

УДК 521.2

И. Е. Молотов¹, А. Е. Вольвач², А. А. Коноваленко³, И. С. Фалькович³,
Л. Н. Литвиненко³, А. А. Негода⁴, О. П. Федоров⁴, **Б. Н. Липатов⁵**,
Ю. Н. Горшенков⁶, В. М. Агапов⁷, Дж. Туккари⁸, Ш. Лю⁹

¹Головна астрономічна обсерваторія Російської академії наук, Санкт-Петербург, Росія

²Кримська астрофізична обсерваторія, РТ-22, Кацивелі, Крим

³Радіоастрономічний інститут Національної академії наук України, Харків

⁴Національне космічне агентство України, Київ

⁵Науково-дослідний Радіофізичний інститут, Нижній Новгород, Росія

⁶Особливе конструкторське бюро Московського енергетичного інституту, Москва, Росія

⁷Інститут прикладної математики ім. М. В. Келдиша, Росія

⁸Інститут радіоастрономії, Ното, Італія

⁹Астрономічна обсерваторія, Урумчі, Китай

Международные эксперименты по исследованию околоземных объектов с помощью метода РСДБ-локации

Надійшла до редакції 27.10.03

За допомогою планетного радіолокатора «Свпаторія» (Україна) та з участю приймальних антен «Ведмежі Озера» (Росія), «Ното» (Італія), «Торунь» (Польща), «Шанхай» (Китай), «Урумчі» (Китай), «Симеїз» (Україна) та ін. з 1999 по 2003 рр. проведено шість експериментів з РНДБ-локації планет земної групи, навколоземних астероїдів і об'єктів космічного мусору на високих орбітах. Комбінація методів радіолокації і РНДБ дозволила отримати новий науковий інструмент для вимірювань короткоперіодичних варіацій власного руху планет земної групи і визначення траєкторій руху тіл Сонячної системи у квазіінерціальній системі координат Radio Reference Frame. За-реєстровано луна-сигнали від 25 об'єктів космічного сміття на геостационарній, високоеліптичній і півдбовій орбітах (зроблено прецизійні вимірювання зміщення частоти, викликаного ефектом Допплера, періоду обертання і оцінки розмірів), а також від планет Венера і Марс.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время метод радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ) является наиболее точным в астрометрии. С 1999 г. начата программа исследования околоземного пространства с помощью совершенно нового в мировой практике метода РСДБ-локации, сочетающего радиозондирование с Земли планет земной группы, околоземных астероидов, объектов космического мусора и прием отраженных эхо-сигналов сетью радиотелескопов

режиме РСДБ [3]. Работы направлены на создание методической, технической и программной базы для решения задач фундаментальной астрометрии: определения составляющих векторов собственного вращения небесных тел и их короткопериодических (внутриорбитальных) вариаций, а также определение методом дифференциальных РСДБ-измерений [1] точного положения центров масс небесных тел (траекторий их движения) в квазиинерциальной системе координат, опирающейся на внегалактические радиоисточники. Конечная цель работ — ус-

тановление точной взаимной связи радио- и динамической барицентрической систем координат.

Важными прикладными аспектами проводимых исследований являются определение точных траекторий астероидов, потенциально опасных для Земли, и фрагментов «космического мусора». В ближнем космическом пространстве накопилось около 10 тысяч крупных объектов (космические аппараты, ступени ракет) и сотни тысяч мелких фрагментов (продукты взрывов, операционные фрагменты и т. д.), представляющих опасность для функционирующих спутников и орбитальных станций, а также жизни людей и экологии Земли (в случае падения крупных или содержащих радиоактивные материалы объектов).

С использованием планетного радиолокатора на базе РТ-70 в Евпатории (длина волны 6 см; излучаемая мощность до 180 кВт) и международной кооперации РСДБ станций «Низкочастотная РСДБ-сеть LFVN» [4] проведено шесть экспериментов методом РСДБ-локации.

НАБЛЮДЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА РСДБ-ЛОКАЦИИ И АНАЛИЗ ДАННЫХ

Подготовка и планирование экспериментов проводились в Радиоастрономическом институте Национальной академии наук Украины (РИ НАНУ, Харьков), Институте прикладной математики им. М. В. Келдыша (ИПМ, Москва), Главной астрономической обсерватории Российской академии наук (ГАО РАН, Санкт-Петербург), Научно-исследовательском радиофизическом институте (НИРФИ, Нижний Новгород). Зондирующие радиосигналы излучались 70-м антенной Национального центра управления и испытаний космических средств (НЦУИКС, Евпатория) в режимах немодулированной несущей 5010.024 МГц и линейной частотной модуляции.

Отраженные эхо-сигналы принимались международной сетью радиотелескопов с участием приемных антенн «Медвежье Озеро», «Ното», «Торунь», «Шанхай», «Урумчи», «Симеиз» и др. Принятые сигналы регистрировались на магнитную ленту в полосе 2 МГц с помощью системы регистрации «Марк-2». Корреляционная обработка сигналов проводилась в НИРФИ.

На первом этапе определялся автокорреляционный спектр принятых сигналов для детектирования наличия радиолокационного эха. Затем осуществлялась кросс-корреляция копии зондирующего сигнала и эхо-сигналов, принятых на различных антеннах. Таким образом, может быть определено

доплеровское смещение частоты исследуемых сигналов относительно передаваемого сигнала с точностью до 0.003 Гц и их пространственная задержка с точностью до 50 м. В реальности точность доплеровских измерений объектов космического мусора снижается до величины порядка 0.1 Гц из-за заметного собственного вращения объектов, вызывающего доплеровское уширение спектра откликов.

С целью получения оперативной обработки информации разработан новый специализированный терминал регистрации для РСДБ-локации [5]. Этот терминал позволяет записывать принятые сигналы в полосе от 62.5 кГц до 32 МГц непосредственно на жесткие диски компьютера или транслировать их через интернет в центр обработки в режиме квазиреального времени. На данный момент терминал установлен в Медвежьих Озерах, Ното и Урумчи. Ко времени следующего сеанса РСДБ-локации (планируется на весну 2004 г.) такой терминал будет установлен в Евпатории и Симеизе.

РСДБ-локация планет земной группы и околоземных астероидов. Одним из аспектов применения метода РСДБ-локации является определение компонентов вектора собственного вращения планет. Традиционные методы определения этих компонентов с помощью обычной радиолокации требовали проведения многолетних экспериментов и подразумевали получение за эти периоды усредненных значений. Метод РСДБ-локации даст возможность получения «почти мгновенной», усредненной лишь на временном интервале в несколько месяцев, величины угловой скорости и ориентации оси вращения.

Идея определения элементов вращения небесного тела состоит в следующем. Результаты картографирования планет радиолокационным способом свидетельствуют о наличии на их поверхности малоразмерных областей с аномальными отражательными характеристиками (светлых и темных участков). Выберем такой участок поверхности, чтобы его видимые угловые размеры были близки к максимальному разрешению интерферометра по углу. Таких участков может быть несколько. Они дадут аномальные выбросы или впадины в спектре отраженного интерференционного сигнала и такие же эффекты в корреляционной огибающей. Предлагается отслеживать перемещение этих аномалий с течением времени.

В пяти экспериментах по РСДБ-локации проводились наблюдения планет Венеры, Марса и Меркурия. Пробная корреляционная обработка записей в формате S2 эксперимента VLBR99.1, позволила обнаружить корреляционные отклики на всех трех

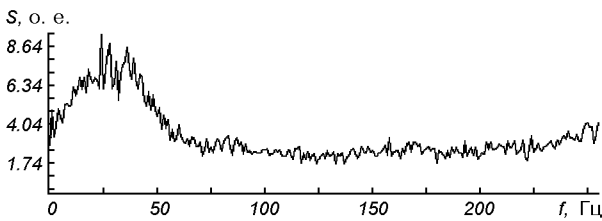


Рис. 1. Кросс-корреляционный спектр радиолокационных откликов от планеты Венера, принятых в Шанхае и Евпатории (вертикальная ось — нормированная спектральная мощность S)

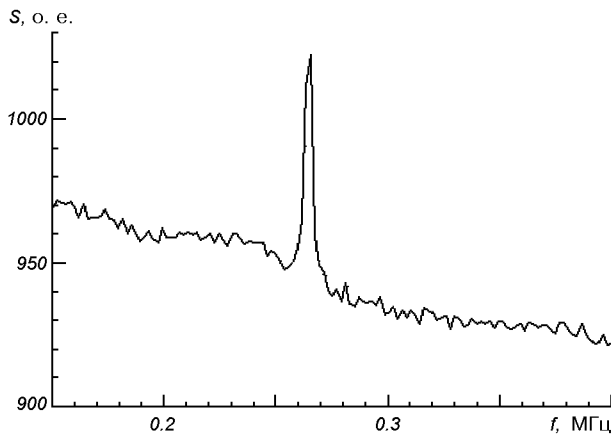


Рис. 2. Эхо-сигнал от планеты Марс: автокорреляционный спектр («Медвежья Озера», 24.07.2003 г., 22:25:10 UT; вертикальная ось — нормированная спектральная мощность S)

базах эксперимента Евпатория — Светлое — Шанхай [3]. Пример полученного кросс-спектра мощности интерференционного отклика см. на рис. 1.

В эксперименте VLBR02.1 (23—29 июля 2002 г.) эхо-сигналы от планеты Венера зарегистрированы с помощью системы регистрации «Марк-2», а в VLBR03.1 (23—29 июля 2003 г.) записаны эхо-сигналы от планеты Марс (рис. 2). В настоящее время записи обрабатываются в НИРФИ.

За время выполнения программы было пять попыток РСДБ-локации астероидов. Обработка записанных магнитных лент показала, что коррелятор «Марк-2» имеет недостаточную разрешающую способность, чтобы выделить чрезвычайно слабый и узкополосный сигнал (единицы герц). Поэтому планируется разработка нового коррелятора с возможностью тонкой фильтрации радиосигналов.

РСДБ-локация объектов космического мусора. Изучение космического мусора — важная глобальная проблема, которая решается международным сообществом. С 23 по 29 мая 2001 г. проведена

Таблица 1. Объекты, от которых зарегистрированы эхо-сигналы

Название эксперимента	Дата	Объекты, от которых зарегистрированы эхо-сигналы
VLBR01.1	23—29 мая 2001 г.	1982-044F «Протон» 4-я ступень (блок ДМ № 28L); 1984-063A «Радуга-15»; 1988-095A «Радуга-22»; 1990-061D «Протон» 4-я ступень (блок ДМ-2 № 24L); 1982-044A «Космос-1366»; 1988-066A «Космос-1961»; 1991-010A «Космос-2133»
VLBR01.2	14—19 декабря 2001 г.	1998-027D «Молния-М» 4-я ступень; 1977-021A «Молния-1»; 1968-081E «Транстейдж» (взорвался 21.02.1992); 1968-081H Фрагмент разрушения «Транстейдж»; 1977-092A «Экран-2»; 1980-104A «Экран-6»
VLBR02.1	23—29 июля 2002 г.	1989-001C «Космос-1989»; 1999-033D «Протон» 4-я ступень (блок ДМ3 № 8Л); 1975-097A «Космос-775»; 1981-069A «Радуга-9»; 1982-044A «Космос-1366»; 1988-018B «Телеком-1С»; 1991-054D IUS-15 SRM-2 («Orbus-6E»)
VLBR03.1	23—29 июля 2003 г.	1976-107A «Экран-1»; 1977-092A «Экран-2» (взорвался в 1978); 1979-105A «Горизонт-3»; 1981-069A «Радуга-9»; 1982-044A «Космос-1366»; 1989-001C «Космос-1989»; 1989-081A «Горизонт-19»; 1994-056C LAPS АКМ; 1998-029B «Центавр ТС-18»; 1999-033D «Протон» 4-я ступень (блок ДМ3 № 8Л)

первая серия экспериментов по радиолокации космического мусора (VLBR01.1) с помощью радиолокатора РТ-70 «Евпатория». Затем были проведены сеансы наблюдений: VLBR01.2 — с 14 по 19 декабря 2001; VLBR02.1 — с 23 по 29 июля 2002 г.; VLBR03.1 — с 23 по 29 июля 2003 г. Непрерывный сигнал мощностью от 40 до 100 кВт сканами длительностью по 20 минут излучали в направлении каталогизированных объектов, находящихся на геостационарной, высокоэллиптической или полусуточной круговой орбитах. Перечень объектов для каждого эксперимента составлялся по предложениям российских и украинских заинтересованных ведомств, а эфемериды объектов уточнялись серией оптических наблюдений [2]. Минимальный размер объекта составил порядка 0.6 м (фрагмент РН «Транстейдж»).

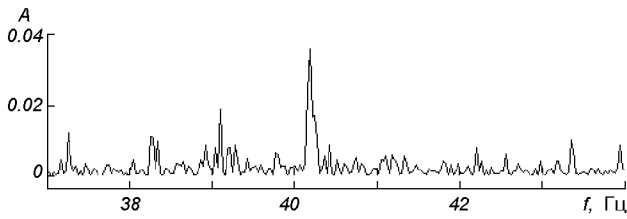


Рис. 3. Спектр интерферометрического сигнала на базе Евпатория (переданный сигнал) — Ното (принятое эхо) для объекта «Космос-1366» (1991-054D), 25.07.02, 13:20 УТ, накопление 33.24 с. Частотное разрешение 0.03 Гц, доплеровский сдвиг — 25.279 Гц (вертикальная ось — амплитуда A интерференции)

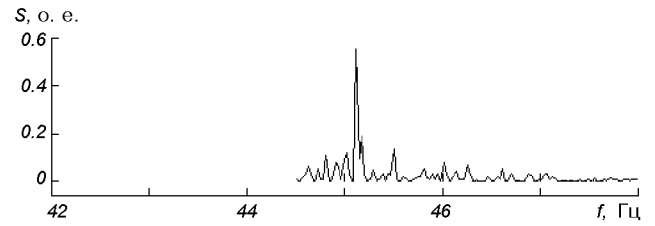


Рис. 4. Спектр интерферометрического сигнала на базе Евпатория (переданный сигнал) — Медвежьи Озера (принятое эхо) для объекта «Космос-1366» (1991-054D), 25.07.02, 13:20 УТ, накопление 33.24 с. Частотное разрешение 0.03 Гц, доплеровский сдвиг -22.585 Гц (вертикальная ось — нормированная мощность S)

Таблица 2. Результаты измерений в эксперименте VLBR03.1

Международное обозначение объекта, дата наблюдений	Измерения сдвига Доплера		Период вращения, с	Размеры, м	
	«Медвежьи Озера»	«Урумчи»		Общие	Элементов
1976-107A «Экран-1», 28 июля	20:30:00 +2286.703 Гц 20:31:00 +2296.946 20:32:00 +2306.633	20:30:00 +2235.195 Гц 20:31:00 +2243.070 20:32:00 +2251.639	166.75	(9-10) × 4.5	4.0
1977-092A «Экран-2» (взорвался в 1978), 29 июля	23:50:00 +3768.594 23:51:00 +3769.716 23:52:00 +3770.720	23:50:00 +3315.859 23:51:00 +3316.054 23:52:00 +3316.422			
1979-105A «Горизонт-3», 29 июля	05:10:00 +1561.565 05:11:00 +1548.997 05:12:00 +1537.116	05:10:00 +1451.803 05:11:00 +1442.197 05:12:00 +1433.341	82.422	(9-10) × 4.5	4.5, 0.5
1981-069A «Радуга-9», 25 июля	21:40:00 +2714.477 21:41:00 +2723.652 21:42:00 +2733.005	21:40:00 +2559.217 21:41:00 +2570.585 21:42:00 +2579.379	81.813	(9-10) × 4.5	6.0, 1.5
1981-069A «Радуга-9», 28 июля	19:50:00 +1599.789 19:51:00 +1612.946 19:52:00 +1627.336	19:50:00 +1612.462 19:51:00 +1623.152 19:52:00 +1635.551	83.539		
1982-044A «Космос-1366», 25 июля	22:22:00 +3047.243 22:22:58 +3053.114 22:24:00 +3059.083	22:22:00 +2849.140 22:23:00 +2853.369 22:24:00 +2857.373	189.833	3.0 × 2.0	2.4
1982-044A «Космос-1366», 29 июля	03:50:00 +1212.257 03:51:00 +1199.414 03:52:00 +1186.991	03:50:00 +2001.639 03:51:00 +1090.792 03:52:00 +1080.341			
1989-081A «Горизонт-19», 25 июля	23:39:43 +1330.406 23:40:42 +1337.620 23:41:41 +1344.806	23:40:00 +1261.068 23:41:00 +1267.582 23:42:00 +1273.778			
1994-056C LAPS АКМ, 29 июля	00:30:00 -54791.475 00:31:00 -54550.784 00:32:00 -54343.947	00:30:00 -53996.129 00:31:00 -53800.778 00:32:00 -53598.217			
1999-033D «Протон» 4-я ступень, 28 июля	19:10:00 -18211.962 19:11:00 -17986.546 19:12:00 -17768.602	19:10:00 -18981.314 19:11:00 -18761.371 19:12:00 -18549.234	5.772	6.0 × 6.0	1.1, 1.0
1989-001C «Космос-1989», 29 июля	03:10:00 +10154.778 03:11:00 + 9884.539 03:12:00 + 9614.148	03:11:00 +10839.649 03:12:00 +10663.603			

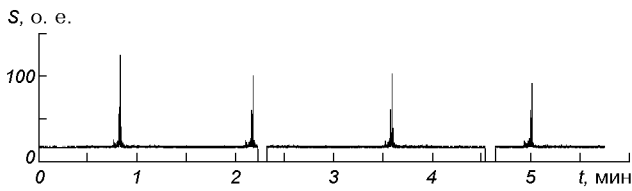


Рис. 5. Объект 1981-069А, наблюдения 28.07.03, старт в 19:47:10 UT, период вращения 83.539 с (вертикальная ось — нормированная мощность S)

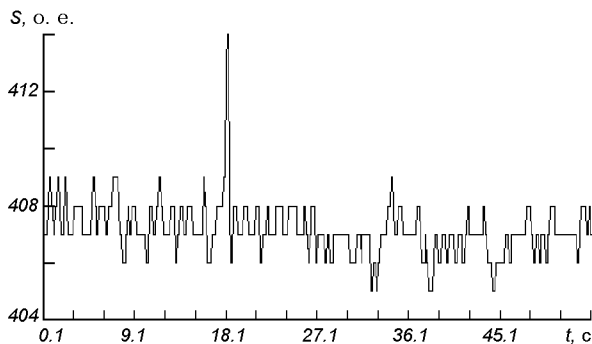


Рис. 6. Эхо от мелкого фрагмента в геостационарной области. 28.07.03, 00:47 UT (вертикальная ось — нормированная мощность принятого сигнала)

В табл. 1 приведены объекты космического мусора, от которых зарегистрированы эхо-сигналы.

На рис. 3, 4 приведены полученные спектры интерферометрического сигнала для объекта «Космос-1366».

В сеансе VLBR03.1 для объектов 1976-107А, 1979-105А, 1981-069А, 1982-044А, 1999-033D, отклики от которых имели периодический импульсный характер, определены основные периоды собственного вращения, которые составляют соответственно 166.75, 82.442, 83.539, 189.833, 5.772 с (см. рис. 5).

Обработка доплеровских измерений объекта «Космос-1366», полученных в эксперименте VLBR02.1 на пунктах «Медвежья Озера» и «Ното», показала, что измерения доплеровского смещения хорошо согласуются с моделью орбиты (в пределах 7 см/с). После взаимной обработки доплеровских и оптических данных новая модель орбиты имела рассогласование около 1 см/с. Исследования доплеровских уширений спектров откликов показывают принципиальную возможность восстановления изображения объектов.

В табл. 2 приведены результаты измерения доплеровского смещения и периода вращения для

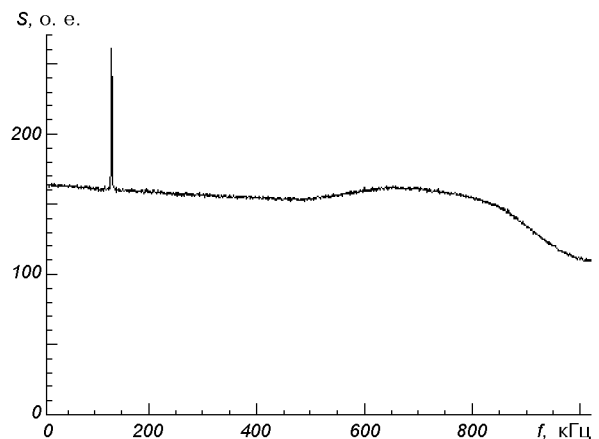


Рис. 7. Объект 1982-044А: автокорреляционный спектр (станция Ното) (вертикальная ось — нормированная мощность)

наблюдаемых объектов в период с 23 по 29 июля 2003 г.

Проведены пробные т. н. «бим-парк»-наблюдения — для низких орбит на базе Евпатория — Симеиз и для геостационарной орбиты на базе Евпатория — Медвежья Озера, Ното и Урумчи. Эксперимент длительностью 3 ч был направлен на получение статистической информации о количестве фрагментов космического мусора, пролетающих через луч диаграммы направленности за единицу времени. На рис. 6 приводится предполагаемый результат обнаружения мелкого фрагмента на геостационарной орбите.

На рис. 7 приведен результат работы специализированного терминала регистрации для РСДБ-локации и нового коррелятора во время эксперимента с 23 по 29 июля 2003 г.

Выводы

Во время серии пробных экспериментов были созданы аппаратная и методическая основы РСДБ-локации, в том числе и в режиме квазиреального времени. Отработано взаимодействие кооперации радиотелескопов-участников, модернизирован центр корреляционной обработки в НИРФИ, изготовлен коррелятор в Ното, работающий в режиме квазиреального времени.

Из РСДБ-локационных наблюдений, выполненных в течение 2001—2003 гг., зарегистрированы эхо-сигналы от 25 объектов космического мусора на геостационарной, высокоэллиптической и полусуточной орбитах, а также от планет Венера и Марс.

По наблюдениям в режиме квазиреального времени были успешно зарегистрированы эхо-сигналы от планеты Марс и 10 различных объектов: 1976-107А «Экран-1», 1977-092А «Экран-2» (взорвался в 1978 г.), 1979-105А «Горизонт-3», 1981-069А «Радуга-9», 1982-044А «Космос-1366», 1989-001С «Космос-1989» («Эталон-1»), 1989-081А «Горизонт-19», 1994-056С LAPS апогейный мотор, 1998-029В «Centaur TC-18», 1999-033D 4-я ступень РН «Протон-К» (Блок ДМЗ № 8Л).

Для перечисленных ниже объектов определены периоды вращения: «Космос-1366» — 189.833 с; «Экран-1» — 167.75 с; «Радуга-9» — 83.539 с; РН «Протон-К» — 5.772 с, «Горизонт-3» — 82.422 с. Измерения доплеровского смещения были получены на трех РСДБ-пунктах («Медвежья Озера», «Ното» и «Урумчи») для 12 объектов. Анализ доплеровских смещений позволил оценить общие размеры для объектов: «Горизонт-3» — размер 10 м × 4.5 м; «Радуга-9» — 10 м × 4.5 м; 4-я ступень РН «Протон-К» — около 6 м.

Таким образом, полученные результаты демонстрируют широкие возможности РСДБ-локационных исследований космического мусора с помощью РТ-70 в Евпатории и РСДБ-сети. Весьма перспективным для обнаружения частиц порядка 1 мм является оснащение антенны РТ-22 «Симеиз» радиолокационным передатчиком коротковолновой части мм-диапазона.

РСДБ-наблюдения возможны только в результате скоординированных усилий большого количества людей. Авторы благодарны персоналу станций, корреляторов и центров анализа за помощь в проведении наблюдений.

Работа частично поддержана грантами INTAS-01-0669, РФФИ-02-02-17568, РФФИ-03-02-31013 и Национальным космическим агентством Украины по теме «Интерферометр».

1. Алексеев В. А., Антипенко А. А., Липатов Б. Н. и др. Длиннобазовая узкополосная радиоинтерферометрия для космической навигации. 1. Межпланетные аппараты; измерения координат АМС «Вега» // *Космич. исслед.*—1989.—27.—С. 447—453.
2. Коноваленко А. А., Фалькович И. С., Липатов Б. Н. и др. Некоторые результаты международных наблюдений высокоорбитального космического мусора 23—29 июля 2003 г. // *Околоземная астрономия — 2003: Сб. тр.* — Санкт-Петербург: Ин-т химии, 2003.—Т. 2.—С. 198—205.
3. Молотов И. Е., Абросимов В. М., Агапов В. М. и др. Исследования динамики планет земной группы, астероидов, сближающихся с Землей, и космического мусора методом РСДБ-локации // *Всероссийская астроном. конф.: Тез. заяв. докл.* — Санкт-Петербург: НИИХ СПбГУ, 2001.—С. 128.
4. Molotov I., Kovalenko A., Samodurov V., et al. International Low-Frequency Very-Long-Baseline Interferometry Network Project Milestones // *Astron. and Astrophys. Transactions.*—2003.—22, N 4-5.—P. 743—752.
5. Tuccari G., Molotov I., Buttaccio S., et al. Radar VLBI activity with participation of Noto // *Proc. of the 6th European VLBI Network Symp.* / Eds E. Ros, R. W. Porcas, A. P. Lobanov, J. A. Zensus. — Bonn, 2002.—P. 45—47.

INTERNATIONAL EXPERIMENTS ON DEVELOPMENT OF VLBI RADAR METHOD FOR RESEARCH OF NEAR-EARTH BODIES

I. E. Molotov, A. E. Volvach, A. A. Kovalenko, I. S. Falkovich, L. N. Litvinenko, A. A. Negoda, O. P. Fedorov, B. N. Lipatov, Yu. N. Gorshenkov, V. M. Agapov, G. Tuccari, X. Liu

Six VLBI radar experiments on the research of Earth group planets, near-Earth asteroids and space debris objects were performed during 1999-2003 with the help of the Evpatoria RT-70 planetary radar (Ukraine) and with the participation of the receiving antennas Bear Lakes RT-64 (Russia), Noto RT-32 (Italy), Torun RT-32 (Poland), Shanghai RT-25 (China), Urumqi RT-25 (China), Simeiz RT-22 (Ukraine) et al. Combination of radar and VLBI methods allowed us to obtain a new scientific instrument for the measurements of short-periodic variations of planet proper rotations and for the determination of solar system body orbits in the Radio Reference Frame. Echo-signals from 25 space debris objects at geostationary, high-elliptical and half-day orbits as well as from Venus and Mars were detected. Precise Doppler shift, main period of rotation and size estimations were derived for some objects.