

УДК 520.27

РТ-22 КраО – 40-летие РСДБ

А.Е. Вольвач¹, Л.И. Матвеевко²

¹ НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”, 98409, Украина, Крым, Научный

² Институт космических исследований, ул. Профсоюзная, 87, Москва, 119017, Россия

Поступила в редакцию 5 октября 2008 г.

Ключевые слова: радиоинтерферометр, источники релятивистских частиц, квазар, РСДБ-метод.

Введение

Исследования структуры объектов – важнейшее направление астрономии. Не случайно говорят: лучше один раз увидеть, чем сто раз услышать. Галилей посмотрел на Юпитер через простейшую линзу и обнаружил его спутники. С тех пор прошли века, и линза превратилась в мощные телескопы. Освоение в послевоенные годы спектра радиоволн открыло перед астрономами необычайно широкие возможности. Но радиоволны в тысячи раз длиннее оптических и разрешающая сила радиотелескопов очень мала. Радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами (РСДБ) преодолела это непреодолимое ограничение и открыла исследователям весь окружающий мир. Угловое разрешение РСДБ в десятки тысяч раз превышает разрешающую силу лучших оптических инструментов. История создания и развития РСДБ непосредственно связаны с освоением космического пространства.

1 Источники релятивистских частиц – переменность радиоизлучения

В конце 50-х годов стартуют первые космические ракеты – “Лунники”. Радиоастрономы ФИАН создают радиоинтерферометр и определяют их траектории движения. По завершении работы вблизи Евпатории создается Центр дальней космической связи (ЦДКС). ФИАН участвует в создании измерительного комплекса на основе радиоинтерферометрии. Необходимо было обеспечить точность координатных измерений порядка 0."1. Для этого нужны были опорные объекты – компактные яркие источники.

Это была эпоха бурного развития и становления радиоастрономии. Астрономические объекты предстали перед исследователями как уникальные космические лаборатории. Центральной проблемой был вопрос об источниках релятивистских частиц. Эти источники могли быть искомыми реперами. Интересы астрономов и промышленности совпадали, что немало способствовало успеху. Наиболее вероятным объектом была Крабовидная туманность, точнее ее центральная звездочка. Наблюдения покрытия Луной на антеннах ЦДКС обнаружили дифракционную картинку, соответствующую компактному радиоисточнику – будущий пульсар.

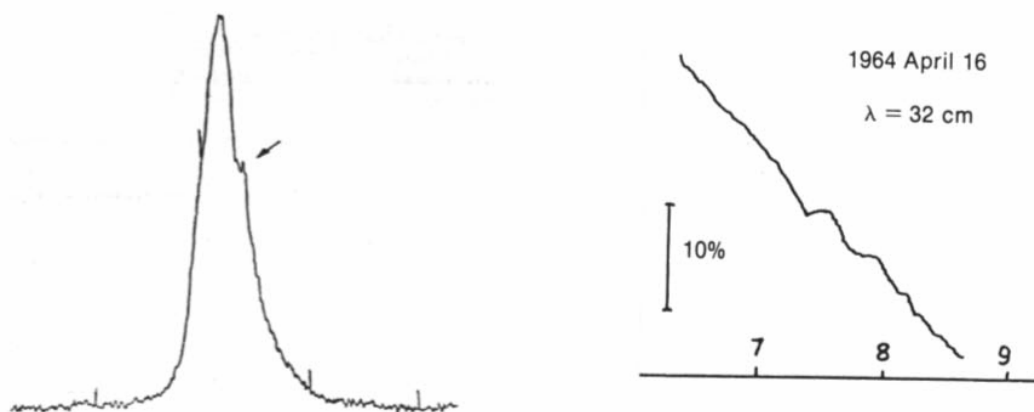


Рис. 1. Дифракционные лепестки, волна 32 см, покрытие 16 апреля 1964 г. Запись прохождения Крабовидной туманности через диаграмму направленности антенны АДУ 1000 на волне 8 см, 15 апреля 1964 г. Стрелка показывает деталь избыточного излучения

Было обнаружено также удивительное явление – изменение яркости компактной области в юго-восточной части туманности. Деталь на записях прохождения Крабовидной туманности, излучение которой существенно снизилось на следующий день, показана стрелкой на рис. 1. В дальнейшем было показано, что эта особенность определяется облаком релятивистских электронов, проходящих в тангенциальном направлении магнитной силовой трубки (Матвеевко, 1975). Это подтверждается рентгеновскими данными – искривлением джета в месте расположения радиоисточника.

В объекте 3С 273 был также выделен компактный источник – квазар и измерен его спектр (Шоломицкий и др., 1965). Компактные источники релятивистских частиц предполагали их переменность. В частности, Г.Б. Шоломицкий обратил внимание на переменность объекта СТА102.

2 Сверхвысокое угловое разрешение – РСДБ

Покрытия источников повторяются редко и не для всех объектов. Нужен был более эффективный инструмент (Матвеевко, 2007). Весной 1962 г. на ЦДКС Л.И. Матвеевко с Г.Я. Гуськовым, руководителем Центра дальней космической связи и Э.Г. Мирзабекяном, директором института радиофизики и электроники Арм. ССР рассматривали вопрос снижения эффективных площадей антенн АДУ 1000. Был затронут вопрос о доплеровских длиннбазовых измерениях координат космических аппаратов. Принимаемые сигналы преобразовывались с помощью атомных стандартов частоты, регистрировались на магнитофонах и в дальнейшем совместно обрабатывались на ВЦ. Но аналогичным образом может работать и радиоинтерферометр. Его отличие заключается лишь в том, что он измеряет не разность частот, а разность фаз принимаемых сигналов. Чтобы сохранить когерентность сигналов при записи и воспроизведении, достаточно было ввести “пилот” сигналы от тех же атомных стандартов, что позволяло исключить неравномерности лентопротяжек. Предложение Л.И. Матвеевко было поддержано Г.Я. Гуськовым. Эксперимент планировалось провести между антеннами ЦДКС в г. Симферополе и г. Евпатории.

Но основной проблемой оказалась не техника и даже не бюрократия, а как теперь говорят “человеческий фактор”. Этот вопрос не является предметом данной работы, и мы отметим лишь, что метод был доложен Л.И. Матвеевко осенью 1962 г. на семинаре Лаборатории радио-

астрономии ФИАНа, но не получил поддержки. А затем в ГАИШе, где было рекомендовано запатентовать метод. Летом 1963 г. Л.И. Матвеев обсудил метод с директором радиообсерватории Джодрэлл Бенк проф. Б. Ловеллом во время посещения им ЦДКС. Б. Ловелл оценил метод, но усомнился в необходимости столь высокого углового разрешения. В то время еще не были известны компактные яркие радиоисточники. Был согласован меморандум о проведении эксперимента Евпатория – Джодрелл Бэнк на длине волны 32 см. В конце 1963 г. Патентное бюро дало согласие на публикацию, и работа была направлена в журнал Радиофизика (Матвеев и др., 1965).

РСДБ-метод был реализован в 1967 г. учеными США и независимо Канады. По завершении эксперимента М.Х. Коуэн (Калтех) и К.И. Келлерманн (НРАО) обратились 23 февраля 1968 г. к В.В. Виткевичу с предложением провести на волне 3 см эксперимент между 22-м антенной в Пущино и 43-м в Грин Бэнк (Матвеев, 2007). Н.Г. Басов открыл зеленый свет, – директивные органы дали согласие на проведение эксперимента, но не на РТ-22 в Пущино, а на РТ-22 в КраО. А.Б. Северный оказал максимальную поддержку в подготовке и проведении эксперимента. В конце 1968 г. были начаты работы по вводу в действие РТ-22 КраО на длине волны 3 см. В январе 1969 г. мы с И.Г. Моисеевым согласовали в НРАО технические условия и программу наблюдений на длине волны 3 см и для гарантии на длине волне 6 см. Осенью на РТ-22 КраО приехали с аппаратурой К. Келлерманн, Б. Кларк и Д. Пайн (рис. 2). Для синхронизации времени пунктов наблюдений был доставлен в горячем состоянии рубидиевый стандарт частоты. Были получены радиоинтерференционные сигналы, доказана возможность реализации РСДБ даже на сантиметровых волнах (Бродерик, 1970). Полученные данные свидетельствовали о сложной структуре квазаров. Принимается решение о включении дополнительной 64-м антенны Центра дальней космической связи в Голдстоуне. Эксперимент на волне 3.55 см планируется на июнь 1971 г.

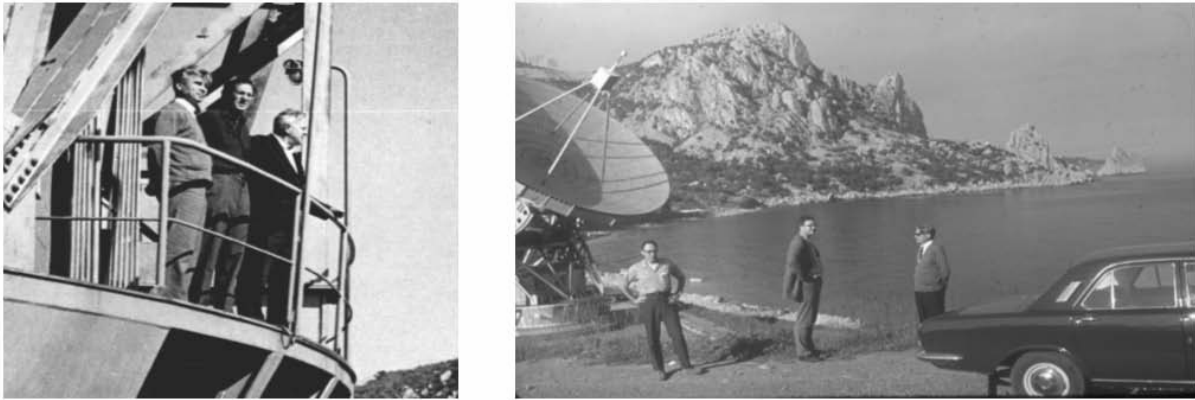


Рис. 2. Участники первого эксперимента И.Моисеев, К.Келлерманн и В.Виткевич (слева) и М. Коуэн, Б. Кларк с И. Моисеевым во время второго эксперимента (справа)

Масштабы работ выходили за пределы возможностей Лаборатории радиоастрономии ФИАН, и РСДБ-направление в июне 1969 г. переводится в ИКИ. Для повышения чувствительности РТ-22 КраО были разработаны малошумящий усилитель мазерного типа и каскадная система облучения антенны. НРАО создает специальную систему регистрации и обработки данных Марк-2 на основе студийных видеоманитрофонов. Для повышения стабильности гетеродинов на РТ-22 применили высокостабильный кварцевый генератор, захваченный рубидиевым стандартом, а в Грин Бэнк и Голдстоуне применяют водородные

стандарты частоты. В Симеиз приехали М. Коуэн и Б. Кларк (рис. 2). Эксперимент подтвердил сложную структуру квазаров, были обнаружены сверхсветовые скорости движения компонент. Эксперимент подтвердил возможности РСДБ.

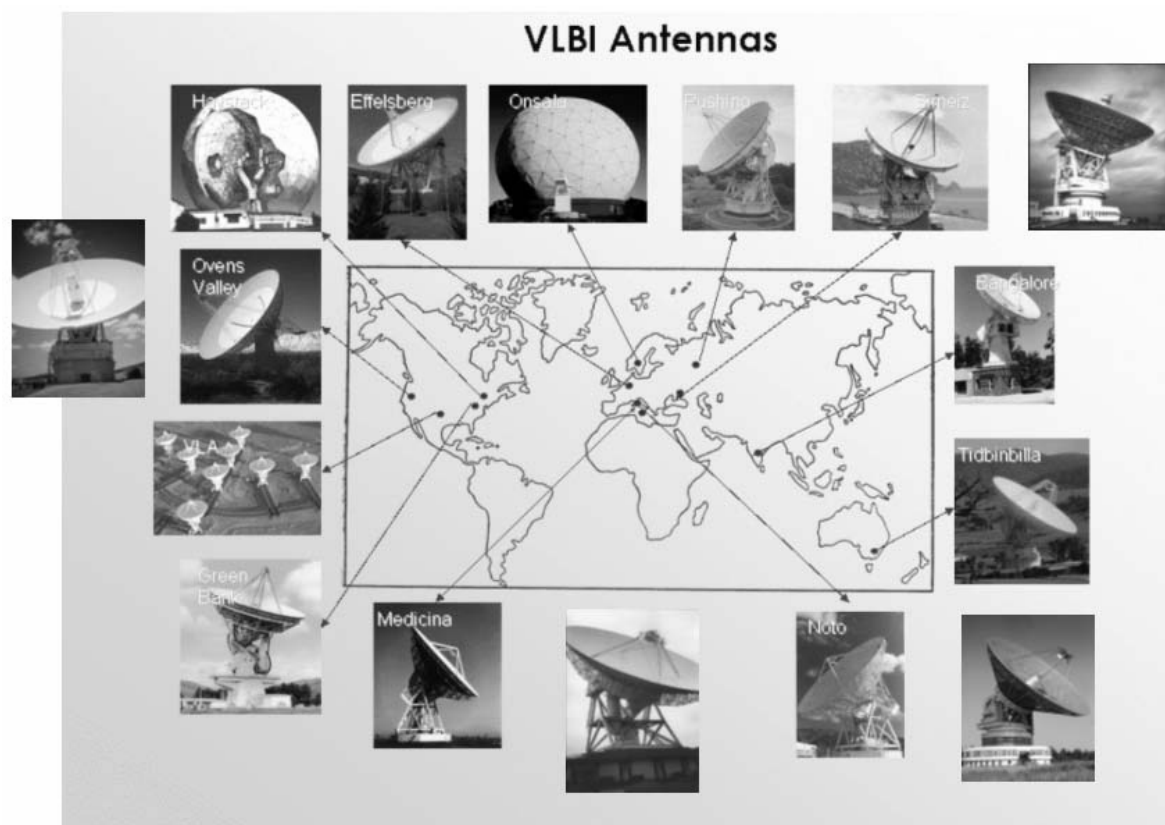


Рис. 3. Глобальная РСДБ-сеть

Для получения детальных изображений объектов необходимо было измерить весь спектр пространственных частот – провести наблюдения на радиоинтерферометрах с базами разной длины и ориентации. Практически все крупные радиотелескопы мира объединяются в единую глобальную сеть, куда входит и станция Симеиз (рис. 3). Станция оснащается водородным стандартом частоты, маломощным усилителем мазерного типа на длину волны 1.35 см.

3 Области образования звезд и планетных систем

В январе 1969 г. Л.И. Матвеевко и И.Г. Моисеев посетили университет в Беркли. У. Велч докладывал об открытии группой Ч. Таунса в газопылевых туманностях интенсивных линий водяного пара на волне 1.35 см. Предполагалось, что это тепловое излучение. Для уточнения необходимо было измерить размеры источников. Были обсуждены возможности наблюдений на межконтинентальном радиоинтерферометре. Открытие в газопылевых комплексах мощного излучения в линиях водяного пара $\lambda = 1.35$ см привлекло внимание как к механизму излучения, так и к кинематике активных областей. При отборе объектов для наблюдений на межконтинентальной базе с наблюдательной точки зрения эти объекты были оптимальны: узкие яркие линии. Через несколько дней в Массачусетском технологическом институте мы

согласовали с Б.Ф. Берком и его аспирантом Д. Мораном эксперимент Симеиз-Хайстек на волне 1.35 см. Перед этим было решено провести тестовые наблюдения в пределах США, а затем перейти на межконтинентальную базу. В июне 1971 г. в Крым прибыла группа Б. Берка, рис. 4.



Рис. 4. Группа “мазерщиков” в Мисхоре (слева) и Тидбинбилле, Австралия (справа)

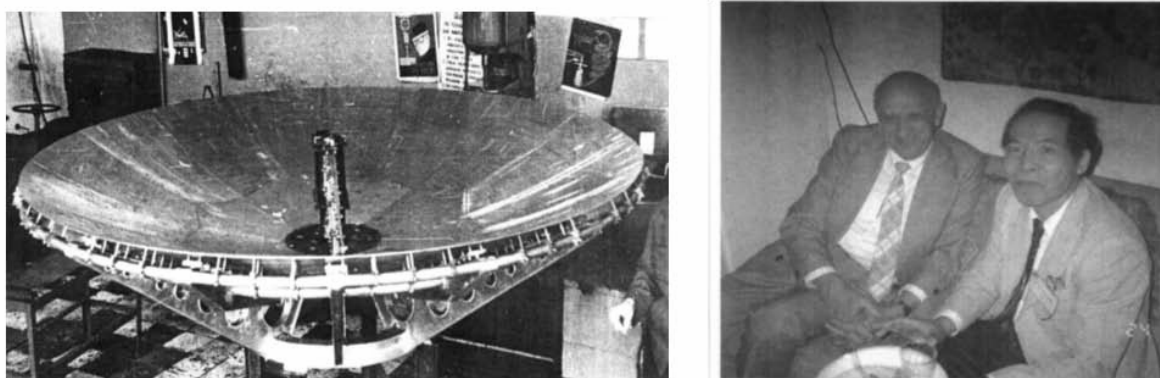


Рис. 5. Параболическая антенна КРТ-3, встреча в Сокорро Л. Матвеевко с Хирабаяши, руководителем японского проекта VSOP

После наблюдений квазаров на длине волны 3.55 см мы приступили к наблюдениям источников в линиях водяного пара. Угловое разрешение радиоинтерферометра Крым-Хайстек достигало 0.1 мсек. дуги. Были выделены скопления H_2O источников, обнаружена мощная вспышка в комплексе W 49. Быстрое нарастание потока свидетельствовало о весьма небольших размерах области излучения, что подтвердилось радиоинтерферометрическими наблюдениями с предельным угловым разрешением. Ее яркостная температура достигала 10^{16} К, что могло быть объяснено лишь мазерным механизмом (Берк, 1972). Стала очевидной необходимость увеличения углового разрешения – вынос одного из элементов интерферометра за пределы Земли. ИКИ приступает к разработке космического интерферометра (руководитель проекта В.П. Мишин, научный руководитель Л.И. Матвеевко). Определены оптимальные параметры орбиты, они соответствовали 30–100 т. км, диаметр антенны радиотелескопа 3.1 метра (рис. 5).

Отражающая поверхность зеркала антенны крепилась на тонких инваровых стержнях. Точное наведение антенны обеспечивалось изменением положения вторичного зеркала.

В результате исследования туманности Ориона было установлено, что мазерные источники сконцентрированы в 8 активных зонах. В одной из них происходили вспышки, достигавшие нескольких МЯн. Это излучение определялось высокоорганизованной структурой – цепочкой из 4-х групп компактных компонент, размерами 0.1 мсек. или 0.05 а. е. (рис. 6).

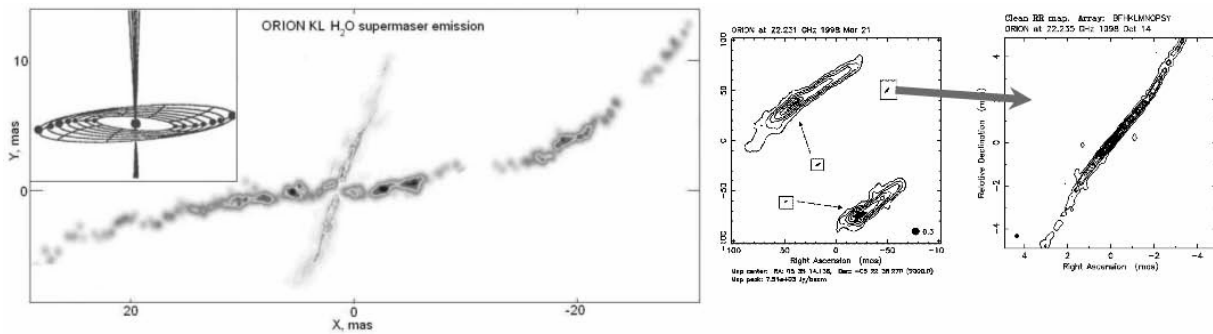


Рис. 6. Цепочка из 4-х групп компактных мазерных источников распределена вдоль S-образной структуры, максимальная яркостная температура источников $T_b \sim 10^{17}$ К . Биполярный поток имеет спиралевидную структуру. Отдельные выбросы имеют структуру: голова-хвост



Рис. 7. Торнадо: вихрь и выброс спиралевидной формы

Эти компоненты распределены вдоль S-образной структуры длиной около 30 а. е. и соответствуют тангенциальным направлениям протопланетных колец. Распределение скоростей компонент определяется твердотельным вращением $V_{rot} = \Omega R$, период вращения равен $T \approx 180$ лет. Масса системы не превышает $M \sim 0.01$ Мо. Эжектируемый биполярный поток вещества имеет спиралевидную форму и содержит компактные вкрапления. Скорость истечения потока в начале активности $V \approx 9$ км/с и снижается до $V \approx 3$ км/с в конце. Эпизодически наблюдаются кометоподобные выбросы (Матвеевко, 2004). Наблюдаемая

структура диск-биполярный поток, твердотельное вращение и малая масса подобны космическому вихрю – торнадо (рис. 7).

4 Объекты с активными ядрами

Создание глобальной сети, а в дальнейшем специализированной системы VLBA (НРАО) существенно расширило возможности исследований тонкой структуры астрономических объектов, в том числе объектов с активными ядрами. Рассмотрим некоторые из них: их структуру – ядро-эжектор и поток релятивистской плазмы – джет. Исследования на длине волны $\lambda = 18$ см радиогалактики М 87 выделили не просто джет, но и установили его скручивание (рис. 8). Здесь же приведено основание джета по данным наблюдений на VLBA с космическим элементом VSOP на длине волны $\lambda = 6$ см.

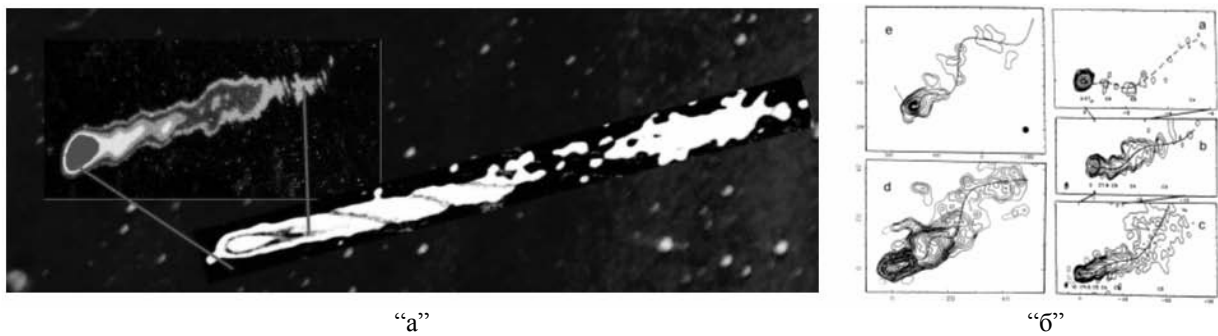


Рис. 8. Радиогалактика Дева А, $\lambda = 18$ и $\lambda = 6$ см – “а”. Квазар 3С 345 радио карты на разных длинах волн – “б”

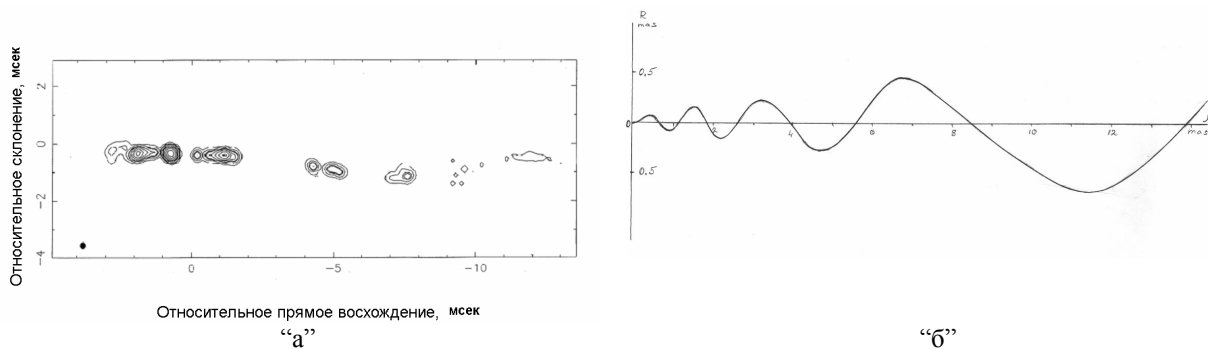


Рис. 9. Объект 1803+784, угловое разрешение 0.2 мсек., $\lambda = 18$ см – “а” и спиральная структура джета – “б”

Джет квазара 3С 345 представляет собой коническую расходящуюся спираль, в вершине которой находится ядро – эжектор (рис. 8”б”). Максимальная яркостная температура ядра достигает 10^{12} К. Как видно из распределений яркости вдоль джета на разных длинах волн, излучение эжектора проявляется на самой короткой длине волны 1.35 см и уменьшается с увеличением длины волны. Длинноволновая часть радиоизлучения поглощается тепловой плазмой, а видимая часть джета лежит за пределами поглощающего экрана.

Исследования объекта 1803+784 с угловым разрешением 0.2 мсек. выделили типичную структуру ядро-джет (рис. 9). Спиральная структура джета построена по наблюдениям на разных длинах волн.

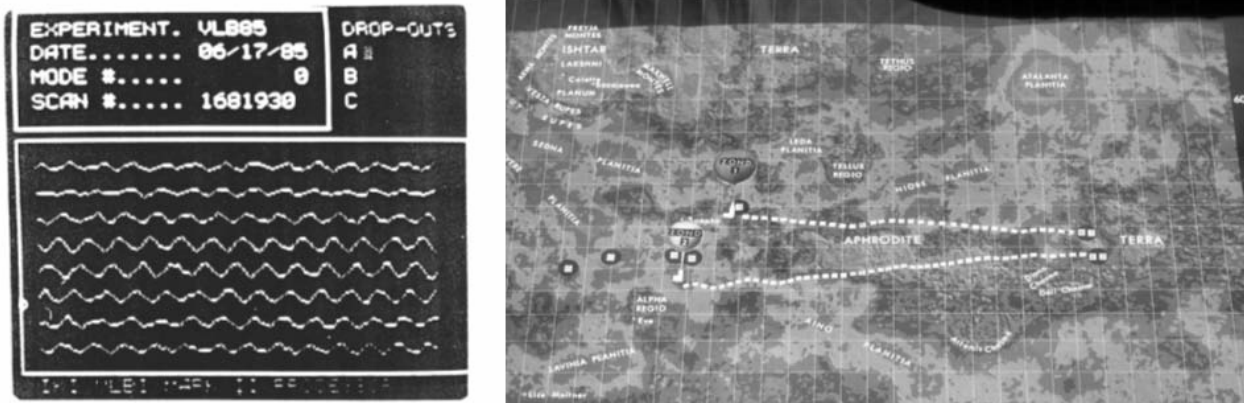


Рис. 10. Траектории баллонов над поверхностью Венеры (справа), запись калибровочного источника W 3 ОН, антенны Уссурийск и Евпатория, $\lambda = 18$ см



ПИСЬМА В АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 1995, том 21, № 2, с. 129 - 131

УДК 524.5

ПРЕЦИЗИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ СТАНЦИИ РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОЙ СЕТИ “СИМЕНЗ”

© 1995 г. Т. А. Кларк*, Дж. Босворт*, Н. Ванденберг*, Д. Гордон*, Е. Химвич*, Д. Шаффер*, А. Витней**, Б. Корей**, А. Нвел**, С. Томас**, Л. И. Матвеев***, Р. Х. Мусли***, А. В. Шевченко***, Н. С. Несгерова***, А. В. Степанов****, П. С. Никитин****, А. В. Ипатов****, В. В. Мардышкин****, Д. В. Иванов****, Я. С. Яцкив****, М. М. Медведский****

*Годдардский космический центр, США
 **Хайтекская радиообсерватория, США
 ***Институт космических исследований РАН, Москва
 ****Крымская астрофизическая обсерватория ГХНТ Украины
 *****Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург
 *****Главная астрономическая обсерватория НАН Украины, Киев

Поступила в редакцию 06.10.94 г.

На радиоинтерферометрической станции “Сименз” введен в действие комплекс аппаратуры на длинах волн 3.6 и 13 см с совмещенным облучателем, установлена система регистрации МК-3. Эквивалентные шумы системы равны 800 и 1500 Ян на волнах 3.6 и 13 см соответственно. Эффективная площадь антенны – 150 м² на обеих волнах. Измерено положение антенны с точностью <10 мм.

Рис. 11. Заключительный момент “подписания соглашения” астрофизиков и геофизиков

Таким образом, было установлено, что реактивное воздействие эжектируемого потока приводит к прецессии оси и образованию спиральной структуры. Джет окружен тепловой плазмой подобно кокону. Прозрачность стенки кокона нарастает по мере удаления от эжектора, что и определяет видимость фрагментов джета на разных частотах.

5 Прикладные направления РСДБ

Успехи метода РСДБ в астрофизике заложили фундамент развития прикладных направлений на принципиально новой основе. К ним относится и прецизионная астрометрия. Создана сеть опорных “точечных” источников, точности измерения координат достигают десятков микросекунд. Это позволило определить траектории свободного плавания аэростатных зондов

в атмосфере Венеры (рис. 10). Расстояние до Венеры превышало 100 миллионов км, а мощность передатчика была всего лишь 1 Вт (проект ВЕГА). Для этого отечественные радиотелескопы: РТ-70, Уссурийск, Евпатория; РТ-22, Симеиз, Пушино; РТ-25, Улан Удэ и РТ-64, Медвежье озеро были оснащены высокочувствительной аппаратурой на длину волны 18 см, водородными стандартами частоты, системами регистрации Марк-2 (Матвеевко, 2007).

Измерение траекторий зондов осуществлялось совместно с глобальной сетью и станциями слежения с 64-м антеннами Тидбинбилла, Мадрид и Голдстоун. Точность определения координат баллонов достигала 200 м, полет происходил со скоростью около 50 м/с (Матвеевко, 2007).

Для дальнейшего развития исследований как в области астрофизики, так и в области прикладных направлений было принято решение оснастить станцию Симеиз совершенной системой регистрации типа Марк-3А. Этот момент отражен на рис. 11. Здесь же приведена первая публикация по прецизионным геодинамическим измерениям.

В настоящее время это направление успешно развивается. РСДБ-станция “Симеиз” на протяжении 14 лет в кооперации с почти 50 радиотелескопами мира проводит международные геодинамические исследования. В результате данных наблюдений были получены с миллиметровой точностью свидетельства о движении тектонических плит земной коры и параметры вращения Земли. Впервые получены величины горизонтальных и вертикальных движений РСДБ-станции “Симеиз” относительно Евразийской тектонической плиты (Петров и др., 2001; Вольвач, Нестеров, 2001; Вольвач, 2005).

6 Заключение

В настоящее время благодаря успехам технологии освоен практически весь спектр радиоволн, начиная с самых коротких – миллиметровых. Созданы радиометры с предельно низкой шумовой температурой, регистрирующие устройства обеспечивают широкие полосы регистрации сигналов, атомные стандарты частоты сохраняют когерентность даже на миллиметровых волнах. Передача сигналов по оптоволоконным каналам обеспечивает работу в квазиреальном времени. Совершенствование методов обработки РСДБ-сигналов позволило достигнуть супервысоких разрешений, достигающих десятков микросекунд дуги. Сделаны первые шаги по включению системы КВАЗАР-КВО в глобальную РСДБ-сеть, что существенно расширяет возможности исследований как в области астрофизики, так и прикладных направлений. Большие технологические успехи достигнуты в реализации радиоинтерферометрии Земля-Космос (проект VSOP), подготавливаются запуски Радиоастрона и VSOP-2.

В соответствии с научной кооперации между Россией и Украиной в рамках подготовки наземно-космического проекта “РадиоАстрон” с использованием 22-м радиотелескопа КрАО проводится подготовка научной программы проекта, составлен каталог источников – близко 1250 объектов северного неба. Получены важные научные результаты о физической природе источников, позволяющие прогнозировать состояние космических объектов на момент выполнения полетной программы (Вольвач и др., 2004; Вольвач и др., 2007). Проведена подготовка РТ-22 как составной наземно-космического радиоинтерферометра при проведении наблюдательной части программы “РадиоАстрон”: разворачивание на станции систем регистрации Марк-5А и Марк-5В+, модернизация службы времени, а также ввод в действие новых приемных устройств на длины волн 1.35 см, 3.6 см, 6 см, 13 см, 18 см (Нестеров и др., 2000; Вольвач, Стрелка, 2003; Вольвач, Грехам, 2008).

Получены результаты в области т. н. электронной радиоастрономии, в частности РСДБ реального времени. С целью получения оперативной обработки информации введен в действие новый специализированный терминал регистрации для РСДБ-локации, который разрешает записывать принятые сигналы непосредственно на жесткие диски компьютера и транслировать

через Интернет в центр обработки в квазиреальном времени. С использованием NRTV-терминалов отработана процедура проведения экспериментов. С участием РТ-22 КрАО отработана технология получения высокоточных траекторных данных по высоко орбитальным объектам методом РСДБ-локации, а также технологии выявления неизвестных объектов в области ГСО в режиме “бим-трек” (Вольвач и др., 2004; Вольвач и др., 2006).

В 2007 году на базе РТ-22 КрАО создан Межотраслевой Центр коллективного пользования радиотелескопом РТ-22 между Министерством образования и науки Украины и Национальной академией наук Украины. Цель деятельности Центра – интенсификация и координация приоритетных научных исследований в области астрофизики, астрометрии и геодинамики, более полного и эффективного развития и использования инструментальных возможностей и научного потенциала Национального достояния Украины РТ-22, как одного из лучших радиоастрономических инструментов миллиметрового диапазона (Вольвач, Грехам, 2008).

Литература

- Берк Б.Ф., Джонстон К.Д., Ефанов В.А., Кларк Б.Д., Коган Л.Р., Костенко В.И., Ло К.У., Матвеев Л.И., Моисеев И.Г., Моран Д.М., Ноулс С.Х., Папа Д.К., Пападополус Г.Д., Роджерс А.И., Шварц П.Р. // *Астрон. журн.* 1972. V. 3. P. 465.
- Бродерик Д.Д., Виткевич В.В., Джонси Д.Л., Ефанов В.А., Келлерман К.И., Кларк Б.Г., Коган Л.Р., Костенко В.И., Коуэн М.Н., Матвеев Л.И., Моисеев И.Г., Пайн Д., Хансен Б. // *Астрон. журн.* 1970. V. 4. P. 784.
- Вольвач А.Е. // *NASA/TP-2005-212772./ Eds D. Behrend and K. Baver. International VLBI Service for Geodesy and Astrometry. Greenbelt. MD 20771 USA. 2005. P. 100.*
- Вольвач А.Е., Грехам Д. // *International VLBI Service for Geodesy and Astrometry./ Eds D. Behrend and K. Baver. NASA/TP-2008-214151. 2008.*
- Вольвач А.Е., Кардашев Н.С., Ларионов М.Г. // *Труды ГАИШ МГУ. 2004. Т. 75. С. 184.*
- Вольвач А.Е., Кардашев Н.С., Ларионов М.Г., Вольвач Л.Н., Стрепка И.Д. // *Кинем. и физ. небесн. тел.* 2007. Т. 23. №. 3. С. 174.
- Вольвач А.Е., Молотов И.Е., Коноваленко А.А., Фалькович И.С., Литвиненко Л.Н., Негода А.А., Федоров О.П., Липатов Б.Н., Горшенков Ю.Н., Агапов В.М., Туккари Дж., Лю Ш. // *Космич. наука и техн.* 2004. Т. 10. N. 2/3. С. 87.
- Вольвач А.Е., Румянцев В.В., Молотов И.Е., Сочилина А.С., Титенко В.В., Агапов В.М., Киладзе Р.И., Шильдкнехт Т., Бирюков В.В., Ибрагимов М.А., Маршалкина А.Л., Власюк В.В., Юрьшева О.В., Стрепка И.Д., Коноваленко А.А., Туккари Дж. // *Космич. наука и техн.* 2006. Т. 12. N. 5/6. С. 50.
- Вольвач А.Е., Стрепка И.Д. // *NASA/TP-2002-210001./ Eds N. Vandenberg and K. Baver. International VLBI Service for Geodesy and Astrometry. Greenbelt. MD 20771 USA. 2003. P. 115.*
- Матвеев Л.И. // *Письма в Астрон. журн.* 2004. Т. 2. С. 121.
- Матвеев Л.И. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 2007. Т. 103. №. 2. С. 66.
- Матвеев Л.И., Кардашев Н.С., Шоломицкий Г.Б. // *Радиофизика.* 1965. Т. 4. С. 651.
- Матвеев Л.И. // *Письма в Астрон. журн.* 1975. Т. 7. P. 13.
- Матвеев Л.И. // *Astron.Nachr.* 2007. AN. 328. V. 5. P. 411.
- Нестеров Н., Вольвач А. // *NASA/TP-2002-210001./ Eds N. Vandenberg and K. Baver. International VLBI Service for Geodesy and Astrometry. Annual Report 2001. Greenbelt. MD 20771 USA. P. 115.*
- Нестеров Н.С., Вольвач А.Е., Стрепка И.Д., Шульга В.М., Лебедь В.И., Пилипенко А.М. // *Радиофиз. и радиоастрон.* 2000. Т. 5. №. 3. С. 320.
- Петров Л., Вольвач А., Нестеров Н. // *Kinem. Phys. Celest. Bodies.* 2001. V. 17. №. 5. P. 424.
- Шоломицкий Г.Б., Слепцова Н.Ф., Матвеев Л.И. // *Астрон. журн.* 1965. V. 6. P. 1135.