

Российская академия наук  
Институт прикладной астрономии

Сообщения ИПА РАН

№ 176

Л. И. Матвеенко

**История РСДБ — становление и развитие**

Санкт-Петербург  
2007

УДК 521.31(083.3), 523.44(083.3)

L. I. Matveenko. The VLBI history: coming into being and developing.

**Keywords:** very long baseline interferometry (VLBI), history of Russian VLBI network, problems solved by VLBI, Russian VLBI network for the aims of VEGA project, VLBI network “Quasar-KVO”.

The paper presents a history of coming into being and developing the method of radio interferometry with very long baselines (VLBI) in the USSR. The first radio interferometer with short baseline was created in the USSR for the purposes of space navigation in the end of 50s. The idea of radio interferometer with very long baseline was firstly put forward by Russian scientists L. I. Matveenko, N. S. Kardashev and G. B. Sholomitsky in 1962. The most important practical achievements in developing VLBI technique are described in details: the first interferometric experiment with intercontinental baselines (Simeiz, Ukraine–Haystack, USA) in 1969; creating the project of space radio interferometer by V. P. Mishin, L. I. Matveenko, V. I. Kostenko in 1982; the development of VLBI network including two 70-meters full-steering radio telescopes in Ussuriisk and Evpatoria, 64-meters antenna near the Bear Lakes, 25-meters antenna in Ulan-Ude, two 22 meters radio telescopes in Simiez and Puschino for the aims of the VEGA project (1985); creation of the specialized VLBI network “Quasar-KVO”. Astrophysical and applied problems to solve by VLBI technique are discussed.

The paper is the text of report which has been presented by the author at the conference “VLBI–2012 for astrometry, geodynamics and astrophysics”, SPb, IAARAS, 2006, September 11–15 (See also “Proceed of IIA, 2007, vol. 16. p. 105.)

Л. И. Матвеенко. История РСДБ — становление и развитие.

**Ключевые слова:** радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами (РСДБ), история развития РСДБ, задачи, решаемые методом РСДБ, РСДБ-сеть по проекту ВЕГА, РСДБ-комплекс, Квазар-КВО.

Статья посвящена истории разработки и становления метода радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ) в СССР. Первый радиоинтерферометр (с короткой базой) был создан в СССР

для целей космической навигации в конце 50-х годов. Идея радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами была выдвинута впервые в мире Л. И. Матвеенко, Н. С. Кардашевым и Г. Б. Шоломицким в 1962 г. Основными вехами практического развития РСДБ в нашей стране автор считает первые эксперименты по радиоинтерферометрии с межконтинентальной базой (Симеиз, КраО–Хайстек, США) в 1969 году; подготовку под руководством В. П. Мишина, Л. И. Матвеенко, В. И. Костенко проекта космического радиоинтерферометра (1982 г.); образование в 1985 г. по проекту ВЕГА РСДБ-сети из двух 70-метровых радиотелескопов (Уссурийск, Евпатория), 64-метровой антенны (Медвежьи Озера), 25-метровой антенны (Улан-Удэ), двух 22-метровых радиотелескопов (Симеиз, Пущино); создание специализированного РСДБ-комплекса «Квазар-КВО». Показаны возможности метода РСДБ для решения астрофизических и прикладных задач.

Статья представляет собой текст доклада, прочитанный автором на конференции “РСДБ–2012 для астрометрии, геодинамики и астрофизики”, СПб, ИПА РАН, 11–15 сентября 2006 г. (см. также “Труды ИПА РАН”, 2007, т. 16, с. 105.)

Сообщения Института прикладной астрономии РАН № 176 – Санкт-Петербург, 2007. – 35 с.

## **Содержание**

1.	Введение	5
2.	Источники релятивистских частиц — переменность радиоизлучения	6
3.	Радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами — РСДБ	8
4.	Космический радиоинтерферометр	20
5.	Глобальная сеть	22
6.	Результаты РСДБ исследований	24
7.	Прикладные задачи	28
8.	Перспективы РСДБ	31
	Список литературы	33

## 1. Введение

Радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами (РСДБ) открыла новую страницу астрономии. Угловое разрешение РСДБ в тысячи раз превышает разрешающую силу лучших оптических инструментов. Это позволяет исследовать формирование звезд и сверхтонкую структуру активных ядер галактик. На принципиально новой основе развиваются такие традиционные направления как астрометрия и геодезия. И если труба Галилея открыла человечеству Солнечную систему, то РСДБ — весь окружающий мир.

История создания и развития РСДБ непосредственно связана с освоением космического пространства. В конце 50-х годов стартовали первые космические ракеты — «Лунники». Необходимо было проконтролировать их движение и определить точку прилунения аппаратурного контейнера. По указанию директивных органов радиоастрономы ФИАН создают на основе радиотелескопов Крымской радиоастрономической станции, вблизи Симеиза, радиоинтерферометр. Работа прошла успешно и получила высокую оценку М. В. Келдыша и С. П. Королева. Накопленный опыт позволил радиоастрономам сделать следующий шаг — создать радиоинтерферометрический треугольник для исследований солнечных вспышек. Были обнаружены и измерены скорости и траектории движения выбросов солнечной плазмы. В ряде случаев скорости выбросов превышали вторую космическую, и через несколько дней потоки частиц достигали Земли, вызывая шумовые бури.

В это время в Крыму вблизи Евпатории в преддверии очередных запусков создается Центр дальней космической связи (ЦДКС). Основой измерительного комплекса стал интерферометр с базой 500 м. В кратчайшие сроки были созданы крупные антенны, комплексы, состоящие из восьми 16-м параболических антенн, установленных на общей платформе. В качестве поворотных устройств использовали орудийные башни линкора, рис. 1. Угломестную ось, она же аппаратурная кабина, сваривали из газгольдеров. ФИАН участвовал в создании интерферометра. Впервые были разработаны и введены в действие малошумящие усилители параметрического типа ( $\lambda = 32$  см) и усилители квантово-парамагнитного типа — мазеры ( $\lambda = 8$  см), работавшие при гелиевых температурах.

Эффективность управления полетами космических аппаратов существенно зависит от точности определения координат. Необходимо



Рис. 1. Антenna АДУ-1000 Центра дальней космической связи, Евпатория



Рис. 2. Крабовидная туманность

было обеспечить точность координатных измерений порядка  $0.^{\prime\prime}1$ , точность неслыханная по тем временам. Для этого были нужны реперные источники — компактные яркие объекты с точными координатами. Для решения этой задачи были приглашены Г. Б. Шоломицкий и Г. С. Хромов, аспиранты И. С. Шкловского из ГАИШ.

## 2. Источники релятивистских частиц — переменность радиоизлучения

Это была эпоха бурного развития и становления радиоастрономии. Астрономические объекты предстали перед исследователями как уникальные космические лаборатории. Центральной проблемой радиоизлучения источников был вопрос о происхождении релятивистских частиц. Предполагалось, что источники релятивистских частиц должны были быть компактными яркими радиообъектами. Таким объектом могла быть одна из двух звездочек в центре Крабовидной туманности (рис. 2). Вблизи юго-западной звездочки эпизодически наблюдаются компактные жгутики — вислы, движущиеся со скоростью порядка 0.2 скорости света. Было установлено, что их излучение определяется релятивистскими электронами и потому должно наблюдаться и в радиодиапазоне. Для исследований этой звездочки нужен был инструмент

с высоким угловым разрешением. Крабовидная туманность эпизодически закрывается Луной. При приближении края Луны к компактному радиоисточнику должна возникать дифракционная картина. Это эквивалентно наблюдению источника на интерферометре в направлении вдоль его базы. База интерферометра соответствует расстоянию до Луны. В 1964 г. покрытия наблюдались в европейской части СССР на всех крупных радиотелескопах во всем спектре радиоволн от 3 см до метровых волн включительно. Этим исследованиям придавалось очень большое значение. По указанию М. В. Келдыша на антенах ЦДКС были остановлены сеансы связи с космическим аппаратом «Венера» и проведены наблюдения покрытий Крабовидной туманности на волнах 8 и 32 см. Дифракционная картина — компактный радиоисточник был обнаружен на волне 32 см (рис. 3). Его положение совпало с расположением юго-западной звездочки. В дальнейшем было установлено, что это нейтронная звезда (пульсар), образовавшаяся в момент взрыва сверхновой.

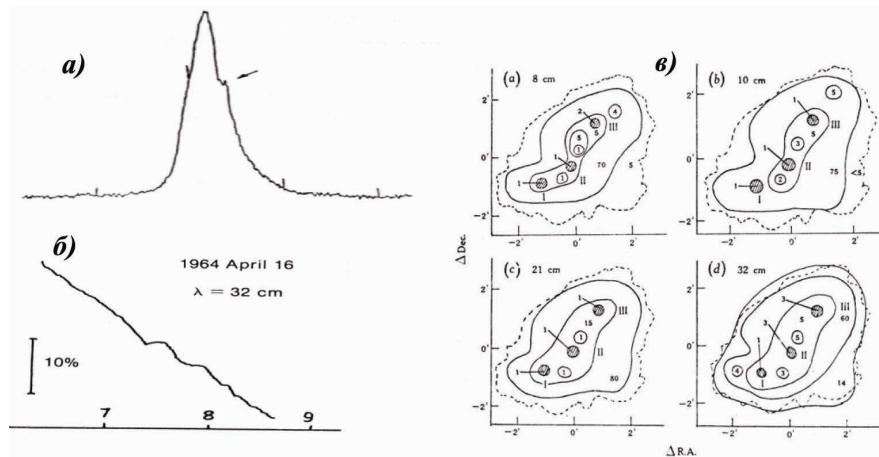


Рис. 3. а) Запись прохождения Крабовидной туманности через диаграмму направленности антенны АДУ-1000 на волне 8 см, 15 апреля 1964 г.  
б) Дифракционные лепестки на волне 32 см, 16 апреля 1964 г. [1].  
в) Распределения яркости в Крабовидной туманности [2].

В это же время было обнаружено еще более удивительное явление — изменение радиоизлучения одной из компактных областей, расположенной в юго-восточной части туманности. При подготовке к наблю-

дениям покрытия на волне 8 см уточнялись систематические ошибки наведения антенны. На рис. За показана запись прохождения Крабовидной туманности через диаграмму направленности антенны. Стрелкой отмечена деталь — избыточное излучение, соответствующее источнику, смещенному в юго-восточном направлении относительно центра тяжести излучения от туманности. Распределение яркости туманности на волне 8 см, полученное по данным покрытия на следующий день, подтвердило наличие яркой области в юго-восточной части туманности, рис. Зв. Но ее излучение снизилось по отношению к предыдущему дню. Таким образом, была открыта переменность радиоизлучения. Результат был столь неожиданным, что теоретики отказывались верить в возможность такого явления. Действительно, время вычисления релятивистского электрона в радиоизлучении составляет сотни тысяч лет. И только после детальнейшего анализа и обнаружения переменности радиоизлучения в квазарах (см. ниже) эти данные были опубликованы [3]. В этой связи вспоминаются слова нашего блестящего астрофизика Соломона Борисовича Пикельнера: «Экспериментальные результаты могут быть отклонены или подтверждены только экспериментальными данными, в то время как теоретические модели нуждаются в экспериментальном подтверждении».

Исследования методом покрытий Луной объекта 3С 273, проведенные на ЦДКС на волнах 8 и 32 см, и австралийскими радиоастрономами на волне 75 см выделили квазизвездный объект — ядро и джет, определили их спектры и точные координаты [4]. Открытие источников релятивистских частиц неизбежно поставило вопрос о стационарности эжекции частиц и соответственно переменности радиоизлучения. Шоломицкий проводил исследования объектов с пекулярными спектрами и обратил внимание на возможную переменность источника СТА102 в дециметровом диапазоне.

### **3. Радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами — РСДБ**

ЦДКС создавался усилиями многих организаций страны, разрабатывались и внедрялись новейшие технологии, приборные комплексы созданные на основе последних достижений физики. ЦДКС являлся полигоном, на котором испытывались новейшие разработки. Лучшие специалисты страны отрабатывали и внедряли методы дальней кос-

мической связи. Даже сейчас не перестаешь удивляться достигнутым результатам. Это относится и к наблюдению покрытий, определению абсолютного положения радиоисточников. Но покрытия радиоисточников повторяются довольно редко и не всегда видны в местах расположения крупных радиотелескопов. Да и не все объекты покрываются. Нужен был более эффективный инструмент со сверхвысоким угловым разрешением.

Основным назначением измерительного комплекса ЦДКС было обеспечение связи с космическими аппаратами в пределах Солнечной системы. Эффективность линии связи определяется эффективными площадями антенн и малошумящими входными усилителями. Электрические параметры антенн аттестовались Институтом радиотехники и электроники Арм.ССР. Весной 1962 г. руководитель «Земли» Г. Я. Гуськов проводил с Э. Г. Мирзабекяном совещание, на котором рассматривался вопрос о снижении эффективности канала связи с космическими аппаратами на волне 32 см. На этой волне применялись усилители параметрического типа. В ходеadioastronomicheskikh наблюдений мы отрабатывали технику и методику измерений параметров системы. Далеко не всегда идеи легко превращались в действительность. Нужно было разработать методику измерений параметров крупных антенн radioastronomicheskimi методами по источникам космического радиоизлучения, провести абсолютную калибровку принимаемых шумовых сигналов. Все это происходило впервые и к тому же в режиме полной секретности. Поэтому у нас нет фотографий тех лет, а публикации весьма ограничены.

Как стало известно в дальнейшем, сотрудники фирмы «Белл» А. Пензиас и Р. Вильсон решали аналогичную задачу по определению параметров крупной антенны рупорного типа, определению ее шумовой температуры. В процессе измерений на волне 8 см ими было обнаружено избыточное 3-х градусное фоновое космическое излучение, получившее с легкой подачи И. С. Шкловского название реликтового. Еще до публикации результатов А. Пензиас прислал мне препринт работы и просил провести измерения температуры фона (на антenne АДУ-1000). К сожалению, многоэлементная синфазная антенна, соединенная длинными волноводами не позволяла провести столь тонкий эксперимент. О чём я и сообщил своему американскому коллеге.

Измерения параметров антенн представителями Института радиотехники и электроники Арм.ССР проводились с помощью специального измерительного приемника. По их данным параметры антенных

на волне 32 см лежали в допустимых пределах. Мы же измеряли параметры действующей системы со штатным параметрическим усилителем на входе. Параметры системы с параметрическим усилителем на входе весьма критичны к согласованию с антенной. Разветвленная сеть волноводных соединений, в этом смысле, была далеко не идеалом. По своему опыту работы с интерферометром в Кацивели мы знали, что высокочастотные кабели большого сечения типа РКК 5/18 весной и осенью накапливали конденсат, что меняло его параметры. Кабели нужно было держать под небольшим избыточным давлением, что и предлагалось сделать с волноводными трактами. Наши измерения проводились весной и свидетельствовали о снижении чувствительности системы, увеличению потерь в трактах. Быть арбитром по рассматриваемому вопросу ко многому обязывало. Тем более, что вопрос носил далеко не академический характер. Технически разъединить волноводы было не просто. Г. Я. Гуськов дал указание бригаде монтажников разъединить волновод. В момент «простоя», мы обсуждали методику измерения координат космических аппаратов методом длиннобазовых доплеровских измерений (принятая терминология среди профессионалов). Принимаемые сигналы преобразовывались с помощью атомных стандартов частоты и регистрировались на магнитофонах, а в дальнейшем в вычислительном центре выделялась их разностная частота. Для меня слово «база» однозначно отождествлялось с понятием радиоинтерферометр. Действительно так же может работать и интерферометр — РСДБ. Когерентность сигналов при записи и воспроизведении можно восстановить с помощью зарегистрированных пилот-сигналов от тех же атомных стандартов частоты. Было решено проверить этот принцип на антенных ЦДКС Евпатория—Симферополь. Пункты имели необходимую аппаратуру: атомные стандарты аммиачного типа, магнитофоны аналогового типа с полосой регистрации 100 кГц и систему обработки.

Осенью 1962 г. во время посещения Радиоастрономической станции ФИАН в Пущино я сделал сообщение на семинаре о методе РСДБ и подготовке соответствующего эксперимента между пунктами ЦДКС АДУ-1000, Евпатория, и РТ-32, Симферополь. К моему полному удивлению предложение не получило поддержку у ведущих радиоастрономов страны. Не меньшее удивление было у молодых радиоастрономов. Руководитель лаборатории радиоастрономии ФИАН В. В. Виткович выразил сожаление, что не может рекомендовать статью к публикации. Когда же я поинтересовался у одного из уважаемых членов Ученого-

го совета доводами по существу вопроса, то услышал весьма «содержательный» ответ: «Это не может быть, потому что не может быть никогда!». И это при полной поддержке профессионалов ЦДКС!

Открытые публикации в ведомственных институтах не практиковались. В этой ситуации у меня оставалась лишь одна возможность обратиться за поддержкой к своим коллегам в ГАИШ. Мое сообщение на семинаре в ГАИШе получило диаметрально противоположную оценку. Председатель семинара Д. Я. Мартынов: «Необычайно важно, нужно патентовать». В декабре 1962 г. ГАИШ направляет заявку Л. И. Матвеенко, Н. С. Кардашева и Г. Б. Шоломицкого в Патентное бюро. Предварительное заключение экспертов сводилось к тому, что патентуется результат, а не метод. Но на просьбу дать согласие на публикацию метода не соглашались. И только после моего категорического требования выдать патент или разрешить публикацию удалось получить согласие на второе. Мне казалось, что патентовать РСДБ это все равно, что патентовать закон Ома. Метод должен быть общедоступен. В декабре 1963 г. разрешение Патентного бюро на публикацию было получено и статья направлена в журнал «Известия ВУЗов. Радиофизика».

Но успокаиваться было рано. На пути публикации дружно встало редколлегия журнала — рецензент, требовал указать какова стабильность атомных генераторов, ее зависимость от времени и какое количество лепестков будет наблюдаться. При этом он прекрасно знал, что сведения о высоко стабильных атомных генераторах секретны. На эту удочку мы не попались. После длительной переписки и выяснения отношений была приведена общая зависимость числа лепестков от стабильности гетеродинов и длины базы. По требованию редколлегии по той же причине была исключена фраза о неограниченности длины базы и возможности выноса элемента на орбиту вокруг Земли? Как оказалось в дальнейшем, рецензент не терял времени и активно пытался реализовать идею не дожидаясь выхода статьи! И как тут не вспомнить, рекомендацию Д. Я. Мартынова о необходимости патентования. В последующие годы, когда стали наводить порядок с патентованием у нас в стране, Д. Я. Мартынов рекомендовал вернуться к оформлению патента, но я считал нецелесообразным менять свое отношение к данному вопросу. Не останавливаясь на деталях становления и развития РСДБ, могу лишь отметить, что основными проблемами у нас в стране все же были не бюрократические препоны, а «поддержка» коллег.

Летом 1963 г. на ЦДКС ожидали приезд гостя Президента АН СССР М. В. Келдыша директора радиообсерватории Джодрелл Бэнк проф. Б. Ловелла. В связи с секретностью основной состав ЦДКС не мог участвовать в этой встрече, и мне, как руководителю радиоастрономических исследований, поступило указание принять гостя, ознакомить его с техническими средствами и проводимыми исследованиями. Решили на время приема гостя устроить выходной — отправить личный состав в/ч на пляж. Осталось лишь несколько человек охраны на всю огромную территорию. Чтобы встреча была более содержательной, приветствовали И. С. Шкловского и Г. С. Хромова в качестве переводчика. В это время они были в Крыму, в КрАО, на летней школе астрономов. Во время приема Б. Ловелла Иосиф Самуилович предложил мне изложить идею интерферометра с независимой регистрацией сигналов (формально это не могло быть сделано по причинам патентования). Б. Ловелл (радиофизик) сразу оценил идею, но высказал сомнение в необходимости сверхвысоких угловых разрешений. Радиоизлучение мощных источников, таких как Лебедь А, Кассиопея А, Крабовидная туманность, определяется их большими угловыми размерами. Их яркостная температура  $T_b \sim 10^7$  К и казалась по тем временам максимально возможной. Радиоизлучение звезд тем более мало, т.к. их яркостные температуры не превышают десятков тысяч градусов. Гипотетический радиоисточник в Крабовидной туманности и квазары были еще неизвестны. Мы согласовали меморандум о создании радиоинтерферометра АДУ-1000 (Евпатория) и МК-1 (Джодрелл Бэнк) на волну 32 см. Эта волна была известна английской стороне по совместным работам по лунным программам. Б. Ловелл предполагал обсудить со своими специалистами детали эксперимента и прислать ответ. Но ответ мы не получили. Много лет спустя Пальмер познакомил меня с воспоминаниями проф. Ловелла. Проф. Ловелл после Крыма посетил Новый свет, где обсуждал эксперимент со своими коллегами, а Пальмер приехал в КрАО для согласования РСДБ-эксперимента на волне 75 см. Но его визит ограничился ознакомлением со строительством РТ-22 и знакомством с достопримечательностями южного берега Крыма.

Наконец после многочисленных согласований статья вышла в свет (рис. 4).

УДК 621.396.67.523.164

О РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРЕ С БОЛЬШОЙ БАЗОЙ

Л. И. Матвеенко, Н. С. Карабицев, Г. Б. Шломоцкий

Рассмотрена система радиоинтерферометра без регрессии. Регрессия не требуется для обработки сигналов, записанных на каждой антенне (путем записи на магнитную ленту) с последующей систематической обработкой этих записей. Использование двух базовых антенн с одинаковыми базами не уменьшает разрешение в частоте  $\sqrt{\frac{D}{f_0^2}} \ll 1,6 \cdot 10^{-11} D$  ( $D$  — длина базы в км). Обсуждаются достоинства такого интерферометра.

В настоящий время для обработки и исследования источников космического излучения с различными базами узловых размеров применяются радиоинтерференционные методы исследований. В случае радиоисточников малых угловых размеров приходится разносить антены на расстояние, превышающее их собственную ширину. В работе с такими системами связано с большими техническими трудностями, так как обычные методы измерения частоты сигнала в таких системах, такие как расточенные становки, неприменимы, ввиду большого затухания сигнала при  $D > 1$  км. Поэтому приходится пользоваться сложными системами регрессии. Проведено исследование радиоинтерферометра, спроектированного в Днепропетровске и работающего на частоте 178 МГц [1]. Кроме технической сложности недостатком системы являются флюктуации фазовых характеристик приемника, что приводит к тому, что результаты измерения частоты интерференции изменяются на величину порядка нескольких герц.

В работе [2] делается попытка некоторого упрощения системы интерферометра путем сложения сигналов после детекторов по низкой, а не по высокой частоте. В результате этого устраняется проблема потери чувствительности в  $T_1 T_2$  раз, где  $T_1$  — антенная температура приемника,  $T_2$  — шумовая температура системы. Последнее достигается в сокращении времени записи на магнитную ленту РП и в том, что сигналы в записи электрических сигналов высоких частот на магнитную ленту [3]. Использование РП позволяет упростить конструкцию радиоинтерферометра со скрепленными базами.

1. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЗАВИСИМЫХ ГЕТЕРОДИНОВ

Рассмотрим две независимые приемные системы, разнесенные на большое расстояние друг от друга. Каждая система состоит из антены, усиленника высоких частот, смесителя, гетеродина, усиленника промежуточной частоты и приемника РП. Время записи сигналов в РП в обеих системах будет рассмотрено во втором разделе. Важной частью такой интерферометрии

$$e_{\text{ант}} \approx \cos \left( \varphi + \varphi + \int \Delta \omega_s (x) dx \right). \quad (1)$$

UNIVERSITY OF CALIFORNIA, SAN DIEGO

BERKELEY • DAVIS • DAVIS • LOS ANGELES • RIVERSIDE • SAN DIEGO • SAN FRANCISCO



SANTA BARBARA • SANTA CRUZ

DEPARTMENT OF APPLIED ELECTROPHYSICS

P. O. BOX 109  
LA JOLLA, CALIFORNIA 92093

February 23, 1968

Dr. V. V. Vitkевич  
Department of Applied Astronomy  
Lebedev Physical Institute  
Moscow  
USSR

Dear Dr. Vitkевич:

We at UCSD know a group of us have been experimenting with very long baseline interferometers using atomic clocks and independent time and frequency standards. The data at each end of the baseline are recorded sequentially on magnetic tape for later processing in a digital computer.

Using a baseline between Green Bank and Sweden of more than  $10^3$  km, at 3 cm, we can measure the phase difference to  $10^{-11}$ . We are strong radio emitters and therefore have diameters less than 0.001. We are curious interested in extending the resolution by increasing the size of the antennas. We have a 37 m. dish at Green Bank. A baseline between the 37 m. telescope at Green Bank and the 25 m. meter antenna at Dnepropetrovsk would give us a resolution of  $10^{-12}$  sec. The highest resolution obtainable from two antennas located on the surface of the earth.

The purpose of this letter is to inquire if you and your colleagues would be interested in collaborating with us on such an experiment.

The timing and data recording equipment are portable, and could easily be transported to Dnepropetrovsk. We have a very good 3-cm radiometer will be available at the 37 m. Green Bank telescope at the end of this summer, and we could think of an experiment after that time.

Sincerely yours,

M. N. Cohen  
K. I. Kellermann  
M. K. Kellermann

*Уважаемые  
доктора  
Виткевича  
и коллеги  
М. Коэн  
и К. Келлерманн  
М. Келлерманн*

Рис. 4: Первая публикация о радиоинтерферометре с независимой регистрацией сигналов. Статья отправлена в печать в декабре 1963 г.; поступила в редакцию в начале января 1964 г.

Рис. 5: Предложение М. Коуэна и К. Келлермана о проведении наблюдений на РТ-22 и РТ-43, на волне 3 см.

Было ясно, что предложение идеи, не дает право на ее реализацию. Для этого нужно иметь научную степень. Пока шла «борьба» за РСДБ, мы продолжали поиски компактных источников. Как уже отмечено, в 1964 г. происходили покрытия Крабовидной туманности, видимые в европейской части Советского Союза. Были подготовлены крупные радиотелескопы ФИАН и ЦДКС, и на них были проведены наблюдения. Полученные изображения Крабовидной туманности на волнах от 3 см до метровых волн включительно позволили выделить отдельные структуры, определить их спектры и природу радиоизлучения. Эти результаты легли в основу моей кандидатской диссертации «Исследование распределения радиояркости Крабовидной туманности», защита которой состоялась в 1966 г. в ГАИШе.

Впервые РСДБ-метод был реализован в 1967 г. радиоастрономами США и независимо Канады. В первом случае применялась цифровая техника регистрации сигналов, во втором — аналоговая. По завершении эксперимента М. Х. Коуэн (Калтех) и К. И. Келлерманн (НРАО) обратились 23 февраля 1968 г. к В. В. Витковичу с предложением провести эксперимент на волне 3 см между 22-м радиотелескопом в Пущино и 43-м в Грин Бэнк (рис. 5). В. В. Виткович передал мне предложение американских коллег со словами: «Это Ваша идея, Вам ее и реализовывать, но вероятность очень мала — время «холодной войны».

Письмо американских ученых напомнило ФИАН о РСДБ. Заместитель директора ФИАН Н. Г. Басов «открыл» зеленый свет — директивные органы дали согласие на проведение эксперимента. Но координаты РТ-32 не могли быть переданы американской стороне, поэтому было принято решение об использовании РТ-22 КРАО, Кацивели. А. Б. Северный дал согласие на участие КРАО в эксперименте. В январе 1969 г. мы с И. Г. Моисеевым были приглашены в НРАО и согласовали технические условия эксперимента. Для гарантии были приняты две волны. Волна 6 см, на которой ранее были получены результаты, и после определения параметров интерферометра на волне 6 см планировалось провести наблюдения на волне 3 см. По завершении работы в НРАО, нам предоставили возможность ознакомиться с рядом радиоастрономических обсерваторий США. В университете в Беркли мы посетили семинар, на котором У. Велч докладывал об открытии группой Ч. Таунса в газопылевых туманностях источников, излучающих интенсивные линии водяного пара на волне 1.35 см. Предполагалось, что это тепловое излучение. Но это предположение нужно было прове-

рить. Рассматриваемые объекты были идеальны для РСДБ-измерений. Их излучение достигало десятков кЯн, а ширина линий не превышала нескольких десятков кГц. Первые наблюдения проводились с системой Марк I, созданной на основе стандартной вычислительной техники типа IBM, магнитофон которой обеспечивал полосу регистрации 360 кГц. Через несколько дней мы посетили Массачусетский технологический институт и Хайтекскую обсерваторию и обсудили с Б. Берком, его аспирантом Д. Мораном и инженером Космо-Папа возможности наблюдений этих источников на межконтинентальном радиоинтерферометре Симеиз-Хайтек. Были согласованы параметры аппаратуры и программа наблюдений. Для гарантии решили провести тестовые наблюдения в пределах США, а затем перейти на межконтинентальную базу Симеиз-Хайтек.

По возвращении мы в кратчайшие сроки создали аппаратуру для юстировки радиотелескопа РТ-22 и определения параметров его антенны, убрали порталный кран, перекрывавший обзор антенны. Определили координаты РТ-22 относительно телескопа на г. Кошка. Были проведены исследования по выбору места приема сигналов навигационной системы Лоран-С в Прибалтике. Осенью 1969 г. после получения гарантий от АН СССР о возврате имущества НРАО, в Москву прибыли с аппаратурой К. Келлерманн, Б. Кларк и Д. Пайн. Для синхронизации времени пунктов наблюдений был доставлен из Грин Бэнк рубидиевый стандарт частоты-времени в горячем состоянии. В Москве часы были поставлены на подзарядку. После завершения всех работ крупногабаритная аппаратура была отправлена машиной в Симеиз, а мы вылетели с рубидиевыми часами в Симферополь и далее в Кацивели. Емкость аккумуляторов рубидия была ограничена, поэтому машина шла на повышенной скорости. За Алуштой нас остановил автоинспектор за превышение скорости. Наши гости с некоторым недоверием отнеслись к этому «инциденту». Автоинспектор признал наше нарушение оправданным и не стал чинить препоны. АН СССР тогда уважали и считались. Автоинспектор оказался любознательным и попросил показать ему эти удивительные атомные часы. Келлерманн с гордостью открывает багажник — часы стоят! Первая реакция — происки врагов. Ведем анализ в духе Шерлока Холмса: часы показывают время пролета над Харьковым. Ясно — аккумуляторы были недозаряжены.

На следующее утро с огромным трудом связались с О. Ридбеком из Иосмической обсерватории, Щвеция. Келлерманн просил подготовить

и выслать в Пулково синхронизованные рубидиевые часы по сигналам Лоран-С. В это же время попросили Ю. Л. Кокурина (станция ФИАН) дать аккумулятор с автомашины. Установили его для маскировки в картонную коробку, соединили с рубидием (чтобы поддерживать режим) и отправили в Ленинград в сопровождении Келлерманна и Когана. Стюардесса с подозрением рассматривала двух иностранцев с большим трудом поднимающихся по трапу. Пошутили и пропустили. В Пулковской обсерватории часы сверили и тут же отправили в Симферополь, а шведские оставили на хранение в Пулково. Все было сделано более чем оперативно. В то время в Симеизе, не говоря уже об РТ-22, не было телефонной связи с зарубежными странами или факса. Ближайший телетайп в Интуристе Ялты работал с большими перебоями, а оформление телеграмм было более чем проблематично.

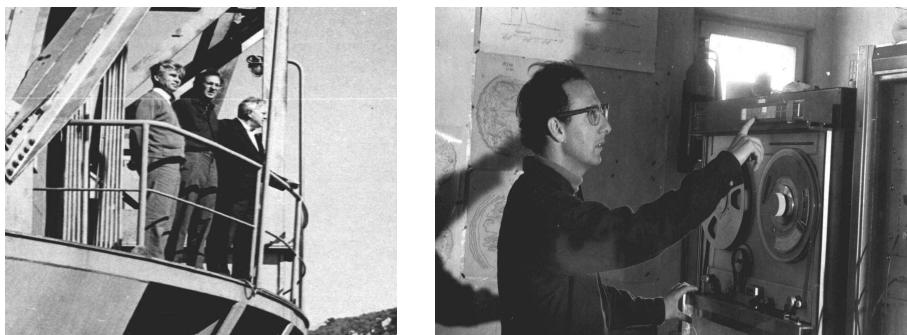


Рис. 6. Участники эксперимента И. Моисеев, К. Келлерманн и В. Виткевич (слева) и К. Келлерманн (справа) на РТ-22 КрАО.

Но как бы то ни было, в нужный момент все было готово, и Келлерманн нажал клавишу пуска магнитофона (рис. 6). В сентябре были проведены тестовые наблюдения на волне 6 см. Магнитные ленты с контрольными записями сигналов были переданы В. В. Виткевичем непосредственно командиру самолета американской авиалинии и доставлены в Нью Йорк. Через несколько дней нам сообщили, что интерференционные лепестки получены и уточнены параметры базы и поправки времени. В октябре успешно прошли наблюдения на обеих волнах. Обработка данных проводилась в НРАО на ЭВМ типа IBM 360/60 и Калифорнийском технологическом институте на более мощной ЭВМ IBM 360/75. Расстояние между антеннами составляло 8030 км,

что обеспечило угловое разрешение близкое предельному значению в условиях Земли. На волне 2.8 см были получены радиоинтерференционные лепестки от источников 3С 273 и 4С 39.25; угловое разрешение достигало  $0.0005''$ . На рис. 7 показан спектр радиоинтерференционного сигнала от источника 3С 273. Для надежности данные были независимо обработаны в вычислительном центре Годдардского космического центра (GSFC).

Проведенные наблюдения позволили уточнить координаты базы с точностью около 50 м и определить поправки времени сигналов станции навигационной системы Лоран-С, расположенной в Турции. Таким образом была доказана возможность реализации интерферометрии на коротких сантиметровых волнах, достигнуто предельное угловое разрешение в условиях Земли. Этим самым были внесены корректизы в теоретические модели тропосфера, исключающие возможность реализации РСДБ на сантиметровых волнах. Удивительными были и астрофизические результаты. Квазары оказались не точечными источниками (не квазизвездными объектами). Была обнаружена их сложная струк-

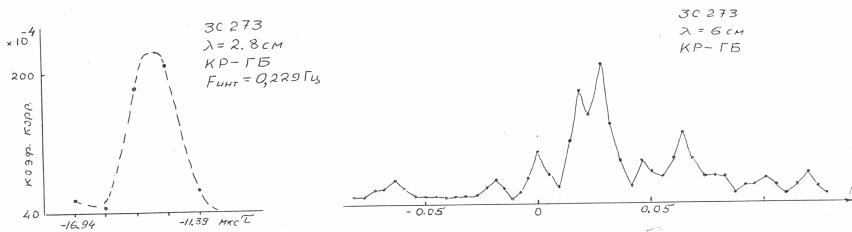


Рис. 7. Радиоинтерферометрический сигнал источника 3С 273 на волне 2.8 (слева) и 6 см.

Масштабы работ выходили за пределы возможностей Лаборатории радиоастрономии ФИАН и РСДБ-направление в июне 1969 г. по ходатайству Г. И. Петрова переводится в создаваемый Институт космических исследований. Следующий эксперимент на волне 3.55 см, связная волна DSN, планировалось провести с дополнительной 64-м антенной Центра дальней космической связи в Голдстоуне в июне 1971 г.

В этой связи следует сделать небольшое пояснение об особенностях радиоинтерферометрических исследований. Отклик интерферометра (радиоинтерференционные лепестки) соответствует не излуче-

нию отдельной точки изображения наблюдаемого объекта, а одной из пространственных частот этого изображения. Чтобы получить само изображение нужно измерить все его пространственные гармоники, т.е. провести наблюдения источника на радиоинтерферометрах с базами разной длины и ориентации. А затем по этим гармоникам построить само изображение. Поэтому для следующего эксперимента привлекалась 64-м антенна Центра дальней космической связи в Голдстоуне (Калифорния). РТ-22, 43-м антenna в Грин Бэнке и 64-м антеннa в Голдстоуне образуют три интерферометра.

Для повышения чувствительности РТ-22 совместно с коллективом В. Б. Штейншлейгера разрабатывался радиометр с малошумящим усилителем мазерного типа, а с коллективом Л. Д. Бахраха — кассегренновская система облучения антенны (рис. 8, слева) [6]. НРАО создало специализированную систему регистрации и обработки данных Mark II на основе студийных видеомагнитофонов. В качестве опорного генератора на РТ-22 применили высокостабильный кварцевый генератор, контролируемый рубидиевым стандартом, а в Грин Бэнк и Голдстоуне генератор водородного типа. Это существенно повысило чувствительность измерений. Для проведения очередных наблюдений в Крым приехали К. Келлерманн, М. Коуэн и Б. Кларк (рис. 8).

Этот эксперимент тоже не обошелся без приключений. Для сравнения времени на РТ-22 Б. Кларк выехал из Грин Бэнк с рубидиевыми часами. Мы все подготовили к наблюдениям на РТ-22, но потерялся Б. Кларк. Для гарантии привязки времени он должен был заехать в Институт радиоастрономии им. Макса Планка в Бонне и сверить часы по сигналам навигационной системы. Таможенники с немецкой педантичностью потребовали выплатить залог за ввоз часов и никакие доводы, что часы будут после сверки вывезены, на них не действовали. В результате Б. Кларк прибыл в Москву на два дня позднее, когда его никто не ждал. Но нам повезло. В это же время из США прилетел М. Коуэн с кварцевым генератором и на мой вопрос, где Барри, он показал на сиротливо стоящего за моей спиной у стойки таможенника Б. Кларка с мигающими часами. Очередной раз сработал авторитет АН СССР и часы вместе с сопровождающими были немедленно пропущены.

Эксперимент на волне 3.55 см прошел удачно. Структура квазаров оказалась сложной, при этом было обнаружено движение отдельных компонентов со скоростями выше скорости света. Казалось, что это противоречит известным физическим законам. Было показано, что это

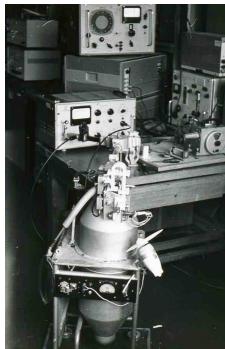


Рис. 8. Мазерный усилитель для волны 3.55 см (слева). М. Коэн, Б. Кларк и И. Моисеев на РТ-22 Симеиз.

видимое сверхсветовое движение определяется конечным значением величины скорости света и движением источника со скоростью близкой к скорости света [7,8]. Была установлена необычайно высокая яркостная температура ядер, достигающая предела обратного комптоновского рассеяния  $T_b \sim 10^{12}$  К.

После окончания наблюдений квазаров совместно с РТ-37 в Хайстеке были проведены исследования источников, излучающих линии водяного пара. В июне 1971 г. в Крым приехали Б. Ф. Берк, Космо-Папа, Д. Моран (MIT) и С. Ноулз (NRL). Использовалась простейшая аппаратура со смесительным приемником, прошедшая успешные испытания в США. Для гарантии Б. Ф. Берк привез рубидиевые часы из Хайстека. Часы имели достаточно большой вес. В самолете летел адмирал американского флота. Увидев наклейку на часах NRL (Военно морская лаборатория), он в знак солидарности счел своим долгом помочь вынести их из самолета. Перед РСДБ-наблюдениями в объекте W 49 произошла мощная вспышка излучения в линии водяного пара (рис. 9). Сигнал нарастал в течение десятка минут, что свидетельствовало об очень малых размерах источника. Измерения на интерферометре Симеиз-Хайстек с разрешением 0.2 мсек дуги подтвердили это. Размеры области вспышки не превышали  $\sim 0.07$  а.е., а ее яркостная температура достигала  $b \sim 10^{16}$  К. В ряде газопылевых комплексов были выделены яркие компактные мазерные источники, сгруппированные в активных

зонах. Таким образом, была установлена мазерная природа излучения источников в линиях водяного пара и подтверждены идеи В. А. Амбарцумяна о коллективном характере формировании звезд в газопылевых комплексах [10] и И. С. Шкловского о сопутствии мазерного излучения формированию протопланетных систем. Чтобы исследовать даже ближайшие к нам аналоги Солнечной системы необходимо было повысить разрешающую силу — создать интерферометр с элементом на орбите вокруг Земли.

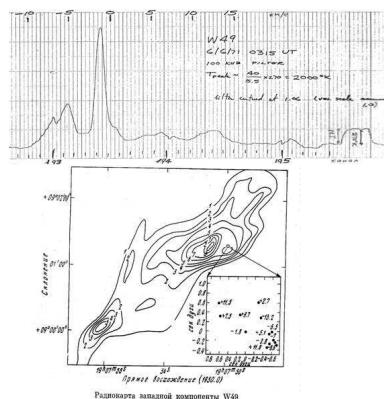


Рис. 9. Спектр объекта W 49 и распределение мазерных источников [9].



Рис. 10. Группа «мазерщиков» в Мисхоре перед наблюдениями.

#### 4. Космический радиоинтерферометр

Угловое разрешение РСДБ определяется размерами базы. Длина базы может быть сделана сколь угодно большой. Мы достигли предельных, трансатлантических расстояний и нужно было выходить за пределы Земли. После обнаружения ярких компактных мазерных источников на волне 1.35 см мы приступили к разработке проекта космического радиоинтерферометра. Руководителем проекта являлся В. П. Мишин, научным руководителем — Л. И. Матвеенко и техническим руководителем — Вал. И. Костенко.

По проекту космический радиотелескоп имел параболическое зеркало диаметром 3.1-м (ограничение обтекателя) с кассегреновской системой облучения. Для защиты антенны от космических перепадов температур ее каркас был теплоизолирован, а отражающая поверхность зеркала крепилась на тонких инваровых стержнях, что обеспечивало сохранение ее параболической формы даже для работы в ИК диапазоне (рис. 11). Менялось лишь положение фокуса, которое корректировалось перемещением вторичного зеркала. С помощью этого же зеркала осуществлялась подстройка наведения антенны на исследуемый объект, что существенно экономило расход рабочего вещества.

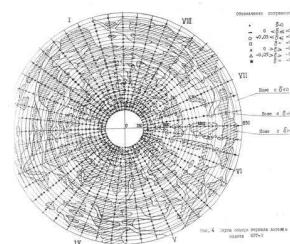
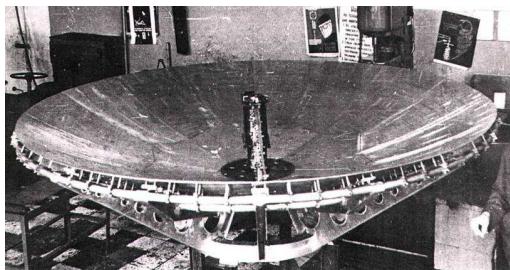


Рис. 11. Параболическая антenna космического радиотелескопа JPR-3 и карта его поверхности.

Оптимальные параметры орбиты соответствовали перигею 30 т. км и апогею 80 т. км, что соответствует угловому разрешению в десятки мкс [11]. Проект получил широкую международную поддержку. Но неумолимо приближалась «перестройка», которая внесла свои коррективы. Наши проработки нашли свое полное отражение в японском проекте VSOP (VLBI Space Observatory Programme). Этот эксперимент явился крупным шагом в развитии технологии РСДБ, он подтвердил оптимальный выбор параметров и заложил технологическую и методическую основу интерферометров Земля–космос. На рис. 12 руководитель VSOP Хирабаяши и Матвеенко во время одной из встреч.

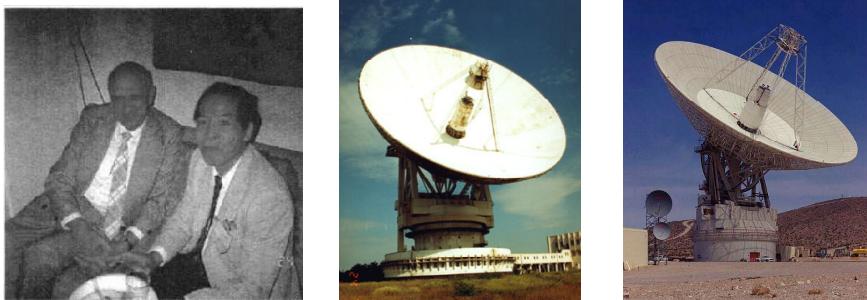


Рис. 12. Матвеенко (слева) с Хирабаяши, 70-м антенна — Евпатория (в центре), 64-м антенна в Голдстоуне

## 5. Глобальная сеть

Проведенные эксперименты доказали возможность и необходимость РСДБ для решения астрофизических и прикладных задач. Как было установлено, компактные радиоисточники имеют сложную структуру и для их исследований необходимо широкое перекрытие пространственных частот. Были определены оптимальные технические требования и направления исследований. Инструменты стали оснащаться малошумящими усилителями, водородными стандартами частоты. Чувствительность инструментов достигла предельных значений. Практически все радиотелескопы мира стали объединяться в единую глобальную сеть. Развитию глобальной РСДБ-сети способствовала разработка Д. Л. Йенном простой и надежной системы регистрации Mark II на основе серийного кассетного видеомагнитофона. Наблюдения проводились во всем спектре радиоволн от миллиметровых до метровых включительно. На рис. 13 показан момент проведения наблюдений мазерных источников на волне 1.35 см на радиointерферометре Тидбинбилла-Симеиз-Мериленд Пойнт.

В наблюдения включается все большее число 64-м радиотелескопов НАСА в Тидбинбилла, Австралии, Мадриде и Голдстоуне и 26-м в Мериленд Пойнт; 10-м в Бангалоре и 20-м в Онсала, 42-м в Овенс Вэлли, 76-м в Джодрелл Бэнк и 22-м в Пущино. Вводятся в действие уникальный 100-м радиотелескоп в Эффельсберге и 32-м инструменты в Италии (рис. 14).

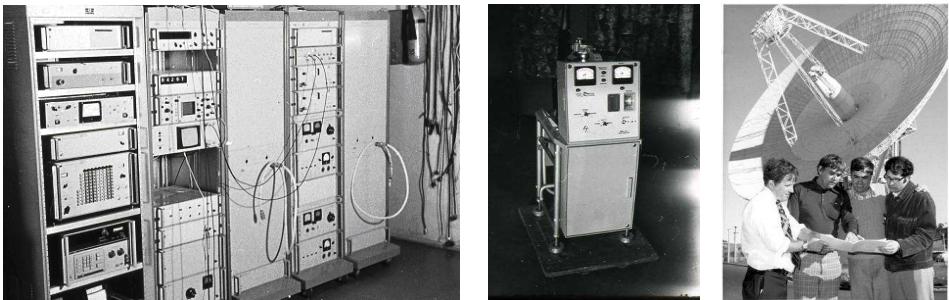


Рис. 13. Водородный стандарт частоты (слева) и малошумящий усилитель мазерного типа на волну 1.35 см (в центре). Группа «мазерщиков» в Тидбинбилле

К 1985 г. в нашей стране по проекту ВЕГА вводятся в действие уникальные 70-м антенны Центров дальней космической связи в Уссурийске, и Евпатории и создается РСДБ-сеть на волну 18 см. Сеть включала 64-м антенну в Медвежьих Озерах, 25-м в Улан Удэ и два РТ-22. Антенны были оснащены системами регистрации типа Mark II, водородными стандартами частоты и малошумящими входными усилителями [12]. Большую помощь в ее создании оказали Е. П. Велихов, А. М. Прохоров и Р. З. Сагдеев. Созданная сеть существенно расширила возможности глобальной сети для измерений траекторий движения астростатов на Венере.

Развитие РСДБ определялось прогрессом технологий систем регистрации сигналов. НРАО и Хайстекская обсерватория разработали широкополосные системы Mark III и VLBA, что существенно повысило чувствительность измерений. Накопленный опыт позволил создать специализированную РСДБ-систему VLBA, состоящую из десяти 25-м параболических антенн. Расположение антенн обеспечивает оптимальное перекрытие пространственных частот. Сеть работает круглосуточно в автоматическом режиме, практически во всем спектре радиоволн от миллиметровых до метровых включительно. Получают радиоизображения объектов в поляризованном излучении в континууме и спектральных линиях в большом динамическом диапазоне с угловым разрешением от 0.2 до 24 мсек.

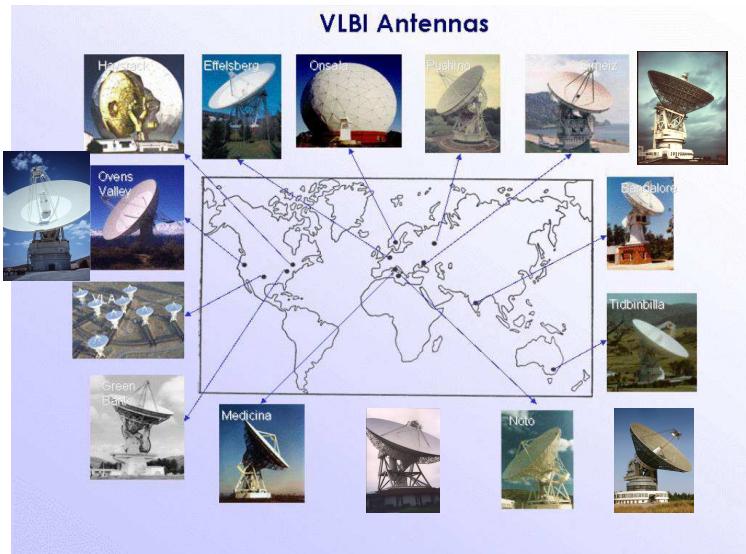


Рис. 14. Глобальная сеть РСДБ.

В настоящее время введена в действие широкополосная система регистрации Mark 5 на основе стандартных дисководов. Прошла успешные испытания система передачи сигналов по оптоволоконным каналам, что позволит перейти в режим работы в квазиреальном времени. Эта система практически снимает ограничение на ширину полосы принимаемого сигнала. Достигнуты предельные чувствительности, что позволяет исследовать структуру квазаров в миллиметровом диапазоне волн, в том числе в поляризованном свете. Обработка данных наблюдений осуществляется на специализированных вычислительных центрах в США, Германии, Европейского центра, Голландия.

## 6. Результаты РСДБ исследований

**Квазары.** Не так давно окружающий нас мир воспринимался как нечто застывшее. Это в полной мере относилось к основным объектам Вселенной — галактикам, их ядрам. РСДБ-измерения открыли их сверхтонкую структуру, внесли существенный вклад в изучение их природы, установили причину переменности радиоизлучения. Выдели-

ли компактное ядро — эжектор и поток релятивистской плазмы — джет. Вспышки радиоизлучения — это излучение выбрасываемых облаков релятивистских частиц. Окружающее вещество падает на ядро — черную дыру, образуя аккреционный диск. Огромная гравитационная энергия системы трансформируется в поток релятивистской плазмы, выбрасываемый с околосветовой скоростью. Ее температура достигает  $T_b = 10^{12}$  К. Поток возбуждает магнитное поле и самофокусируется в тонкую струю — джет. Реактивное воздействие эжектируемого вещества приводит к прецессии оси вращения — эжектора, образованию спиральной формы джета. Угловая скорость увеличиваются со временем, что уменьшает период спирали. Окружающая тепловая плазма обволакивает джет подобно кокону. Прозрачность стенки кокона расстет с уменьшением длины волны и увеличением расстояния от ядра. Она же вызывает низкочастотную переменность радиоизлучения.

В результате вращения инжектора джет в Деве А скручен подобно жгуту (рис. 15). Джет квазара 3С 345 имеет спиральную форму. На рис. 15 показана структура квазара на волнах 1.35–92 см [13].

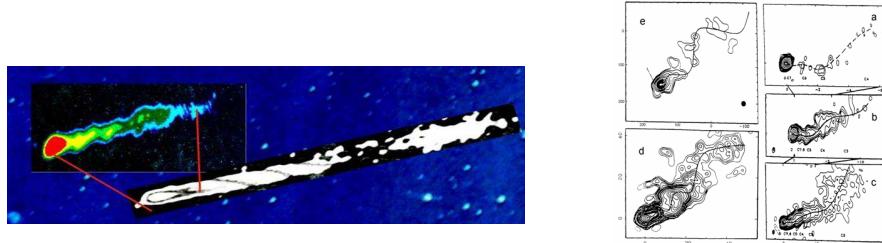


Рис. 15. Структура джета в Деве А (слева) и квазаре 3С 345 (справа)

Структура объекта 1803+784 была детально исследована на волне 18 см с помощью глобальной радиоинтерферометрической сети, включавшей 20 инструментов. На рис. 16 показано перекрытие пространственных частот при наблюдениях этого объекта. С нашей стороны в наблюдениях участвовали 4 радиотелескопа. Как и у 3С 345 его структура состоит из ядра и джета, спиральной формы (рис. 16). Эпизодически выбрасываемые компактные облака релятивистских частиц движутся в той же магнитной силовой трубке спиральной формы. По мере удаления энергия электронов падает, меняются размеры облака, что и

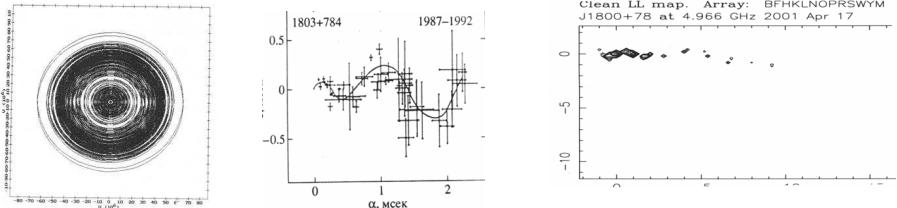


Рис. 16. Объект 18043+784. Перекрытие UV плоскости. Траектория движения выброшенных компактных облаков. Структура джета на волне 6 см

объясняет особенности вспышек, запаздывание на низких частотах [13]. Наблюдаемая предельная яркостная температура достигает  $b = 10^{12}$  К и соответствует комптоновскому ограничению (Келлерманн, Паулини Тос). В области инжектора плотность тепловых электронов порядка  $10^5 - 10^6$  см $^{-3}$ , а оптическая толщина  $\gg 1$ . Увеличение ультрафиолетового излучения в области ядра, взаимодействие релятивистской плазмы со стенкой кокона приводит к уменьшению ее прозрачности. Эта же причина вызывает наблюдаемое изменение меры вращения — ориентации плоскости и уровня поляризации излучения [14].

#### **Области образования звезд и планетных систем.**

В 1960-х гг. в ряде туманностей было обнаружено излучение в узких линиях  $\lambda = 18$  см, а в дальнейшем, как отмечено ранее, в линиях водяного пара  $\lambda = 1.35$  см. И. С. Шкловский показал, что это излучение имеет мазерную природу и сопутствует процессу формирования звезд и планетных систем. В этих активных областях эпизодически наблюдаются мощные вспышки  $_{2}O$  мазерного излучения. Впервые такая вспышка наблюдалась в объекте W49, а затем и Орионе. Остановимся здесь на результатах наших исследований туманности Ориона. Туманность Ориона (рис. 17) — уникальная космическая лаборатория, в которой протекают сложнейшие физико-химические процессы образования молекул, в том числе воды и многих других сложных соединений. Как было показано В. А. Амбарцумяном, в настоящее время в результате гравитационной неустойчивости в газопылевых комплексах формируются звезды, причем этот процесс носит коллективный характер. РСДБ-исследования обнаружили в Орионе 8 активных зон [10].

В сентябре 1979 г. активность одной из зон возросла. Вспышки  $_{2}$  супермазерного излучения наблюдались до конца 1987 г. Излучение вспышек достигало  $F = 8$  МЯн. Наблюдения на глобальной РСДБ-сети

обнаружили цепочку компактных источников, расположенных вдоль S-образной структуры длиной 27 а.е. Размеры источников не превышают 0.1 мсек или 0.05 а.е., рис. 17. Диаметр кружков соответствует логарифму яркости, максимальная яркостная температура равна  $T_b = 10^{17}$  К. Радиальная скорость источников линейно меняется вдоль структуры. Было показано, что супермазерное излучение определяется усилением в оболочке.

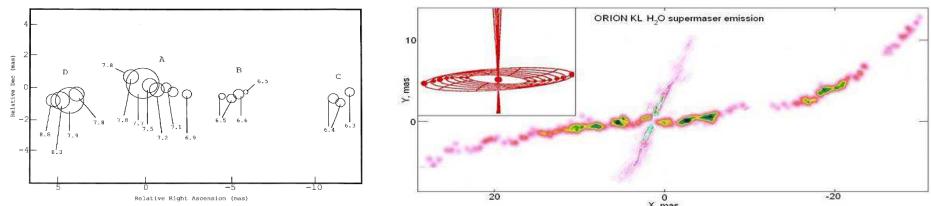


Рис. 17. Структура области супермазерного излучения в Орионе KL, (1 мсек соответствует 0.5 а.е.

Исследования в период «молчания» в 1995 г. ( $F = 1$  кЯн), в широком динамическом диапазоне с помощью системы VLBA обнаружили высококоллимированные биполярные потоки спиралевидной формы и кометоподобные объекты — «пули». Но супермазерное излучение цепочки исчезло. Последующий второй период активности 1998–1999 гг. связан с увеличением яркости эжектора и биполярного потока более чем на два порядка [15,16].

Таким образом, было установлено, что рождению звезды сопутствует аккреционный диск, биполярный поток, оболочка и мощное 2 мазерное излучение.

Данная структура соответствует аккреционному диску, разделенному на протопланетные кольца, наблюдаемые с ребра. Скорость вращения колец пропорциональна радиусу и соответствует периоду 180 лет. Отклонение от кеплеровского вращения определяется трансформацией кинетической энергии вращения вещества колец в поступательное движение биполярных потоков. Спиралевидная форма потоков определяется прецессией оси вращения — результат реактивного воздействия эжектируемых потоков [17]. Только РСДБ могла открыть этот удивительный мир рождения звезд и планетных систем, удаленный от нас

на расстояние 500 пк. И как образно выразился И. С. Шкловский: «Мазерное излучение, подобно крику ребенка, объявило об этом».

## 7. Прикладные задачи

РСДБ — принципиально новая основа решения задач ряда прикладных направлений. Одним из первых было применение РСДБ в 1971 г. для измерения движения астронавтов по лунной поверхности. Точность определения положения «Ровера» относительно лунного модуля достигала 20 см и в основном зависела от точности знания либрации Луны. Определение времени и координат радиотелескопов, самих источников было неотъемлемой частью этих измерений — субпродуктом.

Одним из таких направлений были и измерения траекторий движения свободно плавающих аэростатов в атмосфере Венеры — проект ВЕГА, (The Soviet-French meeting on EOS-Venus Project, Moscow, 1974). Предстояло доставить и сбросить аэростатные зонды с пролетных аппаратов в атмосферу Венеры. Мощность передатчика была всего лишь 1 Вт, а расстояние до Венеры более 100 миллионов км. Его сигнал можно было увидеть только на самых больших антенных в узкой полосе. Запуск планировался на декабрь 1984 г. В кратчайшие сроки нужно было создать наземный измерительный комплекс — глобальную радиointерферометрическую сеть. Оптимальной длиной волны как с точки зрения наземного комплекса, так и бортовой аппаратуры была волна 18 см. На этой волне имеются естественные имитаторы борта — узкополосные сигналы источников мазерного излучения в линиях гидроксила. С их помощью можно было отьюстировать наземный комплекс в максимальном приближении к эксперименту. На этой волне работала глобальная РСДБ-сеть. Ее нужно было дополнить отечественными пунктами. К этому времени вступили в действие 70-м антенны в Евпатории и Уссурийске. Совместно с антеннами: 22-м (Симеиз и Пущино), 25-м (Улан-Удэ), 64-м (Медвежьи Озера) они образовали отечественную сеть. Антенны были оснащены водородными стандартами частоты, малошумящими усилителями, системами регистрации Mark II, коррелятором. Большую помощь в создании сети оказали Е. П. Велихов, А. М. Прохоров и Р. З. Сагдеев [18]. Сеть состояла из 20 элементов: кроме вышеупомянутых включала 64-м антенны НАСА (Тидбинбилла, Мадрид, Голдстоун), 100-м (Эффельсберг), 76-м (Джодрелл Бэнк), 300-м (Аресибо), 40-м (Овенс Вэлли) и др. К моменту запуска была завершена

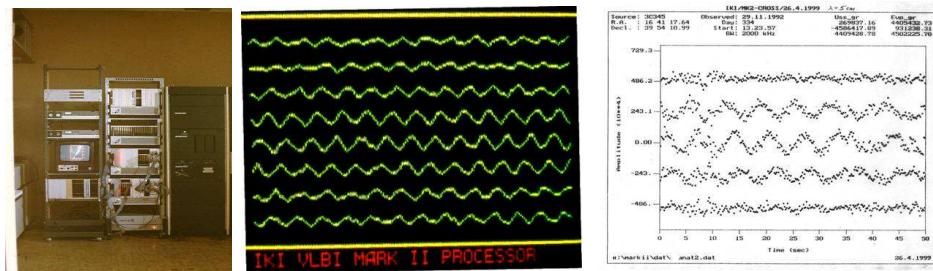


Рис. 18. ОПроцессор Mark II, ИКИ; коррелированные сигналы источников W3 OH и квазара 3С 345 (база Уссурийск–Евпатория)

юстировка отечественной сети. На рис. 18 показаны радиоинтерференционные лепестки на выходе коррелятора по мазерному источнику W3 OH и квазару 3С 345 [18].

Запуски аппаратов ВЕГА-1/2 состоялись в декабре 1984 г. Аэростаты были сброшены в атмосферу Венеры 11 и 15 июня 1985 г. и наблюдались в течение 46 часов. Аэростаты ВЕГА-1/2 плыли параллельно экватору на высоте около 53 км со скоростью 69 и 67 м/с соответственно. Аэростат ВЕГА-2, при приближении к горному массиву Афродиты (рис. 19), отклонился к северу примерно на 1.1 км и далее продолжал плавание параллельно экватору [19].

Координатно-временное обеспечение — одно из важнейших прикладных направлений РСДБ. Практическая реализация этого направления в нашей стране связана с проектом «Квазар-КВО», с Институтом прикладной астрономии РАН. Данное направление исследований и астрофизические исследования взаимно дополняют друг друга. В этой связи в марте 1992 г. в Сокорро представителями обоих направлений было решено дооснастить пункт РСДБ «Симеиз» системой регистрации Mark III (рис. 20). В 1994 г. станция «Симеиз» была оснащена радиометрами на волны 3 и 13 см (ИПА), системой регистрации Mark III (Годдард) для решения задач геодинамики и радиоастрономических исследований. В июне были проведены первые РСДБ-измерения положения антенны (рис. 21). Это позволило отработать методику до вступления в действие системы «Квазар-КВО».

УДК 520.27 + 521.9

СВЕРХДАЛЬНЯЯ РАДИОИНТЕРФЕРЕНЦИОННАЯ СЕТЬ  
НА ВОЛНЕ 18 СМ

Л. И. МАТВЕЕНКО, Р. З. САГДЕЕВ,  
В. М. БАЛЕБАНОВ, В. И. ШЕВЧЕНКО,  
В. И. КОСТЕНКО, В. А. ГРИШМАНОВСКИЙ,  
В. Е. ВЕЛИХОВ, С. Н. ИГНАТОВ, Б. З. КАНЕВСКИЙ,  
Л. Р. БОГАН, А. Н. БОЗЛОВ, Г. Д. БОНЕЛЯНСКИЙ,  
А. Н. МОЛОДЫАНУ, Е. П. МОЛОТОВ, А. Х. ПАПАСЕНКО,  
А. М. РОМАНОВ, И. А. СТРУКОВ, В. В. ТИМОФЕЕВ,  
А. В. ШЕВЧЕНКО, А. Б. СЕВЕРНЫЙ, И. Г. МОНСЕЕВ,  
Р. Д. СОРОЧЕНКО, А. П. ЦИВИЛЕВ,  
Р. М. МАРИГРОСИАН, А. М. АСЛАНИН, А. Г. ГУЛЯН,  
Н. С. ЯЦЫКИВ и М. В. ГОЛОВИНА

Приведены основные параметры советской радиоинтерференционной сети на длине волны 18 см. Она состоит из пяти элементов, образующих интерферометр с базами от 100 до 7000 км. Антенны оснащены водородными стандартами частоты, малошумящими усилителями и системами регистрации с полосой 2 МГц. Сеть предназначена для астрофизических наблюдений и решения прикладных задач в области астронавигации и геодезии.

VLBI NETWORK AT 18 CM WAVELENGTH, by L. I. Matveenko, R. Z. Sagdeev, V. M. Balabanov, V. I. Shevchenko, V. I. Kostenko, V. A. Grishmanovskij, V. E. Velikhov, S. P. Ignatov, B. Z. Kanevskij, L. R. Kogan, A. N. Kozlov, G. D. Korelyanskij, A. P. Molodyanu, E. P. Molotov, A. V. Papasenko, A. M. Romanov, I. A. Strukov, V. V. Timofeev, V. V. Shvchenko, A. B. Severnyj, I. G. Monseev, R. D. Sorochenko, A. P. Tsviliev, R. M. Marigrosian, A. M. Aslanian, A. G. Guljan, N. S. Yatsykyiv and M. V. Golovina. The main parameters are given of the Soviet 18-cm VLBI network including five elements with interferometric baselines from 100 to 7000 km. Antennas are equipped by hydrogen frequency standards, low-noise amplifiers and 2-MHz bandwidth recording systems. The network is destined for astrophysical observations as well as for astronavigation and geodesy purposes.

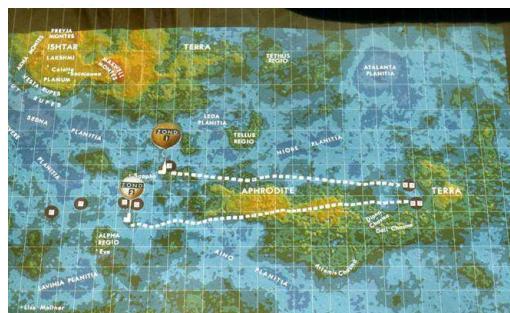


Рис. 19. Публикация о сети. Аэростат с аппаратурной кабиной. Траектория движения аэростатов

В настоящее время ИПА РАН введены в действие три 32-м антенные специализированной системы «Квазар-КВО», расположенные в Бадарах, Зеленчукской и Светлом [20]. Определение положения антенн достигает миллиметровой точности и долей миллисекунд дуги опре-



Рис. 20. Заключительная фаза переговоров об оснащении станции «Симеиз» системой регистрации Mark III

деления положения опорных источников. Большое значение система «Квазар-КВО» имеет и для решения астрофизических задач.

## 8. Перспективы РСДБ

Пропедшие 45 лет для астрономии — мгновение, но успехи, достигнутые РСДБ, превосходят даже самые смелые ожидания. В непрерывном режиме проводятся наблюдения астрономических объектов во всем спектре радиоволн. Угловое разрешение, достигает десятков микросекунд дуги, точности геодезических измерений достигают миллиметров, а астрометрических — долей миллисекунд. Широкополосные системы

УДК 524.5

## ПРЕЦИЗИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ СТАНЦИИ РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОЙ СЕТИ “СИМЕИЗ”

© 1995 г. Т. А. Кларк\*, Дж. Босворт\*, Н. Ванденберг\*, Д. Гордон\*, Е. Химович\*,  
Д. Шаффер\*, А. Витней\*\*, Б. Корей\*\*, А. Ниел\*\*, С. Томас\*\*, Л. И. Матвеенко\*\*\*,  
Р. Х. Мусин\*\*\*, А. В. Шевченко\*\*\*, Н. С. Несторов\*\*\*, А. В. Степанов\*\*\*\*,  
П. С. Никитин\*\*\*\*, А. В. Ипатов\*\*\*\*, В. В. Мардышкін\*\*\*\*\*,  
Д. В. Иванов\*\*\*\*\*, Я. С. Яцків\*\*\*\*\*, М. М. Медведский\*\*\*\*\*

\*Годдардский космический центр, США

\*\*Хайтекская радиообсерватория, США

\*\*\*Институт космических исследований РАН, Москва

\*\*\*\*Крымская астрофизическая обсерватория ГКНТ Украины

\*\*\*\*\*Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург

\*\*\*\*\*Главная астрономическая обсерватория НАН Украины, Киев

Поступила в редакцию 06.10.94 г.

На радиоинтерферометрической станции “Симеиз” 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 м<sup>2</sup> на обеих волнах. Измерено положение антенны с точностью <10 мм.

PRECISE MEASUREMENTS OF A LOCATION OF THE VLBI STATION SIMEIZ, by T.A. Clark, J. Bosworth, N. Vandenberg, D. Gordon, E. Himwich, D. Shaffer, A. Withney, B. Corey, A. Niel, C. Tomas, L.I. Matveenko, R.H.Musin, A.V. Schevchenko, N.S. Nesterov, A.V. Stepanov, P.S. Nikitin, A.V. Ipatov, V.V. Mardishkin, D.V. Ivanov, Ja.S. Jatskiv, M.M. Medvedsky. Receiving equipment for wavelengths 3.6 and 13 cm with a combined feed has been put into operation at the VLBI Station Simeiz. An MK-3 data acquisition system has been installed. The system equivalent noise is 800 and 1500 Jy at 3.6 and 13 cm respectively. The antenna effective area is 150 m<sup>2</sup> at both wavelengths. The antenna location was measured with the accuracy of <10 mm.

Рис. 21. Первая публикация по геодинамическим измерениям на станции Симеиз [21].

регистрации обеспечивают предельные чувствительности, а оптоволоконные системы в недалеком будущем обеспечат измерения в квазиреальном времени. Широкие перспективы РСДБ связаны с восточным полушарием, где находятся крупные радиотелескопы, в том числе 70-м и 64-м антенны России и Украины, 70-м НАСА, 100-м Германии, Австралии, Европейских стран. Дополнение сети новыми антеннами позволит существенно улучшить перекрытие пространственных частот, повысить чувствительность, угловое разрешение, предоставит возмож-

ность исследований объектов в северной и южной полусферах. Ввод в действие 70-м инструмента недалеко от Ташкента, 64-м в Италии, включение трех 32-м антенн системы «Квазар-КВО» существенно расширят возможности сети для решения как прикладных, так и астрофизических задач. Первые шаги в этом направлении были сделаны по проекту ВЕГА. Существенное значение может иметь рассматриваемый проект системы с эффективной площадью  $10^6$  м<sup>2</sup>. Определенная перспектива связана с выводом одного из элементов сети на космическую орбиту. Проект VSOP практически решил все технологические вопросы и определил ближайшие перспективы. Подготавливается второй этап на миллиметровых волнах с 10-м космическим радиотелескопом. В нашей стране, несмотря на трудности, продолжаются работы по реализации проекта «Радиоастрон».

Выбор длин волн определяется особенностями исследуемых объектов. Видимость активных ядер галактик, квазаров ограничена прозрачностью окружающей области НП. Исследования области эжекции доступны лишь в миллиметровом диапазоне. Сантиметровый и коротковолновая часть дециметрового диапазона — оптимальны для исследования джета, в том числе в поляризованном свете. Излучение спектральных линий преобладает в миллиметровом—сантиметровом диапазонах. На низких частотах существенно влияние межзвездной среды и ионосферы. По этой причине в метровом диапазоне длины баз ограничены пределами Земли. Повышение уровня помех в и длинноволновой части дециметровых—метровых волнах существенно ограничивают возможности исследования в этом спектре. На высоких частотах ограничение углового разрешения определяется чувствительностью и в определенной степени влиянием тропосферы. В этой связи космические размеры баз связаны с «космическими» размерами антенн.

## Список литературы

- [1] Матвеенко Л. И. Распределение радиояркости в Крабовидной туманности на волне 32.5 см // АЖ. 1969. Т. 46, № 2. С. 250–259.
- [2] Matveyenko L. I., Kostenko V. I. On the Structure of the Crab Nebula // Australian J. Phys. 1979. Vol. 32. P. 105–111.
- [3] Матвеенко Л. И. О некоторых особенностях радиоизлучения Крабовидной туманности // ПАЖ. 1975. Т. 1, № 7. С. 13–16.

- [4] Шоломицкий Г. Б. и др. Спектры компонент 3С273 // АЖ. 1965. Т. 42, № 6. С. 1135–1137.
- [5] Бродерик Д. Д. и др. Наблюдения компактных радиоисточников на радиоинтерферометре с базой Грин Бэнк–Крым // АЖ. 1970. Т. 47, № 4. С. 784–786.
- [6] Бахрах и др. Повышение чувствительности радиотелескопа РТ-25х2 Крымской астрофизической обсерватории в 3-см волновом диапазоне для использования в радиоинтерферометре с максимальной разрешающей способностью // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 1973. Т. 16, № 9. С. 1425–1428.
- [7] Кларк Б. и др. Наблюдения компактных объектов космического радиоизлучения на волне 3.55 см с предельным угловым разрешением // АЖ. 1972. Т. 49, № 4. С. 700–703.
- [8] Матвеенко Л. И. Видимые сверхсветовые скорости разлета компонент во внегалактических объектах // УФН 1983. Т. 140, № 2. С. 463–502.
- [9] Берк Б. Ф. и др. Наблюдения радиоисточников мазерного радиоизлучения с угловым разрешением в 0."0002 // АЖ. 1972. Т. 49, № 3. С. 465–469.
- [10] Downs D. et al. New VLBI maps of  $H_2O$  sources in different stages of evolution // A&A. 1979. Vol. 79. P. 233–242.
- [11] Костенко В. И., Матвеенко Л. И. Прецезионная антенна космического радиотелескопа // Космические исследования. 1982, Т. 20, № 1. С. 149–151.
- [12] Матвеенко Л. И. и др. Угловые размеры области вспышки мазерного  $H_2O$ -излучения в Орионе KL в линейно-поляризованном свете // ПАЖ. 1983. Т. 9, № 8. С. 456–462.
- [13] Матвеенко Л. И., Витцел А. И. Структура джетов квазаров 3С345 и 1803+784 // ПАЖ. 1999. Т. 25, № 9. С. 643–657.
- [14] Матвеенко Л. И. и др. Инжектор и переменность квазара 3С345 // ПАЖ. 1996. Т. 22, № 1. С. 17–27.
- [15] Матвеенко Л. И. и др. Область вспышки мазерного  $H_2O$ -излучения в Орионе KL // ПАЖ. 1988. Т. 14, № 12. С. 1101–1122.
- [16] Матвеенко Л. И. Поляризация супермазерного  $H_2O$ -излучения в Орионе KL // ПАЖ. 1994. Т. 20, № 6. С. 456–463.

- [17] *Матвеенко Л. И. и др.* Область звездообразования в Орионе KL // ПАЖ. 2003. Т. 29, № 10. С. 723–726.
- [18] *Матвеенко Л. И. и др.* Сверхдалльняя радиоинтерферометрическая сеть на волне 18 см // ПАЖ. 1986. Т. 12, № 1. С. 59–65.
- [19] *Sagdeyev R. Z. et. al.* Differential VLBI measurements of the Venus atmosphere dynamics by balloons: VEGA project // A&A. 1992. Vol. 254, № 1/2. P. 387–392.
- [20] *Финкельштейн А. М. и др.* Результаты первых двух лет РСДБ-наблюдений в обсерватории «Светлое» по международным геодинамическим программам // ПАЖ. 2006. Т. 32, № 2. С. 152–159.
- [21] *Кларк Т. и др.* Прецессионные измерения положения станции радиоинтерферометрической сети «Симеиз» // ПАЖ. 1995. Т. 2, № 2. С. 129–131.

Л. И. Матвеенко  
История РСДБ — становление и развитие.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы **L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X**

---

Подписано к печати 04.05.2007 Формат 60 × 90/16. Офсетная печать. Печ.л. 2.1  
Уч.-изд.л. 2.0 Тираж 200 Заказ 155 бесплатно

---

Отпечатано в типографии ПИЯФ РАН  
(188350 Ленинградская обл., г. Гатчина, Орлова роща).

Институт прикладной астрономии РАН, 197110, С.-Петербург, Ждановская ул., 8.