт САО РАН 54, 1 (1990).
- [2] Афанасьев В.Л., Моисеев А.В., ПАЖ 31, 214 (2005).
- [3] Гаген-Торн В.А., Попов И.И., Яковлева В.А. *Астрофизика* 19, 599 (1983).
- [4] Меркулова О. А., Каратаева Г. М., Яковлева В.А., Буренков А.Н., *Астрофиз. бюллетень* 67, 388 (2012).
- [5] Моисеев А.В., *Астрофиз. бюллетень* 63, 215 (2008).

- [6] Моисеев А.В., *Астрофиз. бюллетень* 67, 154 (2012).
- [7] Моисеев А.В., *Астрофиз. бюллетень* 69, 1 (2014).
- [8] Смирнова К.И., Моисеев А.В., *Астрофиз. бюллетень* 68, 391 (2013).
- [9] Шалапина Л.В., Моисеев А.В., Яковлева В.А., ПАЖ 28, 505 (2002)
- [10] Шалапина Л.В., Моисеев А.В., Яковлева В.А., Гаген-Торн В.А., Барсунова О.Ю., ПАЖ 30, 643, 2004,
- [11] Яковлева В. А., Меркулова О. А., Каратаева Г. М., Шалапина Л. В., Яблокова Н. В., Буренков А.Н., ПАЖ 246 (2016).
- [12] Afanasiev V.L., Dodonov S.N., Moiseev A. V., in «Stellar Dynamics: From Classic to Modern», (Eds L.P. Ossipkov and I.I. Nikiporov), Saint Petersburg: Sobolev Astronomical Institute, p. 103 (2001).
- [13] Afanasiev V., Moiseev A., *Baltic Astronomy* 20, 363 (2011).
- [14] Bettoni D., Fasano G., Galletta G., *Astronom. J.* 99, 1789 (1990).
- [15] Brosch N., Kniazev A.Yu., Moiseev A.V., Pustilnik S.A., *MNRAS* 401, 2067 (2010).
- [16] Corsini E.M., Pizzella A., Coccato L., Bertola F., *A&A* 408, 873 (2003).
- [17] Courtés G., in «Instrumentation for Astronomy with Large Optical Telescopes», eds. C. M. Humphries, *Astrophysics and Space Science Library*, 92, 123 (1982).
- [18] Hagen-Thorn V.A., Reshetnikov V.P. *Astron. Astrophys.* 319, 430 (1997).
- [19] Khoperskov S., Moiseev A., Khoperskov A., Saburova A., *MNRAS* 441, 2650 (2014).
- [20] Moiseev A. V., Valdes J. R., Chavushyan V. H., 2004, *Astron. & Astrophys.*, 421, 433
- [21] Moiseev A.V., Smirnova K.I., Smirnova A.A., Reshetnikov V.P., 2011, *MNRAS* 418, 244
- [22] Moiseev A. V., Egorov O. V., Smirnova K. I., *Multi-Spin Galaxies*, ASP Conference Series, Vol. 486, 71; arXiv:1401.7912 (2014).
- [23] Oosterloo T., Morganti R., Crocker A. et al., *MNRAS* 409, 500 (2010).
- [24] Reshetnikov V.P., Hagen-Thorn V.A., Yakovleva V.A., *Astron. & Astrophys.* 290, 693 (1994).
- [25] Reshetnikov V., Sotnikova N. *Astron. Astrophys.* 325, 933 (1997).
- [26] Rubin V.C., Thonnard N., Ford W.K.Jr., *Astrophys. J.* 217, 1L (1977).
- [27] Sil'chenko O. K., *Astronom. J.* 152, 73 (2016).
- [28] Sil'chenko O. K., Afanasiev V. L., *Astronom. J.* 127, 2641 (2004).
- [29] Sil'chenko O. K., Vlasyuk V.V., Burenkov A.N., *Astron. & Astrophys.* 326, 941 (1997).
- [30] Sil'chenko O. K., Chilingarian I.V., Sotnikova N.Ya., Afanasiev V.L., *MNRAS* 414, 3645 (2011).
- [31] Spavone M., Iodice E., Arnaboldi M. et al., *Astrophys. J.* 714, 1081 (2010).
- [32] Sparke L.S., van Moorsel G., Erwin P., Wehner E.M.H., *Astronom. J.* 135, 99 (2008).
- [33] van Moorsel G., Erwin P., Wehner E.M.H., *Astronom. J.* 135, 99 (2008).
- [34] Whitmore B.C., Lucas R.A., McElroy D.B., Steiman-Cameron T.Y., Sackett P.D. *Astronom. J.* 100, 1489 (1990).

Исследование Местного объема Вселенной

Макаров Д.И.

Заведующий ЛВАК, д.ф.-м.н.; dim@sao.ru

Изучение репрезентативной выборки ближайших галактик является источником важных сведений о формировании и эволюции крупномасштабной структуры Вселенной. Многочисленные современные космологические расчеты опираются на наблюдаемые свойства галактик в объеме определенного размера. Исследование галактик в Местном объеме, условно ограниченном радиусом 10 Мпк, дает уникальную возможность для подробного изучения не только ярких, гигантских, но и карликовых галактик низкой поверхностной яркости и крайне низкой светимости, которые не видны на больших расстояниях. Между тем карликовые галактики являются самыми распространенными объектами во Вселенной. Они играют важную роль в изучении вопросов формирования и эволюции галактик. Более того, эти «пробные частицы» с измеренными лучевыми скоростями и расстояниями прослеживают хаббловское разбегание галактик с беспрецедентно высокой детализацией.

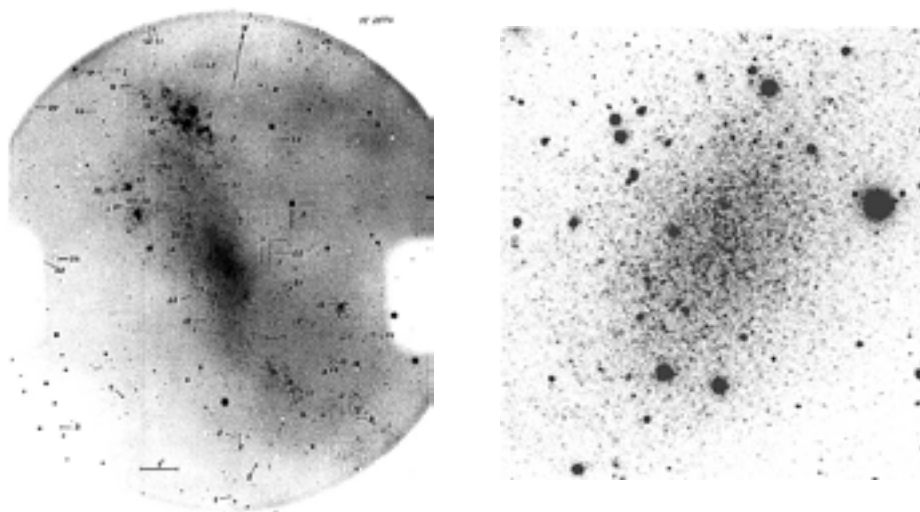


Рис. 119. Галактики IC 2574 (БТА/фотопластинка) и DDO 4 (БТА/ПЗС).

К началу 90-х годов прошлого века в наблюдательной космологии сложилась парадоксальная ситуация, когда активно изучалась крупномасштабная структура Вселенной на шкале 100 и более мегапарсек, а структура близкой Вселенной оставалась плохо изученной. Исследование местной Вселенной сдерживалось скудностью данных о расстояниях даже до самых близких галактик. Начиная с 1980-х годов на БТА стала выполняться программа массового определения расстояний до близких галактик. В работе принимали участие И.Д. Караченцев, Н.А. Тихонов, Л.Н. Макарова, М.Е. Шарина совместно с И.О. Дроздовским (АИ СПбГУ), Ц.Б. Георгиевым и

Б.И. Билкиной (Национальная астрономическая обсерватория Болгарской академии наук). В качестве стандартной свечи использовались ярчайшие звезды в этих галактиках. Около 200 галактик были разрешены на звезды и определены их физические свойства, а также расстояния до них (рис. 119). Несмотря на то, что ярчайшие звезды не являются высокоточным индикатором расстояния, был получен ряд важных результатов. Было исследовано поведение апекса движения нашей Галактики относительно ее ближайших соседей (Караченцев и Макаров, 1996). Было показано, что наблюдаемое движение Солнца относительно микроволнового фона не может быть объяснено влиянием наиболее близкого окружения на шкале до 10 Мпк. Оказалось, что лучевые скорости близких галактик обнаруживают явные признаки когерентности и анизотропии (Караченцев и Макаров, 1997). В плоскости Местного сверхскопления отчетливо проявляется приливное воздействие скопления галактик в Деве на распределение пекулярных скоростей исследованных галактик. Кроме того, пекулярные скорости галактик показали эффект «торможения» разбегания галактик в поперечном направлении (Караченцев и Макаров, 2001).

Создание репрезентативной выборки галактик Местного объема началось со списка 179 галактик, составленного Kraan-Korteweg и Tammann (1979), в который были включены галактики с лучевыми скоростями $V_{LG} < 500$ км/с относительно центра Местной группы, исключая членов соседнего скопления Девы. Позже Караченцев (1994) и Караченцев, Макаров и Nuchtmeier (1999) увеличили количество галактик в Местном объеме до 226 и 303 объектов, соответственно. В 1998–2001 гг. В.Е. Караченцева (Украина) и ее коллеги провели систематический поиск новых карликовых галактик с помощью фотографического обзора неба POSS-II/ESO/SERC. Эти попытки наряду с последующим обзором новых объектов в линии H I нейтрального водорода существенно обогатили выборку галактик Местного объема. Значительное количество новых карликовых иррегулярных галактик с лучевыми скоростями $V_{LG} < 500$ км/с наблюдалось в рамках «слепого» H I-обзора южного неба, выполненного на радиотелескопе Parkes (HIPASS). Это увеличило полное количество галактик Местного объема до 450 объектов, что нашло отражение в каталоге соседних галактик (Catalog of Neighboring Galaxies). В последующие годы выборка Местного объема увеличивалась благодаря обнаружению новых карликовых галактик в Слоановском обзоре неба SDSS, радиообзорам северного неба, выполненным в Parkes (HIPASS), Arecibo (ALFALFA) и Westerbork, и в результате систематического поиска вокруг Млечного Пути, Туманности Андромеды и M 81 карликовых спутников очень низкой светимости, разрешаемых на звезды. Эти наблюдения увеличили количество кандидатов в члены Местного объема до 720, что нашло отражение в улучшенном каталоге близких галактик (Updated Nearby Galaxy Catalog). Очевидно, что большие по площади оптические обзоры неба, такие как Pan-STARRS и более глубокие «слепые» H I-обзоры северного и южного неба увеличат общее количество членов Местного объема.

Распределение близких (в пределах 10 Мпк) галактик по небу показано на рисунке 120. Основная масса галактик Местного объема расположена в плоскости Местного сверхскопления с центром в созвездии Дева, а наша Галактика находится практически в плоскости сверхскопления на его границе. Примерно половину Местного объема занимает гигантская Местная пустота, т. н. «войд Талли», простирающаяся далеко за пределы Местного объема и имеющая размер порядка 50–70 Мпк.

Основным ограничением наземных телескопов является атмосфера, не позволяющая достичь дифракционного предела больших инструментов. Разрешающая способность становится критически важным параметром при использовании

индивидуальных звезд в качестве индикаторов расстояния. Дальнейший прогресс построения трехмерной карты распределения близких галактик был связан с уникальными возможностями космического телескопа им. Хаббла, который позволяет достичь разрешения около $0.''1$. Начиная с 1999 г. командой исследователей под руководством И.Д. Караченцева были выполнены 10 программ в течение более 350 орбит HST.

В этом проекте принимали участие И.Д. Караченцев, Л.Н. Макарова, Д.И. Макаров, М.Е. Шарина совместно с коллегами из США R.B. Tully (University of Hawaii), A.E. Dolphin (Raytheon, Tucson), L. Rizzi (W.M. Keck Observatory) и S. Sakai (University of California at Los Angeles).

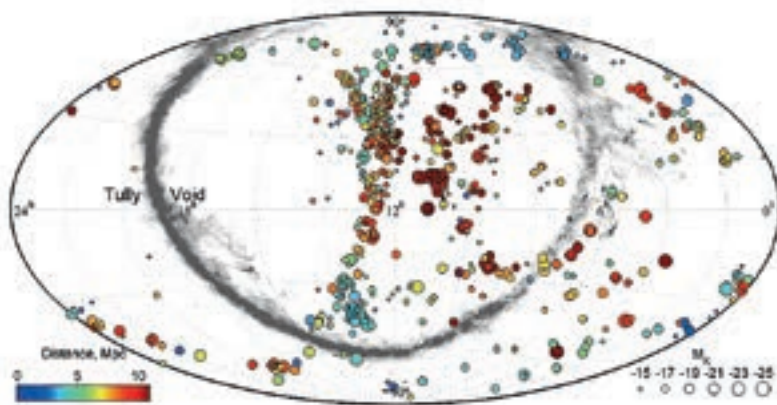


Рис. 120. Распределение по небу галактик Местного Объем. Размер кружков пропорционален абсолютной звездной величине галактики, а цветом закодировано расстояние.

В рамках проекта был улучшен метод определения расстояний по вершине ветви красных гигантов (Макаров и др., 2006). Он обладает рядом преимуществ перед другими методами: относительная простота – анализируется положение обрыва функции светимости старого звездного населения галактик; эффективность – за одну орбиту телескопа HST возможно измерить расстояния вплоть до 10 Мпк; применимость к галактикам всех типов – индикатором расстояния выступают звезды старого населения, встречающиеся во всех галактиках. Точность калибровки (Rizzi et al., 2007) составила $0.^m02$, что сопоставимо или даже лучше, чем у цефеид. Кроме того, оценки расстояния, полученные новым методом, показали отличное согласие со шкалой расстояний, основанной на цефеидах.

Применение уникальных возможностей телескопа им. Хаббла в сочетании с новым методом определения расстояний позволило провести массовые измерения расстояний около 400 близких галактик с точностью 5–10%. Прогресс исследования Местного объема показан на рисунке 121. Цветом выделены измерения, полученные различными методами определения расстояний. Звездами отмечен вклад команды исследователей САО РАН под руководством И.Д. Караченцева в построение карты распределения близких галактик. Внутри сферы радиусом 10 Мпк более 80% высокоточных оценок расстояния получены в САО РАН.

Местный объем содержит карликовые галактики со светимостью в 10^4 раза ниже, чем у Млечного Пути, и включает в себя более десятка групп, похожих на нашу Местную группу по размеру и населению. Подробная диаграмма движений галактик в этих группах и вокруг них впервые выявила некоторые неожиданные особенности хаббловского потока на масштабах 1–3 Мпк (рис. 122).

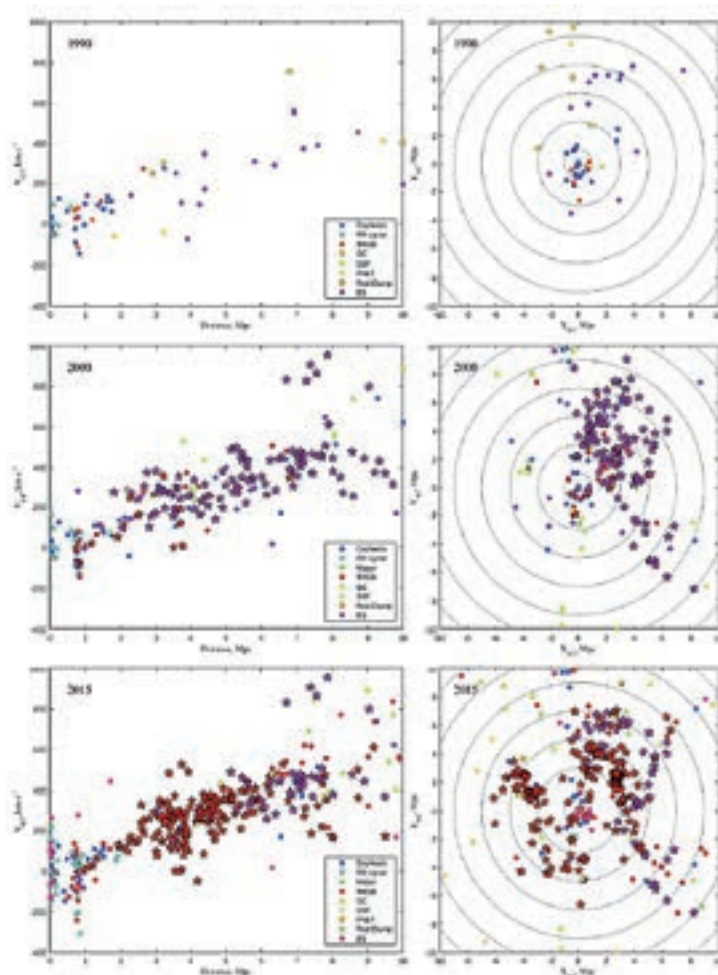


Рис. 121. История исследования распределения галактик в Местном объеме по годам: слева показаны диаграммы Хаббла «скорость – расстояние», справа – распределение близких галактик в проекции на плоскость Местного скопления. Звездами отмечены измерения, выполненные в ЛВАК.

Появились новые свидетельства того, что хаббловские диаграммы «скорость – расстояние» вокруг Местной группы и других соседних групп характеризуются малой дисперсией пекулярных скоростей ~ 30 км/с.

Гравитация Местной группы галактик уменьшает скорость разлета окружающих галактик, что приводит к искривлению местного хаббловского потока. Этот эффект

наблюдается благодаря малости хаотических движений и высокой точности измерения расстояний близких галактик. Достигнутая точность позволяет определить полную массу близких групп галактик с относительной погрешностью $\sim 30\%$ по измерению радиуса «сферы нулевой скорости», R_0 , которая отделяет объем группы от остального расширяющегося окружения (Караченцев и др., 2009). Следует подчеркнуть, что метод R_0 дает оценку массы группы галактик независимо от теоремы вириала, и эта оценка полной массы относится к размеру в 3.5–4.0 раза большему, чем вириальный радиус группы. Стоит отметить, что согласие оценок массы близких групп, основанных на внешних и внутренних (вириальных) движениях галактик, достигается только при учете космологического параметра $\Omega_M \approx 0.7$. Это означает, что наблюдаемые свойства местного разбегания галактик дают прямое и независимое доказательство присутствия особой среды во Вселенной – темной энергии, открытой по наблюдениям далеких сверхновых.

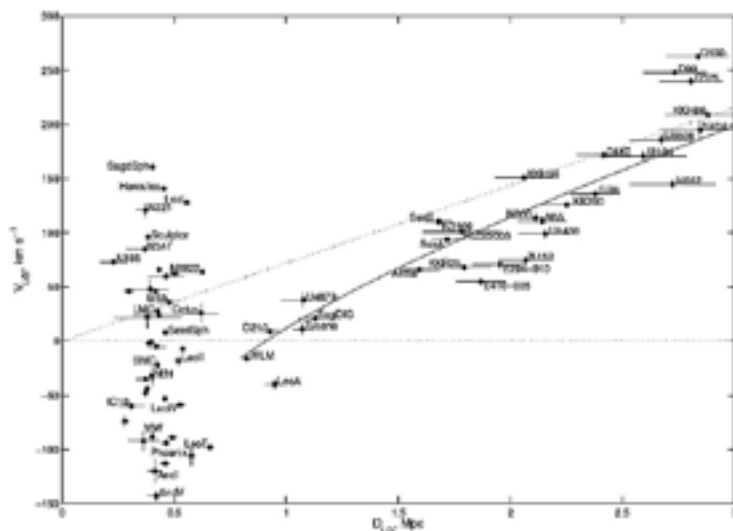


Рис. 122. Диаграмма «скорость – расстояние» для близких галактик относительно центра Местной группы. Модель, описывающая влияние Местной группы на движение близких галактик, показана сплошной линией. Пунктирная линия по диагонали соответствует невозмущенному хаббловскому потоку.

Функция зависимости количества галактик от их круговой скорости является фундаментальной статистикой, чрезвычайно чувствительной к теоретическим предсказаниям. В отличие от функции светимости, которая является результатом истории формирования галактик и зависит от эволюции газа и звезд в них, что делает ее крайне сложной для сравнения с предсказаниями теории, функция скоростей гораздо проще и зависит только от массы темного гало. Однако определение функции скоростей с наблюдательной точки зрения – более сложная задача, поэтому ее согласованные оценки для различных выборок галактик стали получаться только в последнее время. Местный объем позволяет оценивать функцию скорости с точностью 10% для галактик всех морфологических типов, в том числе и для галактик чрезвычайно низкой светимости (Клыпин и др., 2015).

Оказалось, что стандартная Λ CDM-модель дает хорошее предсказание наблюдаемого обилия галактик промежуточных размеров ($V_{max} \geq 70$ км/с и $M_{vir} \geq 3 \times 10^{10} M_{\odot}$), однако категорически расходится с наблюдениями карликовых галактик, предсказывая в 5–6 раз больше гало для галактик с $V_{max} \sim 30$ –40 км/с (рис. 123). Избыток предсказанных темных гало по сравнению с количеством наблюдаемых галактик родственен проблеме потерянных спутников, однако является гораздо более сложным для объяснения, так как относится к галактикам поля. Столь большой избыток предсказанных крупных карликовых галактик с массами $M_{vir} \approx 10^{10} M_{\odot}$ в поле создает сложную проблему – чтобы оказаться потерянными, эти галактики должны быть экстремально низкой поверхностной яркости, без звездообразования и нейтрального водорода.

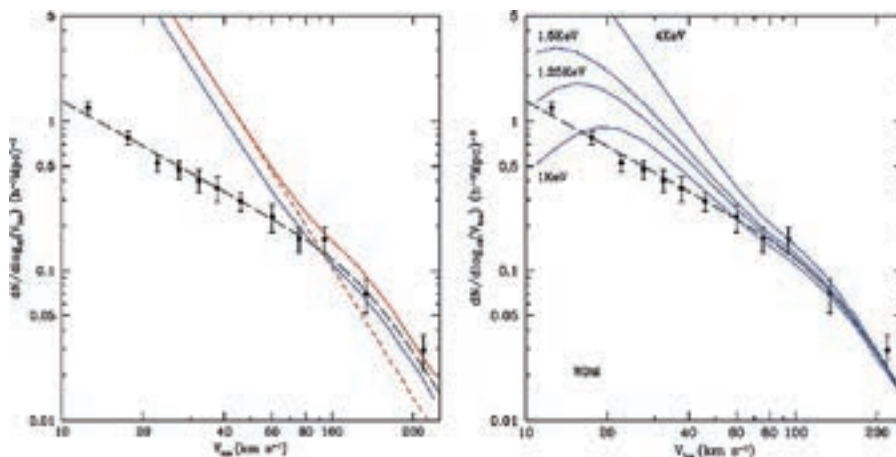


Рис. 123. Сравнение наблюдаемой функции скоростей галактик Местного объема с предсказаниями стандартной Λ CDM-модели и модели с теплым темным веществом.

В ходе картографирования Местного объема было обнаружено несколько уникальных объектов – изолированных карликовых сфероидальных галактик (Макаров и др., 2012; Караченцев и др., 2015). Их расположение показано на рисунке 124. Обычно такие галактики обнаруживаются вблизи гигантских галактик типа нашей или в массивных группах и скоплениях. Их образование объясняется выметанием газа и соответствующим подавлением звездообразования под воздействием массивного соседа. Однако галактики КKR 25 и KKS 3 никогда в ходе своей эволюции не подвергались такому воздействию. Поэтому вопрос об их формировании остается открытым. На данный момент известны всего две такие крайне изолированные карликовые галактики со старым звездным населением, без признаков наличия газа и текущего звездообразования. Существование большого количества массивных сфероидальных галактик в поле может помочь решить проблему избытка предсказываемых теорией галактик в поле. Поиск карликовых сфероидальных галактик в войдах является ключевым тестом для моделей формирования и эволюции карликовых галактик.

Подчеркнем, что наши знания о структуре Местного объема далеко не полны. Наблюдения спутников Млечного Пути и Туманности Андромеды указывают на существование гигантской популяции экстремально слабых галактик, которые не видны

за пределами Местной группы. Высокоточные оценки расстояния на данный момент известны только для примерно половины галактик в пределах 10 Мпк. Очевидно, что расширение и углубление наших знаний о галактиках Местного объема приведет к открытию новых эффектов, чрезвычайно важных для понимания формирования и эволюции Вселенной.

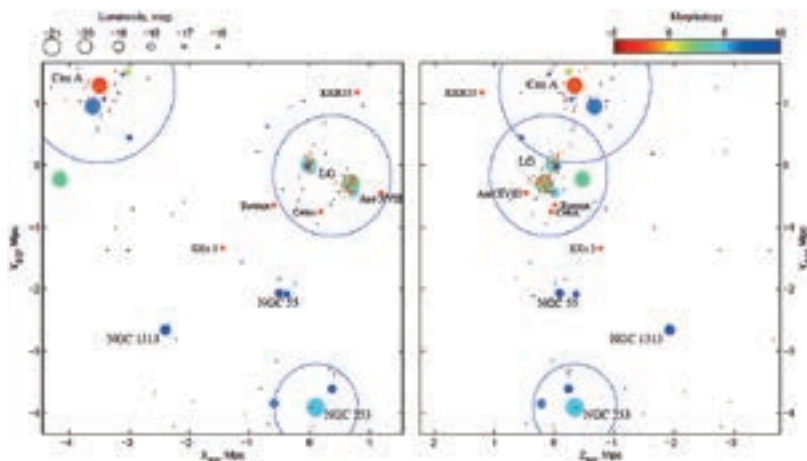


Рис. 124. Положение изолированных карликовых сфероидальных галактик относительно ближайших галактик. Изолированные карликовые сфероидальные галактики выделены красными звездами.

ПУБЛИКАЦИИ

- [1] Karachentsev, I. D.; Makarov, D. I., *Astronomical Journal* 111, 794 (1996).
- [2] Karachentsev, I. D.; Makarov, D. I., *Astrophysical Letters and Communications* 36, No. 1 - 6, p. 7 (1997).
- [3] Karachentsev, I. D.; Makarov, D. I., *Astrophysics* 44, Issue 1, 1-13 (2001).
- [4] Kraan-Korteweg, R. C.; Tammann, G. A., *Astronomische Nachrichten* 300, no. 4, 181 (1979).
- [5] Karachentsev, I.D., *Astronomy and Astrophysics Trans.* 6, No. 1, p. 1 - 35 (1994).
- [6] Karachentsev, I. D.; Makarov, D. I.; Huchtmeier, W. K., *Astronomy and Astrophysics Supplement* 139, p.97-103 (1999).
- [7] Makarov, D.; Makarova, L.; Rizzi, L.; Tully, R.B.; Dolphin, A.E.; Sakai, Sh.; Shaya, E.J., *Astronomical Journal* 132, Is. 6, pp. 2729-2742 (2006).
- [8] Rizzi, L.; Tully, R. B.; Makarov, D.; Makarova, L.; Dolphin, A.E.; Sakai, Sh.; Shaya, E.J., *Astrophysical Journal* 661, Is. 2, pp. 815-829 (2007).
- [9] Karachentsev, I.D.; Kashibadze, O.G.; Makarov, D.I.; Tully, R.B., *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 393, Is. 4, pp. 1265-1274 (2009).
- [10] Klypin, A.; Karachentsev, I.; Makarov, D.; Nasonova, O., *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 454, Is. 2, p.1798-1810 (2015).
- [11] Makarov, D.; Makarova, L.; Sharina, M.; Uklein, R.; Tikhonov, A.; Guhathakurta, P.; Kirby, E.; Terekhova, N., *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 425, Is. 1, pp. 709-719 (2012).
- [12] Karachentsev, I.D.; Riepe, P.; Zilch, T.; Blauensteiner, M.; Elvov, M.; Hochleitner, P.; Hubl, B.; Kerschhuber, G.; Küppers, S.; Neyer, F.; Pözl, R.; Remmel, P.; Schneider, O.; Sparenberg, R.; Trulson, U.; Willems, G.; Ziegler, H., *Astrophysical Bulletin* 70, Is. 4, pp.379-391 (2015).

Эволюция и звездообразование галактик ближней Вселенной

Пустильник С.А.,

ведущий научный сотрудник ЛВАК, д.ф.-м.н.; sap@sao.ru

Предыдущий этап исследования эволюции и звездообразования в галактиках ближней Вселенной, условно завершившийся к 40-летию САО РАН, продолжался с 1988 по 2005 гг. Он включал в себя создание выборок эмиссионных галактик с активным звездообразованием (голубые компактные галактики, ГКГ) и их статистическое и детальное индивидуальное исследование с целью обнаружить возможные связи эволюции и вспышечного звездообразования с локальным и глобальным окружением, а также найти новые галактики с очень низкой металличностью, похожие на IZw 18 – вероятные аналоги молодых галактик в ранней Вселенной. Всего в рамках этого проекта на БТА и зарубежных телескопах получены щелевые спектры более тысячи кандидатов, отобранных по данным обзоров с объективной призмой: Первого и Второго Бюраканских (Second Burakan Survey, SBS), Case (USA) и Гамбург-SAO (Hamburg-SAO Survey, HSS). Полученные выборки ГКГ (240 в зоне SBS, 506 - в зоне HSS+Case) широко использовались астрофизиками САО РАН и многими зарубежными коллегами при исследовании феномена ГКГ и связанных вопросов эволюции и звездообразования в галактиках.

Публикации результатов представлены в более чем 45 статьях в престижных журналах – от Nature и Astrophysical Journal до MNRAS и Astronomy & Astrophysics – и были процитированы более 2000 раз. Лидером этого направления в САО РАН с начала работ и до 1996 г. был В.А. Липовецкий. В 1997 г. руководство этими работами принял С.А. Пустильник. Исходно проект начинался в СССР в тесном контакте с группами ученых из Бюракана (Д.А. Степанян) и Киева (Ю.И. Изотов). На следующих этапах сотрудничество расширялось с включением астрономов из США, Франции, Германии, Испании и Израиля. Важнейшими результатами этого проекта, получившими максимальное число цитирований, являются следующие:

- определения первичного содержания гелия большого числа низкометаллических ГКГ из SBS;
- открытие и детальное исследование (в том числе на БТА, HST и VLA) пары карликовых галактик SBS 0335-052 E и SBS 0335-052 W с рекордно низкой металличностью газа;
- выяснение важности роли локального окружения для вспышек звездообразования в ГКГ;
- обнаружение того, что часть ГКГ, также как и другие типы карликовых галактик, населяют войды.

В последнее десятилетие акценты проекта сместились. Главными задачами являются поиск и изучение галактик с очень низкой металличностью и статистическое исследование свойств галактик в близких пустотах. Для галактик с рекордно низкими металличностями газа и активным звездообразованием получены оценки полной массы газа и данные о кинематике ионизованного и нейтрального водорода. Имеется довольно большой разброс в их свойствах, что, вероятно, указывает на различные эволюционные сценарии, приводящие к пониженной металличности газа в галактиках.

Обнаружено, что большая часть таких объектов показывает следы недавнего взаимодействия и имеет возмущенное поле скоростей. Низкая металличность газа у таких ГКГ, вероятно, связана с падением в центр из-за сильного возмущения переработанного газа из внешних частей дисков или с так называемой холодной аккрецией межгалактического небогатого газа. С увеличением выборки низкометаллических галактик были получены указания на их предпочтительное расположение в областях пониженной плотности галактик – в пустотах. Для понимания значимости и природы такой связи необходимо было работать с большой выборкой галактик и минимальными эффектами наблюдательной селекции, т.е. включать все объекты, которые попадают в изучаемую пустоту.

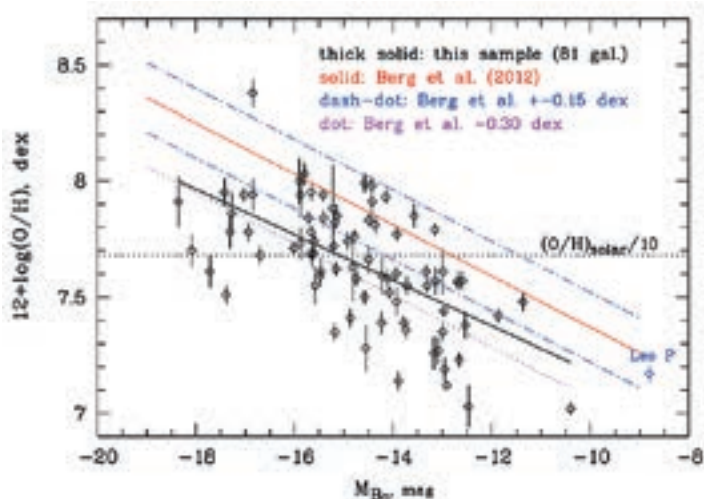


Рис. 125. Ромбами с барями ошибок показаны результаты определения содержания кислорода (O/H) межзвездной среды для 81 галактики пустоты Лупх–Сансер в зависимости от светимости (здесь абсолютная звездная величина M_B в голубой полосе). Черной жирной линией показана линейная регрессия для этой выборки. Красная сплошная линия показывает линейную регрессию для реперной выборки 38 галактик в более плотном окружении, штрих-пунктирные линии показывают диапазон характерного разброса ($\pm 30\%$), в который попадают 80% галактик реперной выборки. Галактики пустоты имеют пониженное в среднем на $\sim 40\%$ значение O/H . Около $1/5$ из них имеет O/H , пониженное более, чем вдвое.

Проведены всесторонние исследования выборки порядка сотни галактик (рис. 125) в одной из ближайших пустот (в Лупх–Сансер, расстояние до центра пустоты 18 Мпс). Для этого использованы БТА, большой радиотелескоп в Нансэ (Франция), фотометрическая и спектральная базы данных цифрового обзора неба SDSS. В результате получены данные о морфологии, поверхностной яркости, цветовых индексах, металличности и полной массе газа галактик пустоты. Для наиболее богатых газом галактик по наблюдениям на радиотелескопе GMRT (Индия) получены карты распределения плотности и скорости нейтрального водорода (в линии HI 21 см).

Для галактик пустот найдены следующие особенности. Подавляющая часть галактик относится к дисковым. Среди них высока доля карликовых галактик низкой поверхностной яркости. У населения пустот значимо понижено содержание металлов (в среднем примерно на треть) и на столько же повышено содержание газа по сравнению с

похожими галактиками той же светимости, но из областей с более типичным окружением (групп и прилегающих областей). Примерно шестая часть изученных галактик близких пустот показывает необычные свойства – крайне низкую металличность газа и очень малую массовую долю звезд (менее нескольких процентов). Впервые вблизи центра пустоты обнаружен карликовый триплет (рис. 126), два члена которого состоят практически из газа (массовая доля звезд менее 1/100).

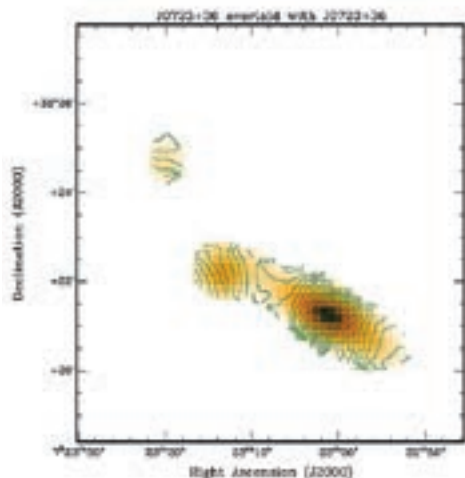


Рис. 126. Карта в линии HI 21 см (GMRT, Индия) распределения плотности водорода (градации оранжевого) с разрешением $\sim 40''$ (3 кпс) для уникального триплета карликовых галактик J0723+36. Изолинии с шагом 3 км/с показывают поле скоростей этих галактик. Все они обладают регулярным вращением. Слабая галактика в центре, взаимодействующая с более массивной западной соседкой, и отдельная, еще более слабая галактика к северо-востоку, имеют звездную массу в 100 раз меньше, чем масса газа. Такие свойства требуют весьма необычного эволюционного сценария.

Анализ совокупности новых наблюдательных данных о свойствах галактик в пустотах приводит к следующим выводам. Эволюция маломассивных галактик в пустотах происходит существенно медленнее, чем у галактик в более плотном окружении. Кроме того, заметная часть самых маломассивных галактик в пустотах начала формировать звезды «недавно» – не более нескольких миллиардов лет назад.

Из-за серьезных эффектов наблюдательной селекции при поиске галактик очень малых масс наше понимание популяции галактик в пустотах пока весьма ограничено. Так, маленькие LSBG с барионной массой ниже $100 \times 10^6 M_{\odot}$ и светимостью ниже, чем $10 \times 10^6 L_{\odot}$ или $M_B > -12^m$, открываются с большим трудом на расстояниях дальше 10 Мпс, хотя по оценкам их ожидается очень много. Нужны новые мощные обзорные инструменты, такие как SKA, которые позволят уверенно обнаруживать галактики в десятки раз слабее, чем те, что позволяют увидеть сегодняшние инструменты.

Ближние пустоты играют роль «космических микроскопов и машин времени» (образное сравнение Aragon-Calvo, Szalay, 2013) при изучении динамики ранней Вселенной. Поэтому более глубокое исследование галактик в пустотах и их статистических свойств принесет новые важные результаты.

Результаты исследований опубликованы в более чем 30 работах в ведущих журналах, такие как MNRAS, Astronomy & Astrophysics и получили более 650 цитирований. Наибольшее внимание получили статьи по изучению низкометаллических галактик Sextans A и B, DDO 68, SBS 0335-052 E,W, HS 0837+4717, HS 0822+3542, а также свежие результаты по свойствам галактик, попадающих в близкую пустоту в области Lynx–Cancer.

Исследование разрешаемых на звезды галактик

Тихонов Н.А.,

руководитель ГИВС, ведущий научный сотрудник, д.ф.-м.н.; ntik@sao.ru

Находясь внутри гигантской звездной системы – Галактики, мы можем даже невооруженным глазом видеть ее звездную составляющую. Телескоп позволяет продолжить такие наблюдения на существенно больших расстояниях. В 1784–1785 гг. В. Гершель опубликовал результаты исследования формы нашей Галактики методом «звездных черепков» и высказал мнение о конечности размеров Галактики и о существовании других, более далеких, наблюдаемых им «звездных островов» Вселенной. Эти даты можно считать началом галактической и внегалактической астрономии.

Долгое время исследования были описательными на основе визуальных наблюдений, но в середине 19-го века появилась фотография, и к началу 20-го века многие астрономические наблюдения стали объективными, фотоснимки астрономических явлений заменили используемые до этого ручные зарисовки. Более того, фотографические эмульсии допускали длительные экспозиции (до десятков часов), и на снимках появлялись неизвестные ранее подробности, которые глаз просто не видел. Наступил длительный период борьбы за повышение чувствительности фотоэмульсий и за увеличение диаметров объективов телескопов, так как больший диаметр позволял собрать больше света от слабосветящегося объекта.

САО АН СССР вступила в этот период в 1976 г. и сразу оказалась в ряду лидеров из-за самого большого на тот период шестиметрового зеркала телескопа. Первые глубокие снимки астрономических объектов, полученные Ю.П. Коровяковским и М.Ф. Шабановым, показали перспективные возможности БТА для внегалактических исследований.

Одной из приоритетных программ САО РАН было изучение пространственного строения Вселенной. Если до далеких галактик расстояния можно определить на основе закона Хаббла, то для близких галактик этот метод не подходит из-за собственных скоростей галактик. Но такие близкие галактики на снимках крупнейших телескопов разрешаются на отдельные звезды, и это можно использовать для определения расстояний. Наилучшую точность в измерениях расстояний давал метод фотометрии пульсирующих звезд – цефеид, но для его применения необходимо было иметь большое число снимков галактики, что не всегда возможно, и поэтому велись разработки иных методов. Один из них – метод ярчайших звезд – давал меньшую точность измерений, чем метод цефеид, но требовал получения всего пары снимков в разных фильтрах и применялся к более яркими звездами, чем цефеиды. Т.е. позволял определять расстояния до более удаленных галактик, чем это делалось на основе метода цефеид.

В начале 80-х годов на БТА по программе И.Д. Караченцева начались фотографические наблюдения близких галактик с целью определения расстояний до них методом ярчайших звезд (рис. 127). И.Д. Караченцевым и Н.А. Тихоновым были получены снимки галактик в голубой (В фильтр) и желтой (V фильтр) областях спектра, что позволяло при сравнении пары снимков выявлять голубые и красные сверхгиганты. Затем на основе измерения яркости сверхгигантов определялось расстояние до родительских галактик. К этому времени в САО уже была отработана

методика очувствления фотоэмульсий ПаО, 103аО и 103аD нагретым водородом, позволявшая в 2-3 сократить время экспозиции, что обеспечило программе успех в получении необходимого числа снимков галактик.

Отдельным этапом работы по определению расстояний был непростой процесс проведения звездной фотометрии снимков БТА и привязка полученных результатов к международным фотометрическим стандартам. Фотометрическая привязка снимков выполнялась С.И. Неизвестным с помощью электрофотометра, а звездная фотометрия фотопластинок проводилась Н.А. Тихоновым, М.Е. Шариной и болгарскими коллегами Ц.Б. Георгиевым и Б. Билкиной на микроденситометрах АМД-1 и АМД-2 при использовании программного обеспечения А.Ф. Назаренко.

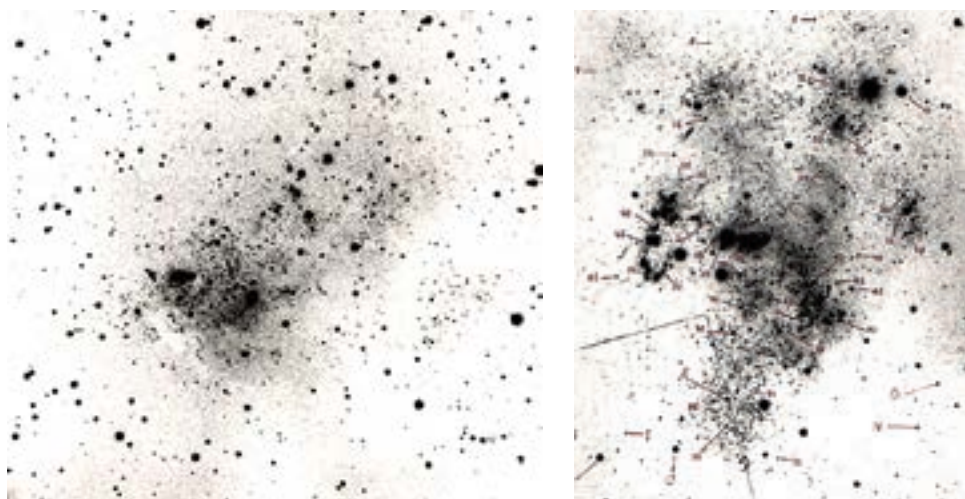


Рис. 127. Слева – фотографический снимок галактики Местной группы IC 10 ($D = 0.78$ Мпс), полученный на БТА в 1982 г. Галактика расположена в зоне Млечного пути, где имеет место значительное поглощение света газопылевыми облаками. В центре галактики наблюдается концентрация ярких сверхгигантов, а общий размер IC10 примерно в 5 раз превышает представленный снимок. Справа – фотографический снимок (БТА) галактики Но II, принадлежащей группе М 81 и находящейся на расстоянии 3.4 Мпс. На снимке размечены яркие сверхгиганты, на основе фотометрии которых определялось расстояние.

Первоначальной целью работы по определению расстояний являлась спиральная галактика М 81 и группа галактик вокруг нее (Tikhonov et al., 1991; Georgiev et al., 1991), но затем в списки объектов для наблюдений попали галактики из других близких групп или изолированные галактики (Karachentsev et al., 1991; Ivanov et al., 1992; Tikhonov et al., 1992; Karachentsev & Tikhonov, 1993; Tikhonov & Karachentsev, 1993; Karachentsev & Tikhonov, 1994 и др.).

Ко времени завершения программы фотографических наблюдений близких галактик для астрономических наблюдений стали применяться первые ПЗС-приемники. Имея высокую квантовую эффективность, они позволяли регистрировать более слабые звезды и тем самым значительно увеличить число разрешаемых на звезды галактик, в которых можно найти сверхгиганты и определить расстояние (рис. 128, слева). Вторым преимуществом ПЗС-матриц была линейность

отклика на принимаемый сигнал, в отличие от фотоэмульсий, где для каждой фотопластинки было необходимо получить свою зависимость между падающим световым потоком и получающейся оптической плотностью. Линейность отклика у ПЗС-матриц позволила упростить процедуру фотометрии астрономических объектов и использовать метод апертурной фотометрии, как это делалось до этого при электрофотометрических наблюдениях. Для звездной фотометрии ПЗС-снимков БТА в САО использовалась программа апертурной фотометрии звезд PCVISTA.

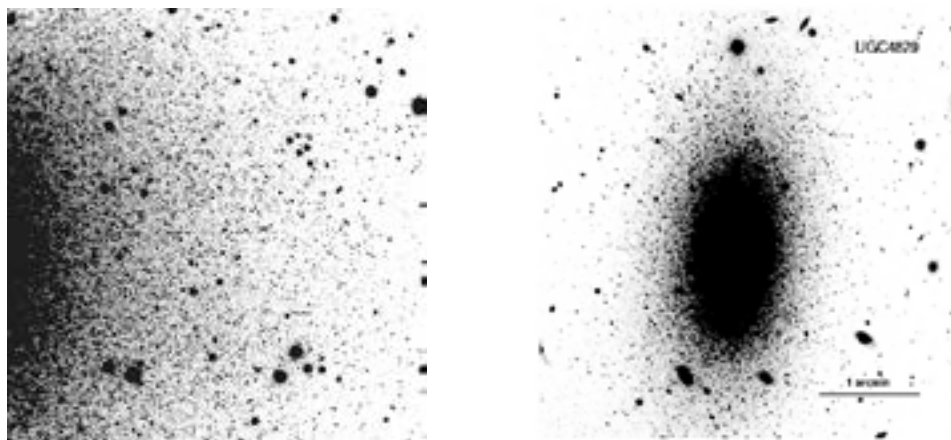


Рис. 128. Слева – ПЗС-снимок БТА галактики Местной группы NGC 185 ($D = 0.64$ Мпк), полученный для изучения пространственного распределения старых звезд, – красных гигантов, которые в большом количестве видны по всему полю снимка. Справа – изображение (БТА/SCORPIO) галактики VV 124 (UGC 4879), впервые отнесенной к Местной группе Копыловым и др. (2008).

Преимущества ПЗС-приемников перед фотоэмульсиями позволили И.Д. Караченцеву продолжить программу определения расстояний до близких галактик. На основе метода ярчайших звезд было значительно увеличено число галактик с измеренными расстояниями (Sharina et al., 1996; Tikhonov & Сазонова, 1996; Tikhonov & Karachentsev, 1998). Глубокий фотометрический предел снимков БТА позволил определить расстояния до ряда галактик в направлении на скопление галактик в Деве, определить расстояние до скопления $D = 6.5$ Мпк и вычислить постоянную Хаббла как $H = 76$ км/с/Мпк (Tikhonov et al., 2000), при современном значении $H = 73$ км/с/Мпк.

В галактиках Местной группы ПЗС-приемники позволяли регистрировать не только ярчайшие сверхгиганты, но и более слабые красные гиганты, которые также можно использовать для определения расстояний TRGB-методом (Lee et al., 1993). Этот метод использовался для определения расстояния до двух новых карликовых галактик Местной группы (Tikhonov & Karachentsev, 1999), а также для определения расстояния до VV 124, которая является последней яркой галактикой, чья принадлежность к Местной группе установлена Копыловым и др. (2008).

Увеличение наблюдательных данных показало, что независимо от светоприемников, метод ярчайших звезд имеет ограниченную и недостаточную для

поставленных задач точность измерения расстояний, хотя и позволяет проводить их для галактик, удаленных от нас до расстояний в 25 Мпк.

Третий этап проводимых в САО исследований разрешаемых на звезды галактик связан с работой HST. Малые угловые размеры звезд на снимках космического телескопа 0."15 по сравнению с «хорошими» для наземных телескопов в 1" позволяют проводить на снимках HST фотометрию одиночных звезд даже в пределах тесных звездных скоплений или центральных областей галактик. Система ориентации телескопа и последующая процедура фотометрической редукции изображений обеспечивают получение стабильных по качеству снимков с очень глубоким фотометрическим пределом.

Переход на качественно более высокий уровень получаемых изображений галактик привел к изменению решаемых задач. На одном снимке HST можно регистрировать до полумиллиона звезд и для их фотометрии необходимы автоматические программы. Такие программы были созданы, наиболее популярные из них – DAOPHOT и DOLPHOT. Изменились и методы определения расстояний. Поскольку на HST-снимках близких галактик видны красные гиганты, то они и были использованы в качестве стандартных свечей (Lee et al., 1993). Процесс измерения расстояний существенно ускорился, а точность измерения не уступала точности метода цефеид, а, возможно, и превосходила его. Счет измеренным галактикам пошел не на единицы, как это было с методом цефеид, не на десятки, как определялось методом ярчайших звезд, а на сотни (Tully et al., 2013).

Измерение расстояния до галактик – это безусловно важный параметр для изучения структуры ближней Вселенной, но снимки космического телескопа содержат значительно больше информации, чем только данные, необходимые для измерения расстояния. Снимки в разных фильтрах позволяют получить диаграммы ГР для звезд исследуемых галактик, а на них выделить звезды разных типов: голубые и красные сверхгиганты, AGB-звезды и звезды ГП, звезды RR Lyg и красные гиганты, т.е. все основное звездное население галактик. Эта информация дает возможность проследить историю звездообразования в исследуемой галактике (Makarova et al., 2010).

Поскольку кроме фотометрических параметров программа фотометрии выдает и координаты объектов, мы получаем возможность изучить в галактиках пространственное распределение звезд разных типов. Из-за сравнительно небольших размеров изображений космического телескопа наиболее удобны для изучения небольшие карликовые галактики. Насколько разнообразны задачи, решения которых получены с помощью анализа звездного населения разрешаемых на звезды галактик, показывают помещенные ниже примеры.

Долгое время оставалась загадкой слабосветящаяся периферия галактик: насколько далеко она простирается и из чего она состоит (рис. 129). Снимки HST разрешаемых на звезды галактик позволяют проследить их звездную периферию примерно до 31 зв. вел./кв. сек. Мы использовали эту возможность телескопа и изучили строение карликовых иррегулярных галактик (Тихонов, 2005; 2006). Выяснилось, что периферия этих галактик состоит из красных гигантов, а размеры галактик по снимкам космического телескопа в 2–3 раза превышают те размеры, которые указаны в каталогах на основании измерений по Паломарским картам (DSS и DSS2). Аналогичные исследования мы провели и для спиральных галактик. Оказалось, что спиральные галактики, также как иррегулярные, имеют тонкий диск, состоящий из молодых звезд, и толстый диск, состоящий из старых звезд – красных гигантов.

Были найдены различия в строении звездной периферии этих типов галактик из-за различия их масс. Оказалось, что спиральные галактики кроме толстого диска из красных гигантов обладают еще и более протяженным звездным гало, также состоящим из красных гигантов (Tikhonov et al., 2005; Тихонов, Галазутдинова, 2005).

При изучении пространственного распределения звезд разного возраста в иррегулярных галактиках была найдена зависимость между возрастом звезд и размером подсистемы, образуемой в галактике этими звездами (рис. 130, слева). Чем больше возраст звезд, тем больше размер подсистемы. Было определено, что этой зависимости следуют звезды в большом диапазоне возрастов: от молодых сверхгигантов (5–10 млн лет) до звезд RR Lyg (10–12 млрд лет). Галактики представляются объемной «матрешкой», и определяемые в них тонкие или толстые диски – это только две звездные подсистемы, которые из-за легкости отождествления составляющих их звезд были выделены в галактиках, в то время как другие звездные подсистемы остались без внимания (Тихонов, Галазутдинова, 2012; Тихонов, 2013).

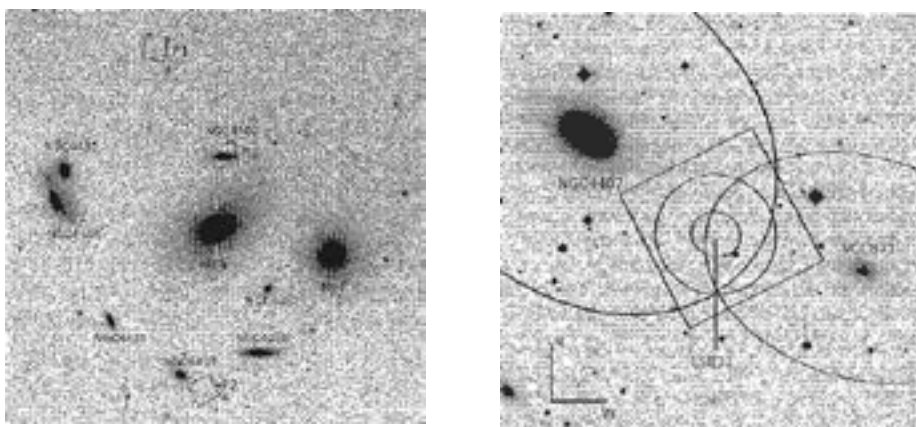


Рис. 129. Слева – область скопления галактик Дева (обзор DSS). Квадратами отмечены поля F1, F2, F3 космического телескопа Хаббла с камерой ACS/WFC. Снимки полей F1 и F2 использовались для доказательства существования межгалактических звезд. Размер снимка $1^\circ \times 1^\circ$. Справа – область (обзор DSS) вокруг поля F2. Эллипсами отмечены границы хорошо видимой звездной периферии галактик, но в реальности галактики простираются на еще большие расстояния. т.е. любая выборка звезд этого поля будет состоять из звезд периферии галактик, но не из межгалактических звезд.

Сравнение получаемых для звезд галактик диаграмм ГР с теоретическими изохронами (Bertelli et al., 1994) позволяет определить возраст и металличность звезд внутренних и внешних областей галактик вплоть до далекой периферии, что дает возможность получать для галактик новые, недоступные ранее, физические параметры. Для объяснения зависимости между размером подсистемы и возрастом звезд нами была выдвинута гипотеза о расширении галактик за время их эволюции (Тихонов, 2012). Если эта гипотеза верна, то должна наблюдаться зависимость между металличностью галактик и разностью между размерами толстого и тонкого дисков (рис. 130, справа). Такая зависимость действительно была найдена, но пока что интерпретация этой зависимости не вполне однозначна.

Изучение распределения звезд по телу галактик позволяет прояснить некоторые загадочные результаты, полученные на основе других методов наблюдений. Яркая спиральная галактика NGC 1313 проявляет хорошо видимые признаки гравитационного взаимодействия, но в окрестностях нет ни одной галактики, которая могла бы создать наблюдаемую деформацию формы NGC 1313. Изучение распределения звезд разного возраста и металличности позволило найти фрагменты той галактики, которая вызвала искажения формы, а сама почти слилась с NGC 1313 (Тихонов & Галазутдинова, 2016). Такой же подход был применен для галактики DDO 68, которая показывала сильное отклонение от зависимости между светимостью и металличностью галактик. Изучение распределения звезд показало, что DDO 68 состоит из двух или даже трех взаимодействующих галактик и низкое значение металличности относится только к одной из них, в то время как светимость измеряется в сумме от всех галактик (Тихонов и др., 2014).

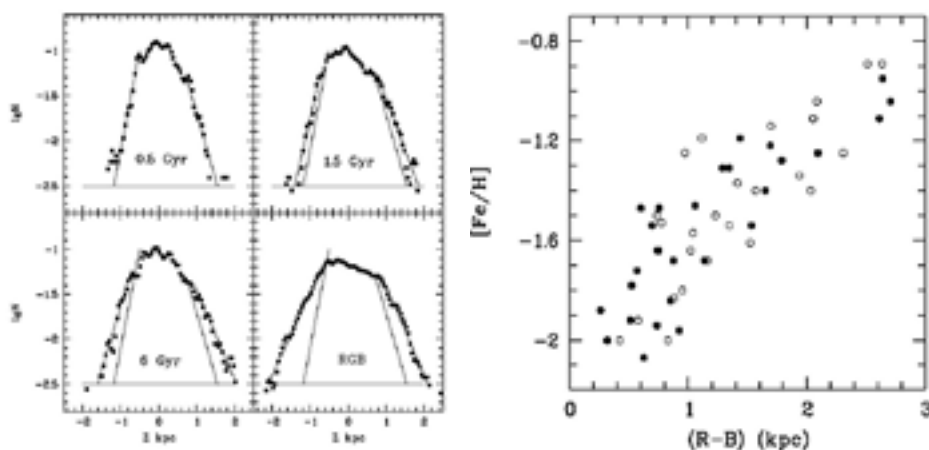


Рис. 130. Слева – распределение плотности звезд разного возраста вдоль малой оси галактики Но IV. Видно, что с увеличением возраста звезд увеличивается размер подсистемы, образуемой этими звездами. Наибольший размер на этой диаграмме занимают старые красные гиганты, но подсистема более старых звезд RR Lyr, не обозначенная на этой диаграмме, имеет еще большие размеры. Справа – зависимость между разностью размеров звездных подсистем старых и молодых звезд и металличностью звезд карликовых галактик. Данную зависимость может объяснить процесс расширения галактик за время их эволюции. Галактики, видимые почти плашмя, обозначены черными кружками, а галактики, видимые с ребра, обозначены пустыми кружками.

При близких прохождении галактик, что часто наблюдается в скоплениях или группах, может происходить отрыв звезд от периферии галактик. Эти звезды оказываются за пределами галактик, и они получили название «межгалактические» звезды. В качестве доказательства существования таких звезд были представлены наблюдения полей в скоплении галактик в Деве. Изучая звездную морфологию периферии галактик в группах и скоплениях, мы провели фотометрию изображений, на которых были найдены межгалактические звезды, и установили, что в реальности эти звезды принадлежат периферии нескольких слабых галактик и межгалактическими звездами не являются (Тихонов, 2017). Т.е. наблюдения для поиска действительно

межгалактических звезд были проведены на HST некорректно, без предварительного учета вклада периферии галактик в исследуемые выборки звезд.

Публикации

- [1] Tikhonov N.A., Bilkina B.I., Karachentsev I.D., Georgiev Ts.B., A&AS 89, 1 (1991).
- [2] Georgiev Ts. B., Tikhonov N.A., Karachentsev I.D., Bilkina B.I., A&AS 89, 529 (1991).
- [3] Георгиев Ц.Б., Тихонов Н.А., Караченцев И.Д., ПАЖ 17, 387 (1991).
- [4] Karachentsev I.D., Tikhonov N.A., Georgiev Ts.B., Bilkina B.I., Sharina M.E., A&AS 91, 503 (1991).
- [5] Ivanov G.R., Popravko G., Efremov Yu.N., Tikhonov N.A., Karachentsev I.D., A&AS 96, 645 (1992).
- [6] Tikhonov N.A., Karachentsev I.D., Bilkina B.I., Sharina M.E., A&ApTrans 1, 269 (1992).
- [7] Karachentsev I.D., Tikhonov N.A., A&A 100, 227 (1993).
- [8] Tikhonov N.A., Karachentsev I.D., A&A 275, 39 (1993).
- [9] Karachentsev I., Tikhonov N., A&A 286, 718 (1994).
- [10] Sharina M.E., Karachentsev I.D., Tikhonov N.A., A&AS 119, 499 (1996).
- [11] Tikhonov N., Sazonova L., AN 317, 179 (1996).
- [12] Tikhonov N.A. and Karachentsev I.D., A&AS 128, 325 (1998).
- [13] Tikhonov N.A., Galazutdinova O.A., Drozdovskii I.O., Afz 43, 367 (2000).
- [14] Lee M., Freedman W., Madore B., AphJ. 417, 553 (1993).
- [15] Tikhonov N.A., Karachentsev I.D., AstL 25, 332 (1999).
- [16] Kopylov A.I., Tikhonov N.A., Fabrika S.N., et al. MNRAS 387L, 45 (2008).
- [17] Tully и др., AJ 146, 86 (2013).
- [18] Makarova L., Koleva M., Makarov D., Prugniel Ph., MNRAS 406, 1152 (2010).
- [19] Тихонов Н.А., АЖ 82, 563 (2005).
- [20] Тихонов Н.А., АЖ 83, 579 (2006).
- [21] Tikhonov N.A., Galazutdinova O.A., Drozdovsky I.O., A&A 431, 127 (2005).
- [22] Тихонов Н.А., Галазутдинова, Астрофизика 48, 221 (2005).
- [23] Тихонов Н.А., Галазутдинова О.А., ПАЖ 38, 172 (2012).
- [24] Тихонов Н.А., ПАЖ 39, 332 (2013).
- [25] Bertelli G., Bressan A., Chiosi C., Fagotto F., Nasi E., A&AS 106, 275 (1994).
- [26] Тихонов Н.А., ПАЖ 38, 562 (2012).
- [27] Тихонов Н.А., Галазутдинова О.А., ПАЖ 42, 476 (2016).
- [28] Тихонов Н.А., Галазутдинова О.А., Лебедев В.С., ПАЖ 40, 3 (2014).
- [29] Тихонов Н.А., ПАЖ 43, N1 (2017).

Радиоастрономические исследования

Радиоастрономия от БПР к РАТАН-600

Парийский Ю.Н.,

главный научный сотрудник СПбФ, академик РАН, д.ф.-м.н.; unipar@rambler.ru,

Мингалиев М.Г.,

и.о. научного руководителя, д.ф.-м.н.; marat@sao.ru,

Сотникова Ю.В.

заместитель директора по научной работе, к.ф.-м.н.; sjv@sao.ru,

Хайкин В.Б.,

руководитель ГАМР СПбФ, ведущий научный сотрудник, к.ф.-м.н.; vkh@sao.ru,

Госачинский И.В.,

главный научный сотрудник-консультант ГГВИ СПбФ, д.ф.-м.н.; gos@sao.ru,

Жеканис Г.В.,

руководитель ГАСУР, ведущий инженер; gvz@sao.ru,

Нижельский Н.А.,

заведующий ЛРК, к.ф.-м.н.; nizh@sao.ru,

Дравских А.Ф.,

д.ф.-м.н.,

Майорова Е.К.,

старший научный сотрудник ГИГК, к.ф.-м.н.; len@sao.ru,

Тимофеева Г.М.,

к.ф.-м.н.,

Богод В.М.,

заведующий СПбФ, д.ф.-м.н.; vbog@sao.ru,

Темирова А.В.,

старший научный сотрудник ГГВИ СПбФ, к.ф.-м.н.; adelina_temirova@mail.ru

Идеология САО РАН в области радиоастрономии начала формироваться в 50-е годы прошлого века, когда пулковским радиоастрономам, возглавляемым основоположником отечественной экспериментальной радиоастрономии проф. С.Э. Хайкиным, было поручено разработать методы исследования ближнего и дальнего космоса в новом для того времени сантиметровом диапазоне длин волн. С.Э. Хайкиным совместно с Н.Л. Кайдановским был предложен вариант решения для задач, не требующих слежения. Так появился Большой пулковский радиотелескоп (БПР) с рекордным для того времени разрешением (размеры ножевой диаграммы $1'-1^\circ$ для длины волны 3.2 см).

Радиоастрономия в те годы развивалась стремительно. За 10 лет своего существования отдел радиоастрономии превратился в один из крупнейших отделов Пулковской обсерватории. БПР (рис. 132) принципиально отличался от имеющихся сантиметровых телескопов того времени и в течение ряда лет первенствовал в разрешающей способности. Школа пулковской радиоастрономии получила широкую известность во всем астрономическом мире. Коллективом были разработаны

направления, где этот тип радиотелескопов мог бы быть вне конкуренции с другими инструментами. Потом многие из сотрудников перешли в САО РАН на РАТАН-600.

БПР с ручным управлением отражающими элементами послужил прообразом РАТАН-600. Справедливо считалось, что без «пулковского» опыта судьба строительства РАТАН-600 была бы туманной, так как удивительным образом небольшим коллективом из 40 человек, включая механиков, лаборантов и техников, были освоены сложные методические направления. Начало 60-х годов для советской радиоастрономии было периодом выбора системы радиотелескопа нового поколения. Предложение о сооружении большого радиотелескопа с антенной нового и непривычного типа не было встречено с энтузиазмом, оно вызвало острые дискуссии о преимуществах и недостатках различных систем радиотелескопов.

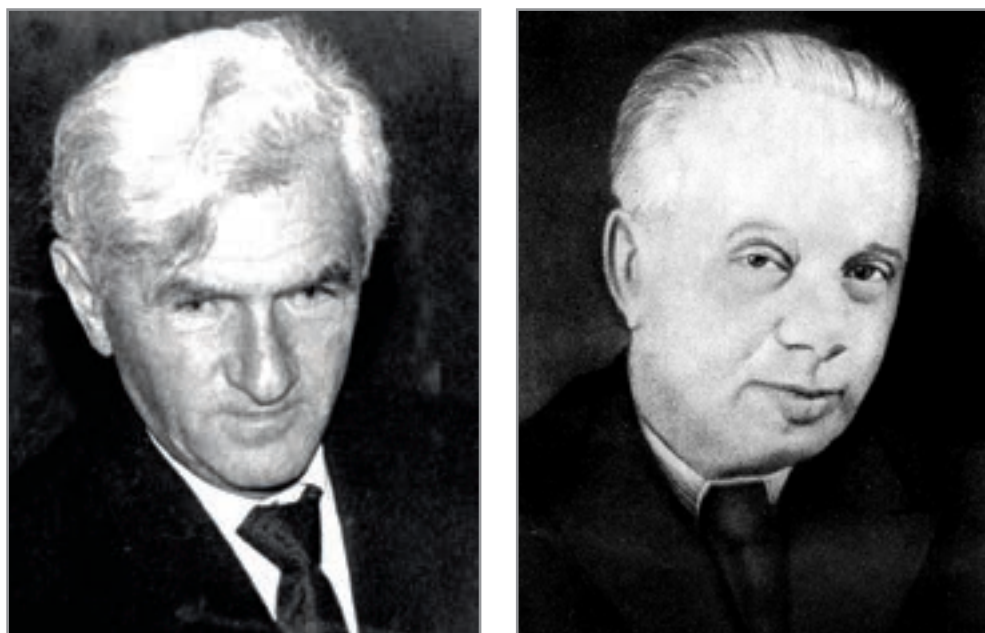


Рис. 131. Слева – главный конструктор РАТАН-600 Н.Л. Кайдановский (1907–2010 гг.); справа – советский и российский физик и радиоастроном С.Э. Хайкин (1901–1968 гг.).

В 1965 г. в АН СССР было принято решение о сооружении радиотелескопа по проекту, предложенному группами из Пулковской обсерватории и ГАИШ МГУ. Была создана комиссия по выбору места. Общими требованиями были:

- расположение на юге страны – для расширения области неба, доступной исследованию;
- уровень защиты по горизонту 1–3 градуса;
- оптимальный грунт;
- близость дорог и линий электропередач.

Не очевидный тогда подход оказался разумным с точки зрения сегодняшнего дня.

Наиболее ответственные и сложные работы делались руками сотрудников ЛФ САО и радиоастрономического сектора САО РАН: обшивка поверхности, ввод в действие

первого сектора главного зеркала, геодезическая и радиотехническая юстировки главного зеркала и, наконец, высокочувствительные радиометры делались совместно инженерами-радиоастрономами и предприятиями электронной промышленности. Всего в создании РАТАН-600 принимало участие около 40 организаций различных ведомств. Особенностью было то, что это было самое крупное строительство, которое вела именно АН СССР, в отличие от атомныхстроек, ускорителей и даже от БТА. Генпроектировщиком в Академии наук был институт ЛО ГИПРОНИИ (работы по фундаментам и общестроительной документации), генеральный проектировщик по конструкциям радиотелескопа – Минэнерго, головной завод – Сызранский завод тяжелого машиностроения, строймонтаж был поручен тресту «Ставропольгидроэнергострой» (рис. 133, 134).



Рис. 132. Большой пулковский радиотелескоп – БПР, являющийся прототипом РАТАН-600 (1960-е гг.).

За последние 50 лет произошло качественное изменение возможностей радиоастрономии в САО РАН и получены новые данные по многим направлениям. Перечислим некоторые.

Солнце. От исследования отдельных ярких образований на 3-5 частотах перешли к 40-канальным исследованиям с разрешением и чувствительностью на порядок выше, чем ранее. Впервые открыто явление радиогрануляции в сантиметровом диапазоне волн, обнаружены новые явления в спектре и поляризации пятен. Появились первые двумерные многочастотные изображения с большим разрешением. Сегодня РАТАН-600 – основной инструмент в мире по мониторингу солнечной активности в радиодиапазоне.

Луна и планеты. Впервые обнаружена френелевская поляризация Луны в сантиметровом диапазоне, и это привело к самым точным оценкам свойств ее поверхности. Данные подтверждены прямыми исследованиями.

Предложен новый дифференциальный метод исследования тепловых и электрических свойств поверхности на глубинах до 10 м. Результаты оказались востребованы сегодня в связи с поиском занесенного солнечным ветром перспективного ядерного горючего (He3, захваченного TiO2). Выявлены места крупных залегающих этого топлива.

В противовес официальным утверждениям США о выключении мощных излучателей в точках посадки кораблей «Аполлон» все они были зарегистрированы на

РАТАН-600 в первых двумерных исследованиях Луны. Сегодня это является неоспоримым свидетельством реальности высадки астронавтов на Луну.

Неожиданным явилось обнаружение аномальных радиосвойств крупных кратеров (Коперник). Впервые в сантиметровом диапазоне (длина волны 1 см) с помощью нового матричного радиометра обнаружена мелкомасштабная рябь («радиогрануляция»), изменяющаяся с фазой Луны.



Рис. 133. Общий вид строительства РАТАН-600. Внизу слева лежат неокрашенные фермы отражательных элементов антенны. Окраска производилась здесь же.

До полета «МАРИНЕР-2» к Венере удалось получить изображение Венеры на волне 8 мм (БПР, разрешение 15") и доказать, что Венера имеет горячую поверхность и огромное давление. Близким методом это было подтверждено «МАРИНЕР-2».

Впервые с разрешением 6" были оценены величина поляризация полярных шапок Марса и водность радиоизлучающего слоя поверхности.

Обнаружено проникновение солнечного ветра до орбиты Юпитера по деформации дециметровых поясов радиации. С разрешением 6" на длине волны 1 см обнаружены высокоэнергичные электроны в поясах радиации, требующие объяснения их происхождения. Используя уникальную возможность отделения мощного радиоизлучения диска Юпитера, исследовано радиоизлучение всех галилеевых спутников Юпитера и выявлены особые свойства спутника Ио, что было подтверждено прямыми исследованиями через 10 лет.

Галактика. После первых в мире исследований Галактики в сантиметровом диапазоне проведен поиск и исследование остатков сверхновых. Организован

мониторинг нового явления – микроквazarов, где РАТАН-600 неоднократно являлся триггером международных всеволновых кампаний.

Удалось провести предельно глубокие многочастотные исследования фонового радиоизлучения крупных областей в Галактике. Это позволило значительно уточнить роль фонового излучения Галактики во внегалактических исследованиях и доказать возможность регистрации предсказанных теорией космологических эффектов на мкК-уровне и проведения экспериментов следующего поколения.

Радиокосмология. С помощью БПР проводились первые в мире систематические исследования с высоким разрешением в сантиметровом диапазоне длин волн самых ярких радиоисточников. Так, впервые была разрешена классическая радиогалактика Лебедь А прямым, не интерферометрическим методом, детально исследованы ее поляризационные свойства и обнаружено мощное фарадеевское гало, что было использовано при разработке Райлом и Лонгейром классической теории радиоизлучения FRII-объектов.

Проведены наиболее полные в 70-е гг. массовые исследования в сантиметровом диапазоне структуры и поляризации основных крупных радиогалактик ЗС-каталога. Впервые получены указания на ускорения космических лучей в компонентах двойных радиоисточников, существование сильно поляризованных джетов в близких радиогалактиках.

Проведены первые поисковые обзоры больших областей неба (2 стерадиана) и обнаружено 7000 объектов в сантиметровом диапазоне. В эксперименте «Холод», самом глубоком обзоре неба на начало 80-х годов, достигнута чувствительность на уровне нескольких мЯн на всех волнах сантиметрового диапазона, включая 2 см, и оценены спектральные свойства обнаруженных объектов.

Крупной частью внегалактических исследований стал эксперимент «Большое Трио», который выявил поколение предельно далеких очень мощных радиогалактик (до $z = 4.515$). Важно, что их обнаружение требует пересмотра старой схемы формирования гигантских черных дыр в ядрах галактик, и, возможно, приведет к схеме с крупными первичными сверхмассивными черными дырами. РАТАН-600 сегодня «видит» объекты этого класса на любых расстояниях, если они там существуют. Получены первые результаты по независимой оценке роли «темной энергии».

Открытием радиоастрономии САО РАН явилось темное пятно в направлении скопления галактик Кома, предсказанное Зельдовичем и Сюняевым, как следствие комптоновского рассеяния реликтовых фотонов горячим газом в скоплении. Это наблюдение стало началом нового крупного направления современной астрономии, так называемой СЗ-астрономии.

Радиоастрономы САО были первыми (1968 г.), кто приступил к исследованию анизотропии ЗК-фона на миллиградусном уровне, которую предсказывала теория того времени. Это привело к полному пересмотру теории формирования галактик и к поиску вариантов, не противоречащих данным наблюдений (скалярная, векторная, тензорная природа первичных возмущений; нейтринная Вселенная и др.). Только к 1990 г. удалось найти вариант теории, не противоречащий данным РАТАН-600, – инфляционную модель. Она получила подтверждение в космических экспериментах уже в 21 веке.

Генетический Код Вселенной. В настоящее время в обсерватории ведется проект «Генетический Код Вселенной», целью которого является накопление данных с пиксельной чувствительностью, которая выше достигнутой в WMAP и Planck, и с

разрешением на порядок более высоким (но по ограниченной области неба). РАТАН-600 является одним из основных наземных радиотелескопов, проводящих наблюдения по согласованной с консорциумом Planck программе поддержки основного космологического эксперимента начала 21 века (см. проект «Генетический Код Вселенной», <http://www.sao.ru/hg/CG/>).

РАТАН-600 – крупнейший в мире радиотелескоп с антенной переменного профиля и основной инструмент в России, работающий в «окне прозрачности» земной атмосферы. Преимущество РАТАН-600 сохраняется в некоторых направлениях и сегодня, несмотря на появление нового поколения инструментов с РСДБ-разрешением. К этим направлениям относятся: построение мгновенных многочастотных радиоспектров, глубокие поисковые многочастотные обзоры неба (все виды фоновых излучений Вселенной, радиоисточники высокой радиосветимости на любых красных смещениях), исследования с высоким разрешением Солнца в сантиметровом диапазоне волн (интенсивность, поляризация, переменность).

Успехи радиоастрономии в САО РАН связаны с активной работой по непрерывному улучшению параметров радиотелескопа и методов наблюдений.

Некоторые цифры. За 40 лет чувствительность радиометров в сплошном спектре в диапазоне частот 4–30 ГГц выросла в несколько раз. Введены в штатный режим несколько радиометров с высокой чувствительностью около 3–10 мК. Геометрическую площадь поверхности удалось удвоить по сравнению с первичным проектом и довести площадь всего кольца до 20000 кв.м. Полностью переобшиты или переюстированы все 1024 элемента (600000 регулируемых крепежных винтов). Все элементы имеют точность около 0.2 мм СКО (среднеквадратичное отклонение). Специальная юстировка главного зеркала проведена так, что исправленная поверхность каждого элемента антенны закреплена с помощью долговечных фиксирующих пружин. Элементы главного зеркала и их взаимная привязка методом автокомаллиционной юстировки имеют такую точность, что можно проводить качественные измерения на частоте 30 ГГц.

На порядок повышена пропускная способность РАТАН-600 в связи с созданием новой системы АСУ РАТАН-600 с быстротой отработки задания и с контролем положения элементов до 100 микрон. Система АСУ РАТАН-600 служит основой для точных радиоастрономических измерений до 100 источников в сутки.

САО РАН – один из инициаторов внедрения матричного направления в радиоастрономии, и уже более 10 лет назад были продемонстрированы его возможности. Первоначально эксплуатировались небольшие матрицы, в последние 10 лет используется 32-волноводная матрица, которая за доли минуты может заменить месячное накопление данных по слабым объектам. Рассмотрены варианты еще более крупных матриц, включая предельно большие, заполняющие все безабберационное поле РАТАН-600, варианты их охлаждения и превращения в фокальную фазированную антенную решетку.

Регистрация полной мощности принимаемого излучения, реализованная сотрудниками лаборатории радиометров континуума (П.Г. Цыбулев и др.), – одно из основных достижений последнего десятилетия в области радиометрии САО РАН. Исследования различных типов шумов в радиометрах РАТАН-600 и применяемой элементной базы показали, что сильным источником шума вида $1/f$ может быть детектор радиометра. Применение современных детекторов в сочетании с новыми неохлаждаемыми усилителями дает возможность проводить наблюдения радиометрами, построенными по схеме «радиометр полной мощности» с расчетной

чувствительностью. Такая схема имеет наилучшую чувствительность среди всех других схем радиометров, и эта чувствительность в 2 раза лучше, чем у модуляционного радиометра. Расчетная чувствительность «радиометра полной мощности» реализуется на масштабах времени 10–20 с.



Рис. 134. Сборка плоского отражателя РАТАН-600.

Коллектив САО РАН предложил ряд крупных проектов. Так, для преодоления атмосферных ограничений был предложен метод восстановления волнового фронта в РСДБ-сетях любого размера и создан проект ПОЛИГАМ с включением всех действующих инструментов, с добавлением новых наземных и космических телескопов. Часть этого проекта была реализована в созданном институте ИПА РАН в виде проекта КВАЗАР КВО.

РАТАН-600 работает в оптимальном диапазоне волн от миллиметров до дециметров, реализуя свое главное преимущество – возможность получения мгновенного радиоспектра радиоисточника за одно наблюдение. Достоинства РАТАН-600 в свое время позволили поставить его в ряд конструкций новой технологии, основанной на применении современных средств автоматике и вычислительной техники. Многие принципы современного телескопостроения были выдвинуты и осуществлены на РАТАН-600 впервые в мире.

Обзоры фонового излучения на РАТАН-600

Парийский Ю.Н.,

главный научный сотрудник СПбФ, академик РАН, д.ф.-м.н.; unipar@rambler.ru

Верходанов В.О.,

руководитель ГИГК, ведущий научный сотрудник, д.ф.-м.н.; vo@sao.ru

Первые наблюдения на РАТАН-600 были проведены на северном секторе радиотелескопа в 1974 г., еще до официального завершения строительства в 1977 г. Одна из основных задач этого инструмента – проведение глубоких обзоров неба на нескольких длинах волн [1]. Глубокие обзоры неба – самые чувствительные эксперименты на момент их проведения, как правило, с хорошим разрешением, чтобы шум слабых радиоисточников не мешал поиску и выделению объектов. Цели обзоров – поиск и исследование радиоисточников, а также изучение фонового распределения радиояркости неба, которое может быть связано как с излучением Солнечной системы, так и с излучением нашей Галактики, и с космологическим фоном.

Среди наиболее важных наблюдательных программ, проведенных на РАТАН-600, эксперимент «Холод» занимает особое место. Целью его было исследование предельных возможностей радиотелескопа при минимально возможных в то время шумах системы «радиотелескоп-радиометр» [2]. В эксперименте был использован радиометр, лучший по флуктуационной чувствительности из известных в Советском Союзе на начало 1980-х годов. Радиометр на основе параметрического усилителя имел замкнутый цикл гелиевого охлаждения. Центральная частота криоусилителя – 3945 МГц (длина волны 7.6 см). За несколько месяцев наблюдений в 1980 г. был достигнут уровень чувствительности ниже 1 мЯн плотности потока. Этот уровень определялся слабыми фоновыми радиоисточниками. Для наблюдений по программе «Холод» использовался северный сектор радиотелескопа. Наблюдения проводились в меридиане на склонении $\delta_{1950.0} = +4^{\circ}54'$ с шириной полосы 10'. Склонение было выбрано по координатам объекта SS 433, самого известного микроквара Галактики. Кроме основной длины волны 7.6 см, на которой проводились чувствительные наблюдения, использовались приемники на дополнительных длинах волн для решения разнообразных астрофизических задач [2]:

- радиометр на длине волны 8.2 см служил для выделения локальных помех;
- измерения на волнах 2.08 и 3.9 см применялись для «чистки» от флуктуаций излучения атмосферы;
- радиометр на 960 МГц (31 см) был использован для контроля за локальными помехами, а также для выделения нетеплового фона излучения Галактики.

Одним из основных результатов обзоров «Холод» стал каталог радиоисточников RC (RATAN Cold) [3, 4], который лег в основу программы исследования далеких радиогалактик «Большое Трио» [5]. В начале 80-х годов XX века, к моменту получения первых данных в сантиметровом диапазоне длин волн в эксперименте «Холод», который проводился, в том числе, для исследования анизотропии трехградусного реликтового фона, не существовало достаточно чувствительных каталогов в изучаемой на РАТАН-600 области неба. Самый достоверный каталог 3CR на частоте 178 МГц имел порог около 10 Ян [6], и основная популяция радиоисточников со стандартными спектрами ($\alpha \sim -0.8$, $S \propto \nu^{\alpha}$) обрывалась на уровне плотности потока около 0.5 Ян на

волне 7.6 см. Это было на два порядка выше флуктуационной чувствительности даже одного суточного скана неба в режиме прохождения на волне 7.6 см [2]. Только объекты с очень крутыми спектрами, как у пульсаров, могли случайно отождествиться с источниками обзоров в метровом диапазоне длин волн и обзоров на РАТАН-600 в сантиметровом диапазоне. Учитывая относительно низкую координатную точность данных РАТАН-600 (10"–30") [7], проводить глубокое оптическое отождествление было также сложно. Положение кардинально изменилось в 1984 г. после передачи Джеймсом Дугласом (США) каталога источников наиболее глубокого Техасского обзора неба на частоте 365 МГц [8], обладающего координатной точностью 1"–3" и с чувствительностью в 20 раз выше, чем каталог 3CR. Этого было недостаточно для отождествления всех объектов РАТАН-600, но зато практически все радиоисточники с крутыми спектрами оказались общими для двух этих каталогов. Источники с плоскими спектрами, обнаруженные на РАТАН-600, были недоступными для каталога Дугласа, и дальнейшее исследование объектов RC-каталога было связано с поиском кандидатов в самые далекие объекты во Вселенной с помощью данных об их радиоспектрах.

Каталог RC, полученный в результате обзора неба «Холод» на РАТАН-600 [3, 4], содержит 1140 объектов в узкой полосе неба шириной около 40' вокруг склонения SS 433. 10% объектов каталога имели достаточно крутые ($\alpha \leq -0.9$, $S \propto \nu^\alpha$) двухчастотные спектры. 104 таких объекта стали основой международной программы «Большое Трио» [5, 7] с участием VLA (Very Large Array, радиоинтерферометр «Большая антенная решетка», США) и 6-м оптического телескопа БТА (рис. 135).

Программа «Большое Трио» получила дальнейшее развитие в наблюдениях на БТА, радиоинтерферометрах VLA (США) и MERLIN (Великобритания) [7, 12].



Рис. 135. Крупные телескопы, участвующие в наблюдениях по программе «Большое Трио»: слева направо - радиотелескопы РАТАН-600 (САО РАН) и VLA (НРАО, США), оптический 6-м телескоп БТА (САО РАН). Рисунки воспроизведены с сайтов обсерваторий: <http://www.sao.ru> и <http://www.nrao.edu>.

При относительно небольшой области обзора (200 кв. град.) и значительно большей глубине эта выборка оказалась в сотни раз более обширной по числу объектов с ультракрутыми спектрами на 1 кв. град. по сравнению с уже существующими обзорами, а также первой, использующей сантиметровый диапазон при селекции источников с крутыми спектрами.

Следует отметить, что обзор «Холод» стал отправной точкой для целого ряда исследований не только в астрофизике, но и в области создания и исследования приемников радиоизлучения, антенных измерений и разработки нового программного обеспечения и методов анализа данных. Для остаточного шума была оценена граница верхнего уровня анизотропии температуры. Обзор «Холод» пересек плоскость Млечного Пути, и в него также попали галактические радиоисточники разной природы:

микроквazar SS 433, который, в частности, определил выбор склонения проводимого обзора, а также остатки сверхновых. Эти объекты привели к серии обзоров галактических квадрантов и составления атласа остатков сверхновых нашей Галактики [9, 10] и исследованиям объектам типа SS 433 [11].

По данным первых обзоров, проведенных на РАТАН-600, был получен ряд важнейших результатов:

- снижение границы уровня флуктуаций микроволнового излучения $\Delta T/T$ от 10^{-3} до 10^{-5} на минутных угловых масштабах, что привело к пересмотру теории образования крупномасштабной структуры, предсказывающей в то время амплитуду флуктуаций на уровне 10^{-3} ;
- построение статистики $\log N - \log S$ для радиисточников в сантиметровом и дециметровом диапазонах длин волн по данным обзора «Холод» и уточнение эволюционных свойств популяции этих объектов в сантиметровом диапазоне;
- обнаружение присутствия горячего газа в скоплении Coma по данным понижения фона в сантиметровом диапазоне;
- обнаружение второй по дальности мощнейшей радиогалактики RC J0311+0507 с красным смещением $z = 4.514$ по программе «Большое Трио»;
- установлен закон поведения спектрального индекса синхротронного излучения и оценен вклад радиисточников в излучение микроволнового фона на минутных угловых масштабах в проекте «Космологический ген Вселенной».

ОБЗОРЫ НЕБА В КОНТИНУУМЕ НА РАТАН-600

Вслед за экспериментом «Холод» на РАТАН-600 были проведены другие обзоры, имеющие своей целью, в том числе, и детальное изучение источников из этого эксперимента. Среди них несколько циклов наблюдений радиисточников в нулевом меридиане, в азимуте 30° и на южном секторе с плоским отражателем. Обзоры позволили уточнить координаты радиисточников, построить кривые блеска и выделить подвыборку переменных объектов [13–15]. В результате обзоров 1987–2000 гг. в полосе склонений $\pm 10'$ с центром на склонения микроквзара SS 433 был составлен уточненный каталог обзора «Холод» на длине волны 7.6 см RCR (Revized RATAN Cold). Объекты были отождествлены с источниками обзора NVSS [16], проведенного на радиоинтерферометре VLA (США) на длине волны 21 см, и для них рассчитаны двухчастотные спектральные индексы. Показано уменьшение среднего спектрального индекса при переходе от плотностей потока $S_{7.6\text{см}} \geq 30$ мЯн к диапазону $15 < S_{7.6\text{см}} < 30$ мЯн, и построена кривая $\log N - \log S$ для радиисточников на длине волны 2.7 см [15].

Можно отметить и зенитный обзор неба, проведенный в 1988 г. в области с границами с 8h до 14h по прямому восхождению и с $47^\circ 06' 45''$ до $47^\circ 07' 45''$ по склонению. РАТАН-600 был установлен в режиме «Зенит» с применением вторичного конического отражателя [17]. В обзоре использовалась вся поверхность РАТАН-600 [18]. Было сделано пять сечений с шагом $15''$ по склонению. Чувствительность приемника составила около 7 мК. Эффективная площадь антенна – 3400 м^2 . При проведении обзора использовался приемник на длине волны 8 см, разработанный В.Я. Гольневым. Получен каталог радиисточников, которые дополнительно исследовались на северном секторе РАТАН-600 [19].

БОЛЬШОЕ ТРИО

Программа «Большое Трио», начавшись с оптического отождествления радиисточников с крутыми спектрами из обзора «Холод», расширилась до многодиапазонных исследований, включающих и изучение физики этих объектов, и их применение в космологии. Следует отметить, что одним из вдохновителей этой программы была Н.С. Соболева, важнейшую часть оптических исследований взял на себя А.И. Копылов, оптические отождествления выполнила О.П. Желенкова, а наблюдения на радиоинтерферометре VLA (США) были любезно организованы сотрудником НРАО М. Госсом.

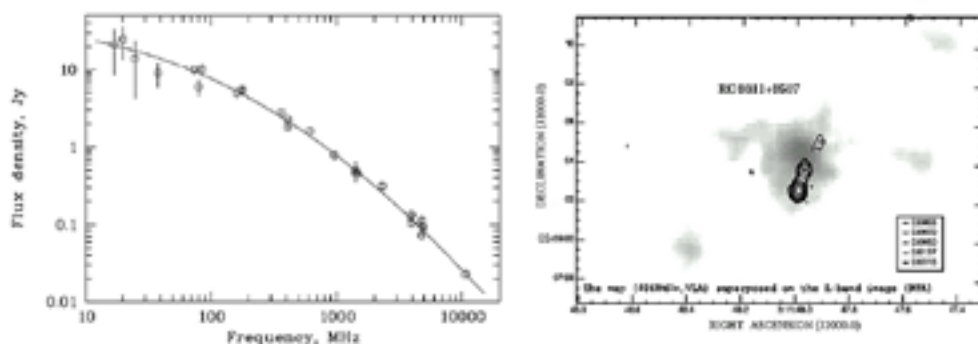


Рис. 136. Слева: радиоспектр RC J0311+0507. Спектральный индекс равен 1.31 в диапазоне частот 365–4850 МГц. Уплотнение спектра к низким частотам указывает на компактность компонент радиисточника. Справа: наложение изофотных контуров карты радиисточника RC J0311+0507, полученной на VLA в 1985 г. на частоте 4860 МГц, на изображение родительской галактики в полосе R по данным БТА 1995 г. [21].

Отбор кандидатов в далекие радиогалактик проходил в несколько этапов, включающих первичную селекцию по спектральному индексу и слабости радиоизлучения в сантиметровом диапазоне. Основные этапы программы «Большое Трио» [5, 20] включали в себя:

- селекцию обнаруженных на РАТАН-600 объектов по спектральным индексам с использованием низкочастотного (365 МГц) каталога Техасского обзора [8];
- картографирование этих объектов с помощью VLA для морфологической классификации и уточнения координат;
- оптическое отождествление по прямым снимкам БТА;
- вторичную селекцию объектов с признаками двойственности, характерной для FR II;
- глубокую многоцветную фотометрию, оценку фотометрических и цветовых красных смещений и цветового возраста звездного населения;
- спектроскопию наиболее интересных объектов;
- определение физических характеристик (расстояние, размер, энергия релятивистских частиц и магнитного поля, ожидаемый поток рентгеновского излучения с учетом Комптоновского рассеяния реликтовых фотонов на космических лучах в радиоконпонентах, распределение по красному смещению и по цветовому возрасту звездного населения, оценка момента формирования

родительской галактики, оценка массы сверхмассивной черной дыры (СМЧД) в их центре, оценка темпов ее роста и т.п.).

Одним из самых серьезных результатов программы «Большое Трио» стало обнаружение радиогалактики RC J0311+0507 на красном смещении $z = 4.514$ [21] (рис. 136, 137). Конечно, открытие таких далеких объектов – это результат, с одной стороны, планомерных поисков и тщательной селекции кандидатов, а с другой стороны, несомненной удачи, учитывая, что исходная выборка радиисточников была не особенно велика. RC J0311+0507 по красному смещению уступает только объекту TN J0924-2201 ($z = 5.199$), но имеет такую же радиосветимость.

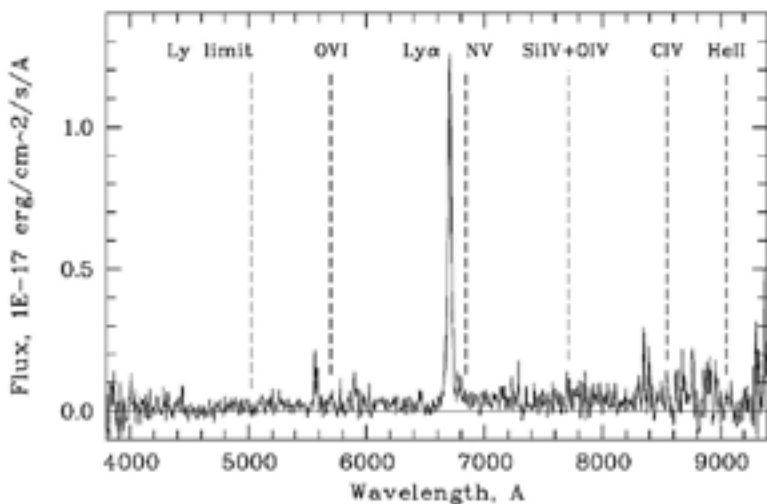


Рис. 137. Оптический спектр родительской галактики радиисточника RC J0311+0507. В центре – узкая и мощная линия, которая отождествляется с $Ly\alpha$ 1216Å. Пунктирными линиями показаны ожидаемые положения типичных для далеких радиогалактик эмиссионных линий. Другие детали спектра – остаточный эффект сильных линий атмосферного происхождения после вычитания спектра ночного неба [21].

Определив с помощью интерполяции по спектру плотность потока 3.5 Ян на частоте 254 МГц, которая соответствует при $z = 4.514$ частоте излучения 1400 МГц, получаем мощность радиисточника $1.3 \cdot 10^{29}$ Вт/Гц (при $H_0 = 70$ км/с/Мпк, $\Omega_m = 0.3$, $\Omega_\Lambda = 0.7$). RC J0311+0507 и 8C 1435+63 оказываются очень похожими по своим параметрам сверхмощными радиогалактиками на $z > 4$, примерно в 10 раз превосходящими по светимости Лебедь А – самую мощную из близких к нам радиогалактик.

Среди важных результатов программы «Большое Трио» отметим несколько:

- по данным наблюдений на РАТАН-600 построены радиоспектры объектов и 10% (104 источника) из них оказались крутыми;
- по данным радиоинтерферометра VLA построены радиоизображения радиисточников с секундным или с субсекундным разрешением;

- проведены оптические отождествления радиисточников с крутыми спектрами с глубокими снимками БТА;
- для 71 объекта были получены спектры (БТА/SCORPIO) и для 51 из них (в основном, ярче 22^m) измерены красные смещения [22];
- подготовлен атлас оптических и радиоизображений радиогалактик и квазаров каталога RC;
- обнаружена радиогалактика с красным смещением $z = 4.514$, вторая по дальности и первая/вторая среди очень далеких ($z > 4$) по радиомощности;
- по фотометрическим данным и синтетическим моделям спектров оценены возрасты звездных систем и z их образования;
- с использованием дополнительных фотометрических данных на малых красных смещениях ($z < 1$) для эллиптических галактик и на больших красных смещениях ($z > 1$) для радиогалактик других каталогов построена зависимость «возраст Вселенной – красное смещение» $t(z)$, с помощью которой оценены космологические параметры H_0 и Ω_A .

КОСМОЛОГИЧЕСКИЙ ГЕН

«Космологический ген» или «генетический код Вселенной» – стандартный набор космологических параметров [23], который фактически определяет эволюцию Вселенной и ее крупномасштабной структуры. Для измерения этих параметров проводится много различных независимых экспериментов, особенно в радиоастрономическом диапазоне [20]. Говоря о проблеме измерения космологических параметров, нельзя не вспомнить программу Я.Б. Зельдовича и А.Д. Сахарова [24] – меморандум 10 институтов. Целью планировавшихся исследований было выяснение происхождения и изучение эволюции Вселенной всеми доступными средствами астрономии и физики элементарных частиц. Для выполнения программы предполагалось подключить к решению задач разные институты АН СССР. САО была обозначена основным институтом, где можно было проводить астрофизические наблюдения мирового уровня. Существенная часть программы определялась исследованиями фонового излучения на радиотелескоп РАТАН-600.

В рамках сформулированных предложений [24] был подготовлен проект исследований «Космологический ген», целью которого являлось изучение физических свойств ранней Вселенной радиоастрономическими методами на РАТАН-600 [23]. По данной программе на РАТАН-600 начались регулярные наблюдения [25] суточной полосы неба на склонении $\delta \sim 41^\circ 30'$, соответствующем склонению яркого радиисточника 3C 84 и околозенитной области (RATAN-600 Zenith Field, RZF). К 2007 г. были проведены 9 наблюдательных сессий и собрано более 300 суточных сканов. По результатам анализа данных был составлен каталог из 437 радиисточников с минимальной плотностью потока 2.5 мЯн на центральной частоте 7.6 см. Практически все радиисточники отождествлены с объектами каталога NVSS. Шум от фоновых источников оценен на уровне 0.8 мЯн.

Дальнейшие работы по программе «Генетический код Вселенной» были связаны с накоплением многочастотных данных в диапазоне волн 1–55 см в 31 частотном канале с предельной статистической чувствительностью, ограниченной шумом фоновых радиисточников на всех волнах длиннее 1.38 см [25]. Область обзора – расширенная по склонению зона RZF: $00^h < RA < 24^h$, $40^\circ 30' < Dec < 42^\circ 30'$. На основании данных,

полученных на РАТАН-600, был уточнен вклад в шум Вселенной основных «экранов» между наблюдателем и эпохой формирования реликтового фона ($z = 1100$). Представленные экспериментальные данные по шуму синхротронного и свободно-свободного излучения позволили исследовать интересные для анизотропии реликтового фона масштабы и предсказать их вклад в экспериментах на миллиметровых длинах волн. В частности, показано, что роль дипольного радиоизлучения пылевых наноструктур типа фуллеренов мала. Были получены наиболее точные на тот момент оценки роли фоновых радиоисточников с инверсными спектрами и показано, что они не являются ощутимой помехой в экспериментах. Оценены средние спектральные индексы предельно слабых радиоисточников каталогов обзоров NVSS [16] и FIRST [27], проведенных на частоте 1.4 ГГц (VLA, США). Данные по «насыщению» на всех длинах волн позволили ограничить шум Сюняева-Зельдовича (C3) и получить независимые оценки средней температуры неба от источников, более низкие, чем в каталоге NVSS. Эти оценки противоречат существованию мощного внегалактического синхротронного фона, связанного с радиоисточниками. Кроме того, была обнаружена ощутимая «квадрупольная» анизотропия в распределении спектрального индекса синхротронного излучения Галактики, которая должна учитываться при оценке поляризации анизотропии реликтового фона на малых мультиполях ℓ (т.е. больших пространственных масштабах). Отдельные моменты отметим более подробно (см. [26]).

Атмосферный шум. На основании не имеющего аналога по объему массива многочастотных суточных записей атмосферного излучения оценена область пространственного спектра $\Delta\ell$, где шум атмосферы меньше чувствительности радиометров в RZF-обзоре, а также предложены методы расширения этой области. Определена методика практически полного устранения шума атмосферы на всех масштабах при поляризационных наблюдениях реликтового фона.

Синхротронный шум Галактики. Накоплены данные по анизотропии синхротронного излучения в области RZF-обзора с чувствительностью и разрешением почти в сто раз более высоким, чем в основных модельных картах синхротронного излучения, использовавшихся ранее при интерпретации экспериментов по реликтовому фону. В области RZF-обзора получены данные о пространственных вариациях спектра синхротронного излучения, что позволяет экстраполировать синхротронный фон до частот эксперимента Planck с чувствительностью выше 1 мК.

Дипольный шум заряженных пылинок (фуллеренов). Показано, что дипольное излучение макромолекул имеет малое влияние на исследования поляризованного мелкомасштабного фона Вселенной. Уточнен верхний предел на анизотропию радиоизлучения ионизированного газа Галактики на масштабах, интересных для экспериментов по реликтовому фону, что позволяет также оценить роль фарадеевского шума для поляризации синхротронного излучения Галактики.

Фоновое излучение точечных источников. Сделан вывод, что ожидаемый процент NVSS-объектов, дающих вклад в регистрируемое излучение миллиметрового диапазона длин волн, мал и для достаточно больших ℓ число этих объектов существенно меньше числа элементов разрешения порядка $4\pi\ell$. Как выяснилось, подозрения о существовании ощутимой популяции таких радиоисточников оказались

преувеличенными, по крайней мере, на уровне чувствительности экспериментов WMAP и Planck. Обнаруженный в RZF-обзоре шум от неопознанных радиоисточников на уровне долей мЯн в сантиметровом диапазоне длин волн не является опасным для ведущихся сегодня экспериментов по реликтовому излучению, так как он соответствует долям мК для эксперимента Planck.

Кроме того, в рамках подготовки программы наблюдений был осуществлен переход от «однорупорных» классических радиометров к многорупорным (аналог ПЗС-приемникам в оптике). Освоен фокальный комплекс MAPC-3 из 16 НЕМТ-усилителей с 32-рупорными облучателями на предельно короткой для РАТАН-600 длине волны 1 см [26].

Для оценки вклада фоновых компонент Галактики был проведен анализ наблюдательных данных с разделением компонент и расчетом мощности свободно-свободного и синхротронного излучения Галактики на средних и мелких масштабах ($500 < \ell < 1000$, $20' < \theta < 40'$) [28]. Наблюдения проводились в диапазоне 2.3–11.2 ГГц в полосе склонений $40.7^\circ < \delta < 42.3^\circ$. Было показано, что, несмотря на значительный шум приемников и, как следствие, значительные ошибки измерения спектра мощности, уровень излучения обеих галактических компонент в основном согласуется с моделями, принятыми в настоящее время. Установлено, что яркость свободно-свободной компоненты на выбранной площадке зенитного обзора почти на порядок выше, чем это следует из модели для высоких галактических широт, используемой в работе [29], что приводит к различию в спектрах мощности почти на 2 порядка. Тем не менее, спектр мощности сильно зависит от морфологии конкретной области, и не превышает уровень низкоширотного спектра мощности для этой модели, что позволяет говорить об общем соответствии данных оценок и выбранных моделей галактических компонент.

ВМЕСТО ЗАКЛЮЧЕНИЯ

Анализ обзоров продолжается. Создан архив наблюдений, проведенных в обзорном режиме на РАТАН-600. Записи проведенных наблюдений активно используются для исследования долгопериодической переменности объектов [30]. Большой интерес они представляют также для поиска транзиентных событий в радиодиапазоне [31].

Исследование объектов из каталогов, полученных по обзорам РАТАН-600, дало старт нескольким программам, в том числе и отождествлению радиоисточников по современным картам реликтового излучения. Например, оценка вклада радиоизлучения объектов каталога RCR [32] в карты миллиметрового диапазона миссии Planck позволила упростить селекцию кандидатов в скопления галактик с эффектом СЗ [33], что открывает дополнительный путь исследованию вторичной анизотропии СМВ.

На диаграмме «спектральный индекс (α) – величина отклика СМВ (T_p)» (рис. 138) показаны значения термодинамической температуры на карте СМВ SMICA [34] миссии Planck 2015 г. Отметим, что диаграмма « $\alpha - T_p$ » интересна тем, что на ней можно выделить группы радиоисточников с коррелированными параметрами, в общем, определяемыми зависимостями «спектральный индекс – красное смещение» [35, 36] и «плотность потока (здесь температура) – красное смещение». Перед построением диаграммы из карты СМВ предварительно были удалены низкие гармоники ($\ell \leq 20$), в которых в основном заключен статистически анизотропный сигнал [37]. На рисунке 138 можно выделить четыре области (A, B, C, D), которые соответствуют положению пиков

на гистограммах параметров объектов: области А, В и С соответствуют положению основного пика на гистограмме спектральных индексов, а область D – второму пику на распределении индексов для источников с плоскими спектрами.

Основные значения отклика на карте СМВ концентрируются около нуля, но с положительной стороны: медиана значений отклика СМВ, рассчитанная по данным всех исследуемых радиоисточников выборки, составляет $+0.025$ мК. Это же демонстрируется гистограммой «температура неоднородности СМВ – число пикселей». Отметим также область А на рисунке 138, соответствующую радиоисточникам с отрицательными откликами, превышающими в распределении ожидаемый уровень 1σ , и имеющим пограничные по наклону радиоспектры: крутые/нормальные ($\alpha = 0.6-0.8$).

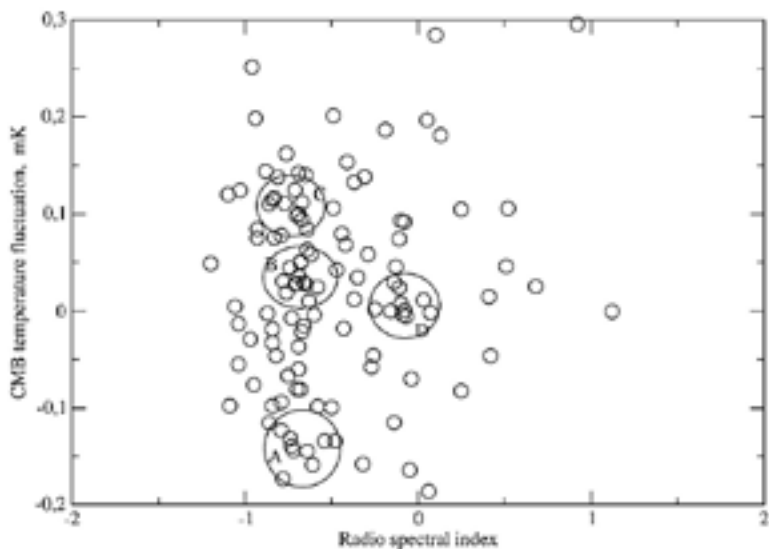


Рис. 138. Диаграмма «радиоспектральный индекс - величина отклика СМВ» для всех радиоисточников RCR-каталога. Значения отклика реликтового излучения даны в термодинамических величинах. Окружностями отмечены четыре группы (A, B, C, D) объектов, соответствующие пикам на гистограммах и обсуждаемые в тексте.

Сравнительно низкий отрицательный уровень фона на карте СМВ может быть обусловлен дополнительным вкладом в неоднородность эффекта СЗ, усиленным в процедуре разделения компонент и выделения сигнала реликтового фона. В пользу этого эффекта говорит и существование в этой области радиоисточника, являющегося признаком скопления материи (в конечном итоге скопления галактик). На рисунке 139 приведен пример карт трех RCR-источников из области А на разных частотах, являющихся кандидатами в объекты с эффектом СЗ.

Выборки включали гигантские радиогалактики, радиоисточники, отобранные по радиоспектральному индексу и красному смещению, а также гамма-всплески, используемые как вторичная сравнительная выборка. В результате исследований топологических свойства сигнала СМВ в окрестности среднего объекта популяции, а именно поиска присутствия максимумов и минимумов в средней площадке и анализа их амплитуды, было обнаружено отличие сигнала в окрестности ГРГ от других типов

объектов. Различие в средней амплитуде фонового сигнала для разных популяций можно объяснить как присутствием или отсутствием пылевого тора, окружающего центральную машину в радиогалактиках, а также особенностями комбинации миллиметрового излучения от родительской галактики и скопления галактик с эффектом СЗ [38].

Необходимо отметить еще несколько важных моментов, связанных с обзорами фонового излучения. Исследование внегалактических и галактических радиоисточников, а также распределений фонового излучения потребовало создания и развития современных систем анализа данных, включающих первичную и интерпретационную обработку.

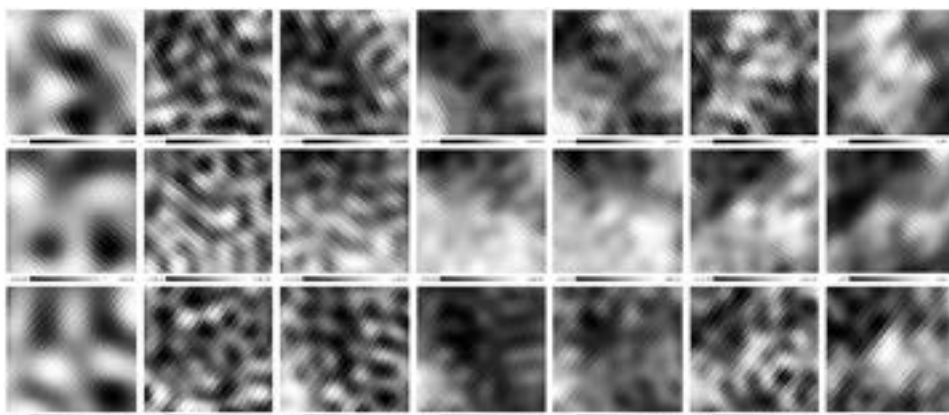


Рис. 139. Слева направо: карты микроволнового фона для RCR-источников, попадающих в группу А (рис. 138), на частотах соответственно 44, 70, 100, 143, 217, 353, 545 ГГц (Planck 2015 г.). При СЗ-эффекте на частотах миссии Planck ожидается «ямка» при $\nu < 217$ ГГц и положительный пик при $\nu > 217$ ГГц. Сверху вниз: радиоисточники RCR J092445+050344, RCR 112437+045618 и RCR 151054+045410. Размер изображений $0.^\circ 5 \times 0.^\circ 5$.

Две наиболее активно используемые системы в последние 20 лет, разработанные для поддержки наблюдений в лаборатории радиоастрофизики САО РАН, – система FADPS для анализа временных рядов, полученных при наблюдениях в континууме [39, 40], и база данных радиоастрономических каталогов CATS, которая является крупнейшей радиоастрономической базой данных [41, 42], – создавались с целью исследований радиоизлучения космических источников на РАТАН-600. FADPS служит для обработки одномерных векторов данных наблюдений, содержащих равноотстоящие отсчеты измерений, а также для анализа континуальных спектров радиоисточников. Она включает графические оболочки над комплексом программ *fgr* для визуализации работы с одномерными векторами данных и *srg* для визуализации работы с неравноотстоящими измерениями континуальных спектров радиоисточников, а также СМВ на полной небесной сфере для пикселизации GLESP [43]. На базе программных библиотек FADPS созданы процедуры, обслуживающие серверы базы данных CATS [41] и системы работы с распределением энергии в спектрах галактик SED [44], а также базы данных карт СМВ и соответствующих им гармонических разложений СМВsite [45].

База данных CATS разработана как публично доступная система, которая позволяет проводить поиск в сотнях каталогов астрономических объектов, излучающих

в широком диапазоне электромагнитного спектра. Основной акцент сделан на источники, наблюдаемые на частотах 30–30000 МГц. Во вторую очередь представлены такие объекты как радиоизлучающие и активные звезды, планетарные туманности, III-области, остатки сверхновых, пульсары, ближайшие галактики, АЯГ и квазары. CATS также включает каталоги крупнейших внегалактических обзоров, таких как NVSS, FIRST, WENSS, VLSS, TXS, GB6, SUMSS, IRAS, 2MASS, SDSS, ROSAT, PGC, MCG и др. CATS содержит $\sim 10^9$ записей более чем из 400 каталогов радио, инфракрасного, оптического и рентгеновского диапазонов, включая большинство каталогов, полученных по наблюдениям на РАТАН-600.

В конце обзора отметим, что общий современный сценарий эволюции Вселенной представляется реалистичным. Космологические параметры измерены с точностью лучшей, чем 5%, по данным космических миссий WMAP НАСА [46] и Planck ESA [47], данным наземных наблюдений на множестве радиотелескопов и телескопов других диапазонов длин волн, а также баллонных экспериментов. Для демонстрации космологической модели приведем основные параметры Вселенной (см. обзор [48]). К ним относится: угловой размер акустического горизонта эпохи последнего рассеяния, оцениваемый по положению пиков в угловом спектре мощности, $100 \times \theta^* = 1.0411 \pm 0.0003$ рад; амплитуда первичных возмущений $\ln(10^{10} A_s) = 3.064 \pm 0.023$; скалярный спектральный индекс $n_s = 0.967 \pm 0.004$; плотность барионной и темной материи соответственно $\Omega_b = 0.049$ и $\Omega_{CDM} = 0.259$, а их относительная сумма - плотность материи $\Omega_m = 0.3089 \pm 0.0062$; красное смещение эпохи вторичной ионизации $z_{re} = 8.8^{+1.2}_{-1.1}$, когда нейтральный газ во Вселенной стал ионизованным за счет ультрафиолетового излучения первых звезд и АЯГ. Вместо последнего параметра z_{re} в расчетах используют другую, но полностью соответствующую ему величину оптическую толщину τ в эпоху реионизации: $\tau = 0.066 \pm 0.012$. Измеренные параметры позволяют зафиксировать космологическую модель и определить остальные параметры. Причем достаточно использовать лишь данные Планака, но можно применить данные других экспериментов для согласованных оценок. Среди остальных параметров отметим плотность темной энергии $\Omega_\Lambda = 0.691 \pm 0.006$, величина которой связана и с размером θ^* , и с прохождением фотонов СМВ сквозь формирующиеся скопления галактик за космологическое время (эффект Сакса-Вольфа). Другим важным параметром является параметр расширения Хаббла в настоящую эпоху – постоянная Хаббла (по данным миссии Planck $H_0 = 67.7 \pm 0.5$ км/с/Мпк). С параметром Хаббла связан и возраст Вселенной $t_0 = 13.89 \pm 0.02$ млрд лет. Знание оптической толщины, которая определяет свойства среды и связана с плотностью материи, а также применение данных о гравитационном линзировании фиксируют дисперсию спектра мощности распределения вещества. Эта величина описывается параметром $\sigma_8 = 0.816 \pm 0.009$, характеризующим сгущивание материи в кубе со стороной 8 Мпк. Еще один параметр плотности – $\Omega_K = 1 - \Omega_0$, описывающий кривизну Вселенной, связан с суммарной плотностью всех компонент энергии Ω_0 , объединяющей Ω_Λ , Ω_c , Ω_b , плотностью излучения и нейтрино и с размером характерных пятен СМВ на момент рекомбинации θ^* . Используя только данные СМВ, куда входят измерения Planck, учитываются линзирование и данные оптических обзоров, имеем оценку кривизны: $\Omega_K = 0.0008^{0.0040}_{-0.0039}$. Малое значение Ω_K является признаком того, что наша Вселенная с высокой точностью плоская, что, в свою очередь, говорит в пользу теории инфляционного расширения.

Сейчас наступает новая эпоха в космологических исследованиях, когда требуется изучение особенностей эволюции и проходящих физических процессов на разных

этапах жизни как Вселенной в целом, так и разных популяций радиоисточников. Не только наблюдения на новых телескопах, но и изучение уже полученных данных, в том числе и на РАТАН-600, помогают продвинуться в этих исследованиях.

В заключение отметим участников большого коллектива САО РАН, которые занимались разработкой оборудования, радиометров, расчетами и установками антенны РАТАН-600, наблюдениями, созданием программного обеспечения, анализом и интерпретацией данных обзоров неба на РАТАН-600 последние 25 лет. Среди них А.Б. Берлин, Н.С. Соболева, А.В. Темирова, М.Г. Мингалиев, Н.Н. Бурсов, Н.А. Нижельский, В.Я. Гольнев, П.Г. Цыбулев, А.И. Копылов, О.П. Желенкова, Е.К. Майорова, С.А. Трушкин, Ю.К. Зверев, Г.С. Голубчин, Г.В. Жеканис, Г.А. Пинчук, В.Б. Хайкин, А.Н. Коржавин, В.К. Кононов, В.А. Столяров, А.А. Гречкин, В.И. Жаров, Б.Л. Ерухимов, В.Н. Черненко, П.А. Фридман, Н.М. Липовка, А.В. Чепурнов, Т.А. Семенова, Ю.Н. Сотникова, Д.В. Кратов, Р.Ю. Удовицкий, М.Л. Хабибуллина, Я.В. Найден, Д.И. Соловьев и многие другие.

ПУБЛИКАЦИИ

- [1] Г.Б. Гельфрейх, И.В. Госачинский, Ю.Н. Парийский, Изв. ГАО (Пулково) 188, 188 (1972).
- [2] Ю.Н. Парийский, Д.В. Корольков. сб. «Итоги науки и техники», *Астрономия*, 31 (Москва, ВИНТИ, 1986), с.73.
- [3] Parijskij Yu.N., Bursov N.N., Lipovka N.M., Soboleva N.S., Temirova A.V., *A&A* 87, 1 (1991).
- [4] Parijskij Yu.N., Bursov N.N., Lipovka N.M., et al. *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 96, 583 (1992).
- [5] Yu.N. Parijskij, W. M. Goss, A.I. Kopylov, et al., *Bull. SAO*, No 40, 5 (1996).
- [6] D.O. Edge, J.R. Shakeshaft, W.B. McAdam, et al., *Mem. R. Astron. Soc.*, 68, 37 (1959).
- [7] Уи.М. Госс, Ю.Н.Парийский, Н.С. Соболева и др., *АЖ*, 69, 673 (1992).
- [8] J.N. Douglas, F.N. Bash, F.A. Vozyan, et al., *Astron. J.*, 111, 1945 (1996).
- [9] С.А. Трушкин, *Астрофиз. Иссл. САО* 32, 132 (1991).
- [10] S. A. Trushkin, *Astron. Astrophys. Trans.*, 11, 225 (1996).
- [11] Bursov, N. N.; Trushkin, S. A., *Письма в АЖ*, 21, 163 (1995).
- [12] Yu.N. Parijskij, P. Thomasson, A.I. Kopylov, et al., *MNRAS*, 439, 2314 (2014).
- [13] N.N. Bursov, *Bull. SAO* 40, 128 (1996).
- [14] N.N. Bursov, N. M. Lipovka, N. S. Soboleva, et al., *Astron. Astrophys. Trans.*, 18, 431 (1999).
- [15] Н.С. Соболева, Н.Н. Бурсов, А.В. Темирова, *АЖ*, 83, 387 (2006).
- [16] J.J. Condon, W.D. Cotton, E.W. Greisen, et al., *AJ*, 115, 1693 (1998).
- [17] Yu.N. Parijskij, O.V. Verkhodanov, G.A. Pinchuk, et al., *Bull. SAO*, 38, 58 (1994).
- [18] М.Г. Мингалиев, О.В. Верходанов, А.Р. Хабрахманов, В.Я. Гольнев, А.В. Темирова, *Сообщения САО*, 68, 47 (1991).
- [19] О.В. Верходанов, Н.В. Верходанова, *АЖ*, 76, 483 (1999).
- [20] Верходанов О.В., Парийский Ю.Н. *Радиогалактики и космология*. (М.:Физмалит, 2009), 304с.
- [21] А.И. Копылов, Уи.М. Госс, Ю.Н. Парийский и др., *Письма в АЖ*, 32, 483 (2006).
- [22] Parijskij, Yu. N.; Kopylov, A. I.; Temirova, A. V.; et al. *Astron.Rep.*, 54, 675-695 (2010).
- [23] Ю. Н. Парийский, сб. «Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук. 40 лет», отв. ред. Балуга Ю.Ю. (САО РАН, Нижний Архыз, 2006), с.198.
- [24] Сахаров А.Д. и др., *Перспективы развития фундаментальные исследования по проблеме «Космоастрофизика» в СССР* (Нижний Архыз, САО РАН, 1988).
- [25] Н.Н. Бурсов, Ю.Н. Парийский, Е.К. Майорова и др., *АЖ*, 84, 227 (2007).
- [26] Yu.N. Parijskij, M.G. Mingaliev, N.A. Nizhelskij, et al., *Astrophys. Bull.*, 66, 424 (2011).
- [27] R. L. White, R. H. Becker, D.J. Helfand, et al., *ApJ*, 475, 479 (1997).
- [28] V.A. Stolyarov, Yu.N. Parijskij, N.N. Bursov, et al., *Astrophys. Bull.*, 67, 29 (2012).

- [29] S. Ricciardi, *New Ast. Rev.*, 51, 310 (2007).
- [30] Majorova, E. K.; Zhelenkova, O. P., *Astrophys. Bull.*, 68, 418-441 (2013).
- [31] Zhelenkova, O. P.; Majorova, E. K., *Astrophys. Bull.*, 71, 14-23 (2016).
- [32] Soboleva, N. S.; Majorova, E. K.; Zhelenkova, O. P., et al. *Astrophys. Bull.*, 65, 42-59 (2010).
- [33] O.B.Верходанов, Е.К.Майорова, О.П.Желенкова и др., *АЖ*, 93, 616 (2016).
- [34] Planck Collaboration, *Astrophys. Astrophys.*, arXiv:1502.05956.
- [35] G. Miley, C. De Breuck, *Astron. Astrophys. Rev.*, 15, 67 (2008).
- [36] O.B. Верходанов, М.Л. Хабибуллина, *Письма в АЖ*, 36, 9 (2010), arXiv:1003.0577.
- [37] O.V. Verkhodanov, *Physics of Particles and Nuclei*, 46, 237 (2015).
- [38] O.V. Verkhodanov, D.I. Solovoyov, O.S. Ulakhovich, M.L. Khabibullina., *Astrophys. Bull.*, 71, 139 (2016).
- [39] O. V. Verkhodanov, in «Astronomical Data Analysis Software and Systems VI», Eds. G.Hunt & H.E.Payne, *ASP Conf. Ser.*, 125, 46 (1997).
- [40] O.V. Verkhodanov, B. L. Erukhimov, M. L. Monosov, et al., *Bull. SAO*, 36, 132 (1993).
- [41] O.V. Verkhodanov, S. A. Trushkin, H. Andernach, V. N. Chernenkov, in «Astronomical Data Analysis Software and Systems VI», eds. G.Hunt & H.E.Payne, *ASP Conf. Ser.*, 125, 322 (1997).
- [42] O.V. Verkhodanov, S. A. Trushkin, H. Andernach and V. N. Chernenkov, *Bull.SAO*, 58, 118 (2005).
- [43] A. G. Doroshkevich, P. D. Naselsky, O. V. Verkhodanov, et al., *Int. J. Mod. Phys.*, 14, 275 (2003).
- [44] O.V. Verkhodanov, A.I. Kopylov, O.P. Zhelenkova, et al., *Astron. Astrophys. Trans.*, 19, 663 (2000).
- [45] O.V. Verkhodanov, Ya.V. Naiden, V. N. Chernenkov, and N.V. Verkhodanova, *Astrophys. Bull.*, 69, 113 (2014).
- [46] Hinshaw G; Larson, D.; Komatsu, E.; Spergel, D. N.; Bennett, C. L.; *Astrophys. J. Suppl.*, 208, 19 (2013).
- [47] Planck Collaboration, *Astron. Astrophys.*, arXiv:1502.01589.
- [48] O.B. Верходанов. *УФН*, 186, 3 (2016).

Лаборатория радиоспектроскопии САО РАН. История и люди

Госачинский И.В.,

главный научный сотрудник-консультант ГГВИ СПбФ, д.ф.-м.н.; gos@sao.ru

Лаборатория радиоспектроскопии САО АН СССР была образована в 1970 г. из группы сотрудников ГАО АН СССР, возглавляемой доктором физико-математических наук Н.Ф. Рыжковым. Лаборатория объединяла астрофизиков-наблюдателей, инженеров по СВЧ, электронике, низкочастотной цифровой аппаратуре и программистов. Одна часть лаборатории работала в Ленинградском филиале, другая – на радиотелескопе РАТАН-600 в станции Зеленчукской. Разработка лабораторией астрофизических задач основывалась на высокой чувствительности антенны РАТАН-600 к малоконтрастным протяженным объектам в диапазоне от нескольких угловых минут до нескольких градусов.



Рис. 140. Слева – Игорь Владимирович Госачинский, справа – сотрудники лаборатории радиоспектроскопии возле второго облучателя (2002 г.).

В программу научно-исследовательской работы лаборатории входили следующие темы:

- комплексное исследование облачной структуры межзвездной среды в Галактике на различных масштабах в радиолиниях HI ($\lambda 21$ см), OH ($\lambda 18$ см), H_2CO ($\lambda 6.2$ см) и H_2O ($\lambda 1.35$ см), а также рекомбинационных радиолиний с целью изучения структуры, динамики и эволюции межзвездного газа, его взаимодействия с другим населением Галактики и условий звездообразования;
- исследование физических и эволюционных характеристик крупномасштабных структур межзвездного газа в Галактике;

- поиск облаков газа на космологических расстояниях по их предполагаемому излучению в радиолиниях.

С 1974 г. основная деятельность лаборатории была перенесена на РАТАН-600. Первые наблюдения в непрерывном спектре источника W49 на волне 21 см на облучателе №2 на южном секторе РАТАН-600 с плоским отражателем были проведены 23.06.1975 г. Аппаратура для спектральных наблюдений, подготовленная в Ленинграде (46 ящиков), была доставлена на РАТАН-600 в ноябре 1975 г., а в декабре этого года на облучателе N2 были проведены первые спектральные наблюдения радиоисточников Лебедь-А и Орион-А с 20-канальным спектроанализатором и записью на перфоленту. Еще через 6 дней эти наблюдения были обработаны с перфоленты на единственной тогда в САО большой ЭВМ М-222. Полученные в этих наблюдениях новые данные о распределении межзвездного газа вокруг туманности Ориона были опубликованы в 1979 г. (Астрон. Ж., т. 56, стр. 1191).

Необходимо отметить главную роль в организации и деятельности лаборатории ее первого руководителя Николая Федосеевича Рыжкова. Большой опыт и способности организатора позволили ему с группой сотрудников, куда входили Т.М. Егорова, Н.С. Евграфов, В.А. Яковлев и А.И. Кутилов, в сравнительно короткий срок создать достаточно совершенную аппаратуру для наблюдения радиолинии нейтрального водорода (H1, $\lambda 21$ см), а также вместе с Н.В. Быстровой, И.В. Госачинским, Т.М. Егоровой и З.А. Алферовой приступить к проведению систематических исследований H1 с помощью БПР. Параллельно разрабатывались новые радиоспектрометры с малошумящими УВЧ на входе: мазерами и охлаждаемыми до температуры жидкого азота параметрическими усилителями (А.П. Венгер, В.А. Прозоров, Г.Н. Ильин). В 1984 г. под руководством Н.Ф. Рыжкова на РАТАН-600 впервые внедрен в регулярную эксплуатацию новый класс малошумящих УВЧ – охлаждаемый транзисторный усилитель, позволивший существенно увеличить стабильность работы приемного устройства и сильно упростить его эксплуатацию.

Специфической особенностью радиоспектрометров, отличающей их от радиометров сплошного спектра, является наличие высокостабильного ($\sim 10^{-7}$ от частоты) гетеродина, который при наблюдениях с неподвижной антенной должен иметь возможность перестройки частоты в зависимости от изменения координат наблюдаемой области неба. Разработка, изготовление и внедрение таких устройств на базе системы фазовой автоподстройки частоты для каждого из применяемых диапазонов были осуществлены в различных модификациях Т.М. Егоровой и В.Г. Могилевой к середине 80-х годов. В дальнейшем настройка частот гетеродинов производилась автоматически с помощью управляемого от ЭВМ синтезатора частоты в соответствии с программой, заданной наблюдателем.

Следующей важной частью радиоспектрометров являются анализаторы спектра. Следует заметить, что в лаборатории радиоспектроскопии были созданы своими силами или испытывались в реальных наблюдениях спектроанализаторы всех существующих типов. Исторически первым и наиболее полезным оказался фильтровой 42-канальный спектроанализатор, созданный под руководством Н.Ф. Рыжкова по оригинальной супергетеродинной схеме. Следующим был созданный впервые в СССР С.Р. Желенковым цифровой однобитовый 128-канальный автокорреляционный анализатор, причем, в двух экземплярах, один из которых был передан в Ашхабад. Кроме этого, на облучателе №2 испытывался акустооптический анализатор разработки Ленинградского политехнического института (под

руководством Н.А. Есепкиной), однако в регулярные наблюдения он не вошел из-за недостаточно высокого качества и огромной сложности в эксплуатации. И в 2007 г. на РАТАНе был внедрен 2048-канальный цифровой Фурье-анализатор производства АКЦ ФИАН, который в течение 10 лет использовался в регулярных наблюдениях.

Конечной частью радиоспектрометров, как и любых астрономических приборов, является система регистрации, которая в данном случае осложнялась большим количеством каналов и жесткими условиями контроля времени. Конечно, уровень развития этой системы определялся состоянием схмотехники и наличием ЭВМ. Здесь инженеры лаборатории старались держаться на мировом уровне, так что нам пришлось пройти от перфоленты к записи на магнитную ленту (в нескольких модификациях) и к записи на жесткий диск ПК. При этом система регистрации была органично объединена с системой программного управления радиоспектрометрами в единую систему автоматического управления и сбора информации, окончательно оформившуюся в 1984 г. (В.Г. Могилева, А.С. Морозов, С.Р. Желенков). Оптимальным для нашей системы оказалась двухуровневая организация, когда программы нижнего уровня разрабатывались авторами «железа», а верхний уровень выполнял роль интерфейса между аппаратурой и наблюдателем и разрабатывался по требованиям и при непосредственном участии последних (И.В. Госачинский, З.А. Алферова). Двусторонний обмен данными между этими уровнями легко согласовывался авторами программ. Система автоматического управления позволяла производить подготовительные режимы, устанавливать необходимую частоту гетеродинов, включать и выключать регистрацию и калибровки. Наблюдатель получал результаты немедленно после наблюдения на ZIP-дискете или CD-диске в виде, пригодном для дальнейшей обработки на ЭВМ.



Рис. 141. Слева – А. Крупейченко, С. Желенков, З. Петров, Ю. Балага, В. Мерзев (1981 г.); справа – С. Трушкин и Н. Юдаева (КМЕРА).

Заметим, что, несмотря на всевозможные изменения «железа» и «софта», формат файлов оставался неизменным в течение примерно 40 лет, что не создавало никаких трудностей для конечных пользователей. Комплекс программ первичной обработки был универсальным для всех волн и всех режимов наблюдений (И.В. Госачинский, З.А. Алферова). Он включал программы быстрого просмотра полученного материала, автоматической обработки наблюдений опорных источников и типового наблюдения. В

результате получался файл типового формата, который поступал в архив спектральных наблюдений, его можно было визуализировать на экране или распечатать. Последующая обработка архивного файла уже определялась методикой наблюдений и требуемым результатом, для чего в лаборатории также было разработано большое количество специализированных программ (И.В. Госачинский).

По мере совершенствования аппаратуры и автоматизации участие инженеров в процессе наблюдений уже не требовалось. Была образована группа наблюдателей-операторов – И.В. Госачинского, Н.А. Юдаевой, З.А. Алферовой, Т.В. Монастыревой, которые и обеспечивали круглосуточный процесс наблюдений.

Следует также отметить группу астрофизиков, входивших в лабораторию радиоспектроскопии (И.В. Госачинский, В.К. Херсонский, Н.В. Быстрова, Н.А. Юдаева, В.В. Морозова, И.В. Шайкин, В.К. Дубрович), которые, с одной стороны, ставили астрофизические задачи, интересные и возможные для решения с помощью радиоспектрометрического комплекса РАТАН-600, а с другой стороны, проводили окончательную обработку и интерпретацию полученных данных. В лаборатории также проводились наблюдения по заявкам сторонних пользователей, выполнялись совместные работы с сотрудниками других учреждений: БАО (Армения), ГАИШ МГУ (Москва), ИПФ АН СССР (Нижний Новгород), ГТО им. Воейкова (Ленинград) и др., включая такую экзотическую задачу, как поиск внеземных искусственных радиосигналов (Л.М. Гиндилис, ГАИШ).

На РАТАН-600 сотрудники лаборатории радиоспектроскопии провели семь крупных обзорных работ:

- проведен обзор радиолинии HI в плоскости Галактики ($\pm 15^\circ$ по широте) по всему небу, по данным которого было выделено порядка 7000 компактных облаков. По измеренным параметрам и изученным статистическим характеристикам было обнаружено их вращение;
- изучено взаимодействие активных галактических объектов (около 60 областей HI и сотни остатков сверхновых) с окружающей межзвездной средой, получены явные свидетельства такого взаимодействия, что дало возможность получить важные сведения как о физике межзвездной среды, так и самих объектов;
- проведено несколько циклов исследования переменности излучения мазеров H_2O на волне 1.35 см, обнаружены так называемые коррелированные вспышки в некоторых объектах;
- изучены статистические характеристики облаков HI в полярных «шапках» Галактики;
- по данным обзора HI исследованы 34 галактических «сверхоболочки», уточнены их наблюдаемые параметры и сделано заключение об их физической природе;
- проведен поиск спектрально-пространственных флуктуаций реликтового излучения на волне 6.2 см и получены убедительные свидетельства их наличия;
- проведен цикл наблюдений особенностей распределения HI в 143 областях звездообразования, идентифицированных по группам компактных ИК-источников, и показано, что молекулярные облака CO, являющиеся характерной принадлежностью таких областей, совпадают с локальными минимумами излучения HI;

Кроме этого следует отметить:

- обнаружение по наблюдениям линии H_2CO на волне 6.2 см сжатия молекулярного облака в области звездообразования Стрелец В2, что является первым

- несомненным доказательством того, что звезды образуются из разреженной среды;
- обнаружение двойной оболочки H I вокруг остатка сверхновой HB3, одна из которых имеет своим происхождением звездный ветер предсверхновой, а другая – собственно ударную волну расширяющегося остатка;
 - изучение структуры горячего газа в туманности Ориона по рекомбинационной линии H110 α на волне 6 см, параметры которой позволили оценить возраст основной возбуждающей звезды.

Уйдя из жизни в 1985 г., Н.Ф. Рыжков оставил дружный коллектив соратников-единомышленников. Более десяти сотрудников защитили диссертации с использованием наблюдательного материала, полученного при его непосредственном участии. К сожалению, нам не удалось успешно продолжить деятельность коллектива, чему были как объективные, так и субъективные причины. Во-первых, старшее поколение сотрудников уходило из жизни: в 1995 г. – Николай Степанович Евграфов, в 2002 г. – Анатолий Иванович Кутилов, в 2004 г. – Вадим Александрович Прозоров. Еще более ужасно, что судьба не минула и молодежь лаборатории: в 1988 г. умерла Надя Юдаева – прекрасный человек и талантливый ученый, в 2002 и 2003 гг. скончались Николай Комар и Сергей Желенков, много сделавшие для становления радиоспектроскопии на РАТАН-600.

В 1998 г. в процессе образования ИПА лабораторию покинули В.Г. Грачев, В.Г. Могилева и Г.Н. Ильин. Ряд сотрудников не удалось удержать из-за общего обнищания российской науки. И наконец, в 2015 г. во время очередной реорганизации Санкт-Петербургского филиала лаборатория радиоспектроскопии прекратила свое существование, а ее сотрудники влились в другие подразделения филиала.

Исследования атмосферы Солнца на основе спектрально-поляризационных наблюдений на РАТАН-600.

Результаты в 24 цикле активности

Богод В.М.,
заведующий СПбФ САО РАН, д.ф.-м.н.; vbog@sao.ru

Радиотелескоп РАТАН-600 обладает высоким пространственным разрешением, высокой чувствительностью по яркостной температуре, низким уровнем инструментальной поляризации в диапазоне частот 0.6–30 ГГц. По ряду параметров и, особенно, по их сочетанию в одном инструменте РАТАН-600 (рис. 142) и в дальнейшем может быть широко востребованным инструментом в тех областях радиоастрономии, где рефлекторные радиотелескопы наиболее эффективны.



Рис. 142. Плоский отражатель РАТАН-600, используемый в режиме солнечных наблюдений. Он состоит из 124 отражательных элементов, каждый высотой 8.5 м и шириной 3.1 м. Его длина равна 400 м. Его наклон к горизонту можно менять от 0° до 55° , то есть возможны наблюдения источников со склонениями от -40° до $+55^\circ$.

Солнечная атмосфера активно исследуется на космических обсерваториях: SOHO, TRACE (рис. 143), RHESSI, CORONAS, GOES, SDO и др. Они работают в диапазонах волн, которые не пропускаются земной атмосферой (главным образом, в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазоне). Однако измерения корональных

магнитных полей (КМП) в этих диапазонах труднодоступны и часто невозможны из-за высоких температур в короне Солнца. Наблюдения в микроволновом диапазоне дополняют эти исследования, обеспечивая ученых независимой информацией о свойствах плазмы в верхней хромосфере, нижней короне и переходном слое между ними.

По наблюдениям радиоизлучения Солнца на РАТАН-600 получены результаты, некоторых нельзя получить другими инструментами. Это относится к высокоточным измерениям круговой поляризации пространственных структур различных размеров и контрастов в широком интервале частот. Так, например, уже в первых наблюдениях слабоконтрастных деталей на диске Солнца была обнаружена хромосферная радиогрануляция в сантиметровом диапазоне радиоволн (Богод, Корольков, 1975), которая позже была подтверждена на других инструментах.

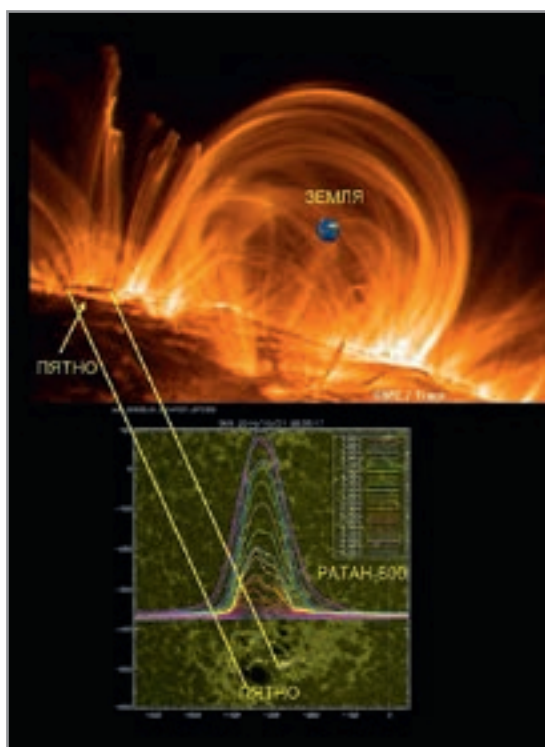


Рис. 143. Схематическое изображение части диска Солнца в рентгеновских лучах (TRACE). Для оценки масштаба приведено изображение диска Земли. Атмосфера над пятном слева сканируется диаграммой РАТАН-600 на многих волнах.

Спектрально-поляризационные наблюдения на РАТАН-600 позволили разработать методы диагностики и измерения КМП (Bogod, Gelfreikh, 1980; Akhmedov et al., 1982). Несмотря на пионерский характер этих высоко цитируемых работ их уровень в мире до настоящего времени не достигнут. Из-за того, что специализированные инструменты – радиогелиографы основаны на интерферометрических принципах, и выполняемые на них наблюдения не являются спектральными и не обладают достаточной чувствительностью по поверхностной яркости.

Строящиеся новые радиогелиографы CSRH (Китай) и ССРТ (Россия) будут спектральными инструментами, где возможно решение многих задач по спектрам вспышечных событий. Однако проблема высокой чувствительности по яркостной

температуре остается, так как работает соотношение: $\Delta T_B \approx D^2_{max} / (d^2 \times N)$, где D – размер синтезируемой апертуры в (км), d – размер одиночного зеркала (м), N – число одиночных зеркал. Этот эффект значительно (в 10^4 – 10^6 раз) ослабляет чувствительность интерферометров по сравнению с зеркалами с заполненной апертурой.

Проблема усложняется и узкими полосами анализа (в десятки МГц), тогда как в рефлекторных инструментах (типа РАТАН-600) легко достигаются полосы анализа в сотни и тысячи МГц. Это позволило достичь высокой чувствительности (до 0.02%) по измерению круговой поляризации при исследовании предельно слабых структур на диске Солнца.

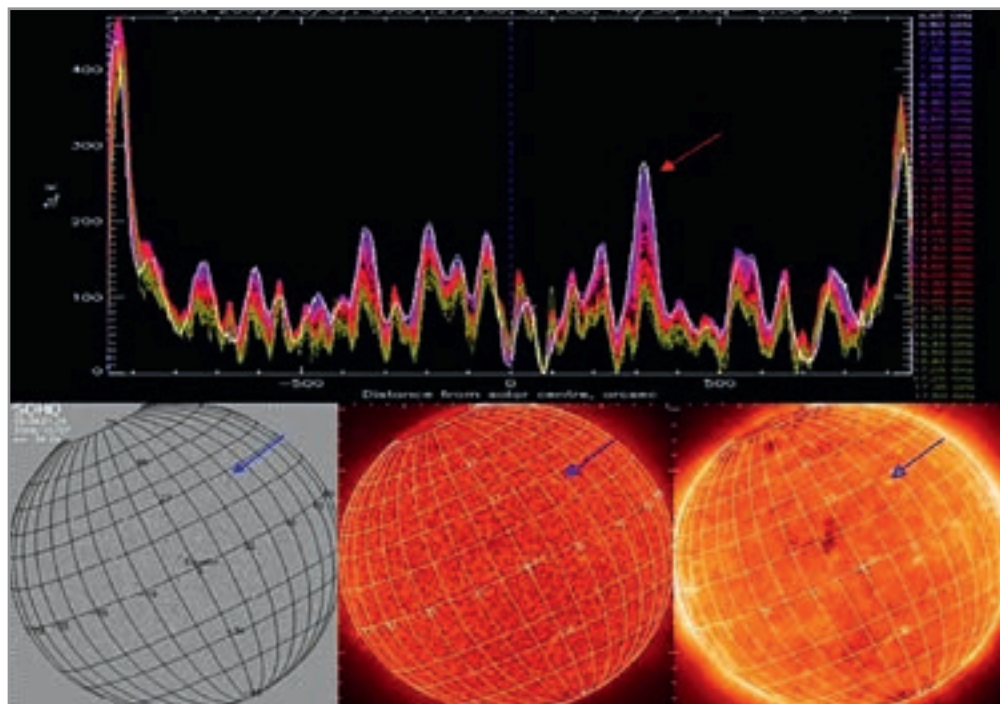


Рис. 144. Пример многоволновых одномерных сканов спокойного Солнца, полученные на радиотелескопе РАТАН-600 7 октября 2009 г. (вверху). Приведена мелкомасштабная структура с амплитудой менее 1% от уровня спокойного Солнца. В нижнем ряду, слева направо - изображения с космических аппаратов SOHO MDI, SOHO EIT 304 и 171, ориентация в гелиокоординатах EW–NS. Стрелки показывают отождествление яркого источника на радиосканах и космических изображениях.

Следующим фактором, который выделяет РАТАН-600 из других инструментов в мире для солнечных исследований (рис. 144), является широкий многооктавный диапазон частот 0.75–18.2 ГГц с частотным разрешением 1% на 112 отдельных частотных каналах, при этом на каждой частоте регистрируется правая и левая круговые поляризации. Сочетание высокой чувствительности, высокого частотного разрешения, точных измерений поляризации делают эти наблюдения уникальными (Богод и др., 2011; Балдин, Гараимов, 2011; Тохчукова, 2011).

Важнейшие результаты 2006–2015 гг.

ПОЛНОЕ ЗАТМЕНИЕ СОЛНЦА 29 МАРТА 2006 Г.

Максимальная фаза покрытия составила 0.997. При этом, Луна, покрывая диск Солнца, касалась его северной зоны и оставляла полоску в $1''$ – $3''$. Это сильно ослабило влияние фонового излучения Солнца на чувствительность системы и четко локализовало место наблюдений.

Уникальные возможности предоставил новый спектрально-поляризационный комплекс, который покрывал диапазон 6.0–16.4 ГГц со спектральным разрешением 1% на 56 частотных каналах с высокой точностью измерения круговой поляризации ($\sim 0.1\%$). Затмение наблюдалось на южном секторе с плоским отражателем в многоазимутальном режиме в течение 2.5 часов.

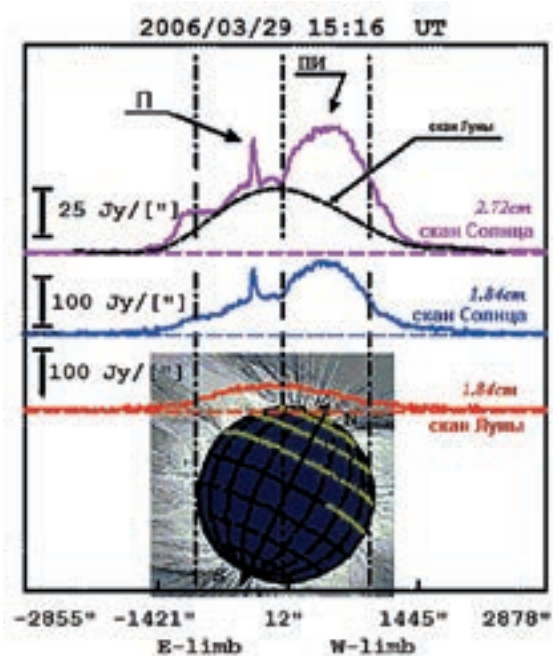


Рис. 145. Сканы северной части диска Солнца во время затмения 29.03.2006 г. на волнах 1.84 и 2.72 см. На верхнем скане ($\lambda 2.72$ см) приведен также вклад Луны. Источник (III) над полюсом с амплитудой потока излучения $50 \text{ Дж}/[']$ обнаружен в ходе затмения. Оценки показали, что этот источник может быть зарегистрирован только на крупном радиотелескопе при экранировании вклада Солнца во время затмения. П – протуберанец.

В результате получены новые данные о структуре короны над северным полюсом Солнца. Спектральные наблюдения полярной зоны Солнца с предельной высокой чувствительностью в ходе максимальной фазы затмения позволили обнаружить яркое излучение в микроволновом диапазоне точно над Северным полюсом Солнца (рис. 145). Этот источник состоит из области размером $\sim 700''$ с интенсивностью около 1–1.5% от уровня спокойного Солнца и тонкой пространственной структуры с флуктуациями на уровне 0.06% и характерными размерами $40''$ – $70''$. Мы объяснили это как проявление тонкой структуры общего магнитного поля Солнца в виде плумов, истекающих в корону. Вблизи полюса Солнца они регистрируются как совокупность множества мелкомасштабных радиоисточников (Богод и др. 2007).

КОРОНАЛЬНАЯ МАГНИТОГРАФИЯ

Магнитные поля – доминирующий источник энергии для нагрева солнечной короны и генерации солнечной активности, такой как вспышки, корональные выбросы массы и солнечный ветер. Они формируют различные структуры корональной плазмы и участвуют в создании структуры гелиосферы, которая включает в себя Землю и другие планеты. Сегодня проблемы корональной магнитометрии рассматриваются как критические для прогресса во многих вопросах солнечной активности. Целевые конференции (например, Workshop Coronal Magnetometry, 2012, Colorado, USA) отмечают, что прямые измерения и диагностика КМП находятся в зачаточном состоянии и остаются технически сложной задачей. Ожидается, что практическое использование результатов современных технологий и быстрый рост в диагностике КМП достижим лишь в следующем десятилетии. Между тем практические наблюдения на РАТАН-600 уже сейчас дают регулярные оценки КМП в атмосфере Солнца над пятнами, тогда как ведущие исследователи пока ограничиваются моделированием будущих измерений (Wang et al., 2015). Учитывая высокую чувствительность радиоастрономического метода даже к небольшим вариациям параметров плазмы (температуры, плотности и магнитного поля), в ИПФ АН, ГАО РАН и САО РАН разработаны разнообразные методики измерения КМП на основе детального спектрального и поляризационного анализа в широком диапазоне волн. Измерения КМП в радиодиапазоне с помощью РАТАН-600 указывают на то, что общепринятые расчеты на основе потенциального приближения часто не справедливы для корональных уровней, особенно, если исследуются активные области, в которых происходят мощные вспышки. В связи с этим, существует проблема корректного построения вертикальной структуры магнитного поля в активных областях в широком интервале высот.

Несмотря на быстрое развитие спутниковых наблюдений, методы радиоастрономии остаются единственными для прямых измерений КМП по поляризованному радиоизлучению. Эти исследования начали выполняться с 1960 г. основателями отдела радиоастрономии в Пулковской обсерватории Д.В. Корольковым, Н.С. Соболевой и Г.Б. Гельфрейхом. На БПР была обнаружена, и в дальнейшем исследовалась поляризация радиоисточников на Солнце. Эти работы были продолжены с более высоким пространственным разрешением на РАТАН-600. Стало ясно, что повышение точности поляризационных измерений, многоволновый анализ спектра и высокая координатная точность являются основой для измерений КМП. В последнее десятилетие особая роль отводилась и методам моделирования. Возможность детального спектрального анализа поляризованного излучения и высокая координатная точность радиотелескопа позволили развивать стереоскопические методы измерений.

Следующие методы измерения КМП в различных структурах на диске Солнца, разработанные и примененные до 2006 г.:

- по тепловому тормозному излучению плазмы, однородный и неоднородный случаи (Г.Б. Гельфрейх, А.С. Гребинский);
- по циклотронному излучению плазмы (Г.Б. Гельфрейх, В.М. Богод, Л.В. Яснов);
- по инверсии круговой поляризации (Н.Г. Петерова, Б.И. Рябов);
- метод эмиссионной томографии на основе спектрально-поляризационных измерений солнечного радиоизлучения (А.С. Гребинский).

ВЫСОТНАЯ СТРУКТУРА КОРОНАЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

В САО разработаны несколько новых методов измерения высотной структуры КМП. Далее представлена более подробная информация об этом.

Метод динамической многоволновой стереоскопии (Богод и Яснов, 2009) позволяет определять вертикальную структуру коронального магнитного поля в АО Солнца. Он основан на измерении координаты источника поляризованного излучения на определенной частоте при его перемещении по диску Солнца и сопоставления точных измерений координат (до 1") на уровне фотосферы (оптические данные) и на уровне нижней короны.

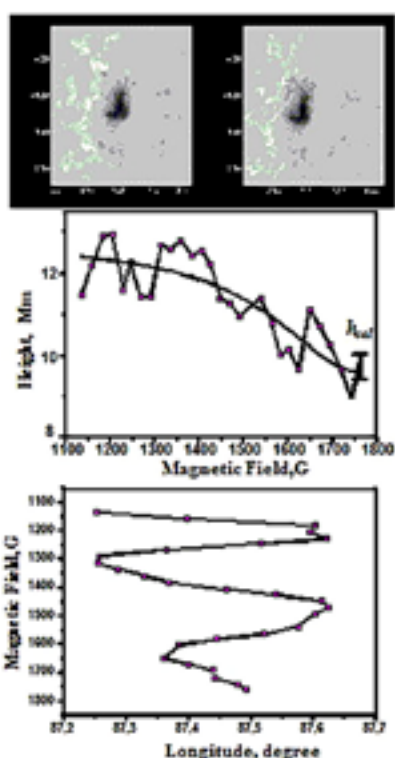


Рис. 146. Вверху показана относительно стабильная структура магнитного поля пятна на уровне фотосферы NOAA 0953 в течение 2–3 мая 2007 г. по данным спутника SOHO MDI. В центре представлены радиоизмерения высот для каждой длины волны многоволнового комплекса, которые сопоставлены с соответствующими значениями магнитного поля, рассчитанными для 3-й гармоники гирочастоты. Вертикальный отрезок h_{cal} показывает систематическую ошибку радиоизмерений, связанную с качеством установки антенны. Внизу приведена высоко-долготная спиральная структура КМП над пятном.

Спектрально-поляризационные измерения в широком диапазоне частот дают профиль вертикального распределения магнитного поля поляризованного радиоисточника, который потом пересчитывается в высотный профиль напряженности магнитного поля для случая циклотронного механизма излучения. При учете различных отклонений (вращение пятен и широтные изменения угловой скорости вращения Солнца) становится возможным определение наклона силовой трубки магнитного поля.

Обнаружено, что КМП напряженностью около 600 Гс находятся на достаточно больших высотах в атмосфере Солнца (до 50000 км.), что хорошо согласуется с наблюдениями в ультрафиолете и рентгене, где расходимость силовых трубок мала (не

более 20–30% в вершинах магнитных петель). Проведено сопоставление высотной структуры КМП в АО по данным радиоастрономических измерений и модельным реконструкциям фотосферного магнитного поля, что позволило сделать вывод в пользу моделей сильно структурированного и скрученного вертикального КМП над пятном.

Обнаружение спиральной высотной структуры КМП над стабильным пятном в АО стало интересным результатом (рис. 146). Как показал статистический анализ, такие структуры встречаются часто. Их существование объясняет большую протяженность тонких арок, в которых осуществляется перенос энергии с помощью МГД-волн.

Группой исследователей из Center For Solar-Terrestrial Research (New Jersey Institute of Technology, Newark, USA) было предложено провести сопоставление наших многоволновых измерений с данными радиогелиографов ССРТ (Иркутск) и NoRH (Нобеяма). Эти работы показали хорошее согласие с данными ПАТАН-600 и поставили фундаментальные вопросы о корректности существующих механизмов.

Метод сопоставлений моделей и измерений КМП основан на сопоставлении модельных расчетов и наблюдательных радиоастрономических данных. В нем используются данные оптических магнитографов и сравнение их с модельными реконструкциями нелинейного бессилового магнитного поля на корональные уровни.

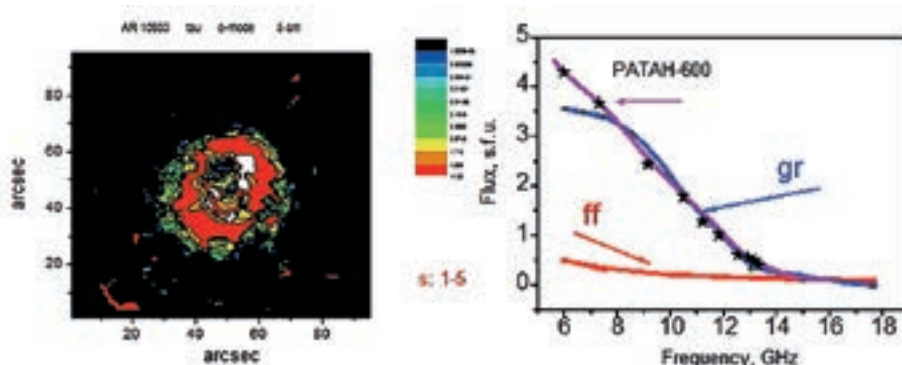


Рис. 147. Слева - 2D-карта коронального магнитного поля на волне 5 см для АО 10933, реконструированная на основе фотосферных данных магнитографа спутника Hinode и расчетов циклотронного излучения на 1–5 гармониках гирочастоты. Величина оптической толщи выделена градацией цвета. Справа – сопоставление расчетных спектров циклотронного излучения (*gr*) и тормозного излучения (*ff*) с данными спектральных наблюдений на ПАТАН-600.

Реконструированные карты магнитных полей проходят стадию модельных расчетов циклотронного излучения и свертку с реальной диаграммой направленности радиотелескопа ПАТАН-600 для каждой из 86 длин волн. Сравнительный анализ пространственной структуры радиоизлучения, рассчитанного на основе реконструированного магнитного поля, с многоволновыми сканами наблюдений в широком микроволновом диапазоне волн на ПАТАН-600, позволяет локализовать в АО места повышенной электронной плотности и дополнительного нагрева корональной плазмы. Удовлетворительное согласие между модельными расчетами КМП и наблюдательными данными удается достичь не только для областей с простейшей структурой типа одиночного пятна (Т.И. Кальтман, А.А. Ступишин), но и для

комплексных АО со сложной магнитной структурой, содержащих пятенные источники над нейтральной линией магнитного поля, флоккулы и другие объекты.

МАГНИТОСФЕРЫ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ

Понятие магнитосферы активной области было сформулировано в работах Ланга и др. (1993) и Гельфрейха (1996) по результатам совместной программы наблюдений Солнца на VLA и RATAN-600. Это понятие – по аналогии с магнитосферой Земли, и многие процессы в них имеют сходную природу. По этим наблюдениям в дециметровом диапазоне были обнаружены радиоисточники нового типа, свидетельствующие о процессах перехода теплового коронального излучения в нетепловое излучение. К таким источникам относятся долгоживущие микровсплески и нетепловое «дециметровое гало», покрывающее по размерам всю АО. Их интенсивность весьма мала, и они обнаруживаются только на крупных инструментах рефлекторного типа.

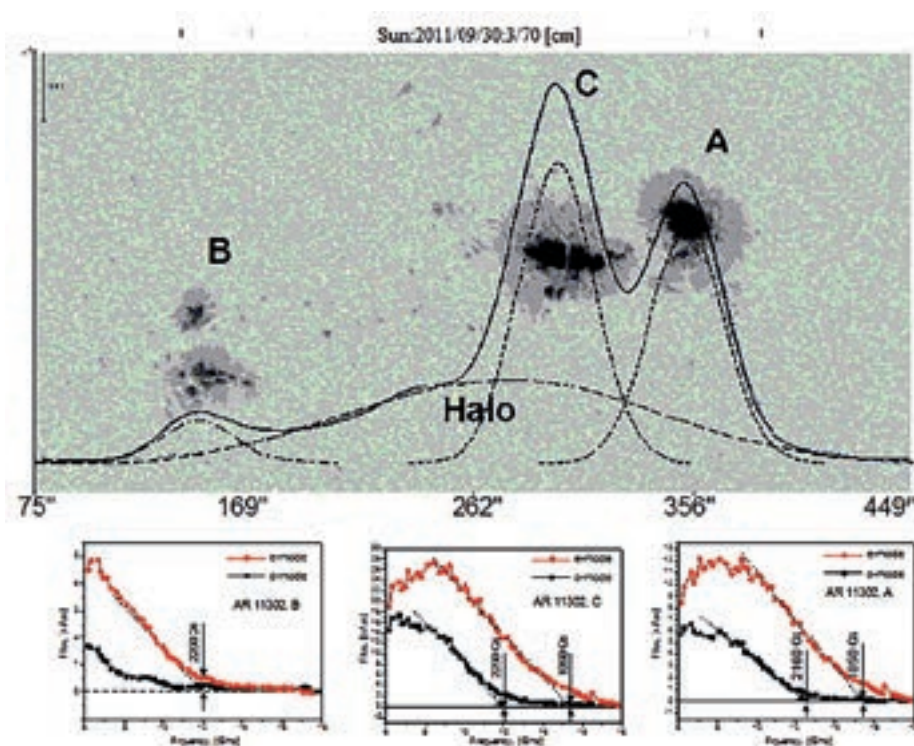


Рис. 148. Вверху: скан АО 11309 (09.2011) на волне 3.7 см (параметр Стокса I), наложенный на фотогелиограмму с результатами гаусс-анализа. Выделяются радиоисточники над пятнами А, В, С и протяженный радиоисточник Halo, покрывающий по размерам всю АО. Внизу приведены спектры потоков радиоизлучения для каждого пятна в необыкновенной е-моды (красный цвет) и обыкновенной о-моды (черный цвет). Для каждого пятна определено КМП в точках повышения радиоизлучения в области корональных температур.

Выявлены взаимосвязи между тепловой (S) и нетепловой (B) компонентами излучения АО. Так установлена связь между обнаруженным на РАТАН-600 «дециметровым гало» и нетепловым излучением длительно существующих источников шумовых бурь в солнечной короне. Природа «дециметрового гало» еще неясна, хотя установлено, что его излучение определяется нетепловым радиоизлучением ускоренных частиц, захваченных радиационными поясами магнитосферы АО. В совместных наблюдениях на РАТАН-600 и VLA была обнаружена двойная инверсия поляризации в активных областях с ШБ, что указывает на локализацию токовых слоев в верхней короне Солнца, которые являются источниками ускорения частиц и мест накопления энергии для ШБ.

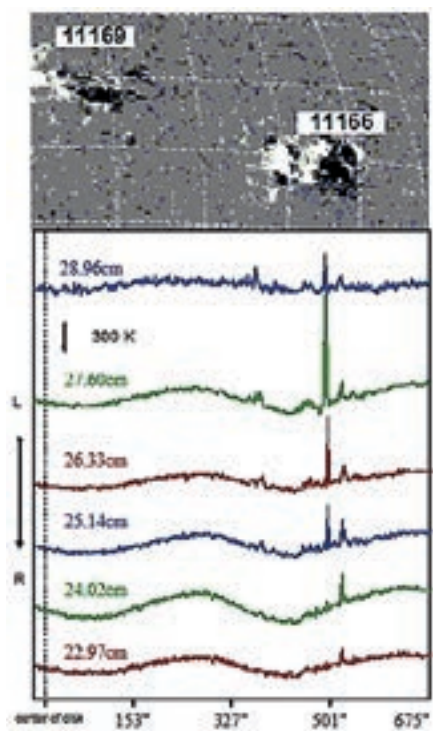


Рис. 149. Сканы микровсплесков на нескольких волнах одновременно, зарегистрированные в диапазоне волн 1.306–1.036 ГГц. Приведена часть диска Солнца. Диаграмма радиотелескопа последовательно сканирует весь диск. Место генерации микровсплесков центрируется на линию раздела полярностей магнитного поля NOAA 11166. Для NOAA 11169 наличие микровсплесков не обнаружено.

Обнаружены новые радиисточники импульсного типа в виде долгоживущих микровсплесков (рис. 149) в дециметровом диапазоне длин волн, которые также связаны с шумовыми бурями (ШБ) в метровом диапазоне волн. Поток МВ находится в диапазоне 0.001–0.1 с.е.п. (солнечная единица потока), степень поляризации – от 10% до 100%, продолжительность индивидуальных импульсов – около 1–2 с. МВ могут существовать в одной и той же АО в течение нескольких дней. Сопоставление МВ с ШБ в метровом диапазоне длин волн показало, что МВ являются проявлением излучения ШБ в дециметровом диапазоне длин волн. Для определения напряженности магнитного поля в местах генерации МВ были использованы модель двойного плазменного резонанса и определение высокочастотной границы спектра МВ с помощью многоволнового спектрографа на РАТАН-600. Это позволяет вместе с реконструкцией

КМП по фотосферному полю определять высотную структуру КМП и электронную плотность в АО над нейтральной линией фотосферного магнитного поля.

Таким образом, с набором методов измерения КМП с помощью технических возможностей радиотелескопа РАТАН-600 становится возможным детальное исследование магнитосферы АО, где зарегистрированы в радиодиапазоне практически все известные структуры – от радиогрануляции до ШБ. Концепция магнитосферы, рассматривающая с единых позиций проявления радиоизлучения АО как единого активного комплекса, позволяет пролить свет на соотношение стабильных и активных процессов и их взаимосвязи. Особо важно определить основные пути переноса нетепловой энергии в тепловую. Доминирующую роль во всех процессах играет магнитное поле, измерение которого на корональных уровнях доступно радиоастрономическим методам. Интересна промежуточная фаза перехода АО из стабильной фазы во вспышечную и обратно. Именно в предвспышечной фазе происходят процессы накопления энергии и формирование предвспышечных состояний (токовые слои, пекулярные источники и др.). К ней относится и постэруптивная фаза, в которой нетепловое излучение стационаризуется и переходит в тепловую фазу. В ней при наличии источников возмущений (выход нового магнитного потока, нестабильные магнитные конфигурации и др. возмущения) может создаться повторная вспышечная ситуация. Многочисленные поиски критериев прогноза вспышек связаны именно с поиском источников первоначальных возмущений и первичного разогрева (токовые слои, сложные дельта – конфигурации магнитного поля, пекулярные радиоисточники, высокие яркостные температуры, аномалии в поляризованном радиоизлучении и др.).

ПЕРЕХОДНАЯ ЗОНА ХРОМОСФЕРА – КОРОНА

Впервые нами получены спектры яркостной температуры пятенных радиоисточников со спектральным разрешением порядка 1%, что соответствует разрешению по высоте в атмосфере Солнца порядка 60 км. Была исследована тонкая структура переходной области между хромосферой и короной над пятнами (Коржавин, 2010). Привязка по высоте сделана с использованием моделей КМП, которые согласованы с наблюдениями поля в фотосфере. Оказалось, что распределение температуры в переходной области носит плавный характер в диапазоне высот 2000–5000 км, что значительно отличается от моделей переходной области с резким ростом температуры, которые, как известно, получили широкое распространение при изучении микроволнового излучения АО на Солнце. Благодаря высокой частоте следования точек в спектре оценены ошибки измерений плотности потока, которые в большей части диапазона (2.5–5 см) не превышают 10–20%. Полученные данные существенно корректируют модель атмосферы над пятном.

ПРИРОДА ПЕКУЛЯРНЫХ РАДИОИСТОЧНИКОВ

Этот тип радиоисточников располагается в короне в межпятенном пространстве над нейтральной линией фотосферного магнитного поля в АО. Такие объекты присутствуют во вспышечных АО и являются кандидатами в источники первичного разогрева плазмы в них. По многоволновым наблюдениям на РАТАН-600 построены спектры потоков и степени поляризации таких источников в диапазоне 4–17 ГГц.

Результаты моделирования указывают, что их интенсивное излучение и слабая поляризация могут быть объяснены циклотронным тепловым излучением в поперечном

магнитном поле. Интерпретация радиоизлучения радиоисточников над линией раздела магнитных полярностей состоит в учете их расположения в верхней части корональной арки (или аркады) и учете особенностей КМП в межпятенной области.

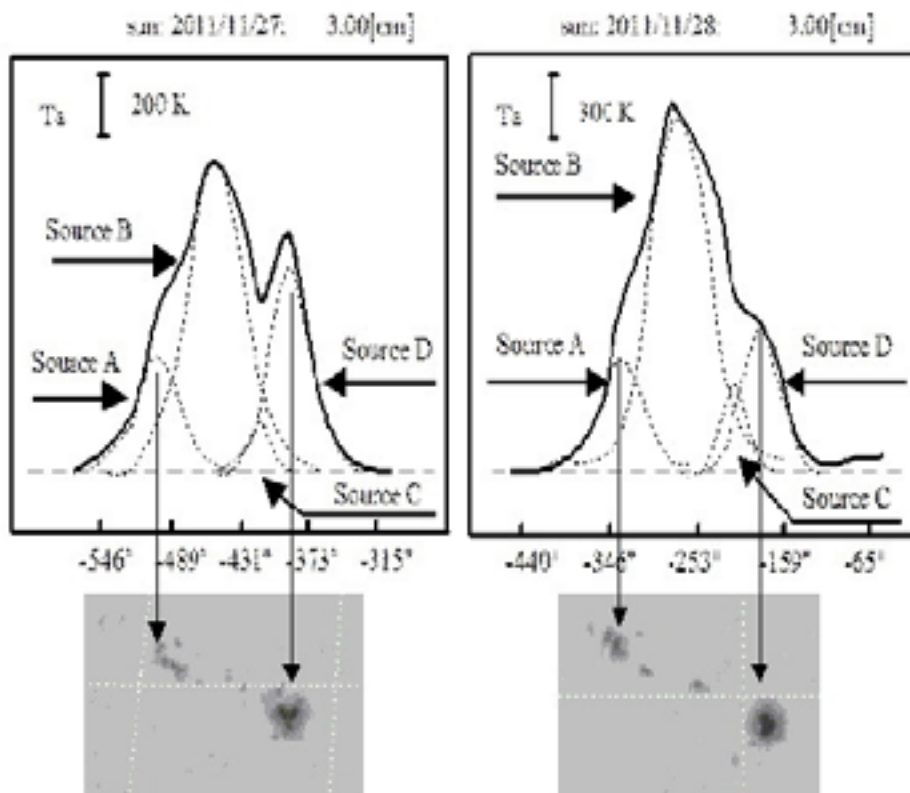


Рис. 150. Скан NOAA11358 на волне 3.0 см 27.11.2011 г. (слева) и 28 ноября 2011 г. (справа). Слева направо вписаны циклотронные источники A и D над пятнами. Самый яркий источник B находится в межпятенном пространстве. Источник C связан со вспышкой нового магнитного потока. Внизу приведено сопоставление со структурой фотосферного магнитного поля по данным спутника SDO AIA в линии 4500Å.

ПОЛЯРИЗАЦИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ РАДИОИСТОЧНИКОВ НА СОЛНЦЕ

Возможности РАТАН-600 по детальным исследованиям спектров поляризованного радиоизлучения АО привели к углублению понимания природы их активности на уровнях переходного слоя и нижней короны Солнца. Обнаружены различные проявления инверсий знака круговой поляризации в микроволновых спектрах излучения. Эти явление проявляются в излучениях вспышечно-продуктивных активных областей на различных стадиях развития, начиная с их предвспышечной стадии и, вероятно, отражает глубинные процессы в них.

Рассмотрено несколько механизмов, которые приводят к двойной инверсии знака поляризации по частотному спектру и к эффекту провала в спектре. Среди них подробно изучены: (i) линейное взаимодействие волн в области квазипоперечного магнитного поля; (ii) распространение радиоволн через область с нулевым магнитным полем; (iii) распространение радиоволн через вышележащие токовые слои; (iv) рассеяние радиоволн при прохождении через волокна и магнитные дыры, в которых направление КМП меняет знак по направлению к наблюдателю. Результаты модельных расчетов теплового циклотронного излучения простейшей трехмерной горячей петли (тора) показали, что горячая корональная петля заметно влияет на характеристики излучения солнечной АО на сантиметровых и дециметровых волнах. Эти модели сопоставлялись с результатами наблюдений на РАТАН-600 для АО, в которых эффект инверсии поляризации близок к расчетным.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВСПЫШЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ СОЛНЦА

На РАТАН-600 в многоазимутальном режиме по заявкам САО, ГАО, ИСЗФ проводится мониторинг Солнца в диапазоне 3–18 ГГц и идет формирование многоволновой базы данных солнечной активности на различных этапах ее развития - предвспышечной, вспышечной и послевспышечной.

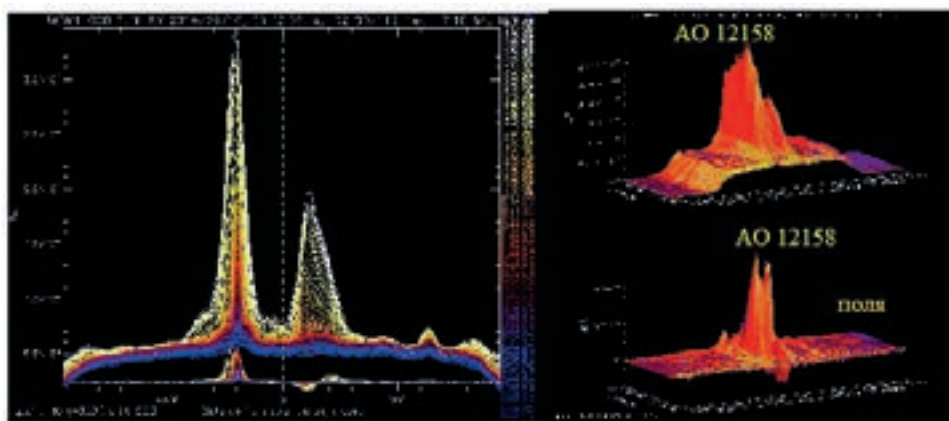


Рис. 151. Многоволновых наблюдений активного Солнца. За одно сканирование получают спектры интенсивности и круговой поляризации обо всех активных областях на диске. С 7:00 UT по 11:00 UT в диапазоне от 3 до 18.2 ГГц реализуется до 60 сканов Солнца на 80 частотах одновременно. В АО 12158, на которую был дан положительный прогноз вспышки уровней C1.5 и X1.6, они произошли через 4 часа и 8 часов, соответственно.

Для прогноза вспышечной активности используется критерий Танаки-Еноме, предложенный для двух волн 3 и 8 см, и его модернизированные версии для многоволновых наблюдений, которые удовлетворительно работают для мощных вспышек и протонных событий. В связи с пониженной активностью 24 цикла проводился поиск адекватного критерия для прогноза вспышек с меньшим рентгеновским классом М (и С большого уровня), а также продолжается работа по установлению комплексного критерия, в котором учитываются данные фотосферных наблюдений, данные ультрафиолетовых и рентгеновских наблюдений.

На сайте СПбФ САО РАН (http://www.spbf.sao.ru/cgi-bin/ion-p?page=rat_search.ion) в автоматическом режиме осуществляется диагностика по критерию, используемому для прогноза. Ведутся регулярные измерения величины КМП (<http://www.sao.ru/hq/sun/>) для всех АО на диске, которые больше нигде не выполняются. Для повышения качества прогнозирования используются обнаруженные на РАТАН-600 особенности в спектрах поляризации АО в предвспышечном состоянии (рис. 151).

СОЛНЕЧНЫЙ АППАРАТУРНЫЙ КОМПЛЕКС

В 2011 г. завершена модернизация приемной аппаратуры для исследования солнечного радиоизлучения на РАТАН-600. Вдвое увеличено перекрытие частотного диапазона, который сейчас покрывает 0.75–18.2 ГГц (рис. 152). Частотное разрешение составляет 50–100 МГц. Число частотных каналов регистрации параметров Стокса I и V составляет 112. В сочетании с большой эффективной площадью РАТАН-600 новая аппаратура предоставила новые возможности для исследования тонкой структуры радиоизлучения солнечной короны. В области солнечной радиоастрономии в настоящее время такой приемный комплекс является уникальным.



Рис 152. Входные облучатели солнечного приемного комплекса для перекрытия диапазона частот 0.75–18.2 ГГц (слева). Справа приведены облучатели волноводного типа для частот 6.7, 17.6 и 37.5 ГГц.

В СПбФ реализован режим удаленных наблюдений на РАТАН-600 путем передачи файлов задания для установки кругового и плоского отражателей телескопа и получения данных. Наблюдения автоматически обрабатываются и в оперативном режиме публикуются на сайте <http://www.spbf.sao.ru/prognoz/> через 4 минуты после регистрации. Регистрация мгновенного спектра во всем частотном диапазоне осуществляется по 224 каналам.

Создан центр анализа многоволновых наблюдений Солнца, где автоматически собирается информация с многоволнового спектрографа облучателя №3 РАТАН-600, которая обрабатывается и представляется в виде удобном для сопоставления с данными других наземных и спутниковых обсерваторий.

АНТЕННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Для обеспечения качественных наблюдений Солнца важно контролировать характеристики радиотелескопа. Проведены исследования поляризационных свойств антенны. Высокая точность достигается оптимизацией характеристик облучения антенной системы, включающей южный сектор и плоский отражатель (Ю+П), при использовании широкодиапазонных первичных облучателей. Важным элементом эксплуатации радиотелескопа является юстировка, которая включает измерение точности отражательных панелей с относительной привязкой друг к другу. На радиотелескопе применяются разнообразные методы юстировки различных секторов. Однако для работы в азимутальном режиме системы Ю+П такого метода не существовало. Для нее мы разработали юстировку как по геостационарным спутникам, так и методами радиоголографии (В.Б. Хайкин, М.К. Лебедев).

Эффективное использование РАТАН-600, соответствующее современным требованиям к наблюдениям, тормозится рядом факторов: (i) одномерность пространственного разрешения; (ii) ограниченная возможность слежения за отдельным объектом на Солнце; (iii) недостаточная точность формирования отражающей поверхности из-за длительной эксплуатации, что привело к увеличению величины люфта в механизмах перемещения. Все вместе это требует полной модернизации радиотелескопа.

ПЕРСПЕКТИВЫ СОЛНЕЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА РАТАН-600

Перспективы связаны с модернизацией радиотелескопа в части перекрытия 8-октавного диапазона радиоволн (от 0.5 м до 3 мм) и реализацией режима слежения для задач по колебательным характеристикам солнечной плазмы.

Важным для солнечной радиоастрономии является перекрытие миллиметрового диапазона волн, что стало ясно после начала работы радиотелескопа ALMA. Расширение рабочего диапазона от 1 ГГц до 100 ГГц, высокое пространственное разрешение в сочетании с матричным картографированием и временными характеристиками могут превратить радиотелескоп РАТАН-600 в уникальный инструмент для исследований в области солнечной физики и в других областях астрономии.

За прошедший период стало ясно, что для новых результатов в исследованиях физики солнечной короны нужен крупный высокоточный инструмент с высокой чувствительностью в широком диапазоне волн. Это подтверждается большим количеством открытий, полученных на РАТАН-600. Из-за длительной эксплуатации инструмент находится в критическом состоянии и нуждается в срочной реконструкции и модернизации с применением современных технологий. Проведенный нами анализ показал, что базовые конструкции вполне надежны и могут работать еще не одно десятилетие. Но научная ценность радиотелескопа может быть доведена до мирового уровня лишь с улучшением его характеристик для наблюдений в миллиметровом диапазоне длин волн. Перекрытие диапазона наблюдений от дециметров до субмиллиметров позволит использовать этот инструмент для решения многих задач современной астрономии. Мы надеемся на государственную поддержку, в результате которой не только отечественная, но и мировая астрофизика получит уникальный инструмент, способный существенно продвинуться в решении проблемы структуризации солнечной плазмы как части общих задач астрономии.

Основной вклад в проведении исследований получен благодаря усилиям научного коллектива солнечной лаборатории САО РАН в составе В.М. Богода, О.А. Голубчиной, А.А. Гофман, А.С. Гребинского, Т.И. Кальтман, А.Н. Коржавина, Н.Г. Петеровой, С.Х. Тохчуковой, С.В. Балдина, А.А. Первакова, Л.В. Опейкиной, Т.Н. Казаниной, Н.В. Хубиевой, Е.А. Курочкина, А.В. Шендрика, А.А. Стороженко, М.К. Лебедева. Многие работы выполнялись при участии сотрудников ГАО РАН - Г.Б. Гельфрейха, И.В. Григорьева, В.Н. Боровик и Т.П. Борисевич; СПбГУ – Л.В. Яснова и А.Г. Ступишина; ИПФАН – Е.Я. Злотника; ИЗМИРАН – М.А.Лившица.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор признает сложность описания работ крупного направления за длительный период работы, в связи с чем, личная точка зрения может сильно превалировать. Он выражает надежду на создание более полного и глубокого описания проведенных исследований радиоизлучения Солнца на РАТАН-600 неформальным коллективом радиоастрономов ГАО и САО. Коллективы выражают признательность академику Ю.Н. Парийскому за интерес, стимулирующий работу коллективов, и отдают дань светлой памяти Д.В. Королькова и Г.Б. Гельфрейха, много сделавших для становления этих исследований на РАТАН-600. В последние трудные годы значительная помощь была оказана РФФИ (05-02-16228а, 08-02-000378а, 06-02-17034а, 06-02-38007 ГФЕН а, 11-02-00072а, 14-02-162а) и программой ПРАН-7,9, 22 и программой ОФН-16 РАН.

ПУБЛИКАЦИИ

- [1] Богод В.М., *Астрофиз. бюлл.* 66, №2, 207 (2011).
- [2] В.М. Богод, Д.В.Корольков, *Письма в АЖ* 1, вып. 10, (1975).
- [3] Bogod V.M., Alissandrakis C.E., Kaltman T.I., Tokhchukova S.K., *Solar Physics* 290, Is 1, 7–20 (2015).
- [4] Mursh K.A. and Hurford G.J., *Ann. Rev. Astron. Astroph.*, 20, 497 (1982).
- [5] Akhmedov S.B., Gelfreikh G.B., Bogod V.M., Korzhavin A.N., *Solar Phys.* 79, 41–58 (1982).
- [6] Bogod, V., Gelfreikh, G. *Solar Phys.* 67, 29–46 (1980).
- [7] Gelfreikh G.B., Pilyeva N.A., Ryabov B.I., *Solar Phys.* 170, 253–264 (1997).
- [8] V.M. Bogod, A.S. Grebinsky, *Solar Physics* 176, No1, 67-86 (1997).
- [9] Grebinskij A., Bogod V., Gelfreikh G, Urpo S., Pohjolainen S. and Shibasaki K., *Astron. Astrophys. Suppl.* 144, 169–180 (2000).
- [10] Yan Y., Zhang J., Wang W., Liu F., Chen Z., Ji G. *Earth Moon Planet* 104, 97–100 (2009).
- [11] Lesovoi S., Altyntsev A., Ivanov E., Gubin A., *Solar Physics* 280, 651–661 (2012).
- [12] Bogod V., Garaimov V., Grebinskij A., *Solar Physics* 182, 139–143 (1998)
- [13] Богод В.М., Алесин А.М., Перваков А.А., *Астрофиз. бюлл.* 66, №2, 223 (2011).
- [14] С.В. Балдин, В.И. Гараймов, *Астрофиз. бюлл.* 66, №3, 400 (2011).
- [15] Тохчукова С.Х., *Астрофиз. бюлл.* 66, №3, 409 (2011).
- [16] H. Lin, J. R. Kuhn, and R. Coulter, *Astrophysical Journal* 613, L177–L180 (2004).
- [17] Tomczyk et al., *Solar Phys* 288, 463–465 (2013).
- [18] V.M. Bogod, L.V. Yasnov, *Astrophys. Bull.* 64, No4, 390-403 (2009).
- [19] Wang, Zhitao; Gary, Dale E.; Fleishman, Gregory D.; White, Stephen M. *Coronal, Astrophysical Journal* 805, Is 2, article id. 93, 13 pp. (2015).
- [20] Bogod V.M.; Golubchina O.A.; Zhekanis G.N.; Korzhavin A.N.; Kotel'Nikov V.S.; Nizhel'Skij N.A.; Tsybulev P.G., *Astrophys. Bull.* 62, Is 4, 360-368 (2007).
- [21] Golubchina O.A.; Bogod V.M.; Korzhavin A.N.; Bursov N.N.; Tokhchukova S.Kh., *Astrophys. Bull.* 63, Is 1, 34–42 (2008).

- [22] Голубчина О.А., Коржавин А.Н., Тохчукова С.Х. *Астрофиз. бюлл.* 66, №4, 524-532 (2011).
- [23] O.A. Golubchina, A.N. Korzhavin, *Geomagnetism and Aeronomy* 54, No.8, 1039-1044 (2014).
- [24] Корольков Д.В., Соболева Н.С., Гельфрейх Г.Б., *Известия ГАО* 21, вып.5, 81-113.
- [25] B.I. Ryabov, N.A. Pilyeva, C.E. Alissandrakis, K. Shibasaki, V.M. Bogod, V.I. Garaimov, G.B. Gelfreikh, *Solar Physics* 185, Is 1, 157-175 (1999).
- [26] Gelfreikh, G.B.; Pilyeva, N.A.; Ryabov, B.I., *Solar Physics* 170, Is 2, 253-264 (1997).
- [27] V.M. Bogod, A.S. Grebinsky, *Solar Physics* 176, No1, 67-86 (1997).
- [28] Aschwanden, Markus J., *Living Reviews in Solar Physics* 8, no. 5.
- [29] V.M. Bogod, L.V. Yasnov, *Cosmic Researches* 46, No 4, 309-313 (2008).
- [30] В.М.Богод, Л.В.Яснoв, *Астрофиз. бюлл.* 64, №4, 333-346 (2009).
- [31] V.M. Bogod, A. G. Stupishin and L.V. Yasnov, *Solar Physics* 276, Is. 1, 61-73 (2012).
- [32] G.M. Nita, G.D. Fleishman, Ju Jing, S.V. Lesovoi, V.M. Bogod, L.V. Yasnov, H.Wang and D.E.Gary, *Aph J* 737, 82 (2011).
- [33] Кальтман Т.И., Богод В.М., Ступишин А. Г., Яснoв Л.В., *АЖ*, №10, 872–882 (2012).
- [34] Богод В.М., Яснoв Л.В., *Астрофиз. бюлл.* 68, №3, 366-370 (2013).
- [35] Т.И.Кальтман, В.М.Богод, А.Г.Ступишин, Л.В.Яснoв. *Труды в сб. «Солнечная и солнечно-земная физика-2012»*, 175-178 (2012).
- [36] В.М. Богод, А.А. Гофман, А.Г. Ступишин, О.М. Ступишина, Л.В. Яснoв, *Вестник СПбГУ, Сер. 4., Т. 2 (60). Вып. 2 (2015)*.
- [37] L.V. Yasnov, V.M. Bogod, A.G. Stupishin, *Solar Physics* 249, 37-51 (2008).
- [38] Lang K.R., Willson R.F., Kile J.N., Lemen J., Strong K.T., Bogod V.M., Gelfreikh G.B., Ryabov B.I., Hafizov S.R., Abramov-Maximov B.E., Tsvetkov S.V., *Astrophys. J.* 419, 398-417 (1993).
- [39] Gelfreikh G.B., *ASP Conference Series* 93, 415 (1996).
- [40] Л.В. Яснoв, В.М. Богод, А.Г. Ступишин., *Astrophys. Bull.* 62, No4, 389 (2007).
- [41] Bogod V.M., Garaimov V.I., Gelfreikh G.B., Lang K.R., Wilson R.F., Kile J.N., *Solar Physics* 160, 133-149 (1995).
- [42] Akhmedov Sh.B.; Bogod V.M.; Borovik V.N.; Willson R.F.; Gelfreikh G.B.; Dikij V.N.; Korzhavin A.N.; Lang K.R.; Petrov Z.E., *Bull. SAO* 25, 103–131 (1991).
- [43] Петерова Н.Г., Опейкина Л.В., Топчило Н.А., *Geomagnetism and Aeronomy* 54, No. 8, 1053–1057 (2014).
- [44] М.А. Лившиц, А.М. Урнов, Ф.Ф. Горяев, Л.К. Кашапова, И.Ю. Григорьева, Т.И. Кальтман, *АЖ* 88, №10, 997-1007 (2011).
- [45] Grigoryeva I.Y.; Borovik V.N.; Livshits M.A.; Abramov-Maximov V.E.; Opeikina L.V.; Bogod V.M.; Korzhavin A.N., *Solar Physics* 260, 157-175 (2009).
- [46] A.N. Korzhavin, L.V. Opeikina, N.G. Peterova, *Astrophys. Bull.* 65, No. 1, 63–77 (2010).
- [47] Bogod V.M.; Peterova N.G.; Ryabov B.I.; Topchilo N.A., *Cosmic Research* 53, Is. 1, 10-20 (2015).
- [48] D. Bezrukov, B. Ryabov, N. Peterova, N. Topchilo, *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences* 48, № 2. 55-69 (2011).
- [49] Н.А. Топчило, Н.Г. Петерова, Т.П. Борисевич, *АЖ* 87, №1, 75–92 (2010).
- [50] B.I. Ryabov, D.E. Gary, N.G. Peterova, K. Shibasaki, N.A. Topchilo, 290, Is. 1, 21-35 (2015).
- [51] Богод В.М., Кальтман Т.И., Яснoв Л.В. *Астрофиз. бюлл.* 67, №4, 441 (2012).
- [52] V.E. Abramov-Maximov, V.N. Borovik, L.V. Opeikina, A.G. Tlatov, *Solar Physics* 290, Is. 1, 53-77 (2015).
- [53] V.M. Bogod, L.V. Yasnov. *Solar Phys.* 255, Is. 2, 253-271 (2009).
- [54] Богод В.М., Кальтман Т.И., Яснoвым Л.В., *АЖ* 87, №11, 1-9 (2010).
- [55] Yasnov, L.V., Kaltman, T.I., and Bogod, V.M., *Astronomy Reports* 55, No 1, 82 (2011).
- [56] N.G. Peterova, N.A. Topchilo, L.V. Opeikina, B.V. Agalakov, T.P. Borisevich, B.I. Lubyshev, *Geomagnetism and Aeronomy* 53, No.8, 1000-1006 (2013).
- [57] N.G. Peterova, T.I. Kaltman, A.N. Korzhavin, *Solar Physics* 242, Is. 1-2, 125-142 (2007).
- [58] Е.Я. Злотник, Т.И. Кальман, О.А. Шейнер, *ПАЖ*, N3 (2007).
- [59] Е.Я. Злотник, Т.И. Кальман, О.А. Шейнер, *ПАЖ*, №4 (2007).
- [60] E.Ya. Zlotnik, T.I. Kaltman, O.A. Sheiner, *Central European Astrophysical Bulletin*, 1-14 (2007).

- [61] В.М. Богод, С.Х. Тохчукова, *Космические исследования* 44, №6, 1-14 (2006).
- [62] В.М. Богод, *Известия РАН, Серия физическая*, том.70, № 10, с.1491-1495 (2006).
- [63] V.E. Abramov-Maximov, V.N. Borovik, L.V. Oreikina, A.G. Piatov, *Cosmic Research* 52, No.1, 1-14 (2014).
- [64] Б.В. Агалаков, Т.П. Борисевич, Н.Г. Петерова, Б.И. Рябов, Н.А. Топчило, С.Н. Кузнецов, И.Н. Мягкова, Б.Ю. Юшков, К. Кудела, *Геомагнетизм и аэрономия* 46, №5, 1-9 (2006).
- [65] Yermolaev Yu.I., L.M. Zelenyi, V.D. Kuznetsov, I.M. Chertok, M.I. Bogod V.M. Panasyuk, I.N. Myagkova, I.A. Zhitnik, S.V. Kuzin, Eselevich, I.V. Arkhangelskaja, A.I. Arkhangelsky and Yu.D. Kotov V.G., *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 70, 334-341 (2008).
- [66] Л.В. Опейкина, Е.К. Майорова, А.Н. Коржавин, *Астрофиз. бюлл.* 67, №1, 95 (2012).
- [67] Е.К. Майорова, Л.В. Опейкина, *Астрофиз. бюлл.* 66, №2, 234 (2011).
- [68] Tokhchukova S.Kh.; Korzhavin A.N.; Bogod V.M.; Kurochkin E.A.; Shendrik A.V. *Astrophys. Bull.* 69, Is. 3, 356-367 (2014).
- [69] А.Н. Коржавин, В.Н. Львов, С.Х. Тохчукова, С.Д. Цекмейстер, *Астрофиз. бюлл.* 67, 237 (2012).
- [70] Pinchuk G.A.; Khaikin V.B., *Soobshch. SAO* 46, 91 (1985).
- [71] Богод В.М., Рябуха В.С., Хайкин В.Б., Призов П.В., Лебедев М.А., Стороженко А.А., Хенталов А.В., Рябуха Ю.В., Яковлев С., *Труды ИПА РАН*, вып.24, 46-56 (2012).
- [72] С.В. Яковлев, В.В. Якунин, А.А. Стороженко, Н.Н. Бурсов, В.Б. Хайкин, *Труды ИПА РАН*, вып.24, 103-108 (2012).
- [73] Лебедев М.К., Хайкин В.Б., Богод В.М., *Труды ИПА РАН*, вып.24, 62-69 (2012).
- [74] Великотный М.А., Хайкин В.Б., Стороженко А.А., Богод В.М., *Труды ИПА РАН*, вып.24, 134- 139 (2012).
- [75] В.Б. Хайкин, В.Н. Радзиховский, С.Е. Кузьмин, *Труды ИПА РАН*, вып.24, 199-205 (2012).

Интервью к 50-летию САО РАН

Парийский Ю.Н.,

главный научный сотрудник СПбФ, академик РАН, д.ф.-м.н.; unipar@rambler.ru



Рис. 153. Юрий Николаевич Парийский.

Ю.Н. Парийскому был прислан список вопросов от организационного комитета по подготовке к 50-летию САО РАН. С Юрием Николаевичем (Ю.Н.) побеседовал сотрудник СПбФ Евгений Курочкин (Е.). Далее приводим ответы на эти вопросы.

Е. Расскажите, пожалуйста, немного о себе. Каким был Ваш путь в науку?

Ю.Н. Наша семья была окружена крупными физиками. Мой отец, Николай Николаевич Парийский, был классическим астрономом, а мама, Лидия Викторовна Парийская (Птицына), работала в ФИАНе, занималась вычислениями. Она была очень общительной и активной женщиной, работала непосредственно в теоретическом отделе ФИАНа под руководством И.Е. Тамма и, кстати, за соседним столом с А.Д. Сахаровым. Она знала там всех и приводила домой всю команду физиков на всякие увлекательные разговоры и, конечно же, на чай. Основным интеллектуальным развлечением на этих чаепитиях у нас были шарады. Все, от мала до велика, участвовали в подготовке к шарадам. Это осталось у меня в памяти на всю жизнь. Многих физиков я запомнил именно по участию в шарадах. Но конечно научные разговоры и споры, обсуждение новых интересных направлений – все это я тоже хорошо помню.

Е. Но почему именно радиоастрономия?

Ю.Н. Радиоастрономией меня заразил И.С. Шкловский, который был частым гостем в нашем доме. Иосиф Самуилович был аспирантом моего отца и писал диссертацию по

структуре солнечной короны. Он занимался тогда физикой Солнца вместе с папой и разрабатывал теорию горячей короны. У Шкловского было предложение опробовать в наблюдениях солнечного затмения предположения своей теории. В 1947 г. была организована экспедиция в Бразилию на пароходе «Грибоедов», где можно было измерить радиоизлучение короны Солнца во время полного солнечного затмения. Это путешествие было кругосветным. К нему готовились многие ученые. После успешных наблюдений 20 мая в порту Баийя теория Шкловского подтвердилась. Он предсказал, что корона должна быть существенно шире видимого диска Солнца, а не маленькой, как следовало из старой теории. Только лет через тридцать на семинаре в ГАИШе я узнал, что столь дорогое путешествие на теплоходе «Грибоедов» в этот трудный послевоенный год имело совсем другие цели – во время заходов в попутные порты корабль собирал всех советских агентов для возвращения на Родину. А тогда в «Трудах Академии наук» это описывалось как просто научная экспедиция.

Шкловский очень много и активно рассказывал о новой науке – радиоастрономии. Мне было так интересно, что я спросил папу, нельзя ли мне тоже заняться этой наукой. Папа посоветовался с М.А. Леонтовичем, и тот сказал: «Надо попробовать». Академическая дача Леонтовичей находилась по соседству с дачей ректора МГУ И.Г. Петровского, они прекрасно знали друг друга. И вот, Михаил Александрович подходит к забору, зовет того и говорит: «Юрка хочет поступить в университет заниматься астрономией, не мог бы ты помочь как-нибудь?». Тот отвечает: «Добро, но ему придется сдать два дополнительных экзамена». Я заверил, что все подготовлю и сдам. Так, несмотря на мое «полутемное» прошлое, из-за которого меня уволили из МИФИ (тогда ММИ) в связи с осуждением по статье 58.10 моей сестры Аси, не доучившись в Московском институте связи по специальности «радиотехника», я попал на астрономическое отделение механико-математического факультета МГУ. Наша группа как раз была первой, которая прослушала курс И.С. Шкловского в 1953–1954 гг.

Е. Интересно узнать, как Вы попали в Пулково из МГУ. Как это случилось?

Ю.Н. Я и моя жена Н.С. Соболева получили официальное распределение в Пулковскую обсерваторию – тогда ведущий астрономический институт. В это время там полным ходом шло строительство Большого Пулковского радиотелескопа (БПР) – первого в мире телескопа с антенной переменного профиля. Мы сразу включились в работу. Коллектив был молодой, работали мы очень азартно и дружно.

Е. А какие самые яркие воспоминания о работе на БПР?

Ю.Н. Вот один очень интересный пример. Ожидалась посадка космического корабля на поверхность Венеры. Велись дебаты – что же там на поверхности? Вариантов было множество – твердая поверхность или жидкая среда, там холодно или горячо. Я предложил провести эксперимент на БПР, но для этого надо было повысить его разрешающую способность в несколько раз. В течение почти двух лет мы всем отделом радиоастрономии ГАО, а тогда в нем было 90 человек, занимались этим делом. Алюминиевая обшивка БПР была заменена на более точную. Было изготовлено специальное устройство – стапель. На таком стапеле вручную с помощью винтов производилась подгонка поверхности элемента антенны к шаблону, чтобы сделать точную поверхность. Этот опыт пригодился при строительстве РАТАН – там была построена такая же система, существующая до сих пор. Нам действительно удалось в несколько раз повысить точность – телескоп стал работать не на трех сантиметрах, а на восьми миллиметрах с разрешением в 15 секунд дуги. Такое угловое разрешение намного меньше, чем размер Венеры – чего мы и добивались. Когда был проведен эксперимент, то выяснилось, что изображение Венеры, полученное на БПР, меньше, чем

соответствует по гипотезе, что она горячая. Если поверхность холодная, давление там должно быть высокое. Я показал этот результат С.Э. Хайкину, который тут же позвонил президенту Академии наук М.В. Келдышу. Буквально на следующий день я полетел в Москву. Посмотрев результаты, Келдыш воскликнул: «Юрий Николаевич, нужно было хотя бы на полгода раньше сообщить об этом! У нас уже летит корабль с расчетом, что она не холодная, а горячая. Корабль будет раздавлен!» Космический корабль Венера-2 не выдержал высокого давления – продержался всего несколько дней.

Е. И потом весь этот опыт пригодился при строительстве РАТАНа?

Ю.Н. РАТАН есть РАТАН – о нем очень много написано. Там было 4–6 сотен человек, и они интенсивно работали. Часть из них работает до сих пор. К сожалению, многих увлеченных наукой сотрудников РАТАНа уже нет в живых. Необходимо особо упомянуть Д.В. Королькова, который оснастил РАТАН-600 современными радиометрами, без которых были бы невозможны астрофизические исследования. И второй мой соавтор по монографии «Радиотелескопы и радиометры» – профессор Ленинградского политехнического института Н.А. Есепкина, которая развивала идеологию антенн переменного профиля. С несколькими сотрудниками САО я нахожусь в постоянном контакте, а также и с сотрудниками ИПА, например, А.В. Ипатов.

Е. Первое наблюдение на РАТАН-600 в 1974 г. Как Вы подошли к этому событию? Какие-то сложности были? Вот этот период в истории РАТАН-600 интересен.

Ю.Н. Мы гордимся тем, что РАТАН-600 был запущен раньше, чем БТА. Там годом ввода в строй считается 1977 г., а у нас – 1976 г. Сейчас трудно представить себе, как сложно мы готовились к первому наблюдению. Надо отдать должное моей супруге Н.С. Соболевой – она круглосуточно уточняла таблицы установок для 225 элементов северного сектора РАТАН-600. Было необходимо учесть огромное количество поправок, и Наталья Сергеевна со своими подругами по работе это все вычисляла на калькуляторах. В итоге к 12 июля 1974 г. появились точные таблицы кинематических поправок, которые мы добавили в установку антенны на источник PKS 0521-29, установили антенну и сразу провели успешно его наблюдения на волне 4 см. Я бесконечно благодарен Наташе, что это состоялось, она помогла преодолеть все трудности.

Е. А 74-й год на РАТАНе, самое первое?

Ю.Н. Вот я про это и говорю.

Е. Тем более, тогда вычислительной техники такой не было...

Ю.Н. Все врукопашную делалось! Недавно я закончил писать книгу воспоминаний, где попытался подробно описать период строительства РАТАНа и первые наблюдения.

Е. Юрий Николаевич, а какие Ваши самые яркие воспоминания из жизни?

Ю.Н. Если говорить о ярких воспоминаниях, то не могу не вспомнить о войне, о голоде, о домашнем общении – шарады, самодеятельность, поездки ежегодные вокруг Москвы. Я должен заметить, что, несмотря на постоянное отсутствие денег, мы путешествовали. Например, были организованы несколько круговых походов вокруг Москвы. Директор ФИАН Игорь Евгеньевич Тамм доверял нам казенные ФИАНовские лодки, которые после походов по рекам в течение 3–4 дней надо было возвращать. Денег набирали и на более длительные поездки. Раз в году мы и старшее поколение отправлялись на Кавказ, в Крым или еще куда-нибудь.

Е. Ваши хобби, увлечения?

Ю.Н. Если в двух словах, то сейчас – это мои дети, внуки. Кстати, у меня на столе картонный макет радиотелескопа РАТАН-600, который сделал один из моих внуков и подарил на мой день рождения.

Е. А какие, по-вашему, перспективы у радиоастрономии в целом?

Ю.Н. Кроме БПР и РАТАН-600 я очень много потратил времени на попытку предложить проект ПОЛИГАМ – создание глобального радиотелескопа площадью до миллиона квадратных метров, состоящего из отдельных радиотелескопов. Это предложение было опубликовано в международных журналах. Проект не был реализован в полном варианте, но в результате получилось его сильно сокращенное решение – проект «Квазар», который является основным и практически единственным петербургским проектом по радиоастрономии. Александр Ипатов, мой ученик, который несколько последних лет был директором ИПА РАН, сейчас этот проект возглавляет.

Е. Какие перспективы у РАТАН-600? Ваши предложения по его развитию? Например, есть возможность поставить новые приводы.

Ю.Н. Конечно, меня беспокоит судьба РАТАН-600 и ратановского коллектива. Время идет, стареют люди, уходят, а университетская молодежь не так охотно идет на телескоп. К кардинальным изменениям – к ним относится и смена приводов и другое, я отношусь осторожно. Я не считаю, что от этого многое зависит. А что касается моего интереса, то, конечно, лет 10 я увлечен далекими объектами. Вместе с Н.С.Соболевой и коллегами мы обнаружили целый ряд предельно далеких радиогалактик. Это направление, я считаю, можно и нужно поддерживать, и делать все, чтобы оно расширилось.

Е. Сейчас достаточно много радиотелескопов. Какое, по вашему мнению, у РАТАН-600 конкурентное преимущество?

Ю.Н. Во-первых, РАТАН-600 имеет свои особенности. У него очень короткая длина волны, чего нет у многих других инструментов. Это включает и жесткие методы на миллиметрах. К ним я отношусь с осторожностью. Интерферометр на одном миллиметре и тому подобное. Я заинтересован в ранней космологии. Чем РАТАН-600 может быть полезен в исследовании далеких радиогалактик? Тут есть отдельные направления, где РАТАН может быть вне конкуренции.

Е. Освоение миллиметрового диапазона на РАТАНе, насколько это перспективный вопрос?

Ю.Н. Я все время борюсь с оптимистами здесь, потому что РАТАН спроектирован не для миллиметров, он спроектирован для сантиметров. Я это пытался объяснить оптимистам, но они машут рукой и говорят: «Справимся, справимся!..». На самом деле это не очень легко.

Е. С другой стороны как говорится, плох тот солдат, который не мечтает стать генералом. Может быть не в качестве ежедневных наблюдений, но в эпизодических РАТАН реально использовать в миллиметровом диапазоне?

Ю.Н. Моя точка зрения – это не его режим. И мы себя обманываем.

Е. Какие ваши научные планы на ближайшую поездку на РАТАН-600?

Ю.Н. Прежде всего, конечно, контакт с коллективом. У нас куча незаконченных дебатов по тому, как надо обработать накопленный материал. И здесь я в долгу перед коллегами.

Е. Еще короткий вопрос, какие вы считаете для молодежи в науке перспективы?

Ю.Н. Я думаю, что время должно подсказать, где искать нужные новые перспективы.

Астрономическое образование

Образовательная деятельность и популяризация астрономии

Кайсина Е.И.,

ученый секретарь, к.ф.-м.н.; scisec@sao.ru

Обсерватория осуществляет образовательную деятельность, направленную на реализацию следующих целей:

- объединение усилий САО РАН и высших учебных заведений России для подготовки студентов, аспирантов и молодых научных сотрудников в области астрономии, повышение качества их образования, развитие новых методов обучения, в том числе на основе информационно-сетевых технологий;
- проведение фундаментальных астрономических исследований, повышение эффективности использования уникальных астрофизических инструментов и баз данных, оптимизация удаленного доступа к ним для обучения и научной работы студентов, аспирантов, сотрудников – участников образовательных структур;
- подготовка специалистов высшей квалификации, способных проводить научно-исследовательскую и научно-техническую работу на оптических и радиотелескопах;
- выявление талантливой молодежи и привлечение ее к научной работе; поддержка различных форм научного творчества; обеспечение мобильности студентов и аспирантов; создание рабочих мест для студентов в целях привлечения их к участию в работе научных коллективов;
- поддержка и развитие интереса к научной деятельности у молодежи, распространение научных знаний и повышение престижа науки.

Научные школы и стажировки для молодых ученых. Этот вид деятельности включает проведение научных школ для молодых ученых страны и организацию стажировок молодых ученых в обсерватории. За 2006–2016 гг. в САО РАН стараниями наших сотрудников (рук. А.В. Моисеев) были проведены три всероссийские школы для молодых ученых: «Современные методы астрономической спектроскопии», «Физика Галактик», «Галактические и аккреционные диски». К чтению лекций были приглашены ведущие специалисты высших учебных заведений и астрономических научных организаций: САО РАН, ГАИШ МГУ, КФУ, ФТИ РАН, ИКИ РАН, АИ СПбГУ, ВолГУ, ЮФУ, ИНАСАН.

В лабораториях САО РАН проходят стажировки молодые ученые из России и зарубежных стран. Они приобретают опыт работы с разработанными в обсерватории методами наблюдений на телескопах обсерватории, включая обработку наблюдений.

Аспирантура. Обсерватория занимается подготовкой кадров высшей квалификации. В аспирантуре, которая действует в САО РАН с 1967 г., ведется подготовка научно-педагогических кадров в системе высшего образования по направлению 03.06.01 «Физика и астрономия» по профилю «Астрофизика и звездная астрономия»

(исследование звезд, планетных и протопланетных систем, исследование галактик и других внегалактических объектов, исследование фоновых излучений Вселенной, исследование межзвездной среды, исследование Солнца и объектов солнечной системы, исследование объектов в околоземном пространстве, проведение атмосферных исследований, модернизация телескопов, информационное обеспечение астрономических исследований, разработка и создание приборов и методов наблюдений искусственных и естественных небесных тел на наземных телескопах и космических аппаратах).

Образовательный и научно-исследовательский процессы выполняются в научных лабораториях и на телескопах САО РАН, где постоянно создаются и внедряются новые методы астрономических наблюдений. На страничке <http://www.sao.ru/educat/> представлена подробная информация.

За 50 лет в аспирантуре прошло обучение более ста аспирантов. Из них 68 человек защитили кандидатские диссертации, 38 человек продолжают работать в обсерватории, 15 человек работают в области астрономии в других российских и зарубежных институтах.

Студенческие практики. С 1997 г. в целях интеграции усилий ВУЗов и РАН в области подготовки студентов и научных сотрудников для фундаментальной науки и развития новых методов сетевого обучения на базе САО РАН действовал УНЦКП «Наземная астрономия». Работа была продолжена в рамках НОЦ «Наземная астрономия». В их работе принимали участие ГАИШ МГУ, СПбГУ, КГУ, РГУ, УрГУ, СГУ, КЧГТА. Ежегодно более 100 студентов из ВУЗов-участников проектов и других учебных заведений России проходили практику в этих центрах.

В настоящее время ежегодно десятки студентов из МГУ, МФТИ, СПбГУ, Университета ИТМО, ЮФУ, КФУ, УрФУ, КубГУ, СКФУ проходят в САО РАН практики разного уровня. Это взаимовыгодное сотрудничество с ВУЗ-ами направлено на повышение качества профессиональной подготовки студентов через ознакомление и участие в астрофизических экспериментах на крупнейших российских телескопах. На этапах учебной и производственной практик у студентов формируются научные интересы. В случае успешной работы они реализуют научное исследование в рамках преддипломной и дипломной практик. Наибольшее количество студентов (до 100 человек в год), прошедших практику в обсерватории, было во время действия ФЦП «Интеграция».

Базовые кафедры. САО РАН сотрудничает с ВУЗами при подготовке кадров астрономических и смежных специальностей также и на основе базовых кафедр. В разные годы были организованы и успешно работали базовые кафедры «Оптики и спектроскопии» и «Информационных технологий в астрофизике» на физико-математическом факультете СГУ, «Физики космоса» на физическом факультете РГУ, «Инфокоммуникационных технологий в астрофизике и астроприборостроении» в составе факультета инфокоммуникационных технологий Университета ИТМО. В настоящее время действуют три базовые кафедры:

- «Астроприборостроение» на факультете лазерной и световой инженерии Университета ИТМО;

- «Прикладная и компьютерная спектроскопия» в составе Института математики и естественных наук СКФУ;
- «Экспериментальная астрофизика» в составе Института физики КФУ.

Работа со школьниками. САО РАН уделяет особое внимание довузовскому астрономическому образованию. Сотрудники обсерватории регулярно проводят для школьников астрономические школы, олимпиады, многодневные экскурсии с лекциями и практическими занятиями, что является одним из способов популяризации астрономии и привлечения молодежи к научным исследованиям.

Начиная с 1994 г. на базе обсерватории было проведено 14 астрономических школ для старшеклассников, победивших на всероссийских астрономических олимпиадах. В 1996–2002 гг. проведение школ совмещалось с международными астрономическими олимпиадами. Бессменными организаторами являются д.ф.-м.н. О.В. Верховданов и д.ф.-м.н. Г.М. Бескин. Участие в астрономических школах подтолкнуло многих школьников к выбору профессии ученого.

В августе 2016 г. на базе САО РАН начала свою деятельность астрофизическая школа «Траектория», поддержанная одноименным фондом. В ее рамках 42 старшеклассника девятых классов из разных регионов страны, прошедшие конкурсный отбор, приступили к регулярным занятиям лет по математике, физике, астрономии. Это специальное обучение продолжится в течение трех лет. Участники АФШ прослушали лекции по современной астрофизике, выполняли практические работы, наблюдали на телескопах обсерватории. Занятия продолжаются в удаленном режиме с преподавателями школы. Цель школы – подготовить юных любителей астрономии к поступлению в ведущие высшие учебные заведения и к профессиональному занятию астрономией.

Начиная с 2012 г. в рамках программы «Боспор» в астрофизическую экспедицию в САО РАН ежегодно приезжают учащиеся и учителя из Краснодарской средней школы №47. Программа направлена на развитие базовых духовно-нравственных ценностей, включая науку, природоведение, искусство, труд и творчество. Для участников экспедиции сотрудники обсерватории читают лекции по астрономии и проводят практические занятия.

Просветительская деятельность. Имея в своем арсенале крупнейшие телескопы России, САО РАН привлекает не только профессиональных астрономов, но и интересующихся астрономией людей. Ежегодно обсерваторию посещают около 25 тысяч туристов. За 50 лет существования обсерватории ее посетителями стали около полумиллиона человек, которые узнали из общения с профессиональными астрономами много интересного о нашей Вселенной. Сотрудники обсерватории всегда принимали активное участие в работе общества «Знание».

САО РАН регулярно посещают участники различных организованных сообществ астрономов-любителей, включая кружки при планетариях Москвы, Казани, Санкт-Петербурга. Они проводят наблюдения на своих инструментах, знакомятся с наблюдательным процессом на телескопах обсерватории, проводят познавательные встречи с ее сотрудниками.

12–14 апреля 2016 г. в САО РАН прошли дни открытых дверей, посвященные 55-летию первого полета человека в космос и 50-летию обсерватории. Более

600 взрослых и школьников из близлежащих школ посетили обсерваторию. В рамках этих мероприятий сотрудники рассказали об истории обсерватории, о новых открытиях в астрофизике, познакомили участников с крупнейшими в России астрономическими инструментами – БТА и РАТАН-600. Планируется ежегодное проведение подобных мероприятий.

Сотрудники САО РАН регулярно дают интервью в средствах массовой информации, включая газеты, журналы, ТВ-передачи, где освещают деятельность обсерватории, а также публикуют статьи в различных научно-популярных российских изданиях страны, таких как «Природа», «Земля и Вселенная» и т.д.

Поддержка образовательной деятельности в САО РАН проводилась за счет бюджетных средств, привлекались средства ФЦП («Интеграция науки и высшего образования России», «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России», «Развитие сети центров коллективного пользования научным оборудованием», «Поддержка и развитие уникальных научных установок для исследования природных объектов, процессов, явлений, в т.ч. астрофизических»), программы ПРАН «Поддержка молодых ученых», РФФИ, фонда «Династия», фонда поддержки научных образовательных и культурных инициатив «Траектория».

Автор выражает благодарность И.П. Костюк за помощь при подготовке публикации.

Астрономические школы для старшеклассников

Верходанов О.В.,

ведущий научный сотрудник, руководитель ГИГК, д.ф.-м.н.; vo@sao.ru

Бескин Г.М.,

ведущий научный сотрудник, руководитель ГРА, д.ф.-м.н.; beskin@sao.ru



Рис. 153. Участники школы «Траектория». Архыз [1]

Астрономические школы (АШ) для старшеклассников проводятся в САО РАН ежегодно, начиная с 1994 г. Они являются эффективным способом популяризации современных представлений о Вселенной и служат привлечению молодежи к научным исследованиям. Отметим, что обсерватория постоянно проводит образовательную и просветительскую работу, что включает шефство над образовательными организациями региона, проведение экскурсий на телескопы, выезды с лекциями в города, аулы и станции. К нам неоднократно приезжали учащиеся старших классов – победители всероссийских астрономических олимпиад. Посещение обсерватории было для них дополнительным поощрением. В 1996–1998 гг. во время проведения АШ проходили и международные астрономические олимпиады. Необходимо отметить, что на первых порах в подготовке и работе школ принимали активное участие В.В. Чичмарь (Московский дворец пионеров) и организатор первых российских и международных астрономических олимпиад М.Г. Гаврилов (Черноголовка). Со временем образовалось сообщество учителей – руководителей астрономических кружков России, которые оповещались об олимпиадах и школах. На международных олимпиадах, где принимали

участие команды из Швеции (рук. Андрес Вастерберг), Болгарии (рук. Ева Божурова), Армении, Индии и Бразилии, кроме теоретического и практического туров, предлагались задания по наблюдениям звездного неба [1].

В обсерватории сложился небольшой коллектив сотрудников, регулярно принимавших участие в подготовке и проведении школ-олимпиад. В его состав, кроме авторов заметки, входили Е.Л. Ченцов, проводивший наблюдательные туры, и Н.В. Верховданова – организатор разнообразных психологических тренингов. Лекции проводили как ведущие научные сотрудники обсерватории, так и молодые ученые и аспиранты. Школы проходили при поддержке администрации САО РАН – директора Ю.Ю. Балеги и ученого секретаря И.П. Костюк и участия вспомогательных подразделений обсерватории, а также персонала Нижне-архызской средней школы.

Отметим, что с начала XXI века количество участников международных олимпиад существенно выросло, и размещать их в п. Нижний Архыз стало затруднительно. Но это не относилось к астрономическим школам, которые продолжали здесь проводиться.

В 2014 г. обсерватория получила поддержку на проведение астрономической школы от некоммерческого фонда Дмитрия Зимина «Династия», оператором гранта являлся фонд «Современное естествознание». Программа занятий школы отражала основные темы исследований, проводимых в обсерватории, и была разделена на блоки. Сюда были включены научно-популярные лекции сотрудников САО РАН и практические занятия по наблюдательной астрофизике с использованием данных, полученных на телескопах обсерватории и в других обсерваториях мира.

Программа XIV Нижне-архызской астрономической школы, проходившей 1–10 ноября 2014 г., началась с открытия АШ и лекции об обсерватории (Е.Л. Ченцов). Она включила блоки лекций и практических занятий:

- «Мир звезд»: «Эволюция звезд» (С.Н. Фабрика), «Звездная спектроскопия» (Е.Л. Ченцов), «Астрофизическая лаборатория» (В.Е. Панчук), «Звездный магнетизм» (И.И. Романюк), «Спекл-интерферометрия» (В.В. Дьяченко), практические занятия (О.Н. Шолухова), дискуссия «Что еще вы хотите знать о звездах?»;
- «От рождения Вселенной к рождению жизни»: «Поиски экзопланет» (Д. Гадельшин), «О проблеме поиска внеземных цивилизаций» (Г.М. Бескин);
- «Мир галактик»: «Взаимодействующие галактики» (А.В. Моисеев), «Звездное население галактик» (Н.А. Тихонов), «Наша Галактика в радиодиапазоне» (С.А. Трушкин), «Мир галактик» (Д.И. Макаров), «Радиогалактики» (О.В. Верховданов), практические занятия (Л.Н. Макарова, М.Е. Шарина), дискуссия «Спросите нас о галактиках»;
- «Дальняя Вселенная»: «Введение в радиоастрономию» (М.Г. Мингалиев), «Космология и реликтовое излучение» (О.В. Верховданов), «Числа и силы» (О.В. Верховданов), практические занятия (Я.В. Найден), дискуссия «Что мы знаем о Большой Вселенной?»;
- «Астрономия – разные инструменты для разных задач»: «Обсерватории и телескопы» (С.Н. Фабрика), «Большие оптические телескопы» (В.В. Дьяченко), «В погоне за неожиданными явлениями» (Г.М. Бескин).

Были проведены экскурсии на БТА (Е.Л.Ченцов, Н.В. Борисов) и РАТАН-600 (Ю. Сотникова), а также «смотрение на небо» с малыми телескопами (Е.Л. Ченцов). Участники школы посетили Архыз и древнейший в России православный храмовый

комплекс, который находится рядом с обсерваторией. Комплекс, построенный аланами в IX–XI вв. при участии византийских зодчих, входит в состав Карачаево-Черкесского историко-культурного и природного музея-заповедника. Каждый вечер Н.В. Верховданова проводила со школьниками коллективные психологические игры. Школа завершилась дискуссией «Вопросы – с ответами и без оных».

После закрытия фонда «Династия» был организован фонд поддержки научных образовательных и культурных инициатив «Траектория», который предложил САО РАН принять участие в новом образовательном проекте для школьников «Астрофизическая школа» (АФШ) [2]. Его инициаторами от фонда «Траектория» стали М. Юрик и К. Петров, менеджером первого цикла – Д. Болотинская, директором – учитель математики из физико-математического лицея «Вторая школа» (г. Москва) К. Медведев.



Рис. 154. Во время ночных наблюдений школы. Площадка возле БТА [4].

Активное участие в организации АФШ приняли учитель физики этого же лицея С.Н. Колякина, а также декан факультета математики и компьютерных наук Адыгейского государственного университета (АГУ), директор Республиканской естественно-математической школы при АГУ Д.К. Мамий. Позднее в проведении школы активно участвовала М.В. Богданова (руководитель астрономического кружка в лицее «Вторая школа»).

Новый проект призван помочь старшеклассникам развивать интерес к научной деятельности, а также расширить их знания в области астрономии и астрофизики. АФШ - это трехлетний цикл очных и заочных занятий по специально разработанной программе. Участие в школе бесплатное. Прием в школу проводился по результатам конкурса для учеников 8-х классов. Отбор учащихся производил фонд «Траектория» с помощью тестов по астрономии, физике и математике, размещенных на сайте фонда.

Участниками АФШ-I, прошедшими отбор, стали 42 восьмиклассника из разных городов и поселков России. Школа была организована в форме юношеского лагеря, в котором педагогами-тьюторами участвовали сотрудники САО РАН – О. Марьева, Е. Семенко, Э. Емельянов, А. Граужанина, а также тьюторы из Москвы – С. Санников, Н. Наконечный, Н. Орехова, М. Лизунова, А. Куркин, А. Топчиева.

Школа продолжалась две недели. Ее занятия структурно следовали программе XIV Астрономической школы, адаптированной для восьмиклассников. Кроме того, были приглашены ученые из астрономических институтов России, которые выступили перед школьниками с лекциями о различных направлениях исследований в астрономии.

Научно-образовательную программу АФШ-I, проходившей в САО РАН 8–21 августа 2016 г., составили лекции и практикумы, которые можно разделить на общеобразовательные, астрофизические и приглашенные сообщения: *общеобразовательный блок*:

- физика: «Физические рассказы о жизни» и серия «Практикум решения задач», которая включила разделы «Основы кинематики. Свободное падение», «Распределенное движение, баллистические задачи», «Законы динамики», «Колебания и волны. Шкала электромагнитных волн» (С.Н. Колякина, учитель физики из лицея «Вторая школа», г. Москва); «Законы преломления», «Основы геометрической оптики», «Сферические зеркала» (С.Н. Колякина и М.Л. Карманов);
- математика и дополнительные разделы:
 - «Типовые дополнительные построения в геометрических задачах», «Углы, вписанные в окружность», «Внеписанные окружности», «Вокруг теоремы Пифагора», «Простейшие геометрические неравенства» (А.Н. Андреева и А.Д. Блинков, г. Москва);
 - «Функции в астрономии», «Элементы сферической геометрии», «Кривые второго порядка. Эллипс. Гипербола. Парабола» (Д.К. Мамий, г. Майкоп);
- общая астрономия: «Астрономические системы координат», «Время в астрономии», «Характеристики звезд», «Спектры в физике астрономии» (М. Богданова и С. Санников, лицей «Вторая школа», г. Москва);

астрофизический блок:

- «История САО» (Е.Л. Ченцов, Г.М. Бескин);
- «Звезды» – «Спектроскопия звезд» (Е.Л. Ченцов), «Эволюция звезд» (С.Н. Фабрика), «Спекл-интерферометрия звезд» (В.В. Дьяченко);
- «Галактики» – «Мир галактик», «Спектроскопия галактик» (Д.И. Макаров), «Галактика в радиодиапазоне» (С.А. Трушкин);
- «Дальняя Вселенная» – «Введение в радиоастрономию», «Радиогалактики», «Реликт и космология» (В.О. Верховданов);
- «Методы» – «Звездный спектрограф БТА» (В.Е. Панчук), «Большие телескопы» (В.В. Дьяченко), «Виртуальная обсерватория» (О.П. Желенкова);
- дискуссии – «Мир галактик – вопросы и ответы», «Космология – вопросы и ответы»;
- практические работы – «Исследование звезды Суг X-1» (О.Н. Шолухова), «Эволюция звезд» (О.В. Марьева), «Переменные/двойные/новые звезды» (Е.А. Барсукова), «Радиогалактики» (О.В. Верховданов);

приглашенные доклады:

«Солнечная система через объективы космических аппаратов» (С.А. Язев), «Гравитационные волны», презентация книги (С.Б. Попов), «Межзвездная среда» и «Рождение звезд и планет» (Д.З. Вибе), «Лекция о Японии, Китае» (Е. Большова, Д. Васильев).

Много времени было уделено практическим работам по разным направлениям наблюдательной астрофизики. Во время практикумов под руководством ученых ребята изучали радиогалактики, прогнозировали время жизни звезд, определяли их химический состав.



Рис. 155. Г.М. Бескин (слева) и О.В. Верходанов во время дискуссии на АФШ.

Во время вечерних наблюдений (Е.Л. Ченцов, Е.А. Семенко, Э.В. Емельянов, М. Богданова) участники изучали рассеянные звездные скопления η и χ Персея (NGC 869 и NGC 884), Плеяды, туманность Андромеды и метеоры из потока Персеид.

По итогам лекций и практических занятий были проведены несколько встреч с сотрудниками обсерватории (модератор Г.М. Бескин), где школьники могли получить ответ на любой вопрос, а именно, узнать что-то новое и загадочное о звездах, черных дырах, галактиках, Вселенной.

Ребята наблюдали в рамках плановых программ на телескопах вместе с сотрудниками САО С.В. Карповым, Н.Н. Бурсовым, Н.В. Борисовым, С.С. Кайсиным, Е.А. Семенко, Т.А. Фатхуллиным.

Во время отдыха было совершено путешествие в горы на канатной дороге, проведена экскурсия к древним аланским храмам. По вечерам школьники объединялись в соответствии со своими интересами и участвовали в психологических играх (Н.В. Верходанова), астрономической викторине «Физики и лирики» (А. Вибе), пении под гитару (А. Паевский), футбольных играх. Завершилась АФШ постерной сессией, на которой юные участники представили и защитили результаты практических работ в виде научных проектов. В этом им помогали ученые и педагоги-тьюторы.

Важно отметить, что проведение АФШ было бы невозможно без поддержки новой администрации обсерватории – директора В.В. Власюка и ученого секретаря Е.И. Кайсиной. Но, несомненно, успешная организация подобных школ – заслуга всего коллектива обсерватории. Большую роль в работе школы играло использование сетевых ресурсов, необходимых для решения астрофизических задач. Их поддержку обеспечивал В.Н. Черненко.

Предыдущий опыт проведения школ свидетельствует, что около 10–15% школьников получают профессиональное астрономическое образование. Как сложится судьба участников школы «Траектория» говорить еще рано, но по результатам региональных астрономических олимпиад в январе 2017 г. пять ребят-участников школы стали призерами и лауреатами.



Рис. 156. Участники школы «Траектория» [4].

ПУБЛИКАЦИИ

- [1] Sky & Telescope, No 3 (2000).
- [2] Сайт Фонда «Траектория» <http://www.traektoriafdn.ru/astrofizicheskaya-shkola>, (2016).
- [3] Фотографии событий школы сделаны Ю.Дементьевым, А.Паевским, К.Петровым (2016). Фотоархив доступен на <http://www.traektoriafdn.ru/astrofizicheskaya-shkola>.

Воспоминания

Обсерватория и жизнь

Памяти И.М. Копылова – первого директора САО РАН

Клочкова В.Г.,
заведующая ЛАС, д.ф.-м.н., профессор; valenta@sao.ru



Рис. 157. Слева: И.М. Копылов – наблюдатель на 50-дюймовом телескопе КраО (1952 г.). Справа: И.М. Копылов (конец 1960-х г.).

Иван Михеевич Копылов – выдающийся ученый СССР и России в области астрономии и астрофизики. Он был создателем и первым директором одной из крупнейших обсерваторий мира – Специальной астрофизической обсерватории Академии наук СССР, которой он плодотворно руководил на протяжении 20 лет. За это время были введены в действие два крупнейших в мире в то время астрономических инструмента – БТА и РАТАН-600.

Приближается 90-летие со дня рождения Ивана Михеевича Копылова. К этой дате мы хотим напомнить новому поколению астрономов основные этапы жизни и некоторые итоги деятельности доктора физико-математических наук И.М. Копылова.

Иван Михеевич родился 15 октября 1928 г. в селе Ускат Сибирского края (ныне Кемеровская область) в крестьянской семье; после окончания в 1950 г. Ленинградского государственного университета поступил на работу в Крымскую астрофизическую

обсерваторию, с 1966 по 1985 гг. – директор САО АН СССР; 1988–2000 гг. – научная работа в Пулковской обсерватории. Доктор физико-математических наук (1967 г.), профессор по специальности астрофизика, радиоастрономия (1999 г.).

Заметим, что множество сторон деятельности И.М.Копылова в период создания нашей обсерватории приведено в сборнике [1], который содержит большой раздел «Краткая история САО АН СССР, 1960–1984 гг.». Эта основная часть сборника, по сути дела, написана самим И.М. Копыловым, поскольку представляет собой материалы из его научного архива, подготовленные к публикации к.ф.-м.н. Р.Н. Кумайгородской и редакторами сборника [1]. Помимо этого сборник содержит оригинальные тексты с воспоминаниями многих авторов и о И.М. Копылове, и о проблемах начального периода существования САО РАН, таких как выбор места установки 6-м телескопа, места строительства научного поселка для астрономов, оценка качества главного зеркала телескопа, приемки и опытной эксплуатации систем БТА. Параллельно шла выработка основных научных направлений деятельности САО РАН, решение проблем обеспечения телескопа светоприемной аппаратурой и т.д.

С момента выхода сборника [1] прошло около 15 лет, и мы хотели бы вновь вернуться к портрету первого директора САО РАН, который возглавил строящуюся обсерваторию с 1966 г. И.М. Копылов – один из наиболее известных советских астрофизиков, энергичный одаренный человек, личность незаурядная.

После окончания учебы в ЛГУ И.М. Копылов поступил на работу в КрАО, здесь он стал опытным наблюдателем, ответственным за спектрограф, и сформировался как ученый. В те далекие 60-е гг. XX века КрАО была уникальным местом для астрономов Советского Союза и других стран. Центром этого творческого круга астрономов были академик Г.А. Шайн, а позже и академик А.Б. Северный. В этих условиях быстро развивался научный талант И.М. Копылова, который за 16 лет работы в КрАО прошел путь от лаборанта до старшего научного сотрудника, доктора физ.-мат. наук. Много интересных деталей в описаниях жизни и работы И.М. Копылова и других астрономов КрАО можно найти в воспоминаниях сотрудников той обсерватории (Н.С. Полосухиной, Э.А. Витриченко и др.), представленных в сборнике [1].

Основным направлением научных исследований в крымский период была разработка системы двумерной спектральной классификации для спектров звезд в широком интервале эффективной температуры и светимости. Этой же тематике была посвящена кандидатская диссертация, которую И.М. Копылов защитил в 1959 г. Его критерии классификации широко используются астрофизиками и в настоящее время. Этот опыт послужил основой деятельности И.М. Копылова в последующий период жизни, 70–80-е годы ушедшего века, связанные уже со САО, когда он заложил основные научные направления работы обсерватории. В этот же период, помимо организационной и административной работы, под научным руководством И.М. Копылова на БТА выполнялись несколько крупных наблюдательных программ в области физики и эволюции звезд.

Коллектив обсерватории был молодой, даже кандидат наук в то время был редкой персоной в коллективе, доктором же физ.-мат. наук в те первые годы был только наш директор. Будучи столь занятым руководителем, даже в этот напряженный период пуска БТА и первых лет работы телескопа И.М. Копылов думал и о перспективе, поэтому много времени уделял обучению аспирантов. Эта кропотливая и со стороны малозаметная составляющая научной деятельности принесла плоды. Умелое научное руководство в сочетании с уникальным наблюдательным материалом, полученным на БТА, привело к тому, что уже в 80-е гг. в САО успешно защитилась целая плеяда

кандидатов наук по специальности астрофизика. Позже древо защитившихся под руководством И.М. Копылова стало быстро ветвиться. Вот уже и мы, бывшие аспирантами в 70–80-е годы, привели к защитам диссертаций многих своих воспитанников. К сожалению, далеко не все они продолжили наше дело в отечественной астрофизике.

Конечно, любимым занятием для И.М. Копылова были его собственные научные исследования. Этому посвящалось все время, свободное от дел, связанных с руководством обсерваторией, включая и дни отдыха, и отпуска. Привычными были долгие и обстоятельные беседы с обсуждением новых результатов или же новых идей, которые зачастую и возникали спонтанно в ходе таких плодотворных для всех участников бесед.



Рис. 158. Трейлер с главным зеркалом БТА на крутом повороте горной дороги к башне.

Получив в ходе дискуссий мощный импульс, мы приступали к новому этапу работы – к подготовке доклада или текста общей статьи, а временами приходилось приступать и к полной переработке наблюдательных данных. Здесь надо отметить, что И.М. Копылов довольно рано начал ставить на первое место в перечне соавторов в общих статьях своих молодых коллег и никогда не соглашался добавлять свою фамилию в соавторы, если его участие в данной работе было ограничено только обсуждением результатов или постановкой наблюдательной задачи. Надо отметить, что участие И.М. Копылова в соавторах любой публикации было своеобразным знаком качества, который стоял на статье. У многих его бывших соавторов и аспирантов, черновики статей и диссертаций которых он так скрупулезно вычитывал, оставалось после этого редактирования ощущение какой-то абсолютной грамотности текста. Столь же тщательно и профессионально на протяжении многих лет он редактировал статьи в каждом выпуске научного журнала «Астрофизические исследования», который издавался обсерваторией и редактором которого был Иван Михеевич. Кроме того, в 80-е

годы, по сути дела, все статьи по звездной тематике, направляемые сотрудниками САО во внешние журналы, основательно редактировались директором.

Серьезным научным инструментом, стимулирующим становление научных сотрудников в годы, когда Копылов И.М. руководил обсерваторией, был астрофизический семинар САО, а также семинар отдела физики звезд, с более узкой специализацией. Большинство сотрудников были очень молодые и не очень опытные, поэтому важнейшим моментом было присутствие наставника, чья научная эрудиция и интуиция служили своеобразным ОТК (отдел технического контроля). Кульминационными моментами были представления диссертационных работ. Мнение Копылова, очень доброжелательное по форме, всегда было принципиальным по сути.

Особенно полезными и интересными для нас, начинающих наблюдателей, были совместные наблюдения на БТА. Для многих молодых астрономов, пришедших на работу в САО, БТА являлся «первым в жизни телескопом», это обстоятельство вызывало опасения у создателей телескопа и спектральной аппаратуры. У звездников САО в те годы был единственный спектрограф высокого разрешения – основной звездный спектрограф с регистрацией спектров на фотопластинки.



Рис. 159. Б.К. Иоанисиани, И.М. Копылов и В.А. Минин в районе хутора Богословского в июле 1968 г.

Мы учились, работая. Выполняя программы сотрудников САО и программы внешних заявителей на ОЗСП, мы под руководством И.М. Копылова и Е.Л. Ченцова постепенно становились профессиональными наблюдателями. До сих пор помню, как в течение нескольких первых ночей наблюдений на ОЗСП И.М. Копылов терпеливо создавал калибровку нашего экспонетра. Полученные зависимости роста сигнала для звезд разной яркости использовались нами в дальнейшем много лет. Непосредственно в наблюдениях Иван Михеевич участвовал первую половину ночи, затем отдыхал, а в

9 утра вместе с ночной сменой спускался на автобусе на ННП, продолжал свой рабочий день уже в директорском кабинете, а в 16 часов снова поднимался на ВНП. Поднявшись, прежде всего, просматривал с нами спектры, полученные в предыдущую ночь. И вновь для нас, начинающих, это было очередным занятием по практической спектроскопии. Естественно, что обучение шло параллельно, но на разных уровнях, потому что у Копылова был богатый опыт работы и наблюдений в КраО. Для нас, молодых наблюдателей общение с Копыловым было интересным и полезным. Его обширные знания в области звездной спектроскопии, предельная добросовестность в работе, дотошность – сослужили нам хорошую службу в будущей нашей самостоятельной работе.



Рис. 160. И.М. Копылов и французский астроном академик Дж. Куртес (САО, 1982 г.).

Все десятилетия работы в САО И.М. Копылов уделял внимание и вопросам по созданию новой астрономической техники, разработке методов астрономических наблюдений и обработке полученных данных. Большую роль сыграл опыт, полученный им в КраО в ходе спектроскопических наблюдений. Помимо участия во внедрении в постоянную эксплуатацию ОЗСП высока роль И.М. Копылова и в решении задачи повышения эффективности спектрографа (в частности, был совершен переход на решетки большого формата), и в особо актуальном переходе на фотоэлектрические методы регистрации данных. В 80-е гг. в обсерватории началось внедрение в наблюдения на БТА многоканальных фотоэлектрических методов с использованием светоприемников комплекса КВАНТ. Последующие 90-е были по многим аспектам переломным периодом в САО. Наступившая новая эпоха поставила новые задачи и выдвинула новые требования к наблюдательным данным.

Полученный опыт наблюдений способствовал тому, что сотрудники обсерватории разработали для БТА спектральное оборудование нового поколения и современные светоприемники. Программы по звездной тематике выполняются теперь с эшелными спектрографами, которые в сочетании с крупноформатными матрицами ПЗС

обеспечивают высокое спектральное разрешение для звезд, на 2–3 величины слабее тех, что мы наблюдали на ОЗСП с фоторегистраций.

При этом продолжается, на новой аппаратной базе, выполнение ряда научных программ, поставленных еще И.М. Копыловым в 70-е гг. Это – спектроскопия оптических компонентов рентгеновских источников, звезд предельно высокой светимости, исследование возникновения и эволюции магнитных полей у звезд главной последовательности с использованием в качестве пробных шаров звезд в составе звездных группировок разного возраста, изучение вопросов звездного нуклеосинтеза и эволюции химического состава галактических популяций.

За полвека научной деятельности И.М. Копыловым опубликовано свыше 170 научных работ (часть работ в соавторстве с другими учеными), посвященных определению спектральных классов и фотометрических звездных величин звезд в избранных площадках Млечного пути; изучению связи скоплений в Галактике с ассоциациями и исследованию их кинематической неустойчивости; разработке уже упомянутой нами системы двумерной количественной спектральной классификации для звезд O5–F2 и проведению детального исследования и эволюционной интерпретации тонкой структуры диаграммы «спектр – абсолютная величина». Кроме того, в соавторстве с А.А. Боярчуком был создан сводный каталог скоростей вращения 2362 звезд и изучена зависимость скоростей вращения от их светимости, при этом впервые обнаружена неравномерность этой зависимости.

Множество оригинальных результатов опубликованы по наблюдательным проблемам звездной эволюции, спектральному и эволюционному исследованию нестационарных звезд различных типов; долгопериодических цефеид и планетарных туманностей; определению химического состава атмосфер горячих звезд и определению их физических характеристик (эффективных температур, масс, радиусов и т.д.). На основе высококачественной спектроскопии на БТА опубликована серия статей, посвященная детальному исследованию химически пекулярных (магнитных) звезд в галактических группировках разного возраста, что привело к важнейшим результатам в решении вопросов возникновения и эволюции этих звезд.

Столь же многочисленные наблюдения на БТА были проведены для изучения тесных двойных звезд с релятивистскими и вырожденными компонентами. В 80-е годы XX-го века астрономам стали доступны результаты внеатмосферных экспериментов в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах длин волн. Естественно, что одной из основных программ по «звездной» тематике на крупнейших оптических телескопах был спектральный мониторинг оптических компонентов рентгеновских источников и газовых потоков в тесных двойных системах.

Наиболее популярным объектом стал массивный сверхгигант в системе Суг X-1. Эта система включает горячий сверхгигант и невидимый компонент. Целью группы И.М. Копылова было определение фундаментальных параметров сверхгиганта в системе Суг X-1. В рамках этой задачи на ОЗСП БТА была получена обширная коллекция спектрограмм, проведено отождествление спектральных линий, получены массивы данных по лучевым скоростям, измеренным по различным спектральным деталям. Получены следующие основные результаты: спектральный класс сверхгиганта O9.7 Iab, его масса $M = 37.6 M_{\odot}$, темп потери массы $1.5\text{--}2 \times 10^{-6} M_{\odot}$ в год.

В 80-е годы XX века одной из самых крупных программ на БТА был мониторинг SS 433 с 1000-канальным телевизионным спектрофотометром (сканер), основной задачей, которой было изучение переменности спектральных деталей с фазой орбитального ($P \sim 13^d$), прецессионного ($P \sim 162^d$) и нутационного ($P \sim 6^d$) периодов. Были

сделаны оценки параметров струй и высказано предположение, что причиной обнаруженной переменности параметров компонентов релятивистских линий является переменность темпа потери вещества в струях. Сделана оценка скважности газа в струях, длины струи и угла ее раствора.

Удивляет активная позиция и результативность И.М. Копылова на завершающем Пулковском этапе его деятельности. Занимаясь многие десятилетия проблемами эволюции звезд и практической спектроскопии, он в годы работы в Пулковке погрузился в новые для него задачи проекта АИСТ (Астрометрический Инерциальный Спутник Телескоп, начало проекта 1986 г.).



Рис. 161. И.М. Копылов на семинаре в САО РАН (1988 г.).

Опираясь на свои обширные знания, научную интуицию и большой опыт, И.М. Копылов смог успешно выполнить фотометрическое обоснование проекта (детали см. в воспоминаниях М.С. Чубея [1]). Остается только сожалеть о том, что из-за отсутствия финансирования работы по астрометрическому картографированию неба были прекращены.

ПУБЛИКАЦИИ

- [1] И.М. Копылов – полвека в астрофизике. Под ред. Ю.Ю. Балеги и В.Г. Клочковой. Нижний Архыз, ООО «Шанс», 2003.

44 года в САО РАН: люди и Наука

Соколов В.В.,

ведущий научный сотрудник ГРА, д.ф.-м.н., sokolov@sao.ru

В конце 2005 г. в ИКИ РАН я слушал доклад А.М. Черепашука, посвященный черным дырам (ЧД), где Анатолий Михайлович сказал, что объекты с такими свойствами еще не открыты, а то, что поспешили назвать черными дырами – уже более 50 лет остается «кадидатами в ЧД».

Поскольку вся драма поисков этих «кандидатов» прошла на моих глазах здесь, в САО, с 1972 г., а также то, что эти поиски имеют прямое отношение к тем большим (как сейчас говорят – амбициозным) планам/проектам, ради которых и строилась обсерватория, то я в своих воспоминаниях буду идти в основном от главных для меня обстоятельств, связанных с общением с такими людьми, как Иван Михеевич Копылов, Сергей Владимирович Рублев, Леонид Исаакович Снежко и Викторий Фавлович Шварцман.



Рис. 162. Слева – В.В. Соколов на международном семинаре, посвященном феномену GRB; справа – дискуссия на одной из сессий международного совещания «Кварковый фазовый переход в компактных объектах и многоволновая астрономия: нейтринные сигналы, сверхновые и гамма-всплески» (2015 г.).

Конечно, это не воспоминания о них, но так уж получилось, что в САО у меня многое было связано именно с ними. С И.М. Копыловым и другими коллегами мы исследовали эволюцию массивных звезд с момента моего поступления на работу и фактически до его ухода. С.В. Рублев в тот короткий промежуток времени, в который мне посчастливилось с ним поработать и пообщаться, просто «поставил меня на курс» и в какой-то момент помог удержаться на нем, не разочароваться в своем выборе. Л.И. Снежко помог мне стать профессионалом в звездной спектроскопии. В очень

плодотворных для меня дискуссиях с В.Ф. Шварцманом мне все больше становился понятным результат эволюции массивной звезды – релятивистский коллапс ее ядра, что привело меня потом к уверенности, что эти коллапсы мы и наблюдаем в виде космических гамма-всплесков.

Конечно, эти люди – основатели САО как научного центра – в конце концов, повлияли на многих, в том числе и на мою судьбу, в чем я хочу здесь признаться, вспомнив какие-то эпизоды из их жизни, отдать и свой долг их светлой памяти.

Работа в Нижнем Архызе всегда была нашим главным «развлечением», а о чем же еще и вспоминать? И, наверное, о многом можно было бы вспомнить – фактически ведь кроме САО у меня и нет ничего.



Рис. 163. Слева - Викторий Фавлович Шварцман; справа – Леонид Исаакович Снежко.

На одной из первых вечеринок в 1972 г. в гостях у Жоры и Ларисы Алексеевых меня Юра Антропов спросили напрямую: «Зачем ты тут? Какая у тебя задача? С начальством подружиться или на Небе разглядеть что-то?» Я не смутился, поняв, что попал к своим, как мог, сформулировал ответы на эти принципиальные вопросы. Конечно, я говорил им о релятивистской астрофизике и о гравитации... Да я и сейчас, через много лет, наверно ничего нового не скажу про себя своим коллегам. Интересно, что с самого первого момента нашего знакомства с Иваном Михеевичем Копыловым получилось так, что сначала на эти же вопросы мне пришлось честно ответить директору. Правда, зато потом уже не нужно было ничего выдумывать и хитрить. Да так и легче, хотя и проблемы были, конечно...

А случилось все так.

Я познакомился с Иваном Михеевичем в июне 1972 г. Сейчас не помню точно, какого числа, но это была суббота. Я приехал в Зеленчукскую из Черкесска на автобусе часов в 9 утра и сразу пошел на улицу Бережного (сейчас Леонова) к дому 167, где тогда находилась дирекция обсерватории и дирекция строящихся научных объектов САО. Никого из сотрудников на работе не было, поскольку был выходной день. Я вышел во двор, вошел в первый подъезд (мне сказали, что там живут сотрудники), поднялся на второй этаж и стал стучаться в дверь заместителя директора САО С.В. Рублева. Мне никто не ответил, но открылась соседняя дверь. На пороге стоял худощавый строгий

мужчина в обычном спортивном костюме, который спросил, кого я ищу. Когда я объяснил, что собираюсь устраиваться на работу в САО, он пригласил меня к себе домой, повел на кухню, напоил чаем и все про меня расспросил – где я учился, чего хочу, что меня интересует больше всего и т.д. Он представился мне как Копылов Иван Михеевич, но тогда мне эта фамилия еще ничего не говорила. Да я и не спрашивал у него про его должность – разговор был о главном для меня, и меня внимательно слушали. Ничего начальственного и подавляющего в его внешности и поведении не было, и я легко «раскололся», хотя разговор был деловой и заинтересованный с обеих сторон (это я почувствовал сразу). Помню, Иван Михеевич мне сказал: «Да не нужно мне на ваш диплом смотреть – и у меня такой есть. Вы лучше скажите мне, что вас больше всего волнует и интересует». Я ему искренне признался в моих представлениях о науке и в том, что я тут хотел бы делать. Теперь я понимаю, что этот наш самый первый разговор все и определил в моей жизни. Можно сказать, что мне просто повезло. Разумеется, тогда я не знал, что это и был директор обсерватории. Мы договорились, что сначала я поеду к себе домой в Кизляр и оттуда позвоню директору САО. А пока Иван Михеевич сам поговорит с начальством и выяснит возможные вакансии в подразделениях.

Через неделю я позвонил по указанному телефону. Трубку подняла секретарь Елена Ивановна Рыжикова и сказала, что сейчас я буду разговаривать с директором САО Иваном Михеевичем Копыловым. Можно представить мои чувства в тот момент, ведь тогда за чаем я действительно честно рассказал ему все о себе и о своем желании заниматься астрофизикой так, как я тогда себе это представлял. Видимо, наше неформальное знакомство помогло И.М. Копылову быстро определить место работы для меня, поскольку ответ его по телефону был коротким: «Приезжайте. Встречайтесь с Сергеем Владимировичем и устраивайтесь на работу. Детали – на месте. До свидания». И положил трубку. Дел тогда у него было очень много – обсерватория только создавалась.

С 1 августа я уже был на работе в САО. Иван Михеевич и Сергей Владимирович определили меня в ОФЗиТ (Отдел физики звезд и туманностей) заниматься звездными спектрами вместе с Л.И. Снежко. Перед этим Сергей Владимирович водил меня по другим отделам и группам, чтобы я сам поговорил с их сотрудниками. Помню, на первом этаже, в отделе внегалактической астрономии и релятивистской астрофизики сидели и занимались своими делами Валя Караченцева, Боря Артамонов, Валентин Липовецкий и Гриша Царевский. Гриша сразу же стал меня отговаривать работать в САО: «Понимаешь, мы сюда устраивались с такими трудами. Готовы были работать и работали даже дворниками, только бы нас взяли сюда. А ты кто такой? Ведь ты же физик, не астроном. Езжай-ка ты домой. Позанимайся там, подготовься. Мы тебе и задания будем высылать. А потом проэкзаменуем...» Тут Боря Артамонов отвлекся от своих дел и сказал Грише что-то вроде: «Все это ты напридумывал с дворниками! Оставь молодого человека и займись своими делами!» После чего Царевский перестал меня донимать. Меня тогда выручил Сергей Владимирович. Он приоткрыл дверь, позвал с собой и повел меня на 2-й этаж, в отдел ФЗИТ. Там сидел задумчивый и красивый Леонид Исаакович Снежко. (По-моему, он как раз тогда размышлял о своей гипотезе «Перемены ролей в звездных тесных двойных системах»). Снежко недолго со мной беседовал и сразу же определил для меня задачу – расчеты спектров и химического состава горячих и массивных звезд. Я получил рабочее место у окна, рядом с вычислительной машиной «Мир», на которой я научился программировать под руководством веселого и симпатичного Жоры Алексева. Мы с Жорой быстро подружились, и он познакомил меня с другими сотрудниками ОФЗиТ.

Помню, что в том же августе состоялись первые наблюдения в САО на телескопе Цейсс-600. Кажется, это были самые первые наблюдения в т.н. эксперименте МАНИЯ. Тогда же мне Жора Алексеев рассказал о молодом талантливом физике – Виктории Шварцмане, который приехал в САО для того, чтобы проверить самое странное утверждение теории относительности – о существовании черных дыр, в котором сомневался сам Эйнштейн. Ведь именно эта задача интересовала меня еще до университета. Эта новость меня сильно взволновала – я понял, что попал на работу именно туда, куда стремился еще со времен учебы в университете.



Рис. 164. С.В. Рублев и И.М. Копылов у имитатора главного зеркала, ст. Зеленчукская.

Правда, понял и то, что мне нужно много прочесть самому (ведь в Петрозаводском университете нас не учили астрофизике), тем более что изучить надо было релятивистскую астрофизику – тогда это была совершенно новая область науки. А тут еще и всю остальную астрофизику надо было пройти самому. Гриша Царевский был прав – досамообразовываться мне пришлось потом еще лет 5. Но такой опыт у меня был, и я засел за книги, чтобы быть хорошо готовым и к работе по моделированию звездных спектров, и к встрече с В.Ф. Шварцманом. Он в то время жил в гостинице Верхней научной площадки. Да и сомнения о справедливости выбора решений уравнений Эйнштейна с сингулярностью у меня были давно...

Вообще-то любая сингулярность в нормальной физике – всегда признак несоответствия математического решения физике реального объекта. Я и сейчас так думаю, правда, сейчас поговорить об этом в САО уже почти не с кем. По сути дела, эту катастрофу (теории, конечно) по-прежнему пытаются выдать за Победу. Несмотря на свой небольшой жизненный опыт, у меня это обстоятельство всегда вызывало и

вызывает внутренний протест. А тут я узнал, что человек ищет эту самую сингулярность у нас в САО! В общем, я стал готовиться к встрече со Шварцманом как к экзамену. И не напрасно...

Когда мы еще жили в Зеленчукской, то встречались с Иваном Михеевичем довольно часто, несмотря на всю его занятость. Он всегда находил время поинтересоваться, как у меня идут дела, и это меня сильно стимулировало в работе. Мне казалось, что если я не буду достаточно быстро выполнять задания, получаемые в ОФЗиТ от Л.И. Снежко и С.В. Рублева, то меня просто выгонят. И пришлось сидеть ночами, осваивать звездную астрофизику, программирование, моделирование атмосфер звезд. Кроме того, мне хотелось принимать участие и в семинарах САО. Семинары ОФЗиТ проводил С.В. Рублев. Иногда летом, когда позволяла погода, семинары проводились прямо во дворе на ул. Бережного. Помню, как меня удивил Сергей Владимирович тем, каким он был возбужденным и радостным после одного из таких семинаров, когда речь шла о его любимых звездах Вольфа-Райе.

Наша Наука ведь не злая в принципе, это физики могут говорить высокомерно, что они «не оперируют понятиями добра и зла», изобретая свои страшные игрушки. А мы ведь Небом занимаемся. Доброта и наивная способность удивляться новому как Чуду Божьему оказываются обычным делом у больших Астрофизиков – это я сейчас так думаю, вспоминая, как Сергей Владимирович ходил тогда по кабинету и говорил: «Какой интересный семинар получился! Как хорошо докладчик излагал и, главное, обо всем удалось поговорить, поспорить».

Перед тем как нам всем переезжать на Буково, Иван Михеевич и Сергей Владимирович позвали меня в кабинет директора, где я увидел на столе большую схему первого многоквартирного дома. Иван Михеевич прохаживался по кабинету, покуривая, а Сергей Владимирович сказал мне: «Вот, выбирайте себе квартиру». После всех моих мытарств с частными квартирами (нынешние молодые сотрудники про такое и не знают даже) я просто опешил от неожиданности и спросил: «Что, любую?» Сергей Владимирович улыбнулся и сказал: «Ну, почти». Тогда я сказал: «Вот эту». Тут они оба заулыбались, и Сергей Владимирович говорит: «Эту уже выбрал Иван Михеевич». В конце концов, я тогда определился с квартирой в первом подъезде. Да и в дальнейшем я чувствовал заботу и внимание Отцов-основателей САО ко всем своим проблемам, в том числе и к бытовым. Наверное, не только я, но и другие сотрудники подтвердят, что жили мы тогда все не богато, но старались помогать друг другу.

Сергей Владимирович умел создать в отделе атмосферу искренности и доверия. Молодые сотрудники это хорошо чувствовали. Был у нас тогда свой кино клуб, который Сергей Владимирович, как мне кажется, и организовал, и принимал активное участие в просмотре и обсуждении фильмов, которые нам давали посмотреть под его же ответственность. Тогда известный фильм «Рукопись, найденная в Сарагосе» надо было смотреть только по спецразрешению. Кажется, представители из известной «конторы», которая тогда «знала» кому, что и где можно посмотреть, были не очень довольны такой активностью С.В. Рублева. Мне и не только мне нравились искренность и независимость Сергея Владимировича. Все молодые сотрудники относились к нему с любовью и большим уважением. Мы чувствовали его поддержку во всем, даже в бытовых мелочах. А для нас это были тогда совсем не «мелочи» – многие жили на частных квартирах, жили бедновато. Сергей Владимирович и Иван Михеевич специально проводили такую политику, чтобы как-то отвлечь сотрудников от их бесконечных бытовых проблем зеленчукской жизни – уголь, дрова, заготовка картошки на зиму и т. д. Мы часто собирались вместе. На наших, как сейчас сказали

бы – корпоративных, вечеринок Сергей Владимирович читал своего любимого поэта Сашу Черного и рассказывал нам о своей одесской юности...

Конечно, я мало знал Сергея Владимировича, но всегда осознавал, что он сильно повлиял на то, чем я всю жизнь занимаюсь в САО. Для меня это был короткий, но во многом решающий период 1972–1975 гг. Уже к осени 1974-го Рублев тяжело заболел и лежал в зеленчукской больнице, куда мы приходили, приносили ему арбузы и обсуждали наши обсерваторские дела. Был случай, как он, будучи в больнице, непосредственно повлиял на решение всех наших комитетов по поводу выделения мне квартиры в Зеленчукской в доме около почты, мотивируя это тем, что астрофизик в САО. Я был очень смущен таким вниманием к себе – я только начинал работать, какой там «астрофизик»... Теперь я понимаю, что в молодости для нас было очень важно почувствовать доверие, понимание и поддержку своих старших и маститых коллег. И нигде их не обмануть... Ведь мы могли тогда только подавать надежды, а до результатов было еще далеко. Конечно, были и соблазны, глупости, интриги, как в любом коллективе. Может быть, некоторым и нравилось принимать горячее участие в интригах, а пример Сергея Владимировича Рублева убедил меня в том, что главное – Наука и научные результаты.

Тогда, кроме работы по моделированию спектров звезд, я занимался еще и релятивистской астрофизикой – мой спор с В.Ф. Шварцманом уже начался. В это время Л.И.Снежко активно включился в работы по приемке главного зеркала БТА. Он привлек меня к разработке и внедрению метода Гартмана для контроля качества рабочей поверхности. С.В.Рублев и Л.И.Снежко обратили внимание на мои метания, и предложили мне сделать доклад по гравитационной физике на семинаре ОФЗиТ. Не знаю, что поняли сотрудники тогда из моего сбивчивого рассказа, но Сергей Владимирович понял, что у меня это серьезно и надолго. Он понимал, что проблемы типа релятивистского гравитационного коллапса содержатся в теме эволюции горячих массивных звезд, которой я начал заниматься. От полного осознания этого меня отделяли еще 10 лет самостоятельной работы, и то, что С.В.Рублев меня подбодрил, удержал от поспешных решений и подчеркнул важность профессионального подхода к каждой работе, помогло мне определиться с собственной темой. Сергей Владимирович никогда и не скрывал своей увлеченности наукой, и стремление к свободе выбора в науке для него было понятным и естественным. «Все придет со временем. Больше работайте. Научитесь и говорить точно, и писать. А экзамены - не переживайте, все это наживное. Все будет хорошо!» До сих пор помню слова этого доброго и прекрасного Человека, которые он мне сказал на ступеньках при входе в здание САО по улице Бережного. Мы с ним курили, и я рассказывал, что сдал кандидатский экзамен по астрофизике на «четверку». Мне повезло с моими первыми научными руководителями. И спасибо Судьбе и Господу за такие встречи. Сергей Владимирович! Я всегда о Вас помню.

В то время, когда мы все жили в Зеленчукской, у Ивана Михеевича было очень много забот, часто весьма далеких от науки. Но, живя в нашем научном поселке, с ним мы встречались гораздо чаще, поскольку сначала кабинет его находился в нашем подъезде. Удавалось больше говорить о науке. Тогда в общении с Иваном Михеевичем стали определяться мои научные интересы. Кстати, это самая тонкая материя в нашем цехе – иметь собственные и внятные научные интересы. Оказывается, не у всякого они есть, либо если и есть, то не свои, а чьи-то – талантливого коллеги или заявителя наблюдательной программы... Чтобы были свои, одних деклараций мало – настоящие свои научные интересы отстаивают в трудах и жестких дискуссиях у всех на виду.

Настоящая наука ведь не политика с ее гнусными методами. Это тоже я понял, общаясь с И.М. Копыловым и с В.Ф. Шварцманом – жесткими и бескомпромиссными профессионалами в своем деле.

В конце концов, и для меня это очень лестно, Иван Михеевич сам предложил мне поступить к нему в аспирантуру. По сути дела, это и была моя астрофизическая школа, поскольку работы, сделанные с Иваном Михеевичем, Леонидом Исааковичем и др., и опыт, который я приобрел тогда, фактически используется до сих пор. Тот же подход к работе с молодыми сотрудниками - «взялся за то, что тебе нравится, так делай это как следует» - позволял Ивану Михеевичу с пониманием относиться и к моему увлечению теорией гравитации. Он мне сразу тогда сказал, что по гравитации защититься будет очень тяжело, а если уж меня интересуют релятивистские объекты, то «давайте займемся сверхгигантом в Лебеде X-1». Мне кажется, что нам тогда удалось сделать хорошие работы на эту тему. Мы измерили массу голубого сверхгиганта в двойной системе Лебедь X-1, получили надежное ограничение снизу в 6.2 солнечных масс на массу релятивистского объекта и даже обнаружили эффекты прецессии оптической звезды. Тогда же Иван Михеевич увлек меня эволюцией массивных звезд, рассказывая о своих работах в Крыму. Когда мы писали эти статьи, я приходил к нему в кабинет, он просил своих секретарей заварить нам чай, откладывал другие, скорее всего важные дела, и мы увлеченно обсуждали наши проблемы, обменивались мнениями, спорили. Я до сих пор с теплотой вспоминаю это время. Было видно, что Иван Михеевич уставал от большой административной нагрузки, и ему нравилось говорить о своих любимых идеях, тем более что ко всем его советам и замечаниям по работе я относился внимательно. Конечно, он и ругал, когда меня слишком заносило. Большой жизненный опыт позволял ему всегда точно и тактично дать мне понять, что «вот это дело я могу сделать, а за то сейчас пока лучше и не браться».

Когда моя кандидатская диссертация была защищена, я вернулся к своей любимой гравитации, но продолжал работу и по горячим звездам, наблюдал на ОЗСП БТА. И теперь Иван Михеевич внимательно следил за моей деятельностью, делился своим опытом в технике наблюдений и интерпретации спектров горячих звезд. В то время все командировки шли только с согласия директора. Иван Михеевич относился с пониманием к моей увлеченности теорией гравитации, и частые командировки по этой теме, прямо не связанные с основной моей тематикой, всегда мне предоставлялись. По возвращении я рассказывал, а он внимательно слушал, что происходит в этой сфере. Его вопросы и замечания часто приводили к тому, что я что-то дополнял или исправлял в своих статьях.

Кажется в 1988 г., мы с И.М.Копыловым вместе находились в Крымской астрофизической обсерватории. По вечерам, после работы, мы с ним прогуливались по КрАО. Иван Михеевич рассказывал, как он начинал здесь свою работу, как складывались его научные интересы, о том, как ему – одному из первых в Советском Союзе – пришлось отстаивать правильные представления об эволюции звезд. Он рассказывал о строгой и не очень сытой жизни в те времена. В этих разговорах самым главным для меня было то, что увлеченность наукой помогала жить и тогда. Мне всегда нравились люди, которые сделали себя сами. Именно таким человеком и был Иван Михеевич.

Сейчас, когда бываю на Пулковской горе у его могилы и читаю надпись «Основателю САО», думаю, что не только я, но и многие из нас не понимали тогда, насколько ему было трудно быть этим самым основателем. Что бы там ни было, его главное Дело было сделано: собрал людей, поставил телескоп – сделал Институт. Со

временем все больше осознаю, что, начиная с той первой нашей встречи в 1972-м, мне просто повезло общаться и работать с большим Ученым и интересным Человеком. Я глубоко благодарен за все, чему научил меня мой Учитель – Иван Михеевич Копылов.

Как уже упоминалось, буквально с первых минут знакомства с Иваном Михеевичем у нас сложились достаточно доверительные отношения, но в то же время я всегда чувствовал ответственность. Иван Михеевич мне сразу дал понять – делай то, что ты можешь, и то, что тебе нравится, но если уж взялся за свои релятивистские дела, то сделано должно быть все профессионально и на «отлично». Это прямо касалось и нашего спора с В.Ф. Шварцманом, который начался сразу же, как только я стал ходить на его семинары. Иногда они проходили в конференц-зале башни телескопа. А часто мы просто встречались в той же башне – я неделями жил там и программировал на М-222 метод Гартмана для 6-метрового зеркала, а Виктор жил тогда в гостинице на ВПП.

Я готовился к встречам с В.Ф. Шварцманом, но его поведение на семинарах своей группы сначала мне не понравилось. Жуткий напор! Желание сбить с ног докладчика, которого перебивают с первой же фразы. Но удивительно, – все это меня только разозлило, а не обидело. Виктор прямо говорил, что наука не в книжках, не в задачниках с ответами в конце и даже не в статьях. Настоящая, азартная и свободная Наука возникает в непосредственном общении, в споре, в сомнении... В споре научная истина и рождается. Азарт. Риск. И неизвестный ответ! Как это увлекает. Что там, за поворотом? И, самое главное, – Свобода! Думаю, как хочу. И никому не подчиняюсь! Молюсь только Истине = Богу! И все это – мой одногодок! Как сейчас не хватает нам и самого Шварцмана, и его семинаров. Где такие семинары сейчас?

Я и с И.М. Копыловым мог спорить и высказываться о своем отношении к КПСС... А Шварцман просто потряс меня, когда в одной из откровенных бесед, в споре я как-то усомнился в том, насколько он действительно свободен в своем научном выборе – он чуть ли не бросился на меня с кулаками! Я завидовал этой его независимости и прямо говорил Виктору это, хотя тогда уже понимал, как нелегко быть свободным и общаться с окружающими – и молодыми, и старыми, умными и не очень.

Несмотря на наш спор – а он и сейчас продолжается – мы никогда не прерывали своих отношений. Я потом и со своей темой определился – система Лебедь X-1, масса компактного релятивистского объекта, находясь под влиянием наших разговоров. В его группу решил не идти – свой путь был мне милее, но релятивистской астрофизикой занимался и продолжаю заниматься по сей день. А эволюция массивных звезд, которой меня научил И.М. Копылов, оказалась для меня той самой, конкретной и настоящей релятивистской астрофизикой с внятными результатами. Чтобы быть понятным своим коллегам, мне пришлось «пропахать» те книги и курсы, которые Виктор прошел как физик-теоретик на физфаке МГУ. Опыт у меня был в этом деле, еще в университете я прочитал и прорешал все задачи из первых 3-х томов Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшица. Мы с Виктором хвастались друг другу: он мне показывал свою истрепанную книжку Зельдовича и Новикова «Релятивистская астрофизика», а я ему показывала такие же истрепанные «Теорию поля» и «Квантовую механику» Ландау. Витя, несмотря на наши научные разногласия и пристрастия, относился ко мне хорошо. За мою любовь к Л.Д. Ландау он подарил мне книгу воспоминаний Майи Бессараб о Ландау. Потом, когда мне пришлось жить снова в Зеленчуке – это был 1980 г. – у нас в гостях вечером вдруг появился Виктор в строгом черном костюме и с букетом цветов. Он поздравил нас с Татьяной. Как я был рад, что он вспомнил про мои житейские перипетии.

Я показал эти свои мемуары Евгению Леонидовичу Ченцову, который знает меня с 72-го года. Он подсказал мне отличную мысль о Шварцмане, которая мне самому как-то

не приходила в голову – отсутствие зависти к результатам своих коллег. Во всяком случае, я этого не заметил, хотя эта «болезнь» в нашем цеху встречается довольно часто, и скрыть ее симптомы очень трудно. Это естественно для по-настоящему талантливого человека, каким был Шварцман. Ему завидовали – это точно. И тихо не любили за быструю и точную реакцию на глупость и спесь. А уж он-то мог «стряхнуть пыль с длинных ушей» кому угодно! Зато мог порадоваться за своего коллегу, если у того что-то получалось, если человек не разочаровывался в своем деле. Я и на себе это испытал когда, наконец, после долгих мучений вышел на цель – система Лебедь X-1 и т.д. - и сел писать кандидатскую. Я помню точно и место, и время, когда он говорил со мной об этом, потому что поддержка такого человека, с которым не раз приходилось круто спорить, для меня была очень существенной. Какая зависть Шварцмана?! А вот чувство одиночества – это в нем было. Хотя вокруг него всегда было много людей и специалистов, его, наверное, сильно «доставало» то, что только он на достижение своей цели «ставит» все, что у него есть... Не скрою, мне именно это в нем нравилось больше всего. Хотя это и опасно. Забредешь куда-то один, а вокруг – никого... Да, отсутствие зависти и одиночество – и этим В.Ф. Шварцман сильно отличался от многих из нас.

Суть нашего спора с Виктором в том, что решения уравнений могут быть всякими. Но решения с сингулярностью для описания какой-либо реальной физики совершенно непригодны. Но если никаких других решений нет, то значит дело в самих уравнениях? Значит, в них чего-то не хватает? Тогда Виктор мне фактически поставил задачу, с которой я потом долго разбирался – посмотреть все возможные альтернативные варианты теорий гравитации без сингулярности – черной дыры (ЧД). И, самое главное, в этих теориях должны быть четкие наблюдательные тесты и предсказания.

На моих глазах он и сам формулировал наблюдательные тесты, которые бы показали наличие или отсутствие поверхности у массивных компактных объектов - кандидатов в ЧД. Это он мне говорил еще в 1985 г. об источниках гамма-всплесков как о возможных массивных коллапсирующих звездах. И от него я впервые услышал – я это понял лет через пять – о своеобразном «принципе неопределенности»: $E \times \Delta t \sim \text{Const}$, из которого следует, что стохастическая переменность блеска компактного объекта тем короче (меньше Δt), чем больше частота (или энергия E), на которой эту переменность наблюдают. В России, мне удалось убедить некоторых своих коллег, которые знали Виктора, что это как раз и может решить загадку гамма-всплесков. И все продолжается! Это как раз и есть та самая релятивистская астрофизика компактных объектов, о которой мы спорили до хрипоты. Фактически к этому приходят сейчас все: во время гамма-всплеска мы наблюдаем сам релятивистский гравитационный коллапс массивного ядра звезды, закончившей свою эволюцию.

А МАНИЯ? Я хотел бы сказать о случае, который произошел году в 1977–78. Телескоп уже работал с первым зеркалом, а я был во временной группе по исследованию главного зеркала методом Гартмана. Как-то мы сидели на 2-м этаже башни БТА в программистской и «тасовали» свои колоды из перфокарт. И вдруг в комнату входит главный конструктор БТА Баграт Константинович Иоаннисиани, здоровается и начинает по очереди всех расспрашивать о том, чем каждый занят. Помню, что я стал лихорадочно соображать – а что же я скажу? Не о методе же Гартмана и о кружке рассеяния толковать с Главным? Но до меня так очередь и не дошла (к счастью!). Когда он выслушал одного из сотрудников группы МАНИЯ, который с гордостью ему рассказал о том, что им удалось разрешить субимпульс пульсара в Крабе, он произнес целую речь: «Ребята! Я же вам сделал такой телескоп! Самый большой в мире! С

введением в строй всех крупных инструментов в науке всегда происходили принципиальные прорывы. Что вы отнаблюдали на БТА такого, чтобы это перевернуло современную Астрономию?» Не мешало бы и сейчас об этом помнить на наших ученых советах.

Конечно, МАНИЯ в нынешнем виде не имеет такого отношения к релятивистской астрофизике, как это когда-то задумывал Викторий Фавлович. По крайней мере, всем понятно, что результат эксперимента сейчас таков: одиночных компактных объектов с ожидаемыми свойствами нет в окрестностях Солнца. Конечно, это понимал и сам Виктор и наверняка лучше всех своих сотрудников. Но ведь любой результат в науке идет в дело. Это может просто означать, что объектов со *свойствами* ЧД действительно нет, а компактные массивные объекты имеют совсем другие свойства, и искать их надо как-то иначе...



Рис. 165. Участники международного совещания «Много проявлений феномена GRB – от оптики к высоким энергиям» (2009 г.).

Да, по пути была создана оригинальная методика. Ее основа – это известная всем быстрая фотометрия оптических объектов. А метод обработки данных (МАНИЯ), нацеленный на поиск ЧД в оптике, – всего лишь метод обработки, и никто сейчас не ищет стохастическую переменность компактных массивных объектов в оптике и на временах переменности, соответствующих времени жизни некоторых элементарных частиц... Просто очень жаль, что такой талантливый и искренний человек, каким был Викторий Фавлович Шварцман, не продолжил сам начатое им исследование физических свойств «кандидатов в ЧД», массивных и компактных объектов, найденных в тесных двойных системах, о которых он знал и думал. Сейчас аппаратура эксперимента МАНИЯ продолжает совершенствоваться в интересах фотометрических

исследований на коротких временах источников послесвечения гамма-всплесков, возможных источников гравитационных волн и быстрых радиовсплесков на БТА и других телескопах САО РАН. Так что «ничего не проходит бесследно», как поется в старой песне...

Несмотря на то, что мы работали вместе долгие годы, не хочу приписывать себя к друзьям Копылова и Шварцмана даже сейчас. Первый был первым директором САО, крепким оппонентом и моим строгим руководителем, которого надо было слушать и тогда, когда с ним не согласен. Другой Другой был умным, блестящим и азартным спорщиком, который часто совсем не щадил самолюбие собеседника, споры с которым иногда кончались и ссорами. Но именно спор и общение с такими людьми действительно сильно помогают мне точно формулировать мысль.

Сейчас надо далеко ехать, чтобы пообщаться с любимыми коллегами и друзьями. А тогда они были рядом, и думалось, что так будет всегда. В спорах с ними мы иногда были беспощадными к слабостям друг друга. Только после их ухода становится ясно, как им было больно и неприятно от лишних вопросов и ненужного пафоса. В спорах все же погибает что угодно, но только не Истина, бессмертная по определению. Это ложь и неправда пропадут рано или поздно, какими бы красивыми и важными они не выглядели.

Я искренне желаю здоровья и успехов всем нынешним сотрудникам своей любимой обсерватории!

Воспоминания

Голубчина О.А.,

старший научный сотрудник ГРИС СПбФ, д.ф.-м.н.; golubchina_olga@mail.ru

Груды мыслей чужих и своих
На мне повисли – лохмотьев грузы.
Что нас роднит разных таких-
Так это цепкие Солнца узы.
1992 г., РАТАН-600

С 1963 г. я – студентка астрономического отделения математико-механического факультета ЛГУ им. Жданова – проходила практику и писала курсовые работы в отделе радиоастрономии Пулковской обсерватории, где на БПР проводились антенные эксперименты, исследовали антенну способом «из фокуса в фокус». С этого времени я не расстаюсь с антенными работами, которыми я раньше даже не планировала заниматься. В соответствии с постановлением о строительстве РАТАН-600 Академией наук впервые за 10 лет были выделены три ставки для молодых специалистов, занятых в работах на радиотелескопе. Я попала в «первый призыв» принятых молодых специалистов. Благодаря поддержке академика В.В. Соболева и директора Пулковской обсерватории профессора В.А. Крата, после окончания университета 1 августа 1967 г. я была распределена в отдел радиоастрономии ГАО в качестве стажера-исследователя. Я пишу об этом, чтобы напомнить, как трудно было попасть на работу астрономом. Мы, везунчики, кому удалось устроиться на работу по специальности, очень дорожили этим.

Я была зачислена в группу Г.Б. Гельфрейха и должна была заниматься разработкой и внедрением методики радиоастрономической юстировки по Солнцу. Не могу сказать, что эта работа грела мне душу, скорее наоборот. Но она вызывала у меня почти спортивный азарт: «Кто кого?! Антенна и ЭВМ победят меня, или я приручу их!». В течение многих лет радиоастрономическая юстировка была основной, а иногда и единственной на БПР. Таким образом, можно считать, что я была подготовлена для аналогичной работы и на РАТАН-600.

В мае 1975 г. я вместе с дочкой, которой было 1.5 года, отправились жить в ст. Зеленчукскую, где мой муж Г.С. Голубчин уже работал на РАТАН-600.

Трудно приходилось с юстировками и наблюдениями на радиотелескопе из-за удаленности ЭВМ М-220, которая находилась в башне БТА, от РАТАН-600. Получить время для вычислений на М-220 было нелегко, а сами расчеты были сложными и трудоемкими. Я часто поднималась вечерами на ВПП в надежде, что кто-то откажется от своего запланированного времени. Ночное время на ЭВМ часто было у группы Шварцмана – они тогда вели тему «МАНИЯ». Когда наблюдения не проводились по погодным условиям, они отдавали мне свое время. С благодарностью я вспоминаю ответственную работу операторов и инженеров ЭВМ М-220 под руководством О.М. Михайлова.

Переставлять отражающие элементы по координатам в быстром динамическом режиме в любую погоду (команды следовали через каждые 15–30 секунд в течение четырех часов) может далеко не каждый человек, а в юстировке принимали участие все операторы РАТАН-600. Поэтому, конечно, операторы допускали ошибки. Вообще для

организации юстировок, а особенно наблюдений методом «эстафеты» от меня требовались неимоверные усилия.

Совместно с Г.Б. Гельфрейхом к 1978 г. мы внедрили в практику методику радиоастрономической юстировки по Солнцу и Луне для достижения высокой точности отражающей поверхности главного зеркала АПП РАТАН-600. Этот метод позволил исследовать параметры радиотелескопа и явился базой для создания специальных методов наблюдений на радиотелескопе: «эстафеты» и «эстафеты с зонированием». В 1978 г. Г.Б. Гельфрейх предложил мне задачу привязки групп отражающих элементов главного зеркала антенны для исключения у них остаточных случайных ошибок в местах нулей.

Суть метода состоит во взаимной привязке удаленных друг от друга групп отражающих элементов. При этом две юстируемые группы работают в режиме двухэлементного интерферометра. Выполнив соответствующие расчеты, мне удалось решить задачу, применив метод к наблюдениям источника 3С 84 на двух группах № 16 и № 13 северного сектора РАТАН-600.



Рис. 166. Слева – О.А. Голубчина вместе с Н.П. Комаром и членами его семьи после успешного проведения первого наблюдения радиоизлучения Солнца методом «эстафеты с зонированием» на волне 18 см. (28.07.1983 г.). Справа - О.А. Голубчина после наблюдений Солнца 20.10.1999 г. на облучателе с конической поверхностью РАТАН-600.

В это время на радиотелескопе под руководством Г.С. Голубчина полным ходом шли работы по автоматизации управления отражающими элементами АПП. Г.С. Голубчин предложил мне провести наблюдения Солнца с частыми перестановками отражающих элементов, используя этот метод. Наблюдения на одних частях антенны последовательно перемещались на другие части антенны в соответствии с изменениями координат наблюдаемого источника. Позже этот режим наблюдения с уменьшенной апертурой мы назвали методом «эстафеты». Он позволил наблюдать Солнце от восхода до заката с умеренным угловым разрешением чуть лучше, чем на БПР (~1' на волне 2 см), что вызвало критику на семинаре отдела: «От чего шли к тому и пришли!».

Однако это было не совсем так. Метод «эстафеты» давал возможность исследовать эволюцию источников солнечного радиоизлучения от восхода до захода Солнца.

Автор первых работ по исследованию Солнца на АПП БПР к.ф.-м.н. В.Н. Ихсанова также принимала активное участие в постановке задач и исследовании радиоизлучения Солнца по наблюдениям, полученным на РАТАН-600 в режиме «эстафета».

Для повышения пространственного разрешения и скорости перестановки антенны мною был разработан режим наблюдений с зонированной поверхностью – метод «эстафеты с зонированием». Специальные наблюдения – метод «эстафеты» и «эстафеты с зонированием» – обеспечивают возможность многочастотного мониторинга Солнца от восхода до захода, что важно для исследования эволюции активных областей солнечного радиоизлучения, развития солнечных всплесков и их прогнозирования.

В период разработки и внедрения этих методов нередко приходилось привлекать к проведению наблюдений родственников и знакомых, так как мне для экспериментов выделялись только нерабочие дни, когда на РАТАН-600 почти никого не было. Первое наблюдение в режиме «эстафеты с зонированием» также было выполнено благодаря помощи родственниц радиоинженера Н.П. Комара, которые помогали передвигать вторичный облучатель по рельсам в нужное положение (рис. 166, слева).

Метод «эстафеты» также использовался на РАТАН-600 при наблюдении солнечных затмений 31.07.1981 г. и 29.03.2006 г. Затмение Солнца 31.07.1981 г. происходило на восходе светила, поэтому его можно было наблюдать только методом «эстафеты». К этому времени метод был разработан и опробован, а западный сектор был уже автоматизирован. Сотрудники лаборатории АСУ Г.С. Голубчин, Г.В. Жеканис, А. Мотренко, Н. Трофимова обеспечили безотказную работу антенны.

В наблюдениях участвовали также В. Пиотрович (ЛГУ) и молодые сотрудники САО Г. Рыбкина и В. Плотников, которые из-за большой и неизвестной радиорефракции на восходе Солнца при подготовке к наблюдению долго спорили, куда наводить центр диаграммы направленности антенны (ДНА), чтобы получить наиболее интересную информацию. Центр ДНА случайно навели именно туда, куда и надо было! Все остались довольны наблюдениями.

Солнечное затмение 29.03.2006 г. наблюдалось на северо-восточном секторе также методом «эстафеты» с использованием радиоаппаратуры первого облучателя. Сотрудники геодезической группы тщательно выполнили все подготовительные работы. Активное участие в подготовке и проведении наблюдений принял Г.В. Жеканис (ЛАСУР). В наблюдении и первичной обработке результатов участвовали П.Г. Цыбулев (ЛРК) и Н.Н. Бурсов. С.Х. Тохчукова внесла много полезного в программы обработки этих наблюдений.

По данным наблюдений этого солнечного затмения впервые в сантиметровом диапазоне длин волн было найдено распределение яркостных температур в полярной корональной дыре (КД) от лимба Солнца до расстояний двух радиусов Солнца от центра его оптического диска. Известно, что механизм образования полярной КД отличается от организации КД вне полярных областей на фоне спокойного Солнца. Тем не менее, результаты наших исследований впервые показали идентичность температурных характеристик КД независимо от места их расположения. Это означает, что в период минимума солнечной активности температурные характеристики КД не зависят от способа организации корональных дыр на Солнце.

Специальные методы наблюдений на РАТАН-600 использовались для исследования симпатических всплесков – синхронных уярчений локальных источников на Солнце. Нашими исследованиями было показано, что на Солнце существуют

сильные взаимодействия активных областей, удаленных друг от друга на расстояния вплоть до $L > 10^5$ км. Впервые в узком спектральном диапазоне микроволнового излучения (1.92–3.21 см) отмечено проявление двух различных механизмов синхронных уярчений источников солнечного радиоизлучения: действие высокоэнергичных электронов и волновых фронтов. Мой доклад на семинаре в филиале САО об обнаруженных синхронных уярчениях на Солнце вызвал недоверие.



Рис. 167. Слева – подготовились к наблюдениям солнечного затмения 29.03.2006 г. П.Г. Цыбулев, Н.А. Нижельский., Ю.А. Ковалев, О.А. Голубчина, Д.В. Кратов, Ю.В. Сотникова, Г.В. Жеканис; справа – О.А. Голубчина и Н.А. Нижельский в процессе наблюдения солнечного затмения.

Прошло много лет. Я доказала свою правоту, неоднократно повторив наблюдения синхронных уярчений на Солнце на западном и южном секторах РАТАН-600. Большую помощь в этих наблюдениях оказала Т.А.Пляскина.

Характер моих работ на РАТАН-600 требовал наблюдений на всех вторичных облучателях. Метод «эстафеты с зонированием» обеспечил более быстрые перестановки антенны и возможность получения двумерных изображений источников космического радиоизлучения с использованием вторичного отражателя с конической поверхностью. Так впервые на РАТАН-600 было получено двумерное изображение Солнца.

Не все шло гладко в моей работе на РАТАН-600, однако, всегда находились такие сотрудники, как С.А. Чех, Ю.А. Ковалев и Ю.Ю. Ковалев (АКЦ ФИАН), С. Болдырев, которые немедленно оказывали помощь. Вспоминая время работы на РАТАН-600, я отчетливо осознаю, что для нашей семьи в основном это были долгие и непростые годы напряженного труда.

Научная библиотека САО и ОНТИ

Шведова Г.С.,

заведующая научной библиотекой ОНТИ (с 1970 г.), заведующая ОНТИ (1980–2003 гг.)

После окончания Московского библиотечного института в 1959 г. я была направлена на работу в научную библиотеку Коми филиала АН СССР, где проработала 10 лет. По состоянию здоровья врачи посоветовали мне переехать в среднюю полосу или на юг. Я не хотела уходить из системы академических библиотек и, будучи в командировке в Секторе сети спецбиблиотек (Москва), теперь Библиотека естественных наук, попыталась узнать, есть ли вакансии в научных библиотеках. Мне предложили на выбор Пушино, Борок или САО. Особенно рекомендовали САО, т.к. ученый секретарь обсерватории очень просил найти сотрудника на должность заведующего библиотекой.

В августе 1970 г. я приехала в станицу Зеленчукскую. Меня принял заместитель директора по научной части С.В. Рублев. Он подробно рассказал о планах организации библиотеки, показал чертежи лабораторного корпуса и домов в строящемся научном поселке, который находится в 25 км от станицы. Меня интересовало, какова будет площадь помещений библиотеки, потому что, бывая в научных библиотеках, я видела, как все страдают из-за тесноты. Рублев показал мне строительные чертежи и объяснил, что третий этаж шестиэтажного лабораторного корпуса будет отдан библиотеке. Потом познакомил меня с двумя приятными улыбчивыми женщинами – Н.А. Костиной и А.Д. Бардаковой. Костина показала мне фонд и помещения библиотеки, существовавшей с декабря 1966 г. На следующий день я поднялась на ВВП, где главный инженер А.А. Шевела показал мне башню. Еще не были построены лестницы, и чувствовалось, что идет сооружение огромного объекта.

В августе 1970 г. я приехала в Зеленчук. Меня встретил ученый секретарь В.М. Перерва. Именно он создавал библиотеку, ездил по обсерваториям, институтам, собирал дублетные экземпляры астрономической литературы. В библиотеке началась работа по проверке фонда. В штат была принята библиотекарем В.Н. Степанова. Проверка фонда закончилась к концу года, и началась обычная работа. Ученый секретарь вместе с научными сотрудниками составили первую десятичную классификацию по астрономии, которой мы начали пользоваться для пересортировки книг библиотеки. Велась большая работа с книгами, которые лежали еще не разобранными в мешках. В основном это была литература по астрономии на иностранных языках и издания обсерваторий. В.М. Перерва составил для библиотеки картотеку журналов, которые необходимо было иметь в фонде.

В 1970 г. в библиотеке было 70 читателей, в основном молодые астрономы: Валентиев Ключкова, Семен и Лев Пустильники, Виктор Дуборович, Юрий Хабазин, потом приехали Валентина и Игорь Караченцевы и другие. Астрономы часто просили заказать книги, которых у нас не было. Мы заказывали ксерокопии и фотокопии в ВИНТИ и расширяли связи по междубиблиотечному абонементу. Большую помощь в работе с иностранной литературой оказывал переводчик САО В.М. Шаповал.

Первое время я скучала по библиотеке Коми филиала, но постепенно привыкала к новым сотрудникам. Удивлялась тому, что все друг друга называют по имени, но потом я поняла: это из-за того, что коллектив обсерватории очень молодой. Многие пришли после окончания школы: Валя Сайченко (Максимова), Инна Ушмаева, Галя Хрипкова.

Многие приехали после окончания институтов и университетов: Борис Артамонов, Наташа Войханская, Слава Дебур, Наташа Чунакова, Юра Сухарев. Радовало, что коллектив очень дружный. Например, ко Дню советской армии женщины САО надели пельменей и пригласили на празднование всех мужчин. А на 8 марта на столах у женщин стояли вазочки с крокусами. Вместе смотрели телевизор по вечерам, вместе устраивали культпоходы в кинотеатр. Заместитель директора С.В. Рублев пригласил всех на «Рублева» Андрея Тарковского. Кинотеатр был деревянный, холодный. Всем коллективом устраивали поездки на Нижнеархызские храмы и в Шоанинский храм в Карачаевске, поездки по грибы. В автобусе пели песни. Еще мне запомнилось, как Узденов преподнес букет черных тюльпанов, собранных мужчинами в поездке на Голубые озера, секретарю директора Татьяне Васильевне Леоновой, галантно поцеловав ей руку.

В 1974 г. по приглашению группы сотрудников в САО приехал спелеолог из Черкесска, и мы всемером (Леушин, Артамонов, Дебур, Чунакова, Хрипкова, спелеолог и я) пошли в пещеру под станицей Исправной. Это было яркое впечатление, которое осталось у меня на всю жизнь. Я вспоминаю подземное озеро и сталактиты вокруг него. В 1975 г. Боря Артамонов уходил из САО и решил отметить свое увольнение коллективным походом на Пик пионеров в Архызе. Леня Снежко нес бюст Ленина, чтобы водрузить его на вершине. По словам Аллы Шаповаловой, он и сделал это, но я до вершины не дошла. От САО было два автобуса восходителей. Я никогда не ходила в горы, и Шаповалова меня просто тащила на себе. Снежко спрашивал: «Ты ее до пика дотащишь или оставишь где-нибудь?». Артамонов сжалился над нами и повел женщин и детей на Баритовые водопады.

В 1971 г. были организованы филиалы библиотеки на РАТАН-600 и БТА. В декабре 1972 г. стал действовать библиотечный совет под председательством С.В. Рублева. Члены совета регулярно просматривали тематические планы издательств, каталоги журналов и отмечали те издания, которые необходимо было приобрести. В.М. Перерва подбирал литературу для нашей библиотеки в ИТА и ГАО. В башне телескопа БТА было выделено довольно большое помещение, куда библиотека перевезла многие журналы, еженедельно возила выставки новых поступлений и литературу по заказу сотрудников, там работавших.

У меня было много работы, особенно по классификации литературы. Необходимо было осваивать астрономические термины, поскольку, работая в Коми филиале, я хорошо знала терминологию геологии, биологии и общественных наук, но не астрономии. Поэтому приходилось часто задерживаться в библиотеке. Я жила на частной квартире у Карповны, которая находилась на улице Бережного за сельсоветом. Часто меня отвозил домой на мотоцикле Володя Бардаков. Соседи, сидя вечером на лавочках возле своих домов, говорили: «Жиличка Карповны идет». Меня удивляло, что дети на улице всегда здоровались – деревенская манера общения, которая в городе не принята. Потом я получила однокомнатную квартиру в доме на ул. Первомайской, 117, где прожила до апреля 1975 г.

В 1971 г. библиотека профсоюзного комитета САО, которая имела литературные журналы за два года, была передана в научную библиотеку. В 70-80 гг. профком выделял деньги на приобретение литературных журналов и художественных книг, которые покупали члены Книжного общества для библиотеки: В.Е. Карачанцева, Лебедевы, Т.Н. Соколова, Ченцовы. Мы с Наташей Чунаковой ездили в Хабез и Медногорск и покупали там книги. Библиотека была не только научной. Все новинки помещались на еженедельную выставку новых поступлений.

В 1973 г. я впервые увидела небо в телескоп в Бюракане. В 50-сантиметровый телескоп мне его показали Алла Шаповалова и Валентин Липовецкий. Я увидела кольца Сатурна и была потрясена, потому что видела их до этого только на рисунках.

В 1975 г., когда был построен первый дом в п. Нижний Архыз, где под библиотеку выделили помещение площадью 150 кв. м. Ее фонд насчитывал тогда 93 тыс. экземпляров. Была организована вся структура библиотеки – абонемент, открытый и закрытый фонды, где работали семь человек: Н.А. Костина, Э.А. Генно, А.Д. Бардакова, О.М. Неизвестная, Катя Литвинова, О.В. Ивашенко и я. Мы вели информационно-библиографическую работу, обслуживая десять групп научных сотрудников, выпускали информационный бюллетень новых поступлений, еженедельно проводили выставки новых поступлений и тематические выставки. Обсерватория выписывала за валюту более десяти наименований иностранных журналов. Многие командированные и студенты-практиканты с удовольствием ходили в нашу библиотеку, потому что другие библиотеки зачастую получали гораздо меньше иностранных астрономических журналов. Директор Бюраканской обсерватории академик В.А. Амбарцумян приезжал в САО несколько раз. Он всегда приходил в библиотеку и радовался, что его книги стоят на видном месте. Библиотека в то время входила в группу, а после в отдел научно-технической информации, который располагал множительной техникой, поэтому мы могли делать ксерокопии журналов, таблиц, рисунков и т.д.

В феврале 1980 г. библиотека переехала в лабораторный корпус, где для библиотеки был предназначен третий этаж. Фонд к этому времени насчитывал более 110 тысяч единиц. Его разместили на площади 494 кв. м, а под рабочие помещения отводилось 76.3 кв.м. При переезде все четыре фонда - открытого доступа, закрытого доступа, читального зала и БТА, были слиты в один. Благодаря четкой организации труда и помощи всего коллектива САО все удалось перевезти в течение тринадцати дней. Когда к лабораторному корпусу подъезжала машина с пачками книг, их по цепочке передавали на третий этаж. Библиотека была недоступна для читателей всего три недели. За это время литература была расставлена по стеллажам. Затем были оборудованы читальный, выставочный залы и абонемент. Назначили день торжественного открытия. С утра в вестибюле было полно читателей, которые с нетерпением ждали начала мероприятия, а в читальном зале сотрудники библиотеки и ОНТИ приготовили шампанское и конфеты. Ответственный за ведение фотоархива САО Ю.В. Сухарев все снимал на пленку. Иван Михеевич произнес проникновенную речь о значении и роли библиотеки. В работе библиотеки наступила новая эра.

В 80-е годы библиотека процветала. АН СССР обеспечивала полноценное комплектование. Пришли новые сотрудники: Т.А. Борисенко, Л.В. Плохотниченко, П.Н. Дышекова, Л.И. Дудий, Л.Г. Шпак. В филиале библиотеки на РАТАН-600 работали Г.И. Капранова, потом Э.А. Генно и И.Д. Перехватова. После сдачи корпуса автоматики и электроники, библиотеке выделили помещение из двух комнат: в одной фонд и абонемент, а во второй читальный зал и выставка еженедельных поступлений.

В эти годы библиотека была центром информации и культуры САО. Мы обслуживали не только сотрудников обсерватории, но и всех жителей поселка, учителей, школьников. Библиограф Н.А. Костина занялась озеленением библиотеки. Сотрудники приносили свои цветы и дарили библиотеке. На абонементах, в читальном и выставочном залах всегда было много людей. Пенсионеры приходили почитать газеты, посмотреть выставки новых поступлений. Школьники прибегали за материалами для рефератов по биологии, физике, истории, за литературой к школьным сочинениям. Мы старались выполнить читательские запросы и всем найти необходимую литературу.

После смерти С.В. Рублева председателем библиотечного совета стал И.Д. Караченцев. Совет помогал дополнять таблицы классификации, так Караченцев и Шварцман редактировали разделы по внегалактической астрономии и астрофизике. Многие сотрудники, уехавшие из САО, посещая наш поселок, благодарили за хорошую работу. М.Ф. Шабанов, С.М. Морозова, Н.М. Чунакова, Р.Н. Кумайгородская и другие – все они были преданными читателями. Одна из них, Лариса Шлык, работала в библиотеке после окончания школы. Через год она поступила в МГУ на химфак, потом уехала в США по обмену и писала оттуда Е.А. Барсуковой о том, какая хорошая в САО библиотека и как часто она ее вспоминает.



Рис. 168. Сотрудники ОНТИ, 1981 г.: нижний ряд – Л. Дудий, Л. Шлык, Л. Спангенберг, Л. Алексеева; средний ряд – В. Чурбанова, (?), А. Песчанова, Л. Плохотниченко, О. Неизвестная, Е. Литвинова; верхний ряд – Г. Шведова, Е. Болдырева, Ю. Сухарев, Э. Генно, Н. Костина.

Член бибсовета Е.Л. Ченцов и работники абонемента организовывали экскурсии по библиотеке. Приходили школьники и даже дети старшей группы детсада. Им показывали фонд, старинные атласы звездного неба, старые издания – журналы 1836 г. выпуска и другие. Библиотека регулярно проводила тематические выставки. Например, Л. Шпак делала выставку «Редкие и исчезающие растения нашего края». Были выставлены не только книги, но и сами растения. Помогал в оформлении выставки Е.Л. Ченцов. Интересная была выставка по истории нашего края. Вместе с тематическими выставками проводились обзоры и беседы о книгах. Так, редактор Е.Н. Болдырева провела беседу по выставке «Чуковский К.И. 100 лет со дня рождения». Кроме книг на выставке были детские рисунки по произведениям Чуковского. Выставка по теме «Освоение космоса в научной фантастике» сопровождалась обзором литературы, а выставка «О небесных созвездиях» - беседой о них.

Руководство обсерватории – директор И.М. Копылов, заместители директора С.В.Рублев, Л.И. Снежко и А.Ф. Фоменко, главные бухгалтеры М.Т. Удовицкий и

Г.В. Сухарева – безотказно выполняли любые просьбы библиотеки. Председатель профкома А.Ч. Узденов с гордостью показывал библиотеку чиновникам, приезжавшим в САО.

В доинтернетовское время информацию можно было получать только в библиотеке, и мы старались сделать все возможное для этого.

В рубеже 80–90 гг. в библиотеке САО наступила пора компьютеризации. Сотрудники библиотеки начали формировать на ЭВМ вычислительного центра САО алфавитный каталог на магнитных лентах. Активную помощь в этой работе оказывала инженер-программист Н.П. Хорунжая. Опыт оказался неудачным: носители информации быстро менялись, и, соответственно, так же быстро менялись устройства для их чтения. Удалось создать электронный алфавитный каталог лишь с пятой попытки, в конце 2016 г.



Рис. 169. Сотрудники ОНТИ (2001 г.): нижний ряд – Н. Кретьова, Л. Плехотниченко, Г. Шведова, Э. Маркелова, Е. Филиппова; верхний ряд: Т. Борисенко, И. Романюк, Г. Коледа, Ю. Сухарев, Л. Спангенберг, О. Неизвестная, М. Моисеева.

Первый персональный компьютер появился в библиотеке в 1992 г. Он использовался в основном для отправки и получения электронных писем. Затем их стали использовать для печати каталожных карточек, для формирования списков поступившей литературы и прочей бумажной работы. Труд библиотекарей стал значительно легче. В эпоху печатных машинок мы должны были порой печатать каталожные карточки по двенадцать штук на одно издание, а в день библиотекарь должен был напечатать сорока таких карточек. С появлением персональных компьютеров эта проблем решалась намного легче, но при этом от сотрудников библиотеки потребовались специальные навыки.

До июня 2003 г. библиотека являлась подразделением ОНТИ, в который входила также редакционная группа, издававшая журнал «Астрофизические исследования» (позднее журнал стал называться «Астрофизический бюллетень»). Возглавляла редгруппу Л.И. Спангенберг. Ольга Цветкова и Валентина Воробьева набирали тексты на печатных машинках, редакторами были Е.Н. Болдырева и Е.В. Додонова. В эпоху компьютеризации издания САО редактировали О.М. Неизвестная и Г.Н. Коляда. Лариса Алексеева была редактором-художником. Бессменным переводчиком на английский язык был В.М. Шаповал, замечательный человек, всегда готовый прийти на помощь. Также сотрудником отдела был великолепный фотограф Ю.В. Сухарев. Вместе с лаборантом Анной Песчановой он вел фотоархив обсерватории с самого дня ее основания. На выставках фотографий, которые время от времени устраивались в САО, ему не было равных, хотя многие сотрудники были далеко не новичками в этом деле. Сделанные им художественные фотографии до сих пор украшают стены лабораторного корпуса. В ОНТИ работали ксерокописты Вера Чурбанова, Вера Тимченко и Н.А. Кретьова. Они начинали работу на огромных установках «Эра» и постепенно перешли на современные ксеромашины. Работа была непростая и физически трудная: сначала делались фотографии страниц, а потом их копии на машине, в которую засыпали черный порошок. Все ксерокописты работали в масках и ходили всегда засыпанные этим порошком. Печатником работал М.Б. Быстров, который отлично переплетал диссертации, отчеты, книги. В архиве документов САО, который тоже входил в структуру ОНТИ, работала Е.В. Додонова, ее сменила Г.И. Капранова. Она привела архив в порядок, начала оформлять документы по архивным правилам, сделала картотеки. Позже архив приняла М.Н. Моисеева. В ОНТИ работали инженерами по патентной работе Л.Ф. Захарова и В.С. Иванова. Они отслеживали по специализированным изданиям информацию об изобретениях и передавали ее научным сотрудникам и инженерам.

Из библиотеки в разное время перешли на работу в администрацию САО и другие подразделения А.Д. Бардакова, Н.А. Калинина, Т.И. Туполова, Л.Ю. Кравченко и Е.Э. Филиппова.

В настоящее время в библиотеке работают Л.В. Плохотниченко, Т.А. Борисенко, Э.Н. Маркелова, И.Б. Романюк и И.Ю. Перкова.

Коллектив научной библиотеки и ОНТИ, с которым я работала все эти годы, был замечательный. Все относились к своей работе с любовью и ответственностью. Проработав в САО 33 года, я счастлива, что у меня были любимая работа, любимые коллеги, любимые читатели и замечательные преданные друзья.

Вспоминая ушедших товарищей

ГЕЛЬФРЕЙХ Георгий Борисович
(19.06.1932–03.07.2010)

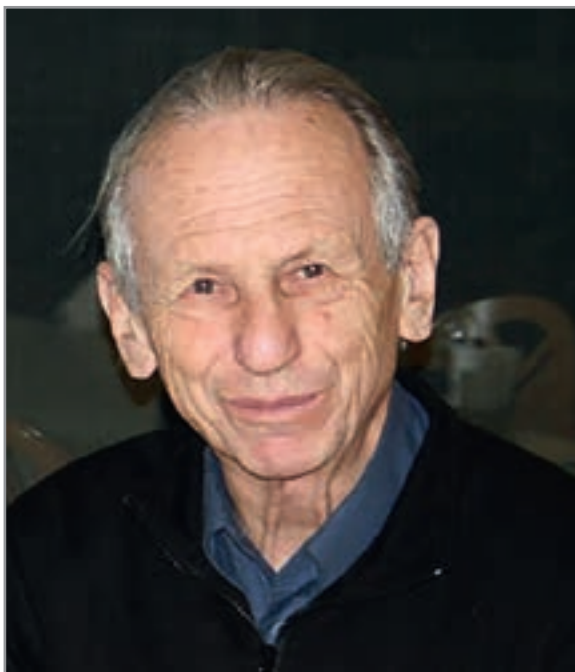


Рис. 170. Г.Б. Гельфрейх – главный научный сотрудник ГАО РАН, д.ф.-м.н., профессор.

Георгий Борисович Гельфрейх не являлся сотрудником САО, но вся его научная деятельность, относящаяся к физике Солнца и исследованию наблюдательных возможностей антенн переменного профиля (АПП) связаны с радиотелескопом РАТАН-600, где при его непосредственном участии были внедрены новые способы юстировки и специальные режимы наблюдений.

Во время блокады Георгий чудом остался жив, благодаря своей матери. В 1950 г. он поступил на астрономическое отделение математико-механического факультета Ленинградского государственного университета. В начале своей учебы Георгий Гельфрейх увлекся планетологией. После первого курса он вместе с однокурсником Борисом Стругацким – известным в будущем писателем-фантастом – поехал на практику в обсерваторию в Алма-Ате, где тогда развивал новую науку «астроботанику» Гавриил Андрианович Тихов – выдающийся планетолог и астроном.

В 1953 г. в ГАО АН СССР был создан отдел радиоастрономии. Возглавил его С.Э. Хайкин – основоположником нового направления исследований – изучения Вселенной и наблюдений затмений Солнца в сантиметровом диапазоне радиоволн. Георгий Гельфрейх, будучи еще студентом, обратился к Семену Эммануиловичу с просьбой об участии в работе отдела. В 1954 г. в ГАО еще не было ни одного радиотелескопа, но шла сборка приемников для будущих наблюдений. Поскольку

Гельфрейх был еще и радиолобителем и был знаком с радиотехникой, то он подключился к этим работам.

После успешного окончания университета в 1956 г. Георгий Гельфрейх был распределен в аспирантуру Пулковской обсерватории. Однако в это время в Академии наук вышло указание, запрещающее принимать в аспирантуру молодых людей без стажа работы. Осенью он был принят в ГАО АН СССР на одну из инженерных должностей.

С 1959 по 1962 гг. Г.Б. Гельфрейх обучался в аспирантуре ГАО, где после окончания в 1963 г. защитил кандидатскую диссертацию по теме «Исследование поляризации всплесков радиоизлучения Солнца в сантиметровом диапазоне». С 1962 г. работал в ГАО АН СССР в должностях от младшего научного сотрудника до старшего научного сотрудника. С 1965 г. Г.Б. Гельфрейх преподавал в ЛГУ. Именно ему С.Э. Хайкин поручил читать спецкурсы по широкому кругу вопросов из области радиоастрономии и физики плазмы, физики Солнца.

В 1976 г. Георгий Борисович защитил докторскую диссертацию по теме «Локальные источники сантиметрового излучения Солнца». Он заведовал отделом физики Солнца ГАО (1984–1986 гг.), затем работал ведущим (1986–1995 гг.) и главным научным сотрудником (1999–2010 гг.).

Из воспоминаний Г.Б. Гельфрейха: «Первым важным событием моей работы в Пулкове, в котором я активно участвовал, было наблюдения солнечного затмения 02.12.1956 г. В результате оригинальных по своей методике наблюдений удалось установить, что радиоисточники, связанные с солнечными пятнами, имеют большую яркость, малые размеры, близкие к размерам самих пятен. Эти результаты и мое участие в их получении стало началом одного из центральных направлений моей последующей исследовательской работы. Наблюдения солнечных затмений как полных, так и частных открыло путь к измерению с высокой точностью размеров и положения ярких деталей радиоизлучения Солнца на сантиметровых волнах».

Одна из первых его теоретических работ была посвящена теории поляризационных модуляторов в радиометре (1967 г.), в которой были рассмотрены все возможные инструментальные искажения поляризации.

В 1976 г. совместно с А.Н. Коржавиным он провел оптическое моделирование диаграмм крупных радиотелескопов, что позволило оценить режимы работы радиотелескопа РАТАН-600. Большую известность среди радиоастрономов РАТАН-600 получила его программа расчета установок радиотелескопа, которая в дальнейшем привела к созданию теории юстировки отражательных элементов радиотелескопа по позиционному углу Солнца (1972 г.). Внедрение этого метода юстировки выполнялось им совместно с О.А. Голубчиной (1978 г.).

Г. Б. Гельфрейх хорошо понимал важность моделирования физических и наблюдательных процессов. Такие работы были им выполнены своевременно уже в первом периоде наблюдений на РАТАН-600, что позволило обнаружить тонкую вертикальную структуру излучения циклотронного радиоисточника (1979 г.), так называемый эффект Гельфрейха–Лубышева. Эта работа получила международный резонанс, и модельные расчеты были подтверждены на крупных радиотелескопах мира (VLA, WSRT).

Георгий Борисович активно развивал различные методы измерения корональных магнитных полей. Совместно с В.М. Богодом им был разработан метод измерения слабых корональных полей по тепловому излучению (1980 г.), затем вместе с А.Н. Коржавиным (1982 г.) – измерение магнитного поля на основе циклотронного

излучения радиоисточников над пятнами, совместно с Н.Г. Петеровой и Б.И. Рябовым – метод на основе эффекта смены знака круговой поляризации, совместно с А.С. Гребинским Георгий Борисович развил метод магнитной томографии (2000 г.).

Общие семинары под его руководством позволили объединить группу сотрудников ГАО и САО, связанных, связанных тематикой исследований на крупных рефлекторных инструментах (БПР, РАТАН-600). Под его руководством было защищено 10 кандидатских диссертаций.

За более чем за полвека исследовательской работы в области физики Солнца, радиоастрономии, физики плазмы Георгий Борисович Гельфрейх выполнил огромное число оригинальных исследований, опубликованных в ведущих научных журналах. Большая часть из них выполнялась совместно с коллективами ученых, часто из других стран, в т.ч. с учеными Японии, Китая, Греции, Германии, США, Австралии. Георгий Борисович посетил свыше 20 стран разных континентов, включая и поездки, связанные с наблюдениями солнечных затмений. Возглавляемая им экспедиция на Кубу в 1969 г. для наблюдений солнечного затмения организовала Гаванскую радиоастрономическую станцию для ведения регулярной службы радиоизлучения Солнца. Станция эффективно работает до сих пор.

Яркий дидактический талант Георгия Борисовича, его ответственное отношение к воспитанию молодой смены астрономов стали залогом его активной и успешной педагогической деятельности в СПбГУ, где он служил много лет профессором на кафедре астрофизики.

Г. Б. Гельфрейх был одним из плеяды астрономов, обладающих широкой эрудицией. Он – автор более 120 научных статей, являлся членом МАС (с 1967 г.), был действительным членом РАЕН.



Рис. 171. Солнечники СПбФ САО и ГАО РАН (2003 г.).

Материал подготовлен В.М. Богодом.

ЗВЕРЕВ Юрий Кузьмич **(25.10.1935–12.09.2010)**



*Рис. 172. Ю.К. Зверев – заведующий
СПбФ САО РАН (2004 г.).*

В 1958 г. Юрий Кузьмич Зверев окончил геодезический факультет Московского института инженеров геодезии, аэрофотосъемки и картографии (МИИГАиК) и стал работать инженером-астрономом в Северо-Западном аэрогеодезическом предприятии. В 1965 г. Ю.К. Зверев поступил старшим инженером в отдел радиоастрономии ГАО, а с 1969 г. он – сотрудник Ленинградского (сейчас Санкт-Петербургского) филиала САО РАН, где работал сначала инженером-конструктором, затем старшим научным сотрудником, позже до 2004 г. руководил филиалом, а затем работал ведущим научным сотрудником.

Работа Ю.К. Зверева в ЛФ САО АН СССР началась с реконструкции Большого пулковского радиотелескопа (БПР), которая проводилась для расширения рабочего диапазона волн. Это потребовало изготовления новой отражающей поверхности щитов БПР с точностью около 1 мм. Зверев предложил и внедрил ряд специальных методик по улучшению качества отражающей поверхности БПР [1]. В дальнейшем накопленный им опыт оказался очень полезным при создании РАТАН-600. Юрий Кузьмич принимал участие в проектировании и строительстве радиотелескопа, начиная от разбивки фундаментов и до полной геодезической юстировки радиотелескопа, затем – в работах по улучшению качества отражающей поверхности антенны.

В процессе строительства радиотелескопа совершенствовались методики геодезических измерений и юстировки антенны переменного профиля (АПП). Первое наблюдение радиоисточника на РАТАН-600 состоялось практически на следующий день после завершения геодезической юстировки северного сектора радиотелескопа [3], но

для наблюдений на более коротких волнах эффективность антенны была еще недостаточной.

Выяснилось, что эффективность АПП можно повысить с помощью введения так называемых «кинематических» поправок. Ю.К. Зверев участвовал в работах по исследованию кинематических характеристик элементов антенны, которые можно было получить только геодезическими методами. Удалось существенно улучшить качество отражающей поверхности главного зеркала [4]. Так введение поправок за калибровку угломестных винтов (кривая 2 на рис. 173, слева) и поправок за систематическую разность между автоколлимационным и геодезическим методом (кривая 3 на рис. 173, слева) существенно увеличило эффективную площадь антенны, что видно по увеличению яркостной температуры источника (рис. 173, слева).

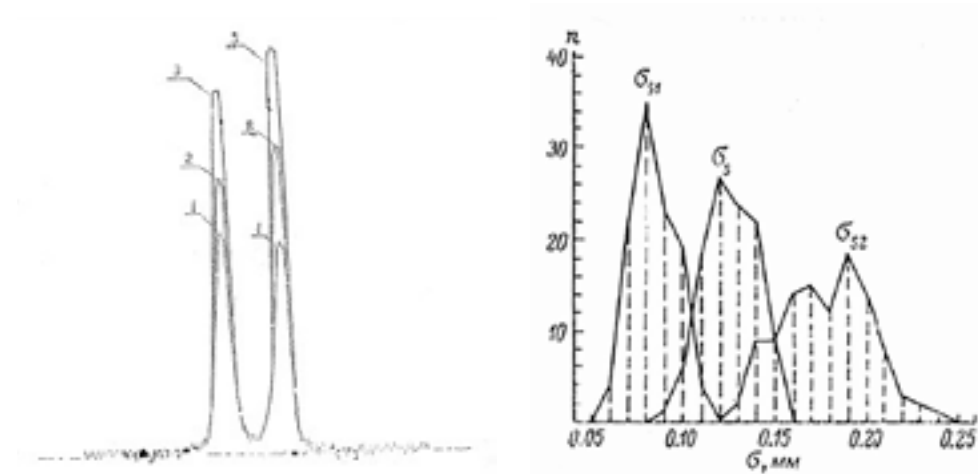


Рис. 173. Слева – сканы прохождения радиоисточника Лебедь А через диаграмму направленности радиотелескопа. Кривая 1 – отклик антенны без учета поправок; 2 – после введения поправок за калибровку угломестных винтов; 3 – при введении поправок за систематическую разность между автоколлимационным и геодезическим методом. Справа – распределение среднеквадратичных ошибок поверхности всех щитов кругового отражателя с новым материалом «обиивки» и отъюстированных по измененной методике. σ_{S1} – для центральной части щита, σ_{S2} – для краев щита, σ_S – для всего щита.

Ю.К. Зверев разработал геодезическую сеть РАТАН-600, с помощью которой осуществляется эффективный взаимный контроль положения ее пунктов. Им был предложен способ разбивки фундамента кольцевых сооружений, который был использован при строительстве кругового отражателя РАТАН-600.

В 1974 г. Ю.К. Зверев защитил кандидатскую диссертацию на тему «Геодезические методы юстировки больших радиотелескопов с антеннами переменного профиля БПР и РАТАН-600».

Разработанные им методы используются и в настоящее время как в юстировочных работах, так и в измерениях поверхности вторичных зеркал и главного отражателя РАТАН-600.

Ю.К. Зверев показал, что качество антенны можно существенно повысить, изменив форму и улучшив поверхность отдельных элементов РАТАН-600. Такая работа была проведена для всех 1024 отражающих элементов антенны. В результате

была достигнута точность поверхности элемента 0.2–0.3 мм, что привело к уменьшению рассеяния на коротких длинах волн.

Работа по «переобшивке» элементов антенны, а также разработке новых методов юстировки проводилась в несколько этапов. Отметим, что недостатком геодезического метода является его большая трудоемкость, поскольку для юстировки отражающий элемент антенны снимают и перевозят на ступень для измерений, а затем ставят обратно. Ю.К. Зверев разработал методы, позволяющие проводить корректировку поверхности без снятия щита. Это особенно важно для контроля поверхности АПП, поскольку ее качество при эксплуатации ухудшается, антенна «стареет», что связано с раскручиванием регулировочных винтов. Позже В.Б. Хайкин предложил фиксировать регулировочные винты специальными пружинками для предотвращения их раскручивания. Тем самым удалось добиться как высокой точности, так и стабильности отражающей поверхности.



Рис. 174. Ю.К. Зверев рядом с элементом антенны БПР. Юстировка БПР.

Ю.К. Зверев провел большую работу по геодезической юстировке элементов плоского отражателя и выставлению в створ от струны каждого отдельного щита. Это позволило получить единый створ на всю длину плоского отражателя со средней квадратичной ошибкой ± 0.3 мм. Контрольные измерения, выполненные с применением современного геодезического оборудования, демонстрируют высокую точность и стабильность положения щитов плоского отражателя.

Под руководством Ю.К. Зверева были проведены работы по улучшению отражающей поверхности вторичных зеркал и постоянному контролю качества их отражающей поверхности.

Наиболее существенным вкладом Ю.К. Зверева в отечественную радиоастрономию было его участие в создании РАТАН-600, а также в реконструкции БПР, которая улучшила качество поверхности антенны до 1 мм, что позволило измерить температуру и давление на поверхности Венеры на волне 8 мм.

Юрий Кузьмич – автор более 40 научных работ в области фундаментальных астрономических исследований космических радиисточников, разработки и внедрения геодезических методов юстировки больших радиотелескопов, проектирования, обеспечения радиоастрономических наблюдений.

Он отмечен государственными наградами: орденом Трудового Красного Знамени (1978 г.) и медалями «Ветеран труда» и «В память 300-летия г. Санкт-Петербурга» (2003 г.).

Мне посчастливилось работать с Ю.К. Зверевым при юстировке БПР и в работах по определению наклона вторичного зеркала в августе 2006 г., а на РАТАН-600 – в работах по определению наклона вторичного зеркала облучателя №5. Самые хорошие воспоминания об этом замечательном человеке навсегда останутся в памяти у тех, кому довелось с ним сотрудничать.

ПУБЛИКАЦИИ

- [1] Зверев Ю.К., Копылов А.И., Шиврис О.Н. Реконструкция Большого Пулковского радиотелескопа, Известия ГАО в Пулкове, № 185, 1970, С.219-235.
- [2] Белевитин А.Г., Зверев Ю.К. Геодезические работы при строительстве и юстировке радиотелескопа РАТАН-600, Известия ГАО в Пулкове., № 188, 1972, С.114-119.
- [3] Батуринцева Е.В., Зверев Ю.К., Коркин Э.И., Крылова С.Я., Миленко В.Ф., Хилькова Е.К. Геодезические методы определения мест нулей элементов кругового отражателя радиотелескопа РАТАН-600. Научно-технический отчет. САО АН СССР. 1976.
- [4] Зверев Ю.К., Голосова С.Я. Геодезическое обеспечение наблюдений в миллиметровом диапазоне длин волн на РАТАН-600, Сообщения САО, Вып. 63, 1989, С. 8-17.

Материал подготовлен Жаровым В.И.

СНЕЖКО Леонид Исаакович (03.11.1940–19.05.2011)



*Рис. 175. Л.И. Снежко, к.ф.-м.н.,
ответственный астроном БТА,
ведущий научный сотрудник
(2003 г.).*

Леонид Исаакович Снежко в 1962 г. окончил Уральский государственный университет в г. Свердловске (ныне УрФУ, Екатеринбург) и поступил в аспирантуру ГАИШ МГУ им. М. В. Ломоносова, после окончания которой работал ассистентом кафедры астрономии и младшим научным сотрудником Коуровской обсерватории УрГУ (1966–1969 гг.). С 1969 до 2003 гг. он постоянно работал в САО сначала младшим научным сотрудником, с 1974 по 1979 гг. был заведующим отделом физики звезд и туманностей, заместителем директора по научной работе (1985–1991 гг.) и с 1991 по 2003 гг. – ведущим научным сотрудником и ответственным астрономом БТА.

Основные научные интересы Л.И. Снежко лежали в области исследования внутреннего строения и эволюции звезд и двойных систем, исследований крупногабаритной астрономической оптики.

В конце 60-х – начале 70-х гг. им был опубликован ряд исследований по физике и эволюции тесных двойных систем. В частности, результаты исследования по расчетам сценариев эволюции таких систем обобщены в фундаментальной работе по их

классификации, написанной совместно с М. А. Свечниковым в 1974 г. Его астрофизические работы последующего периода посвящены в основном изучению горячих звезд, количественному анализу их атмосфер, исследованию эффектов в протяженных фотосферах сверхгигантов, приводящих к искажениям профилей линий. Одним из многолетних соавторов этих работ являлся В. В. Леушин.

Заслуги Л.И. Снежко перед российской астрономией и САО РАН неоспоримы. Хорошо известны его классические работы в области эволюции звезд. Он первым в мире предложил идею перемены ролей в тесных двойных системах, на которой сейчас основана вся астрофизика двойных звезд.

Пионерскими для нашей науки стали работы Леонида Исааковича по моделированию атмосфер горячих звезд. Его исследования звездных ветров и химического состава звезд также были одними из первых в стране.

С середины 70-х гг. основные интересы Леонида Исааковича сместились в область исследований астрономической оптики, что было обусловлено, прежде всего, потребностями исследования оптики 6-м телескопа БТА, особенностей микроклимата его гигантской башни. Под его руководством была проведена работа по оптимизации условий работы телескопа, вплоть до конца 90-х гг. проводилась реконструкция автоматизированной системы управления телескопом. Леонид Исаакович лучше всех знал зеркало БТА, и сам 6-метровый телескоп долгое время находился под его опекой.

Его уникальный опыт был бесценным для САО РАН, он был востребован и в других обсерваториях страны и ближнего зарубежья. Благодаря Л.И. Снежко путевку в жизнь получили крупные телескопы Болгарии, Абастумани, Терскола.

Результаты этих работ нашли отражение в защищенной им диссертации кандидата физико-математических наук «Исследование оптики больших телескопов» (1980).

За участие в работах по освоению и исследованию 6-м телескопа был награжден медалью «За трудовое отличие» (1976). Его работы по исследованию и контролю крупногабаритной оптики были отмечены серебряной медалью ВДНХ (1978) и премией Совета Министров СССР (1982). Автор более 60 научных работ.

Материал подготовлен В.В. Власюком.

СОБОЛЕВА Наталья Сергеевна (17.07.1933–01.01.2012)



Рис. 176. Слева – ведущий научный сотрудник, д.ф.-м.н. Н.С. Соболева (2010 г.); справа – первое наблюдение (12 июля 1974 г.) на РАТАН-600. В центре - Н.С. Соболева, на заднем плане слева направо – Г.М. Тимофеева, Л.С. Уголькова и Ю.Н. Парийский.

Наталья Сергеевна Соболева окончила МГУ в 1955 г. и была направлена в Главную (Пулковскую) астрономическую обсерваторию. Здесь ее зачислили в только что созданный отдел радиоастрономии, которым руководил профессор С.Э. Хайкин, основатель экспериментальной радиоастрономии в СССР.

Д.В. Корольков предложил Н.С. Соболевой принять участие в поисках круговой поляризации радиоизлучения Солнца. Он хорошо знал Наталью – в 1954 г. она, будучи студенткой МГУ, проходила у него практику. Теперь он поручил ей исследование нового синхронного детектора, обязательного для тех лет устройства на выходе радиометра. Далее начались поисковые наблюдения Солнца на 3-м радиотелескопе около западного корпуса ГАО. Она столкнулась тут со сложными проблемами инструментальных паразитных поляризаций. Борьба с «паразитами» требовала мониторинга Солнца от восхода до захода в течение многих недель и, наконец, увенчалась успехом.

Работа по уничтожению инструментальной поляризации была важна методически. Особенно острая проблема возникла при наблюдении на антенне переменного профиля БПР. Для решения задачи Н.С. Соболева привлекла теоретиков Н.А. Есепкину и В.Ю. Петрунькина, а затем внедрила предложенный ими метод борьбы с помощью так называемых «сеток». Только после этого ей удалось провести исследования на БПР «замагниченных высокотемпературных образований» над пятнами и доказать их стабильность в течение месяцев. Астрономам на механико-математическом факультете МГУ не давали необходимых сведений по физике плазмы в магнитном поле, и

Н.С. Соболева многие недели штудировала основные классические работы в этой области, переводя на русский язык зарубежные статьи. Это позволило ей создать теорию плазменных образований и предложить простые методы определения их параметров по данным многочастотных радионаблюдений. Следует здесь напомнить, что в те годы во многих странах физики пытались создать стабильные «магнитные ловушки» для горячей плазмы, и в литературе описывались успешные эксперименты по удержанию плазмы в таких ловушках в течении нескольких секунд. Это направление интересовало физиков в связи с поиском путей реализации ядерных источников энергии. Стабильность плазменных образований в течение многих недель не укладывалась в модельные схемы тех лет, и это было неожиданностью для физиков.

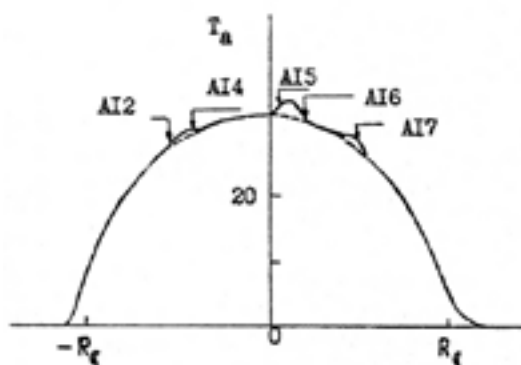


Рис. 177. Слева – вид АПП РАТАН-600 после введения «кинематических поправок»; справа – обнаружение с помощью РАТАН-600 ALSEP-ов (Apollo Lunar Surface Experiment Package) на Луне.

В 1956–1958 гг. Наталья Сергеевна была одним из авторов первых в мире результатов по обнаружению круговой поляризации солнечного радиоизлучения на сантиметровых волнах, а также уточнению геометрии и физики долгоживущих замагниченных плазменных образований в нижней хромосфере Солнца.

Она разработала методику определения магнитного поля излучающей области, расположенной над солнечным пятном, а также была инициатором использования метода затмения (покрытия Солнца Луной) для уточнения координат и высоты над фотосферой этих образований.

Особенно ярко она проявила характер и научную принципиальность в период солнечного затмения, которое наблюдалось на о. Хайнань (Китай), рядом с о. Тайвань. Появление на Хайнане нескольких радиотелескопов из Советского Союза было интерпретировано Тайванем как военная угроза, и в момент затмения над экспедицией из СССР стали кружить военные самолеты. Китайская сторона потребовала немедленного прекращения наблюдений и ухода в заранее подготовленные убежища. Однако Н.С. Соболева и Д.В. Корольков уйти категорически отказались и продолжили наблюдения, которые привели к важным результатам по плазменным образованиям на пятнах, в отличие от команды оптиков, которые провели наблюдения только частично.

Ею был установлен предел на дипольное магнитное поле Солнца, что широко обсуждалось в 60-х годах. В течение двух лет она следила за вариациями эффекта Фарадея при покрытии солнечной короны сильно поляризованного радиоисточника.

Этот эксперимент позволил установить ограничение на величину общего эклиптического поля. Позднее стало ясно, что магнитное поле Солнца имеет не дипольную, а спиральную структуру, формируемую солнечным ветром.

К результатам, полученным Н.С. Соболевой на БПР, следует отнести первые радиоизображения Крабовидной туманности в поляризованном излучении на сантиметровых волнах, а также первое детальное исследование поляризации радиоизлучения Луны и наиболее точное определение диэлектрической проницаемости лунной поверхности.

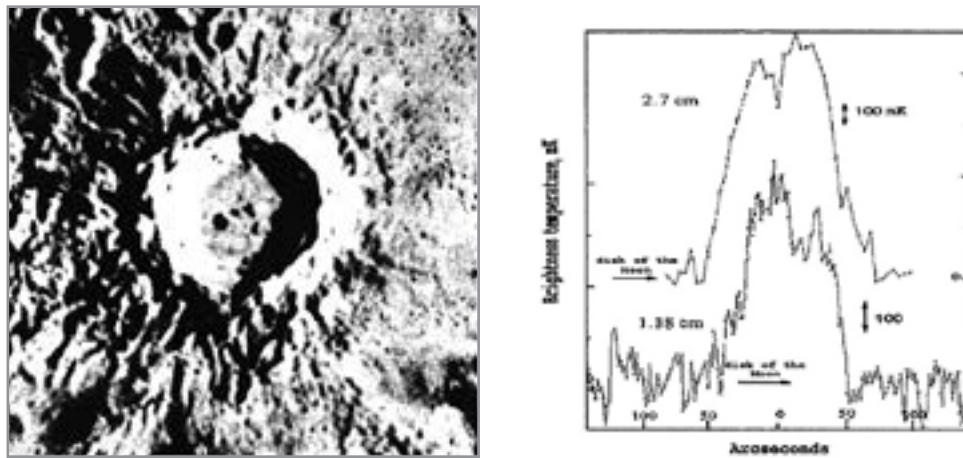


Рис. 178. Кратер «Коперник» на Луне в оптическом диапазоне (слева) и в радиодиапазоне по данным РАТАН-600 (справа).

Наталья Сергеевна – активный участник работ по вводу в строй радиотелескопа РАТАН-600. Блестящий методист, она сыграла огромную роль в организации первых наблюдений на РАТАН-600. Н.С. Соболева оказала неоценимую помощь в исследовании многочисленных факторов, снижающих эффективность радиотелескопа. Без использования каких-либо компьютеров она вычисляла около 6000 так называемых «кинематических поправок» для учета отклонения формы антенны от проектной по формулам, разработанным Ю.К. Зверевым и О.Н. Шиврисом. Благодаря этому удалось существенно повысить чувствительность инструмента.

К методическим достижениям Н.С. Соболевой относится предложенный и внедренный ею в наблюдения «метод неподвижного фокуса», который позволил существенно повысить точность определения плотности потока исследуемых радиоисточников.

При исследовании Луны на РАТАН-600 Н.С. Соболева неожиданно обнаружила мощное излучение активных излучателей, установленных США и считавшихся выключенными по требованию мировой общественности (ALSEPs, Apollo Lunar Surface Experiment Package). Обнаруженные яркие детали были исследованы в 6 азимутах на РАТАН-600, что позволило определить точные координаты и доказать совпадение их с положениями ALSEP-ов (рис. 177, справа). До этого такого широкого использования всех «азимутов» на РАТАН-600 никто не пробовал осуществить. Эти наблюдения активно обсуждались на заседании Президиума РАН в 1977 г.

Впервые Н.С. Соболевой с помощью радиоастрономических методов было показано, что кратеры на Луне имеют свойства поверхности, отличные от средних (рис. 178). Также ею была обнаружена асимметрия в распределении поляризованного излучения в поясах радиации Юпитера. Это было интерпретировано как возможное действие солнечного ветра, что отвергалось теорией тех лет, поскольку считалось, что ветер не может проникать на такие расстояния, но было подтверждено много лет позднее.

Наталья Сергеевна являлась активным участником многочастотного патрулирования переменных радиоисточников и сопоставления данных РАТАН-600 с вариациями структуры по РСДБ-данным.

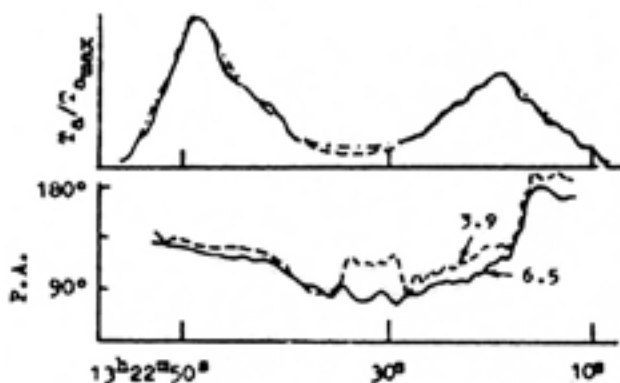


Рис. 179. Перемычка между компонентами мощной радиогалактики Центавр-А. Данные дециметрового диапазона (вверху) и поляризационные наблюдения на 3.9 и 6.5 см (внизу). Малое изменение интенсивности в поляризованном излучении говорит об однородности структуры магнитного поля в джете.

Докторская диссертация Н.С. Соболевой была связана с первыми радиоизображениями радиогалактик в сантиметровом диапазоне с достаточно высоким угловым разрешением, что позволило исследовать вариации спектрального индекса от центра к периферии. Она доказала существование перемычки с плоским спектром между радиокомпонентами известного радиоисточника Центавр-А (рис. 179) много раньше зарубежных исследований.

Последние десятилетия Н.С. Соболева была активным участником международного проекта «Большое Трио» (РАТАН-600, VLA, БТА), в результате которого была обнаружена одна из самых далеких радиогалактик ($z = 4.515$) во Вселенной. Работы по этому проекту она продолжала до последнего года своей жизни. Этот проект был отмечен Советом по астрономии в числе основных достижений РАН в декабре 2011 г.

Наталья Сергеевна Соболева – автор более двухсот работ в области радиоастрономии и физики Солнечной системы. За вклад в науку и участие в освоении радиотелескопа РАТАН-600 она награждена медалью «За трудовую доблесть».

Материал подготовлен Ю.Н. Парийским, А.В. Темировой.

ФОМЕНКО Александр Федорович (18.10.1938 – 01.12.2013)



Рис. 180. А.Ф. Фоменко – заместитель директора по научной работе (80-е годы).

Александр Федорович Фоменко в 1963 г. окончил Московский инженерно-физический институт (МИФИ). В течение 9 лет он работал в должности инженера, учился в аспирантуре МИФИ, занимался преподавательской деятельностью, защитив в это время диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук (1970 г.). С 1972 г. Александр Федорович работал в Специальной астрофизической обсерватории АН СССР, сначала – старшим инженером, впоследствии – младшим научным сотрудником, старшим научным сотрудником, заместителем директора по научной работе, заведующим лабораторией. В 1994–1999 гг. он – ведущий инженер-электроник САО РАН.

Александр Федорович поступил на работу в лабораторию астросветоприемников в июне 1972 г., и с тех пор его жизнь была неразрывно связана с оптическим приборостроением.

В 1973 г. возглавил созданную по его инициативе научно-техническую группу оптико-электронных многоканальных систем (ОЭМС), задачами которой были развитие спектроскопических, фотометрических и других телевизионных методов наблюдений на 6-м телескопе. В 1979 г. группа была преобразована в лабораторию перспективных разработок, которой он руководил до 1986 г.

Одновременно он являлся заместителем заведующего отделом научно-технических проблем БТА (отдел возглавлял И.М. Копылов), в функции которого входило выполнение многочисленных практических задач САО, связанных с монтажом, наладкой и освоением 6-м телескопа, обучением технического и научного персонала работе на телескопе, подготовкой к эксплуатации БТА.

Александр Федорович руководил рабочей группой по исследованию главного зеркала (ГЗ) БТА. Эти работы включали разработку оперативных методов контроля 6-м зеркала в процессе его изготовления в цеховых условиях, их применение для

исследования зеркала на заключительных стадиях его изготовления, подготовку ГЗ к аттестации.

В 70-е годы по инициативе А.Ф. Фоменко группой ОЭМС разработан первый в отечественной астрономии телевизионный спектрофотометр для первичного фокуса БТА, в основу работы которого были положены принципы телевизионного счета фотонов.



Рис. 181. Лаборатория перспективных разработок (70-е годы). На снимке (слева направо): Г.С. Чепурных, В.Б. Небелицкий, В.П. Рядченко, С.В. Маркелов, В.И. Удодов, Г.А. Чунтонов, А.Н. Борисенко, С.Н. Клочков, И.И. Балега, О.И. Спиридонова, Р. Верещагина, А.Ф. Фоменко, Л.В. Громакова, Л. Фоменко, Т. Сомова.

В 1975 г. в обсерватории усилиями Э.Б. Гажура, М.М. Кононова, В.Б. Небелицкого, А.Ф. Фоменко был введен в строй телевизионный телескоп ТТ-600, спроектированный и построенный на основе узлов модели 6-метрового телескопа. На этом телескопе под руководством А.Ф. Фоменко на протяжении нескольких лет проводились экспериментальные и наблюдательные работы с телевизионной аппаратурой, которые дали много полезных практических результатов в части выработки требований к будущей аппаратуре 6-м телескопа.

В начале 80-х им совместно с Ю.Ю. Балегой и Н.Н. Сомовым была создана первая телевизионная цифровая система накопления и обработки панорамных астрономических изображения и на ее основе – телевизионный спекл-интерферометр БТА совместно с Ю.Ю. Балегой и Н.Н. Сомовым. К началу 1985 г. Е.И. Николаевым,

А.Ф. Фоменко, С.В. Маркеловым с коллегами и в сотрудничестве с ВНИИ телевидения (Ленинград) создан телевизионно-вычислительный комплекс КВАНТ, в котором были разработаны и применены средства цифровой обработки изображений. К началу 1986 г., благодаря внедрению комплекса КВАНТ на БТА, в методах наблюдений слабых объектов цифровые телевизионные системы окончательно вытеснили ЭОП с фотографической регистрацией.



Рис. 182. Слева – испытания комплекса «Квант». С.Н. Додонов, С.В. Драбек, Н. Шпекина и специалисты ВНИИ телевидения (г. Ленинград); справа – В.С. Рылов, А.Ф. Фоменко, Д.Я. Мартынов на конференции.

Деятельность А.Ф. Фоменко в должности заместителя директора по научной работе (1975–1985 гг.) отличалась большой инициативностью, самостоятельностью и оперативностью. По воспоминаниям Виктора Леонидовича Афанасьева, главного научного сотрудника обсерватории, Александр Федорович ежедневно поднимался на БТА, чтобы контролировать весь рабочий процесс.

Александр Федорович был заместителем руководителя методологического семинара САО, руководил техническим советом оптического сектора и общественным отделом кадров обсерватории.

А.Ф. Фоменко внес значительный вклад в развитие и внедрение цифровых систем и методов наблюдений на БТА, непосредственно участвовал в становлении научно-технической деятельности обсерватории.

Александр Федорович – автор более 70 трудов, был избран членом МАС. За участие в работах по изготовлению главного зеркала БТА А.Ф. Фоменко в 1977 г. был награжден орденом «Знак Почета».

Материал подготовлен Е.И. Кайсиной.

БЕРЛИН Александр Борисович (26.12.1936 – 05.01.2015)



Рис. 183. Слева: А.Б. Берлин – главный конструктор РАТАН-600 по радиоэлектронному оборудованию, к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник (2007 г.). Справа: А.Б. Берлин и Д.В. Корольков на облучателе (1980 г.).

После окончания средней школы в августе 1954 г. Александр Борисович Берлин поступил на работу старшим лаборантом в отдел радиоастрономии ГАО АН СССР, и с тех пор его жизнь была неразрывно связана с радиоастрономическим приборостроением. После окончания Северо-западного политехнического института (г. Ленинград) он стал работать инженером-конструктором в этом же отделе.

Начиная с 1969 г. Александр Борисович – ведущий конструктор САО АН СССР, затем заведующий лабораторией высокочувствительных приемных устройств (с 1976 г.) и главный конструктор РАТАН-600 по радиоэлектронному оборудованию. В 1984 г. он защитил кандидатскую диссертацию на тему «Высокочувствительный радиометрический комплекс РАТАН-600 для исследования космических радиоисточников в сплошном спектре».

Сначала А.Б. Берлин создавал радиометры для БПР – первого крупного радиотелескопа в мире с антенной переменного профиля, затем участвовал в разработке приемной аппаратуры и в наблюдениях солнечных затмений в Новой Зеландии, Мексике и на Кубе.

В 70-е годы А.Б. Берлин внес решающий вклад в оснащение радиотелескопа РАТАН-600 уникальным многочастотным приемным комплексом. С первых дней работы и по настоящее время на инструменте проводятся измерения космического радиоизлучения от объектов Солнечной системы, галактических и внегалактических объектов вплоть до флуктуаций реликтового фона. Школа А.Б. Берлина и Д.В. Королькова стала ведущей в области радиоастрономического приборостроения в СССР. Здесь были впервые разработаны и применены туннельные и параметрические

усилители, а в 80-е годы были начаты пионерские работы по внедрению широкополосных малощумящих транзисторных усилителей с криогенным охлаждением. Впервые в стране были применены и в течение более 30 лет массово использовались микрокриогенные системы водородного уровня охлаждения, обеспечивавшие чувствительность радиометров на мировом уровне.

Созданный под руководством Александра Борисовича многочастотный комплекс высокочувствительных радиометров до сих пор поставляет основной поток наблюдательных данных на РАТАН-600, но уже на современной элементной базе – неохлаждаемых транзисторных усилителях на гетероструктурах.

А.Б. Берлин был организатором сотрудничества с профильными предприятиями страны, направленного на оснащение радиотелескопа новейшими достижениями приемной техники. Он был идеологом создания и успешной реализации всех вариантов уникального 16-канального матричного комплекса МАРС в диапазоне 30 ГГц. В проекте ОКТАВА им впервые в России была технически реализована идея сверхширокополосного первичного облучателя с единым фазовым центром на дециметровых волнах.

Александр Борисович являлся членом МАС, был членом бюро совета РАН по теме «Радиоастрономия». За доблестный труд А.Б. Берлин в 1978 г. был награжден орденом «Знак Почета», а впоследствии – медалью «Ветеран труда».

Александр Борисович Берлин обладал непререкаемым авторитетом, его экспертная оценка была решающей для других специалистов по радиометрическим устройствам в России. Дело А.Б. Берлина достойно продолжают его ученики.



Рис. 184. Сотрудники лаборатории радиометров континуума (слева направо) Р.Ю. Удовицкий, Н.А. Нижельский, А.Б. Берлин, Б.И. Карабашев, Д.В. Кратов.

Материал подготовлен Н.А. Нижельским.

ЛЕУШИН Валерий Владимирович (31.10.1940–03.07.2015)



Рис. 185. В.В. Леушин – ведущий научный сотрудник, д.ф.-м.н., руководитель Московского отдела САО РАН, профессор кафедры физики космоса ЮФУ (2015 г.).

Валерий Владимирович Леушин в 1959–1964 гг. учился в Ростовском государственном университете (РГУ), затем в аспирантуре КрАО АН СССР (1965–1968 гг.). В 1969 г. он поступил на работу в САО АН СССР, где работал младшим научным сотрудником до 1972 г. С 1972 г. В.В. Леушин преподавал в РГУ на кафедре физики космоса, сначала старшим преподавателем (1972–1978 гг.), затем доцентом (1978–1990 гг.) и профессором (1990–2015 гг.). В 1995 г. он был принят на работу в САО РАН руководителем Московского отдела и ведущим научным сотрудником (1995–2015 гг.).

В 1971 г. Валерий Владимирович защитил кандидатскую диссертацию по теме «Количественное исследование пекулярностей Ар-звезд на основе спектральной классификации».

В 1977 г. он ввел в обиход спектроскопический параметр пекулярности, который вплоть до настоящего времени повсеместно используется в спектроскопии пекулярных звезд. В период с 1984 по 1988 гг. Леушин выполнил пионерские систематические исследования особенностей химического состава массивных звезд в тесных двойных системах. Валерий Владимирович первым отметил аномально высокое содержание гелия в атмосферах таких звезд. В 1988 г. он провел с использованием приемников сравнительно низкого разрешения пионерские исследования относительной распространенности углерода и азота в таких звездах и подтвердил ожидаемый в двойном CNO-цикле дефицит углерода и избыток азота.

В 1989 г. он защитил докторскую диссертацию по теме «Эволюционные изменения химического состава двойных звезд».

В.В. Леушину принадлежит целый ряд фундаментальных результатов, многие из которых активно цитируются и по сей день. В основном они лежат в области спектроскопии звезд с аномальным химическим составом и магнитных звезд.

В. В. Леушин долгое время преподавал на физическом факультете РГУ (ныне ЮФУ). Курсы «Физика звездных атмосфер», «Ядерная астрофизика» всегда ассоциировались с именем В.В. Леушина. Все выпускники кафедры физики космоса были его слушателями. В общей сложности, это - порядка полутысячи человек, 50 из них работают в астрофизике или в смежных областях науки.

Валерий Владимирович – автор более 120 научных публикаций.



Рис. 186. А. Леушина, В. Леушин, И. Уймаева, В. Мороз, В. Дебур. 1970 г.

Материал подготовлен Т.П. Пановой.

НАЙДЕНОВ Иван Дмитриевич (01.01.1947 – 26.12.2015)



Рис. 187. И.Д. Найденков – ведущий научный сотрудник, д.т.н.

В 1971 г. Иван Дмитриевич Найденков закончил Кабардино-Балкарский государственный университет (г. Нальчик). В 1972 г. был принят инженером в САО АН СССР, где и проработал более 40 лет.

В 1989 г. он защитил кандидатскую диссертацию на тему «Разработка и усовершенствование аппаратуры и методов для измерений магнитных полей звезд на 6-метровом телескопе», в 2004 г. защитил докторскую диссертацию на тему «Приборы и методы для спектрополяриметрических исследований на 6-метровом телескопе».

Основные научные работы Ивана Дмитриевича относятся к астрономическому приборостроению и методам обработки сигнала, он – автор и соавтор 60 публикаций, изобретений и патентов.

В 1975 г. он совместно с Г. А. Чунтоновым разработал первый анализатор круговой поляризации, с помощью которого на основном звездном спектрографе (ОЗСП) БТА выполнены многолетние спектрополяриметрические обзоры.

Также совместно с Г.А. Чунтоновым они создали звездный магнитометр с интерферометром Фабри-Перо, заложив основы техники интерферометрической спектроскопии на БТА. Он разработал и изготовил серию оригинальных поляриметрических и спектрополяриметрических устройств, послуживших экспериментальной основой направления звездного магнетизма в САО. Изготовил анализаторы поляризации для других телескопов. Иван Дмитриевич разработал (совместно с Н. Н. Сомовым) метод высокоскоростной спектрополяриметрии и

выполнил оригинальные исследования полярнов. Под руководством В.Е. Панчука И.Д. Найденов участвовал в создании эшелле-спектрограф фокуса Нэсмита (НЭС), являющегося в течение 20 лет основным прибором высокого разрешения на БТА. Он разработал оригинальный резатель изображения, что увеличило проникающую способность НЭС на одну звездную величину. Выполнил (совместно с В. Е. Панчуком) реконструкцию ОЗСП, что, в режимах спектроскопии и спектрополяриметрии, увеличило его проникающую способность на одну звездную величину. Разработал и изготовил (совместно с В. Е. Панчуком) первый эшелльный спектрополяриметр для главного фокуса БТА. Разработал и изготовил анализаторы линейной и круговой поляризации для эшелльных спектрографов среднего и высокого разрешения.

Большинство диссертационных работ сотрудников САО в области звездного магнетизма и спектрополяриметрии выполнено с использованием разработок И. Д. Найденова.



Рис. 188. Участники работ и наблюдений на Цейсс-1000: верхний ряд – В. Власюк, Н. Борисов, В. Михайлов, В. Бычков, Л. Бычкова, И. Варваркин, Е. Фоменко, И. Костюк, В. Амирханян, С. Митронова, Е. Барсукова, В. Романенко; нижний ряд – А. Буренков, В. Горанский, И. Найденов, Н. Сомов, Е. Ченцов.

Материал подготовлен В.Е. Панчуком.

Сокращения и аббревиатуры, встречающиеся в тексте

АГУ	Адыгейский Государственный Университет (г. Майкоп)
АЗТ	Астрономический Зеркальный Телескоп
ак.	академик РАН
АКЦ ФИАН	АстроКосмический центр ФИАН (г. Москва)
АМД	Автоматический МикроДенситометр
АО	Активная Область
АПП	Антенна Переменного Профиля
АСИ	Астрономический Спектральный Инструмент
АСП	Астрономический Спектральный Прибор
АСУ	Автоматизированная Система Управления
АТС	Автоматическая Телефонная Станция
АШ	Астрономическая Школа
АФШ	АстроФизическая Школа
АЯГ	Активное Ядро Галактики
БАО	Бюраканская Астрофизическая Обсерватория НАН РА (п. Бюракан)
БЕН	Библиотека Естественных Наук РАН
БНО	Баксанская Нейтринная Обсерватория ИЯИ РАН (п. Нейтрино, КБР)
БТА	Большой Телескоп Азимутальный с зеркалом диаметром 6 метров
ВАК	Всероссийская Астрономическая Конференция
ВНИИТ	Всероссийский НИИ Телевидения (г. Ленинград)
ВНП	Верхняя Научная Площадка
ВНТИЦ	Всероссийский научно-технический информационный центр
ВПС	Внутренние Полярные Структуры
ГАИ	Группа Антенных Измерений САО РАН
ГАИШ МГУ	Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга МГУ
ГАМР	Группа Аппаратурно-Методических Разработок СПбФ
ГАО НАНУ	Главная Астрономическая Обсерватория НАНУ (г. Киев)
ГАО, ГАО РАН	Главная Астрономическая Обсерватория РАН (Пулково)
ГАС ГАО	Горная Астрономическая Станция ГАО РАН (г. Кисловодск)
ГГВИ	Группа Галактических и Внегалактических Исследований СПбФ
ГЗ	Главное Зеркало оптического телескопа БТА
ГИВС	Группа Изучения Внегалактических Систем САО РАН

ГКГ	Голубая Компактная Галактика
гл.н.с.	главный научный сотрудник
ГНС	Группа Наблюдений Солнца САО РАН
ГОИ	Государственный Оптический Институт (г. Санкт-Петербург)
ГП	Главная Последовательность
ГПК	Галактики с Полярными Кольцами
ГРА	Группа Релятивистской Астрофизики САО РАН
ГРИС	Группа Радиоастрономических Исследований Солнца СПбФ
ГС	Горизонт Событий
ГСР	Группа Системных Разработок САО РАН
ГСЗ	Группа Спектроскопии Звезд САО РАН
ГЭСМ	ГрузоЭлектроСтройМонтаж (г. Москва)
диаграмма ГР	диаграмма Герцшпрунга-Рассела
д.ф.-м.н.	доктор физико-математических наук
ЗО	ЗвездоОбразование
ЗТШ	Зеркальный Телескоп им. Шайна (КрАО)
ЕЮО	Европейская Южная Обсерватория (Чили)
ИАиЭ	Институт автоматики и электрометрии СО РАН
ИБД	Интегрированный Банк Данных
ИВК	Измерительно-Вычислительный Комплекс
ИВС	Информационно-Вычислительная Сеть
ИК-диапазон	ИнфраКрасный диапазон электромагнитного излучения
ИКИ	Институт Космических Исследований РАН (г. Москва)
ИНАСАН	ИНСтитут Астрономии Академии Наук (г. Москва)
и.о.	исполняющий обязанности
ИОА СО РАН	Институт Оптики Атмосферы Сибирского Отделения РАН (г. Томск)
ИОНХ	Институт Общей и Неорганической Химии
ИПА РАН	Институт Прикладной Астрономии РАН (г. Санкт-Петербург)
ИПИ РАН	Институт Проблем Информатики РАН (г. Москва)
ИПЛИТ РАН	Институт Проблем Лазерных и Информационных Технологий РАН
ИПС	Информационно-Поисковая Система
ИПФ РАН	Институт прикладной физики РАН (г. Нижний Новгород)
ИриЭ	Институт Радиотехники и Электроники АН СССР
ИСЗФ	Институт солнечно-земной физики СО РАН (г. Иркутск)
ИТА	Институт Теоретической Астрономии АН

ИТМО	Институт Точной Механики и Оптики, теперь Университет ИТМО
ИТФ РАН	Институт Теоретической Физики РАН
ИФП	Интерферометр Фабри-Перо
ИФП СО РАН	Институт Физики Полупроводников СО РАН
ИЯИ РАН	Институт Ядерных Исследований РАН
КАМАК	англ. САМАС – Computer Automated Measurement and Control
КГУ	Казанский Государственный Университет, теперь КФУ (г. Казань)
КМП	Корональные Магнитные Пятна
КраО	Крымская Астрономическая Обсерватория (Республика Крым)
к.ф.-м.н.	кандидат физико-математических наук
КТБТ	Комитет по Тематике Больших Телескопов
КФ(П)У	Казанский Федеральный (Поволжский) Университет
КЧД	Координатно-Чувствительный Детектор
КЧР	Карачаево-Черкесская Республика
ЛАС	Лаборатория АстроСпектроскопии САО РАН
ЛАСУР	Лаборатория
ЛВАК	Лаборатория Внегалактической Астрономии и Космологии САО РАН
ЛВС	Локальная Вычислительная Сеть
ЛЗСО	Лыткаринский Завод Оптического Стекла (Лыткарино)
ЛИЗМ	Лаборатория Исследования Звездного Магнетизма САО РАН
ЛНИВЦ	Ленинградский научно-исследовательский вычислительный центр
ЛИИАИ	Ленинградский Институт Информатики и автоматизации АН СССР
ЛОМО	Ленинградское Оптико-Механическое Объединение
ЛОН	Лаборатория Обеспечения Наблюдений САО РАН
ЛПР	Лаборатория Перспективных Разработок САО РАН
ЛРА	Лаборатория РадиоАстрофизики
ЛРК	Лаборатория Радиометров Континуума САО РАН
ЛСФВО	Лаборатория Спектроскопии и Фотометрии Внегалактических Объектов САО РАН
ЛФЗ	Лаборатория Физики Звезд САО РАН
МАВР	группа Методов Астрономии Высокого Разрешения САО РАН
МАИК	Международная Академическая Издательская Компания
МАНИЯ	Многоканальный Анализ Наносекундных Изменений Яркости
МАРС	МАтричная Радиометрическая Система
МАС	Международный Астрономический Союз

МАСТЕР	глобальная роботизированная сеть телескопов-роботов (МГУ)
МВ	МикроВсплески
МВК	МежВедомственная Комиссия
МГА-2009	Международный Год Астрономии
МГУ	Московский Государственный Университет
Минобрнауки	Министерство образования и науки Российской Федерации
ММТ	Мини-МегаТОРТОРА
МКФ	Микроволновой Космологический Фон
МШУ	МалоШумящий Усилитель
НАН РА	Национальная Академия Наук Республики Армения
НАНУ	Национальная Академия Наук Украины
НИВЦ МГУ	Научно-Исследовательский Вычислительный Центр МГУ
НИИ ПП	НИИ Полупроводниковых Приборов (г. Томск)
НИИ ПФ	Научно-Исследовательский Институт Прикладной Физики
НКТРТ	Национальный Комитет по Тематике Российских Телескопов
ННП	Нижняя Научная Площадка
НПФ	Научно-Производственная Фирма
НСА РАН	Научный Совет по Астрономии РАН
НСР	Научный Совет по комплексной проблеме «Радиоастрономия» АН СССР
НЭС	Нэсмитовский Эшелле-Спектрограф
ОГС	Опорная Геодезическая Сеть
ОЗСП	Основной Звездный СПектрограф
ОИ	Отдел Информатики, с 2005 г. – ЛИ (Лаборатория Информатики)
ОС	Операционная Система
ОУУ	Отсчетно-Установочных Устройств
ОФЗ	Отдел Физики Звезд
ОФН РАН	Отделение Физических Наук РАН
ПЗС	Прибор с Зарядовой Связью
ПКБ	Проектно-Конструкторское Бюро
ППЭВМ	Профессионально- Персональная ЭВМ
ПЭВМ	Персональная Электронно-Вычислительная Машина
РАЕН	Российская Академия Естественных Наук
РАМН	Российская Академия Медицинских Наук
РАН	Российская Академия Наук
РАСХ	Российская Академия Сельского Хозяйства

РАТАН-600	РадиоТелескоп Академии Наук диаметром 600 метров
РВО	Российская Виртуальная Обсерватория
РГУ	Ростовский Государственный Университет, теперь ЮФУ
РНФ	Российский Научный Фонд
РОКОС	РадиоОбъект с Континуальным Оптическим Спектром
Роснаука	Федеральное агентство по науке и инновациям
РосНИИРОС	Российский НИИ Развития Общественных Сетей
РСДБ	Радиоинтерферометрия со СверхДлинными Базами
Рысь	эшелле-спектрограф высокого спектрального разрешения
САО РАН	Специальная Астрофизическая Обсерватория РАН
СГУ	Ставропольский Государственный Университет, теперь СКФУ
эффект СЗ	эффект Сюняева-Зельдовича
СибИЗМИР	Сибирский институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн СО РАН (Иркутск)
СКБ НИ	Специальное Конструкторское Бюро Научного Приборостроения СО РАН
СКО	СреднеКвадратичное Отклонение
СКФО	Северо-Кавказский Федеральный Округ
СКФУ	Северо-Кавказский Федеральный Университет
СМЧД	СверхМассивная Черная Дыра
СНГ	Союз Независимых Государств
СПбФ	Санкт-Петербургский Филиал САО РАН
ССРТ	Сибирский Солнечный РадиоТелескоп
СЭК БТА	Служба Эксплуатации Комплекса БТА
СЭК РАТАН	Служба Эксплуатации Комплекса РАТАН-600
ТГУ	Томский Государственный Университет
УВЧ	Усилитель Высокой Частоты
УДК	Универсальная Десятичная Классификация
УНУ	Уникальные Научные Установки
УрГУ	Уральский Государственный Университет
уставка	величина некоторого параметра системы управления
УФ-диапазон	УльтраФиолетовый диапазон
ФАНО	Федеральное Агентство Научных Организаций
ФИАН	Физический Институт им. П. Н. Лебедева РАН
ФЦП	Федеральная Целевая Программа
ФЭУ	ФотоЭлектронный Умножитель

Цейсс-1000	1-метровый телескоп САО РАН, изготовленный фирмой Цейсс
ЧД	Черная Дыра
ЦКП	Центр Коллективного Пользования
ЦНИИГАиК	Центрального научно-исследовательского института инженеров геодезии, аэрофотосъемки и картографии им. Ф.Н. Красовского
ЦНПО	Центральное Научно-Производственное Объединение «КАСКАД»
ШБ	Шумовые Бури
ЭВМ	Электронно-Вычислительная Машина
ЭОП	Электронно-Оптический Преобразователь
ЭЦУМ	Электронная Цифровая Управляющая Машина
ЮНЕСКО	UNESCO — United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
ЮНЦ РАН	Южный Научный Центр РАН
ЮФУ	Южный Федеральный Университет

ADU	Analog Digital Unit
AGB	Asymptotic Giant Branch
AGN	Active Galaxy Nucler
ALMA	Atacama Large Millimeter/submillimeter Array
AMBER	Astronomical Multi-Beam Recombiner
АРО	Apache Point Observatory
ARC	Astrophysical Research Consortium 3.5-meter Telescope
ASPID	Archive of Spectral, Photometric and Interferometric Data
BAT	Burst Alert Telescope
CATS	Astrophysical CATalogs support System
CERN	Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire
CFHT	Canada France Hawaii Telescope
CGI	Common Gateway Interface
CMB	Cosmological Microwave Background
CORONAS	Complex Orbital Observations Near-Earth of Activity of the Sun
CP-star	Chemical Pecular star
CSRH	Chinese Spectral RadioHeliograph
CUDA	Compute Unified Device Architecture
DAOPHOT	a stellar photometry package (P. Stetson)
DBD	DataBase Driver

DBI	DataBase Interface
DOLPHOT	a stellar photometry package (A. Dolphin)
E-ELT	European Extremely Large Telescope
ER-DAS	Embedded Radiometric Data Acquisition System
ESPaDOnS	Echelle SpectroPolarimetric Device for the Observation of Stars
FADPS	Flexible Astronomical Data Processing System
Fermi	Fermi Gamma-ray Space Telescope
FITS	Flexible Image Transport System
GLESP	Gauss-Legendre Sky Pixelization scheme for CMB-maps
GMRT	Giant Metrewave Radio Telescope
GOES	Geostationary Operational Environmental Satellite
GPU	Graphics Processing Unit
GRB	Gamma-Ray Burst
HEMT	High Electron Mobility Transistor
HIPPARCOS	High Precision PARallax COLlecting Satellite
HPC	High Performance Computing
HST	Hubble Space Telescope
HTTP	HyperText Transfer Protocol
IFP	Interferometer Fabri-Perrot
IMBH	Intermediate Mass Black Hole
IOTA	Infrared Optical Telescope Array
ISM	Industrial, Scientific and Medical radiobands, 2.4 GHz
IVOA	International Virtual Observatory Alliance
ISDN	Integrated Services Digital Network
ISIS	Imaging Speckle Interferometer in Space
ISM	InterStellar Medium
JENAM	Joint European and National Astronomy Meeting
LAMOST	Large Sky Area Multi-Object Fibre Spectroscopic Telescope
LBV	Luminous Blue Variables
LSBD	Low Surface Brightness Dwarf galaxy
LVG	Local Volume Galaxy database
MDI	Michelson Doppler Imager
MIDAS	Munich Image Data Analysis System
MOFS	Multi Object Fiber Spectrograph
MPFS	Multi Pupil Fiber Spectrograph

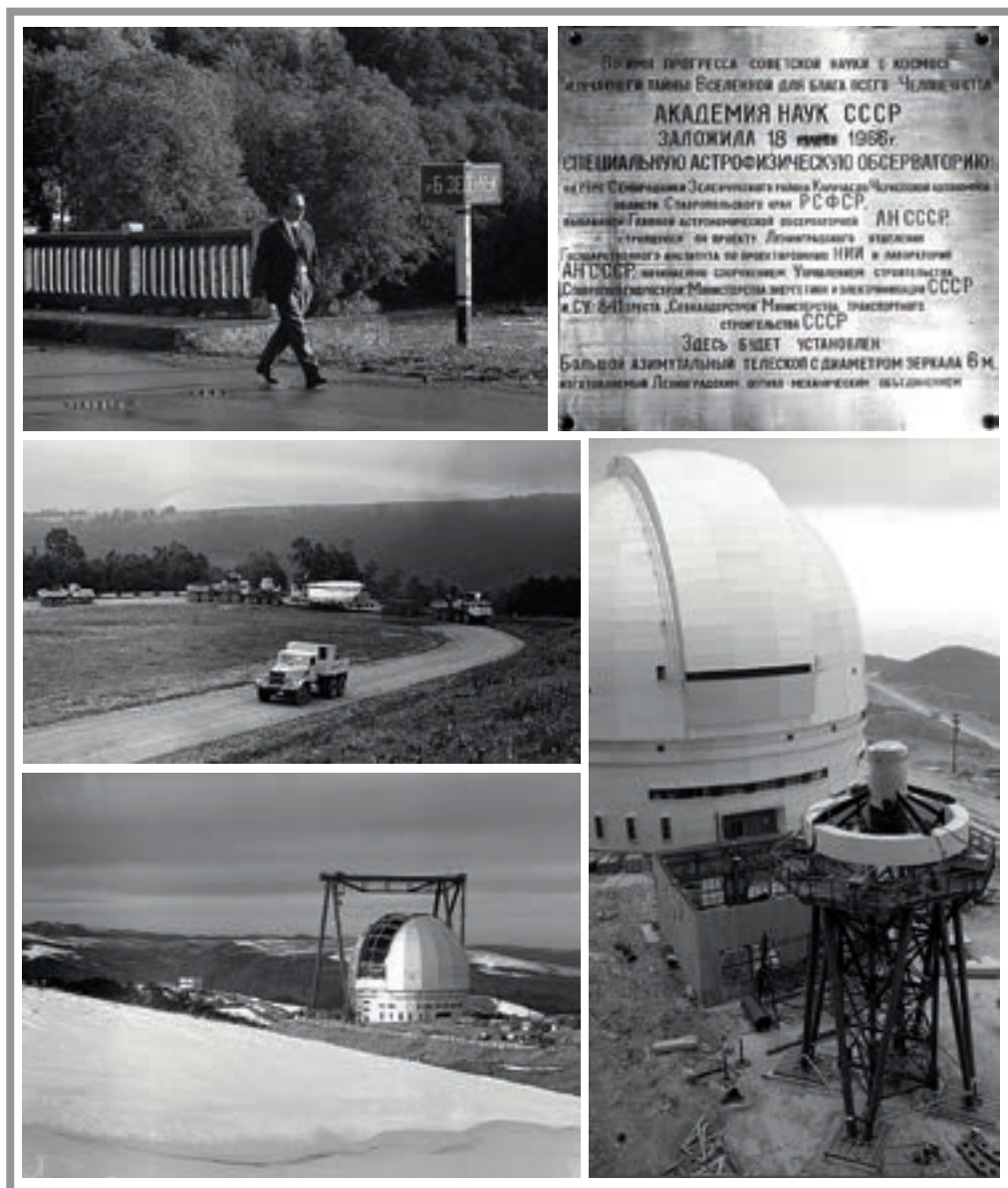
OASIS	Observation Archive Search Information System
ODA-R	Observational Data Archive – Radio
PCVISTA	FITS-based image processing package
PFES	Prime Focus Echelle Spectrograph
Planck	far-infrared wavelengths space observatory
POSS	Palomar Observatory Sky Survey
PRC	Polar Ring Catalog
PSF	Point Spread Function
post-AGB	post-Asymptotic Giant Branch
RHESSI	Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager
RXTE	Rossi X-ray Time Explorer
SALT	Southern African Large Telescope
SAURON	Spectrographic Areal Unit for Research on Optical Nebulae
SBS	Second Burakan Survey
SCORPIO	Spectral Camera with Optical Reducer for Photometrical and Interferometrical Observations
SDO	Solar Dynamics Observatory
SDSS	Sloan Digital Sky Survey
SFR	Star Formation Rate
SLIP	Serial Line Internet Protocol
SNR	SuperNova Remnant
SOHO	Solar and Heliospheric Observatory
SPID	Speckle Interferometre Differentiel
SPRC	Sloan-based Polar Ring Catalog
SSS	Super Soft
PPN	Proto-Planetary Nebula
PPP	Point-to-Point Protocol
Swift	Swift Gamma-Ray Burst Mission
TRACE	Transition Region And Coronal Explorer
TRGB	Tip of the Red-Giant Branch
Triplespec	cross-dispersed near-infrared spectrograph
UAGS	Universal Astronomical Grating Spectrograph
UCD	United Content Descriptor
ULX	Ultra-Luminous Xsources
UKIRT	United Kingdom Infra Red Telescope

USNO	an all-sky catalog that presents positions, proper motions, magnitudes
UUCP	Unix-to-Unix CoPy
UVES	Ultraviolet and Visual Echelle Spectrograph
WHT	William Herschel Telescope
WMAP	Wilkinson Microwave Anisotropy Probe
WR-star	Wolf–Rayet star
VMS	Very Massive Star
VLA	Very Large Array
VLT	Very Large Telescope
VLTI	Very Large Telescope Interferometer
VO	Virtual Observatory
VoIP	Voice over Internet Protocol
ΛCDM	Lambda Cold Dark Matter
1FGL	First Fermi Large Area Telescope First Source Catalog
2MASS	Two Micron All-Sky Survey

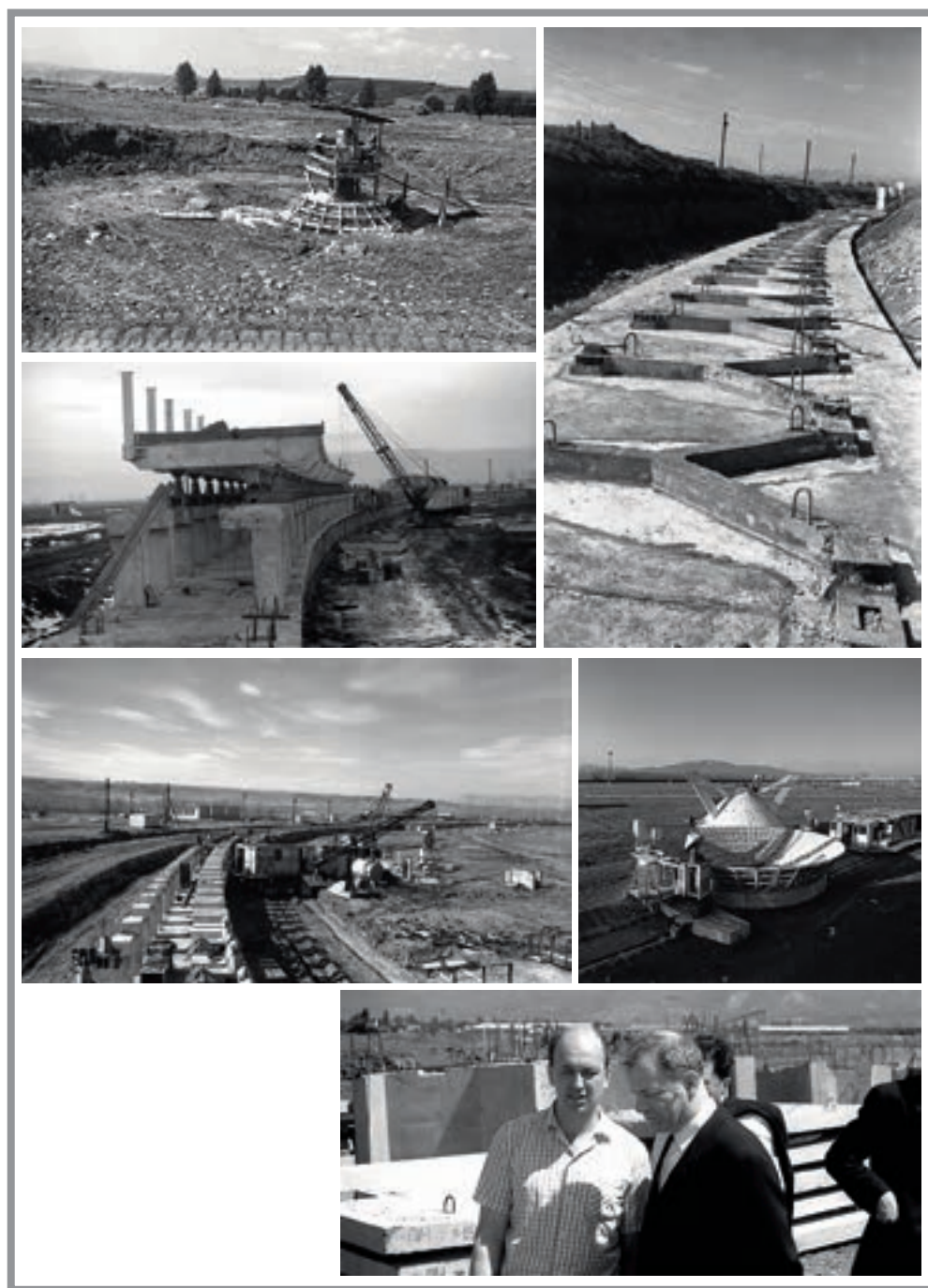


Фотоальбом

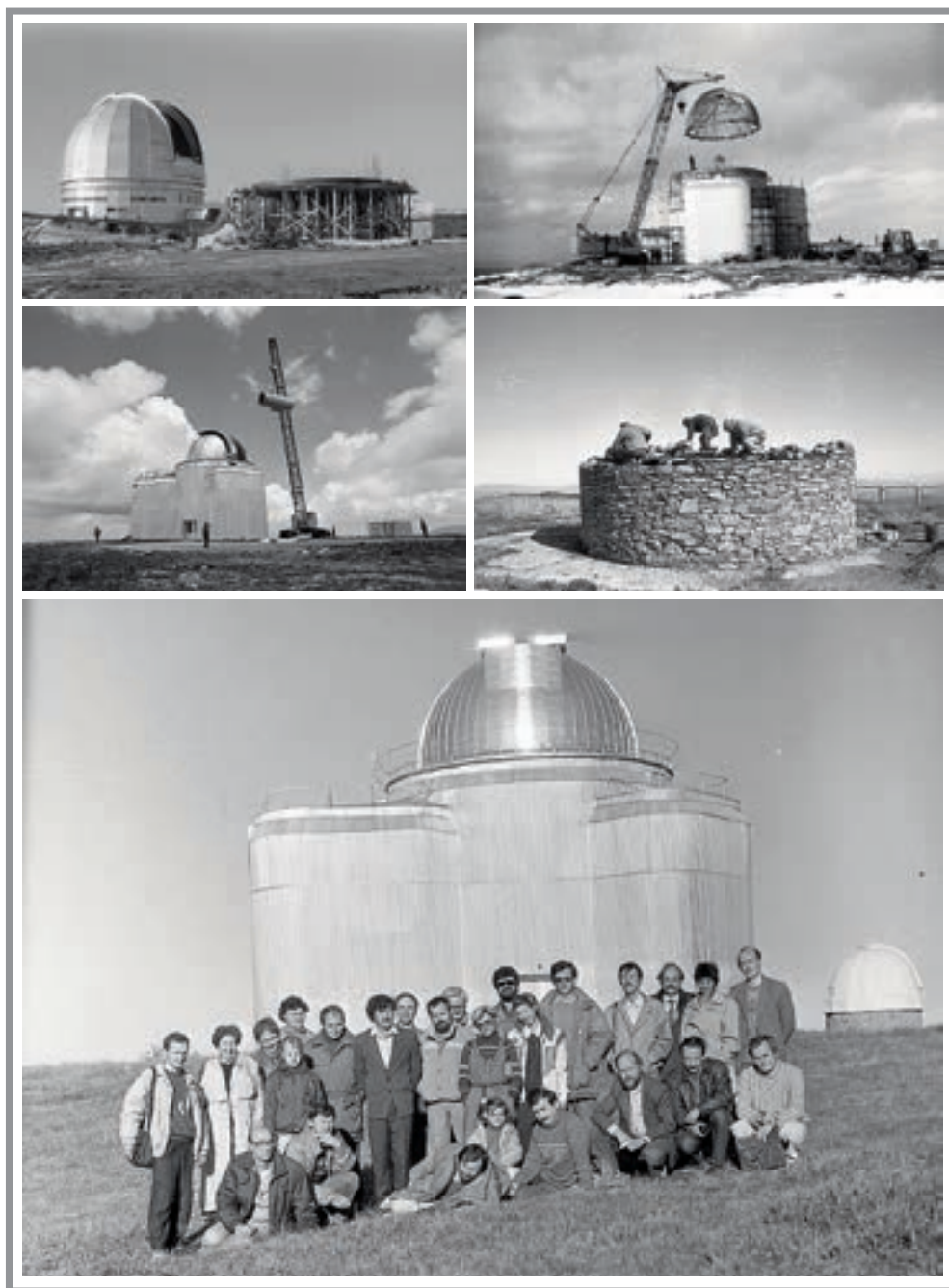
К истокам...



Строительство БТА. Сверху вниз: памятная бронзовая плита, заложенная в основание фундамента БТА 18 марта 1966 г.; И. М. Копылов встречает автопоезд, 22.07.1968 г.; облицовка купола, конец 1969 г.; транспортировка главного зеркала БТА, 1974 г.; сборка верхней части трубчатой конструкции.



Строительство РАТАН-600. Сверху вниз: центр главного зеркала (антенны) РАТАН-600; строительство и монтаж кольцевой антенны, 1970 г.; монтаж облучателя №6; Ю. Н. Парийский и академик Л. А. Арцимович на строительной площадке РАТАН-600.



Малые телескопы САО. Сверху вниз: строительство 1-м телескопа Цейсс-1000, 1986 г.; установка каркаса купола, 1987 г.; монтаж трубы 1-м телескопа; строительство павильона 60-см телескопа Цейсс-600, 1995 г.; коллективный портрет наблюдателей-участников конференции, посвященной 5-летней работе телескопа Цейсс-1000, 1994 г.

2006 – 2016 гг.



Оптический телескоп с диаметром зеркала 6-м - БТА.



БТА и привод азимутальной оси БТА.



Вверху: Оптический телескоп Цейсс-1000; внизу: вид на верхнюю гостиницу САО и комплекс малых телескопов НИИ ФФ.



Вверху: вид на РАТАН-600 с высоты птичьего полета; облучатели РАТАН-600.



Сверху вниз: IX Российско-финляндский симпозиум по радиоастрономии (Нижний Архыз, 15–20 октября 2006 г.) А.В. Темирова и Э. Валатойа (Финляндия); середина – В.К. Кононов; внизу – С.С. Ермоленко, В.А. Акименко, В.С. Миленко, Е.М. Плотников, Ф.Д. Мостовой, А.А. Широков.



Вверху – В.И. Ардиланов, И.П. Костюк, Н.В. Борисов; середина – перетягивание каната на мероприятии, посвященном 40-летию обсерватории ; внизу – С. Рыбенюк, В.М. Гурин, А.В. Захаров.



Празднование Старого Нового года в 2007 г.



Сверху вниз: Н.А. Нижельский и А.Б. Берлин; в центре – П.Г. Цыбулев, слева направо – Р.Ю. Удовицкий, Ю.Н. Парийский и Д.В. Кратов; внизу – Г.Б. Гельфрейх и П.М. Афанасьева.



Вверху – А.Н. Хрипунов; В.М. Черепков и В.М. Окорок; середина – погрузка первого зеркала БТА на платформу тягача; внизу – сидит М.П. Пушков, стоят (слева направо) А.И. Евенко, В.М. Черепков, В.Г. Куценко, М.П. Казанцев, А.М. Притыченко, М.Н. Игнатов.



Международная конференция «Физика космоса» (27–31 мая 2007 г.). Вверху – А.А. Смирнова, О.П. Желенкова, О.Н. Шолухова; С.Н. Додонов; середина – А.В. Моисеев; Л.А. Пустильник, С.А. Пустильник, М. Пасарге (ФРГ); внизу – участники конференции.



Вверху – Ю.Н. Парийский; Ю.В. Сотникова, Р.Ю. Удовицкий, Д.В. Кратов и Т.А. Семенова; середина – участники конференции «Повышение эффективности и модернизация радиотелескопов России» (22–26 сентября 2008 г.); внизу – О.В. Верхованов; С.Н. Трушкин.



Вверху – А.С. Москвитин; В.Е. Панчук; Е.В. Малоголовец; внизу – веб-трансляция из Томска полного солнечного затмения 01.08.2008 г. (В.В. Комаров, В.Н. Черненко, А.С. Марухно, В.В. Витковский и Н. Дмитриев).



Вверху – председатель Счетной палаты РФ С.В. Степашин и Ю.Ю. Балега; мероприятия, посвященные Международному году астрономии (2009 г.); середина - восхождение на Эльбрус; внизу – Е.Л. Ченцов проводит экскурсию на астрономической фотовыставке (г. Черкесск).



Всероссийская астрономическая конференция «От эпохи Галилея до наших дней»(13–18 сентября 2010 г.). Вверху – Ю.Ю. Балага открывает конференцию; в перерывах между заседаниями; середина – первый день конференции в большом зале КОН; внизу – секционные заседания в зале корпуса информатики; Н.Н. Самусь (ГАИШ).



Всероссийская астрономическая конференция. Закрытие.



Вверху – визит французских астрономов (2010 г.); С.Н. Додонов, Р. Вилена и Ж. Булестекс на БТА; середина – административные подразделения отмечают Международный женский день; внизу – Н.С. Соболева, Ю.Н. Парийский; А.В. Моисеев у SCORPIO.



Вверху – П.Г. Цыбулев и Ю.Н. Коновалов; Н.Н. Бурсов проводит экскурсию; середина – Е.Л. Ченцов; Е.А. Барсукова; С.Н. Митронова; внизу – выступают малыши.



Прохождение Венеры по диску Солнца 06.06.2012 г. Вверху – Венера на фоне диска Солнца (японский спутник HINODE); Е.А. Семенко; середина и внизу – наблюдения этого астрономического события, в котором участвовало около сотни человек.



Вверху – на закрытии Всероссийской конференции «Наблюдаемые проявления эволюции звезд» (15–19 октября 2012 г.); Т.А. Фатхуллин и Е.О. Васильев (ЮФУ); Ю.Ю. Балега; середина – Г.Г. Валявин; В.Г. Клочкова; внизу – О.П. Желенкова; Е.Г. Чмырева.



Вверху – А.Н. Саркисян, Е.А. Семенко, А.С. Москвитин; Т.Е. Бурлакова и Л.В. Опейкина; середина – (слева направо) В.К. Дубрович; С.А. Пустильник, С.В. Маркелов, Т.Н. Соколова, О.Н. Шолухова; внизу – Ю.Ю. Балега и Ю.Н. Парийский; А.Ф. Валеев и Д.О. Кудрявцев.



Вверху – группа дежурных наблюдателей и операторов РАТАН-600; середина – на субботнике; внизу – футбольная команда: Е.А. Семенко, Д.В. Гунько, Д.И. Макаров, М.М. Габдеев и А.Н. Саркисян; спектакль «Муха-Цокотуха».



Вверху – СЭЖ РАТАН-600. Электрики на размотке кабеля с барабана облучателя; слесари; 40 лет первого наблюдения на РАТАН-600 (12.07.2014 г.); торжественное заседание; внизу – Н.Н. Нижельский; Ю.Н. Парийский.



День поселка (2014 г.). Вверху – выступление вокально-инструментальной группы КБ; сандружина на посту (Н. Аламтиева, В. Шелегина, Т. Янова, Л.И. Спангенберг, Л. Минакова, О. Курдюмова, Е. Демакова); внизу – Т.А. Пляскина; перетягивание каната.



VII Всероссийский семинар-совещание «Информационные системы в фундаментальной науке. Большие данные» (22–26 июля 2014 г.). Вверху – В.В. Власюк; проф. В.А. Уткин (СКФУ), проф. И.М. Першин (СКФУ) и А.С. Марухно; середина – участники конференции; внизу – на заседаниях; В.В. Витковский.



Переалюминирование главного зеркала БТА (2015 г.). СЭЖ БТА за работой.



День Победы (2015 г.). Вверху – Н. Пустильник и Ю. Верич; И.П. Старенко с внучкой; С.С. Кайсин; середина – переправа через запруду; внизу – Е.И. Кайсина; Л.И. Спангенберг с внуками; М.М. Габдеев с сыном и женой.



День Победы (2015 г.). Вверху – Е. Демакова; Е. Кучаева; Станкевичи; середина – А.С. Марухно; В. Верич; внизу – Т.П. Шумакова, Л. Кузнецова, О.Б. Швецова; Е.Г. Юркова.



Вверху – 22.12.2015 г. слова благодарности коллег и торжественное чаепитие по поводу ухода Ю.Ю. Балеги с поста директора обсерватории; середина – А. Эркенов; В.В. Соколов; внизу – ратановцы (сидит – Ю.Н. Парийский).



Выборы директора 27.11.2015 г. Вверху – три кандидата: В.В. Власюк, А.В. Моисеев, С.Н. Фабрика; В. Бычков и А.С. Сеньков; внизу – А.П. Головки, Н.С. Таволжанская, В.Г. Клочкова, В.А. Подтелкина, Н.П. Коцюбинская, Н.В. Суянова; Ю.В. Сотникова и Н.В. Дмитриюкова.



Выборы директора. Вверху – В.В. Власюк и А.В. Моисеев; Г.М. Бескин и А.И. Копылов; середина – В.А. Желенкова; И.А. Якунин; Э.В. Емельянов; внизу – О.В. Верходанов; В.А. Моисеев; А.А. Перваков.



Вверху – Д.А. Растегаев; Д.В. Опарин; А.В. Моисеева; О.В. Марьева; середина – Е.К. Майорова; Н.А. Тихонов; внизу – Ф.Г. Копылова; Е.Г. Сендзикас.



Вверху – Е.А. Семенко ведет экскурсию; на семинаре памяти В.Ф. Шварцмана – Ю.Ю. Балеза, В.В. Витковский; С.Н. Фабрика, И.Д. Караченцев и Е.И. Рыжикова; О.Г. Кашибадзе - получение национальной стипендии L'Oreal-UNESCO «Для женщин в науке»; внизу – экскурсия для участников школы «Траектория».



Вверху и середина - туристические мероприятия, посвященные 50-летию САО РАН; внизу – 1 сентября 2016 г.



Вверху – В.В. Власюк, Ю.Ю. Балега, Г.Г. Матишов (заседание Президиума ИОНЦ РАН, 19.10.2016 г.); передача зеркала в ЛЗОС 03.11.2017 г.; середина и внизу – выставка работ современных художников «Обсерватория». Открытие выставки (слева направо) – Ю.Ю. Балега, К. Циммер (Австрия), С. Мраз (Австрия), М. Губер-Гогова, Э. Брикс (посол Австрии), М. Гогова, В.В. Власюк.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение

3

Власюк В.В. 50 лет Специальной астрофизической обсерватории

Деятельность обсерватории в 2006–2016 гг.

4

Основные события

5

Научные достижения

26

Научно-технические разработки

37

Заключение

46

Телескопы и методы наблюдений

Панчук В.Е., Клочкова В.Г. 40 лет спектроскопии высокого разрешения на БТА

49

Нижецкий Н.А., Цыбулев П.Г. От юбилея к юбилею: радиометры континуума РАТАН-600 за 10 лет

71

Жаров В.И. Геодезические измерения на радиотелескопе РАТАН-600

78

Голубчин Г.С. Создание комплекса автоматизации РАТАН-600 в 1969–1987 гг.

89

Информационные технологии

Витковский В.В. Информатика в САО

99

Желенкова О.П., Витковский В.В., Пляскина Т.А., Малькова Г.А., Шергин В.С., Черненко В.Н. Общий архив наблюдений

125

Астрофизические исследования

Физика звезд

Балега Ю.Ю. Спекл-интерферометрия

133

Клочкова В.Г. Спектроскопия звезд высокой светимости на БТА: результаты 2005–2015 гг.

144

Фабрика С.Н. Лаборатория физики звезд

166

Бескин Г.М., Карпов С.В., Плохотниченко В.Л. Астрофизика высокого временного разрешения

183

Глазголевский Ю.В., Романюк И.И. История и перспективы исследований звездного магнетизма в САО РАН

196

Внегалактическая астрономия

Моисеев А.В. Исследование галактик с полярными кольцами на БТА

221

Макаров Д.И. Исследование Местного объема Вселенной в САО РАН

236

Пустильник С.А. Эволюция и звездообразование галактик ближней Вселенной

243

Тихонов Н.А. Исследование разрешаемых на звезды галактик

246

Радиоастрономия

Парийский Ю.Н., Мингалиев М.Г., Сотникова Ю.В., Хайкин В.Б., Госачинский И.В., Жеканис Г.В.,

253

Нижецкий Н.А., Дравских А.Ф., Майорова Е.К., Тимофеева Г.М., Богод В.М., Темирова А.В.

Радиоастрономия от БПР к РАТАН-600

Парийский Ю.Н., Верхованов О.В. Обзоры фонового излучения на РАТАН-600

260

Госачинский И.В. Лаборатория радиоспектроскопии САО РАН. История и люди

273

Богод В.М. Исследования атмосферы Солнца на основе спектральных и поляризационных наблюдений на РАТАН-600. Результаты 24 цикла активности

278

Парийский Ю.Н. Интервью к 50-летию САО РАН

295

Астрономическое образование

<i>Кайсина Е.И. Образовательная деятельность и популяризация астрономии</i>	299
<i>Верходанов О.В., Бескин Г.М. Астрономические школы для старшеклассников</i>	303

Воспоминания

<i>Клочкова В.Г. Памяти И.М. Копылова – первого директора САО РАН</i>	309
<i>Соколов В.В. 44 года в САО РАН: люди и Наука</i>	316
<i>Голубчина О.А. Воспоминания</i>	327
<i>Шведова Г.С. Научная библиотека САО и ОНТИ</i>	331

Вспоминая ушедших товарищей

<i>Гельфрейх Георгий Борисович</i>	337
<i>Зверев Юрий Кузьмич</i>	340
<i>Снежко Леонид Исаакович</i>	344
<i>Соболева Наталья Сергеевна</i>	346
<i>Фоменко Александр Федорович</i>	350
<i>Берлин Александр Борисович</i>	353
<i>Леушин Валерий Владимирович</i>	355
<i>Найденов Иван Дмитриевич</i>	357

Сокращения и аббревиатуры

359

Фотоальбом

369

Научное издание

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук

**Юбилейный сборник
САО РАН. 50 лет.**

Ответственный редактор: В.В. Власюк
Редколлегия: О.П. Желенкова, Е.И. Кайсина,
Д.О. Кудрявцев, И.И. Романюк,
С.А. Трушкин, Е.Э. Филиппова

Оригинал-макет, обложка:
О.П. Желенкова, Е.И. Кайсина

Фотографии: А.Н. Борисенко, Е.А. Борисенко,
А.С. Желенков, С.С. Кудусов, В.М. Нарвышев, А.В. Пилипас,
В.П. Романенко, Е.А. Семенко, Google Maps, фотоархив САО.

Печатается по решению ученого совета
САО РАН от 4 июня 2015 года №328

Заказ №1

Подписано в печать 10.05.2018. Формат 72x104/16. Бумага офсетная.
Печать офсетная. Усл.печ.л. 23.599. Тираж 1000 экз.

Отпечатано с готового оригинал-макета.
ООО Издательство «СНЕГ». Россия, Ставропольский край,
357500 г. Пятигорск, ул. Дегагатская, 97.
Тел.: 8 (8793) 399-000, факс: (8793) 384-062.
E-mail: info@sneg-izdat.ru
www.sneg-izdat.ru

2018 год

