

УДК 520.27

Тестирование наземных РСДБ-станций миссии “Радиоастрон”. Интерферометр Симеиз-Евпатория на длинах волн 6 и 18 см

*А.Е. Вольвач¹, В.И. Костенко², М.Г. Ларионов², Л.Н. Вольвач¹, Д.М. Муза³,
А.С. Набатов³, А.М. Резниченко³*

¹ Лаборатория радиоастрономии НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”, 98688, РТ-22, Ялта, АР Крым, Украина
volvach@ukrpost.ua

² Астрокосмический центр Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, 117810, Россия

³ Радиоастрономический институт НАН Украины, 61002, Харьков, Украина

Поступила в редакцию 8 февраля 2012 г.

Аннотация. В рамках программы кооперации между научными организациями Украины и России проведен цикл исследований по подготовке функционирования наземных РСДБ-пунктов миссии “Радиоастрон”. Для решения задачи на 22-м радиотелескопе миллиметрового диапазона РТ-22 (НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”) была подготовлена научная программа измерений, существенной частью которой являлось исследование компактных образований в структуре внегалактических источников. Для тестирования наземных РСДБ-станций миссии “Радиоастрон” на РТ-22 КраО в Симеизе и РТ-70 (П-2500) в Евпатории выполнены наземные однобазовые РСДБ-эксперименты. В результате обработки данных, записанных на каждой из антенн, на корреляторе АКЦ ФИАН получены и прокалиброваны отклики кросскорреляционных функций. Результаты эксперимента демонстрируют готовность участия РТ-22 и РТ-70 в наземно-космических радиоинтерферометрических сеансах по проекту “Радиоастрон”.

THE TESTING OF THE GROUND-BASED SEGMENT OF THE RADIOASTRON MISSION. THE SIMEIZ—EVPATORIA INTERFEROMETER AT WAVELENGTHS OF 6 AND 18 CM, *by A.E. Volvach, V.I. Kostenko, M.G. Larionov, L.N. Volvach, D.M. Mucha, A.S. Nabatov, A.M. Reznichenko.* In terms of the scientific cooperation between Ukraine and Russia a series of studies for the preparation of the ground segment of the “RadioAstron” mission has been carried out. Using the 22-m radio telescope RT-22 (Crimean Astrophysical Observatory) the scientific program of measurements has been prepared. The substantial part of this program is the study of compact structures in the extragalactic sources. For the testing of model of the ground segment of “Radioastron”, RT-22 of the Crimean Astrophysical Observatory in Simeiz and RT-70 (P-2500) in Evpatoria jointly carried out the ground-based VLBI test experiments at 6 cm and 18 cm. As a result of data processing using the ASC LPI correlator the amplitude and phase of the cross-correlation functions have been obtained and calibrated, and the available coherence time has been estimated. Results of the experiment demonstrate readiness of RT-22 and RT-70 to participate in the ground-space Very Long Baseline Interferometer sessions on the “Radioastron” project.

Ключевые слова: космос, радиоастрономия, интерферометр, активные ядра галактик

1 Введение

В процессе реализации наземно-космической программы “Радиоастрон” предполагается получить экспериментальный материал для решения важнейших астрофизических задач по изучению строения и эволюции объектов Вселенной, выяснению механизма энерговыделения в источниках на всех уровнях иерархии объектов. Чрезвычайная важность задач, которые предстоит рассмотреть в будущем, определяет и масштабы экспериментов по картографированию скрытых от наблюдателя областей компактных ядер активных галактик.

В рамках подготовки научной программы “Радиоастрон” был составлен предварительный каталог радиоисточников, по прогнозам имеющих избытки плотности потока на высоких частотах (Вольвач и др., 2004; Вольвач, 2009). Для количественной оценки неполноты полученного списка радиоисточников строилась экстраполированная зависимость подсчета числа источников (“ $\log N - \log S$ ”) на частоте 22 ГГц (Вольвач и др., 2007).

Для исследования оптических свойств радиоисточников каталога “Радиоастрон” по сравнению с объектами, представляющими собой полные выборки источников в радиодиапазоне, выполнялся сравнительный анализ оптических и радиохарактеристик объектов в каталоге.

В список указанного каталога были отобраны объекты с инвертированными спектрами и потоками более 250 мЯн. В среднем выборка объектов каталога “Радиоастрон” содержит более мощные источники по сравнению с полной выборкой 87 GB. Полученные результаты по изменению свойств источников в каталоге “Радиоастрон” указывают, что, наряду с работой “центральной машины”, активные процессы звездообразования в ядрах космологически удаленных источников поставляют значительную пылевую составляющую. За счет этого может трансформироваться и цвет источников. Одновременное присутствие вспышек звездообразования и активности в ядрах может служить косвенным указанием на космологическую удаленность объектов, т. к. рост скорости звездообразования напрямую связан с увеличением красного смещения источников.

Проведено сравнение спектральных характеристик и параметров переменности потоков излучения источников каталога WMAP с объектами результирующего каталога “Радиоастрон”. Для этой цели с использованием радиотелескопа РТ-22 НИИ “КрАО” на частотах 22.2 ГГц и 36.8 ГГц получены наблюдательные данные полной выборки радиоисточников каталога WMAP для положительных склонений (Вольвач и др., 2008). В плане отработки наземно-космической миссии “Радиоастрон” в 2009 и 2010 гг. были проведены наземные РСДБ-эксперименты в различных частотных и спектральных модах проекта, а именно: использовались верхние и нижние боковые полосы приема в двух круговых поляризациях – правой и левой. Наблюдения проводились на двух близких по характеристикам радиотелескопах РТ-22 в Пушино (Россия) и в Симеизе (Украина) (Вольвач и др., 2011 а, б). Параметры РТ-22 в Пушино были подобраны таким образом, чтобы оказалось возможным имитировать наземный интерферометр с элементами РТ-22 (Симеиз) и космический радиотелескоп. Для этого была искусственно снижена эффективная площадь РТ-22 (Пушино) и ухудшены шумовые параметры приемной аппаратуры.

В результате проведенных в 2009 и 2010 гг. экспериментов по тестированию наземной сети проекта “Радиоастрон” были сделаны следующие выводы:

1. Параметры чувствительности и когерентные свойства интерферометров, реализованных на длинах волн 6 см и 1.35 см, соответствуют расчетным для данных показателей отдельных антенн.
2. Эксперимент с эмуляцией параметров бортового радиоастрономического комплекса свидетельствует о возможности выделения на интерферометре Симеиз-КРТ10 сигналов с коррелированным потоком около 100 мЯн при времени когерентного интегрирования около 10 сек при соотношении сигнал/шум около 10 и в полосе регистрации сигнала 4 МГц.
3. РСДБ-эксперимент на длине волны 1.35 см между станциями Симеиз и Пушино продемонстрировал возможности дальнейшего использования указанного интерферометра для спектральных наблюдений в линии водяного пара.

2 Тестовые наземные РСДБ-сеансы

В плане дальнейшей отработки наземно-космической миссии “Радиоастрон” в сентябре 2011 г. совместно НИИ “КРАО”, РИ НАНУ и АКЦ ФИАН РАН были подготовлены и проведены наземные РСДБ-эксперименты с использованием наземных РСДБ-пунктов РТ-22 в Симеизе и П-2500 в Евпатории на длинах волн 6 см и 18 см. Длина базы составляет около 110 км, максимальное угловое разрешение в направлении С–Ю равно 0.33 и 0.18 сек дуги и 1.2 и 0.7 сек в направлении В–З на волнах 18 и 6 см соответственно.

Предварительно была проведена модернизация аппаратуры и отработаны современные методы наблюдений, необходимые для работы в глобальной РСДБ-сети. Радиотелескоп РТ-22 оснащен аппаратурой, необходимой для РСДБ-исследований космических объектов в сантиметровых и миллиметровых областях спектра, специализированными высокоскоростными цифровыми устройствами регистрации данных Марк-5А, Марк-5В+, терминалом регистрации в режиме квазиреального времени.

П-2500 в Евпатории был оснащен высокочувствительной приемной аппаратурой на длины волн 6 см и 18 см, цифровыми видеоконверторами, российской системой регистрации РДР-1. Дополнительно пункты РСДБ в Симеизе и Евпатории были оснащены высокостабильными водородными стандартами частоты со стабильностью до $1e-15$ и обеспечивающими привязку местных шкал времени к шкале GPS с погрешностью не хуже $1e-8$ сек.

2.1 Эксперимент на длине волны 6 см

РСДБ-сеанс наблюдений был выполнен в сентябре 2011 г. на длине волны 6 см. Регистрация данных производилась в Симеизе на дисковые регистраторы системы Марк-5А, а в Евпатории – на регистраторе АКЦ РДР-1 (формат RDF). Синхронизация систем в двух пунктах обеспечивалась водородными стандартами частоты и времени и системой синхронизации времени GPS. Для наблюдений были выбраны шесть источников 3C286, 3C279, 3C454.3, DA193, 0420-014 и DR21. Приведенный список объектов позволял провести оценку времени когерентности интерферометра Симеиз-Евпатория и калибровку комплексных коэффициентов усиления антенных элементов. Усредненные параметры радиотелескопов на длине волны 6 см приведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры системы радиотелескоп+радиометр для станций Симеиз (РТ-22), Евпатория (РТ-70) и Радиоастрон (КРТ-10) на длине волны 6 см

Антенна	Система регистрации	A_{eff}, m^2	T_{sys}, K	SEFD, Jy
Евпатория (РТ-70)	RDR-1	1900	40	60
Симеиз (РТ-22)	Марк-5А	230	70	840
Радиоастрон (КРТ-10)	RDR-1	40	70	4800

На рис. 1а, 1б, 2 приведены корреляционные отклики на длине волны 6 см для источников 3C279, 3C286 и 3C454.3. Высокое время когерентности интерферометра позволяет выполнять комплексное интегрирование на интервалах более 400 сек, обеспечивать низкий уровень шума и с высокой точностью оценивать комплексную амплитуду интерференции.

В таблице 2 приведены оценки коррелированных плотностей потоков на длине волны 6 см, сделанные по измеренным амплитудам коррелированного отклика при SEFD (Симеиз-Евпатория) равной 225 Jy.

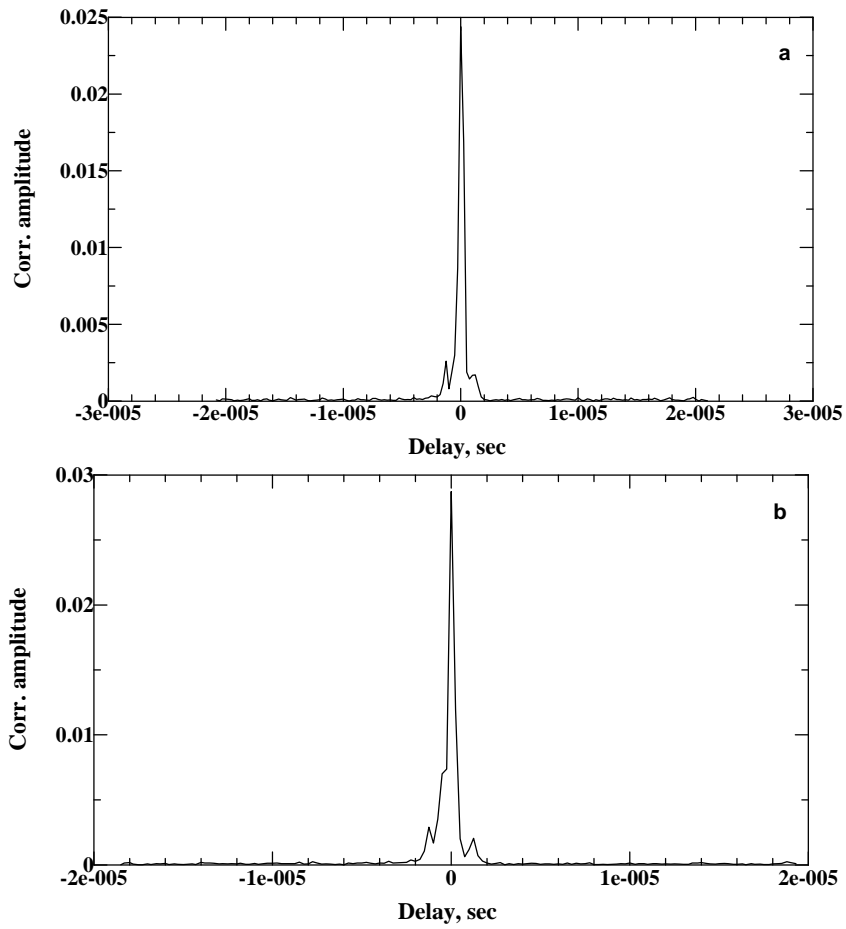


Рис. 1. а) Кросскорреляционный отклик для источника 3C279, База = EVP-SIM, 6 см, $\tau = 300$ сек, $S/N > 400$ сек. б) Кросскорреляционный отклик для источника 3C286, База = EVP-SIM, 6 см, $\tau = 180$ сек, $S/N = 440$ сек

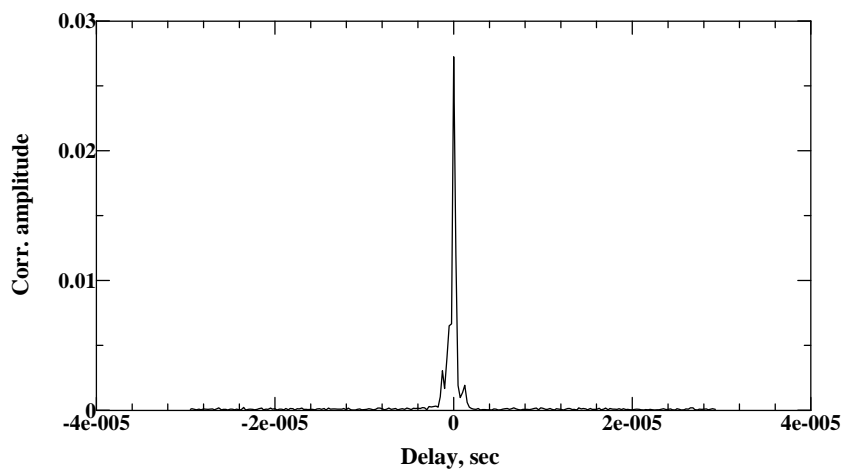


Рис. 2. Интерференционный отклик для радиоисточника 3C454.3 на базе Симеиз-Евпатория. Время когерентного интегрирования 400 сек

2.2 Эксперимент на длине волны 18 см

Для проверки параметров модели наземного сегмента в этом диапазоне волн в сентябре 2011 г. был проведен радиоинтерферометрический сеанс между радиотелескопами РТ-70 и РТ-22. Для наблюдений были выбраны шесть источников 3C286, 3C279, W75N, W3(OH), PSR0329 и DR21. Кроме решаемых задач, указанных в случае длины волны 6 см, включение в программу наблюдений источников W75 и W3(OH) позволяло оценить характеристики систем при наблюдении спектральных линий гидроксила OH. Параметры станций на длине волне 18 см приведены в табл. 3.

Таблица 2. Коррелированные плотности потоков на длине волны 6 см

Радиоисточник	Амплитуда корреляции	Коррелированная плотность потока, Jy	Полная плотность потока на длине волны 6 см, Jy
3C279	4.44e-2	9.9	13.0
3C286	2.35e-2	5.3	6.3
3C454.3	3.16e-2	7.1	16.0
DA193	2.52e-3	5.7	6.1

Таблица 3. Параметры системы радиотелескоп+радиометр для станций Симеиз (РТ-22) и Евпатория (РТ-70) на длине волны 18 см

Антенна	Система регистрации	A_{eff}, m^2	T_{sys}, K	SEFD, Jy
Евпатория (РТ-70)	RDR-1	1950	60	85
Симеиз (РТ-22)	Марк-5А	230	70	840
Радиоастрон (КРТ-10)	RDR-1	30	50	4600

Результаты измерения авто- и кросскорреляционных свойств мазерного источника W3(OH) на частоте 1665.5 МГц иллюстрируются на рис. 3 а, b, с, d.

Из рисунков видно, что реализованная чувствительность позволяет уверенно оценивать спектры W3(OH), в том числе и в круговой поляризации.

В качестве примера обработки данных на длине волны 18 см в континууме на рис. 4 приведен коррелированный отклик в зависимости от задержки для источника 3C279. Положение пика отклика в задержке 0 мксек характеризует высокую точность вводимой при обработке модели задержки для станций интерферометра.

Анализ коррелированных данных в континууме показал высокую степень когерентности интерферометра Симеиз-Евпатория (так называемое время когерентности), что позволяет выполнять когерентное интегрирование при временах накопления до 600 сек на длине волны 6 см и более 900 сек на длине волны 18 см и тем самым реализовывать высокую чувствительность. Так, на длине волны 6 см флуктуационная чувствительность (ср. кв. откл.) при максимальном времени когерентного накопления (600 сек) составляет около 3 мJy.

3 Общие выводы

В сентябрьских интерферометрических РСДБ-экспериментах 2011 г. с антеннами в Симеизе (РТ-22) и Евпатории (РТ-70) на длинах волн 6 и 18 см получены и проанализированы кросскорреляционные отклики интерферометра от компактных радиоисточников и их ход со временем. В линии гидроксила OH на волне 18 см получены авто- и кросскорреляционные спектры мазерных источников.

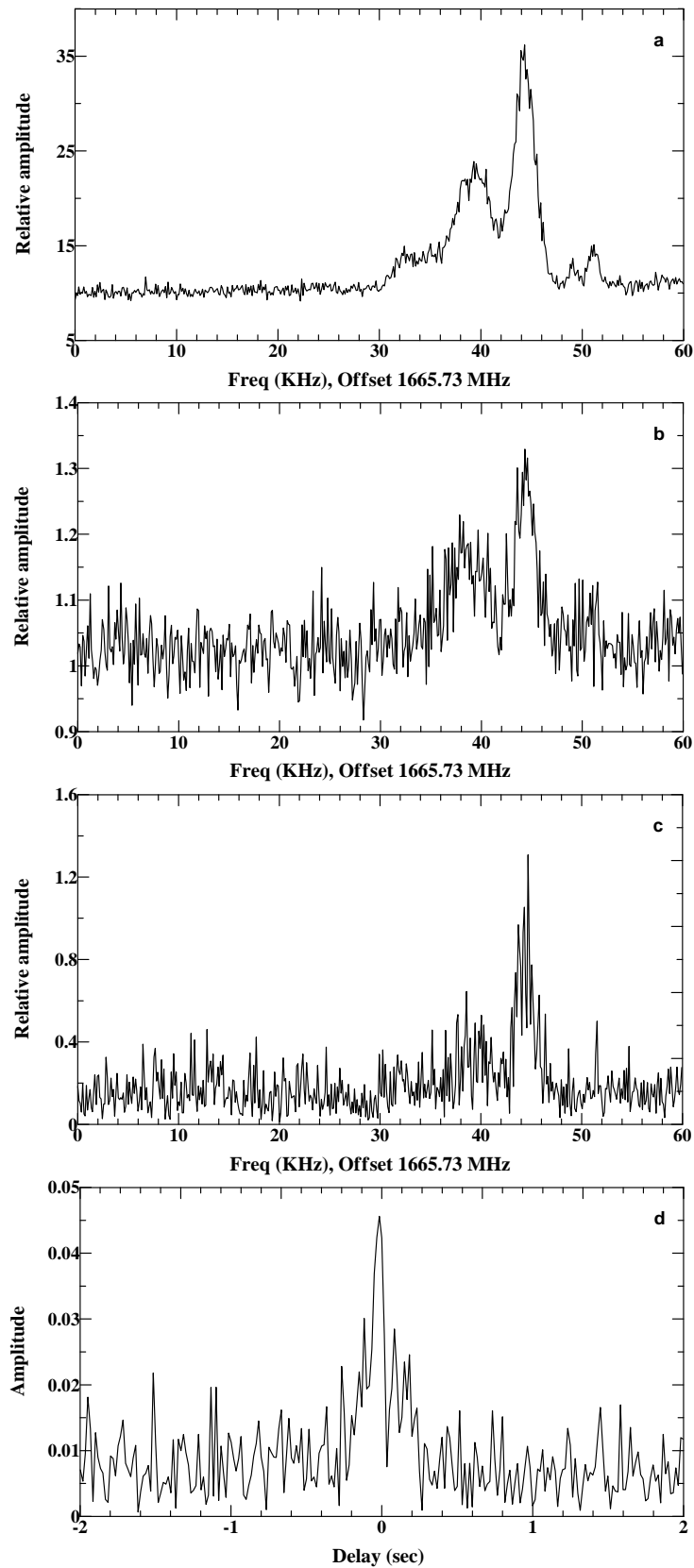


Рис. 3. а) Автоспектр W3(OH) в Евпатории, правая круговая поляризация RCP; б) Автоспектр W3(OH) в Евпатории, левая круговая поляризация LCP; в) Кросс-спектр W3(OH) Евпатория-Симеиз, круговая поляризация LRCP; д) Кросс-спектр W3(OH) Евпатория-Симеиз, круговая поляризация RRCP

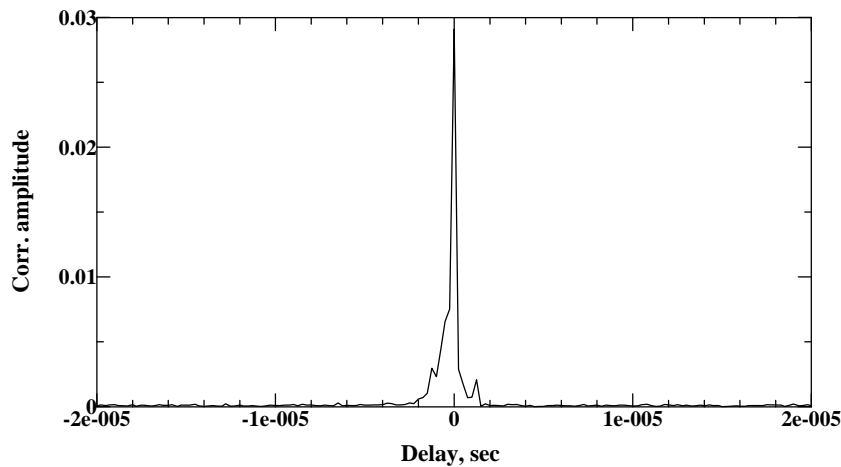


Рис. 4. Радиоисточник 3C279, 18 см, Cross, LCP, Tau = 600 sec. Коррелированный поток составляет около 1.5 Jy при полной плотности потока 11 Jy

Продемонстрированы высокая когерентность интерферометра, достижимость расчетных параметров аппаратных средств радиотелескопов РТ-70 (Евпатория) и РТ-22 (Симеиз) и их техническая готовность к участию в дальнейших интерферометрических сеансах. Эксперименты продемонстрировали эффективность использования антенн РТ-70 (Евпатория) и РТ-22 (Симеиз) в предстоящих сеансах Космос-Земля в проекте “Радиоастрон”. Антенна РТ-22 (Симеиз) наиболее эффективно будет использована в самом коротком диапазоне длин волн проекта – 1.35 см. Великолепное качество поверхности зеркала этой антенны, предстоящая модернизация приемной аппаратуры и расширение записываемой полосы сигнала до 16 МГц приблизят данный инструмент по эффективности к существующим в мире антеннам диаметром в 30 и даже 64 м.

Благодарности. Работа поддержана грантом ДФФД и НАН Украины – РФФД России. Авторы выражают искреннюю благодарность сотрудникам РИ НАН Украины и НЦУКС за обеспечение работы антенно-приемного комплекса РТ-70 во время проведения наблюдений, И.Д. Стрелка за подготовку приемной аппаратуры, персоналу пульта управления РТ-22 за помощь в проведении наблюдений.

Литература

- Вольвач А.Е. // Космическая наука и технология. 2009. Т. 15. № 6. С. 28.
 Вольвач А.Е., Вольвач Л.Н., Кардашев Н.С., Ларионов М.Г. // Астрон. журн. 2008. Т. 85. № 6. С. 483.
 Вольвач А.Е., Кардашев Н.С., Ларионов М.Г. // Космическая наука и технология. 2011а. Т. 17. № 1. С. 70.
 Вольвач А.Е., Кардашев Н.С., Ларионов М.Г. // Труды Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга МГУ. 2004. Т. 75. С. 184.
 Вольвач А.Е., Кардашев Н.С., Ларионов М.Г. и др. // Кинем. и физ. небесн. тел. 2007. Т. 23. № 3. С. 174.
 Вольвач А.Е., Костенко В.И., Ларионов М.Г., Вольвач Л.Н. // Космическая наука и технология. 2011б. Т. 17. № 2. С. 45.