

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,  
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ**

УДК 520.872+520.88+528.088

**НАБЛЮДЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА  
РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ “КВАЗАР-КВО”**

© 2022 г. М. В. Васильев<sup>а</sup>, В. Ф. Зимовский<sup>а</sup>, А. Е. Мельников<sup>а</sup>, И. Ф. Суркис<sup>а,\*</sup>,  
И. А. Рахимов<sup>а</sup>, В. Г. Олифирова<sup>а</sup>, А. А. Дьяков<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт прикладной астрономии РАН  
Россия, 191187, Санкт-Петербург, наб. Кутузова, 10

\*e-mail: surkis@iaaras.ru

Поступила в редакцию 04.03.2022 г.

После доработки 21.06.2022 г.

Принята к публикации 24.06.2022 г.

Описаны несколько программ наблюдений космических аппаратов (КА) методами радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ) на комплексе “Квazar-КВО”, результаты спектрального анализа принятого сигнала, а также оценка точности РСДБ-измерений на примере нескольких спутников, излучающих сигналы различных типов. На основе полученных результатов сделаны выводы о перспективности использования информационного радиоканала КА для проведения траекторных измерений. Приведены планы по проведению длинного ряда наблюдений для оперативного уточнения параметров орбиты КА.

DOI: 10.31857/S0032816222060210

**ВВЕДЕНИЕ**

Важной задачей координатно-временного и навигационного обеспечения Российской Федерации являются траекторные измерения космических аппаратов (КА) в дальнем и ближнем космосе, которые предполагают проведение интенсивных позиционных оптических, радиотехнических, светолокационных наблюдений сетью наземных станций или автономную навигацию с помощью бортовых приемников глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) [1]. Наиболее перспективным средством навигации КА являются автономные бортовые приемники ГНСС, однако наземные наблюдательные средства, несомненно, еще долгое время будут оставаться необходимым дополнением к спутниковой навигации для низко- и среднеорбитальных КА и практически безальтернативным инструментом для навигации КА в дальнем космосе.

В настоящее время российский радиоинтерферометрический со сверхдлинными базами (РСДБ) комплекс “Квazar-КВО” [2] обладает всеми возможностями для проведения высокоточных наземных радиотехнических наблюдений КА в дальнем космосе и светолокационных наблюдений низко- и среднеорбитальных искусственных спутников Земли (ИСЗ).

В состав комплекса “Квazar-КВО” входят три 32-метровых и три 13-метровых радиотелескопа, которые могут быть использованы для РСДБ,

псевдодальномерных и доплеровских наблюдений КА. Все антенные системы комплекса размещены в пунктах колокации РСДБ, светолокационных средств измерений (ГЛОНАСС/GPS и DORIS), что позволяет осуществлять привязку измерений КА к земной системе координат с максимально возможной точностью. Актуальность применения комплекса “Квazar-КВО” для наблюдений КА в ближнем и дальнем космосе обусловлена следующими факторами:

- возможностью проведения измерений практически по любым радиосигналам КА: от широкополосных до монохроматических, в L-, S-, X- и Ka-диапазонах;

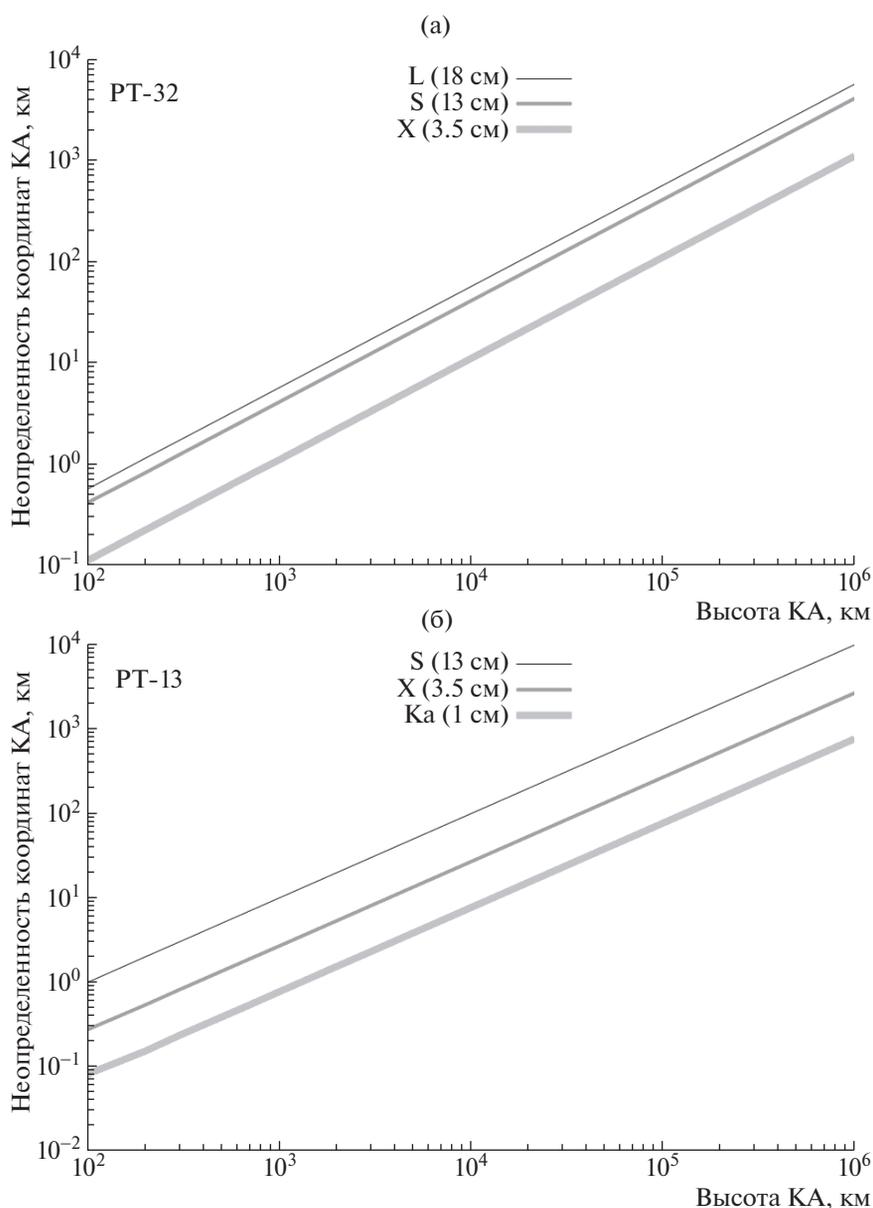
**Таблица 1.** Оценки ширины диаграммы направленности радиотелескопов РСДБ-комплекса “Квazar-КВО”

Диапазон длин волн, см	Ширина диаграммы направленности по половине мощности для радиотелескопов	
	РТ-32	РТ-13
18–20 (L)	21'	
13 (S)	14'	34'
3.5 (X)	4'	9'
1 (Ka)		3'

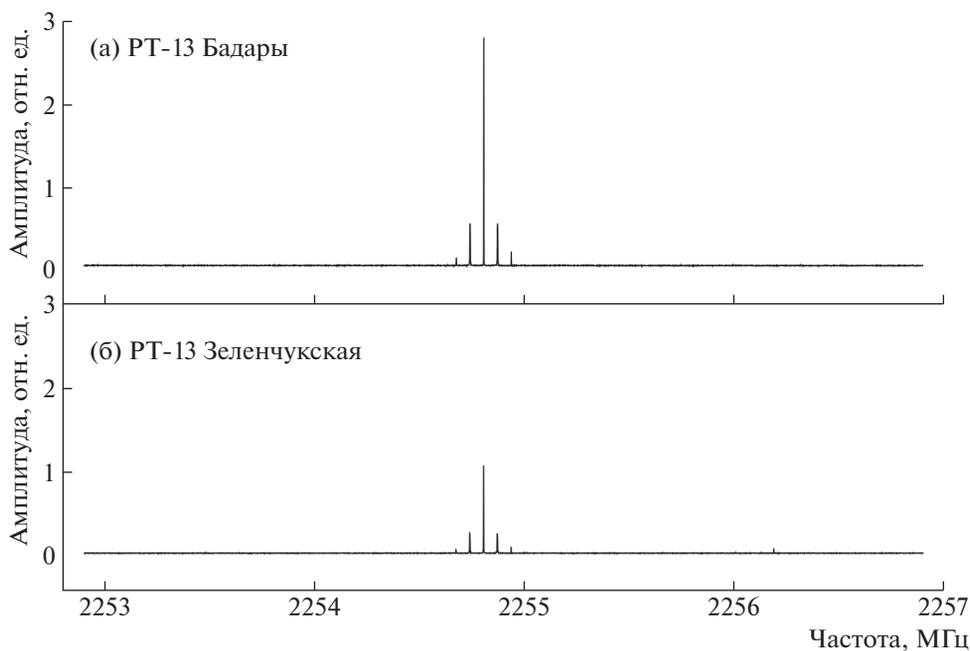
**Таблица 2.** Наблюдения КА на радиотелескопах РСДБ-комплекса “Квазар-КВО” в 2020 г.

Сеанс	Дата начала наблюдений	Продолжительность наблюдений	Состав сети	Примечание
RU0852	2020.09.15	3 ч	BvZvSw	S-диапазон RCP/LCP, КА <sub>1</sub>
RU0859	2020.12.01	20 мин	SvBvZvSw	S-диапазон RCP/LCP, КА <sub>2</sub>
RU0860	2020.12.02	35 мин	BdSvZcBvZvSw	S-диапазон RCP/LCP, КА <sub>3</sub>
RU0861	2020.12.15	6 ч	BvZvSw	S/X-диапазоны LCP, КА <sub>2</sub>

Примечание. Sv – радиотелескоп РТ-32, Светлое; Sw – радиотелескоп РТ-13, Светлое; Zc – РТ-32, Зеленчукская; Zv – РТ-13, Зеленчукская; Bd – РТ-32, Бадары; Bv – РТ-13, Бадары; RCP и LCP – соответственно правая и левая круговые поляризации; КА<sub>1</sub>–КА<sub>3</sub> – космические аппараты.



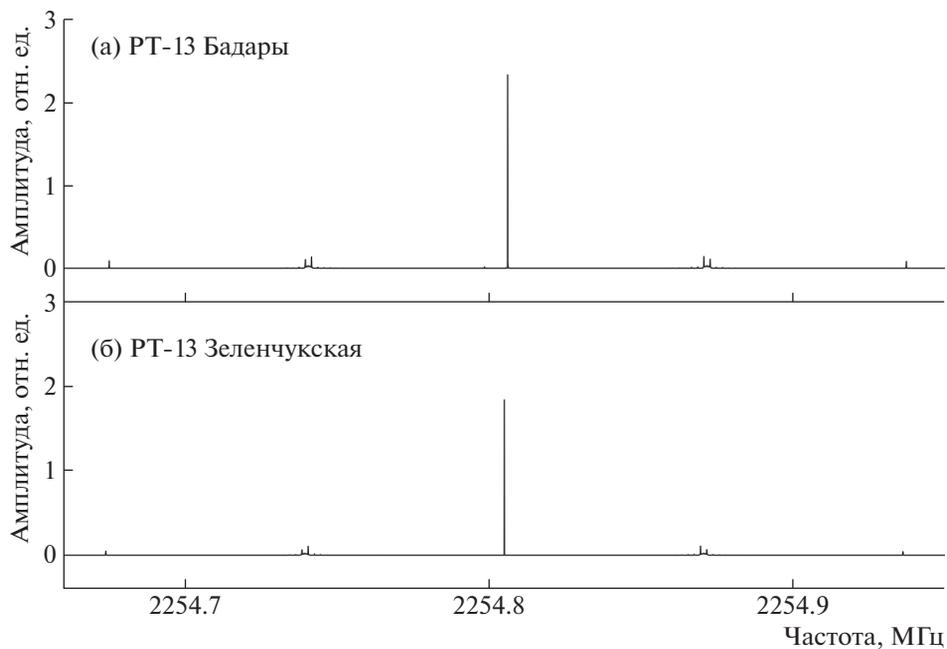
**Рис. 1.** Допустимые ошибки эфемерид КА в зависимости от высоты его орбиты для соответствующих длин волн и радиотелескопов РТ-32 (а) и РТ-13 (б) комплекса “Квазар-КВО”.



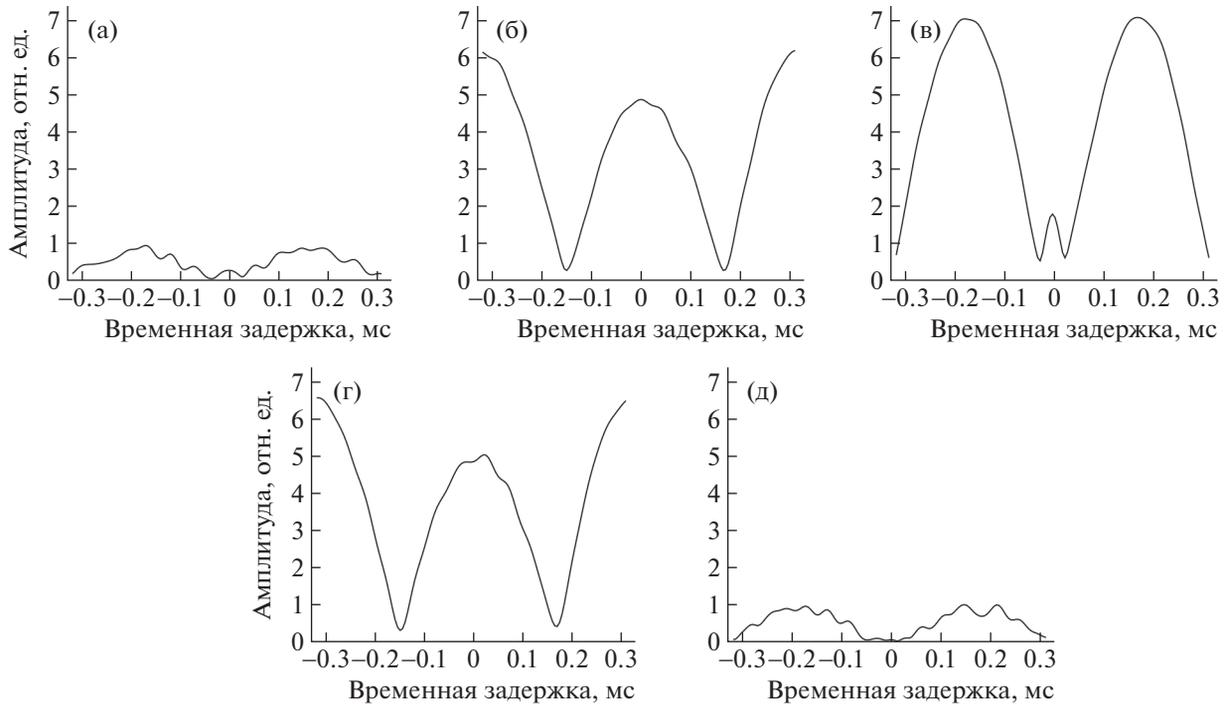
**Рис. 2.** Автокорреляционный спектр сигналов в правой круговой поляризации радиотелескопов РТ-13 обсерваторий Бадары (а) и Зеленчукская (б).

- гибкой системой первичной обработки, основанной на использовании аппаратных и программных корреляторов ИПА РАН [3, 4];

- высокой, вплоть до субсантиметровой, точностью измерений временных задержек приема сигналов станциями РСДБ-сети;



**Рис. 3.** Фрагмент автокорреляционного спектра сигналов в правой круговой поляризации радиотелескопов РТ-13 обсерваторий Бадары (а) и Зеленчукская (б).



**Рис. 4.** Кросскорреляционные отклики для одного из 5-секундных интервалов усреднения для спектральных деталей на частотах, МГц: 2254.68 (а), 2254.74 (б), 2254.81 (в), 2254.87 (г), 2254.94 (д).

- возможностью использования приемников ГНСС и радиометров водяного пара для компенсации атмосферных задержек [5];
- опытом РСДБ-наблюдений КА навигационных систем GPS, ГЛОНАСС, Beidou, КА серии Космос, КА РадиоАстрон, Mars Express [6];
- возможностью проведения высокоточных дифференциальных РСДБ-наблюдений КА и квазаров;
- возможностью использования комплекса для отработки методики траекторных РСДБ-наблюдений КА.

В данной статье описан опыт применения средств комплекса “Квазар-КВО” для организации оперативных РСДБ-измерений КА, первоначальная информация о котором ограничивается его элементами орбиты и примерным диапазоном радиоизлучения.

#### ШИРИНА ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ РАДИОТЕЛЕСКОПОВ КОМПЛЕКСА “КВАЗАР-КВО” И ДОПУСТИМЫЕ ОШИБКИ ЭФЕМЕРИД КА

Возможность точного наведения радиотелескопа зависит от точности эфемерид КА и ширины диаграммы направленности антенны. Известное выражение для ширины диаграммы направленности по половине мощности для параболической антенны имеет вид

$$\theta = \lambda/D,$$

где  $\theta$ , рад – ширина диаграммы направленности по половине мощности;  $\lambda$ , м – длина волны;  $D$ , м – диаметр антенны.

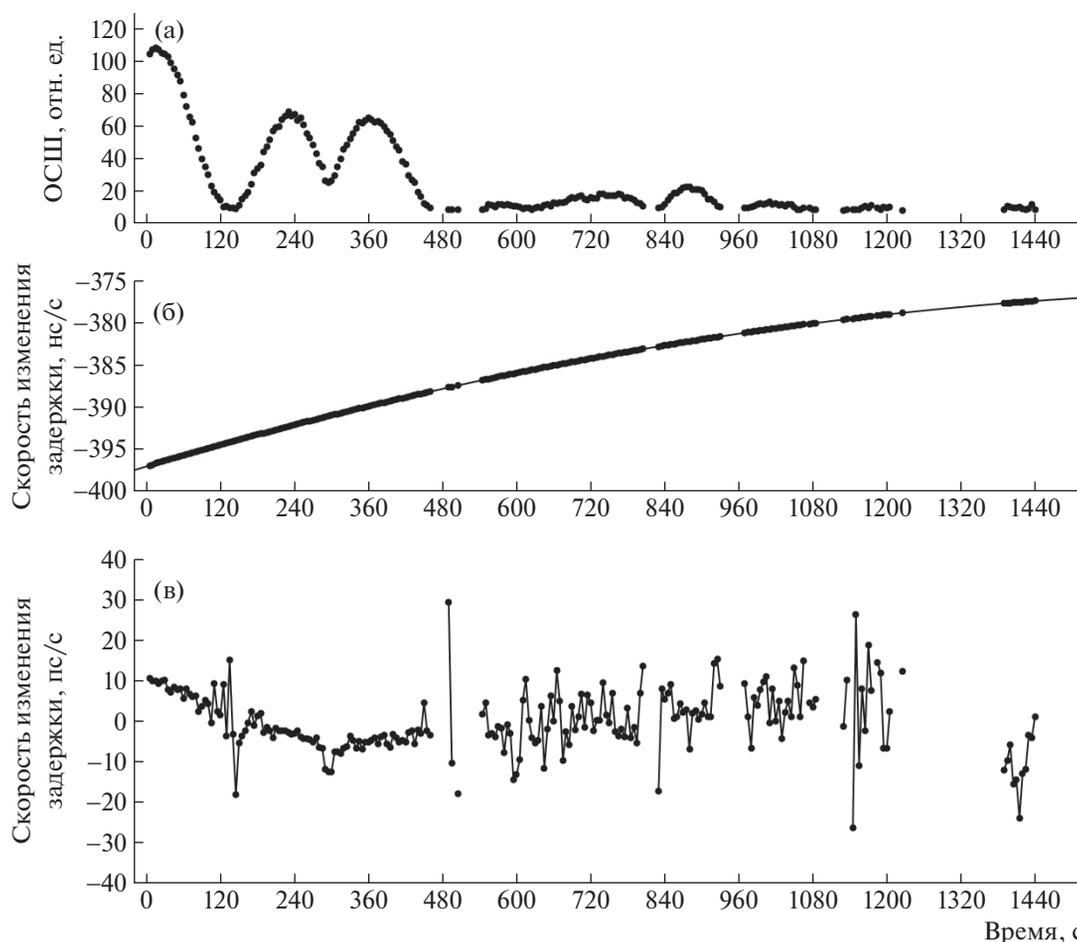
В табл. 1 приведены оценки ширины диаграммы направленности радиотелескопов РТ-13 и РТ-32 на различных длинах волн.

На рис. 1 приведены оценки допустимой ошибки эфемерид КА в зависимости от высоты его орбиты для соответствующих длин волн и типов радиотелескопов. Видно, что допустимая ошибка эфемерид при использовании радиотелескопов комплекса “Квазар-КВО” варьируется от долей (для низкоорбитальных ИСЗ) до тысяч километров (для высокоорбитальных КА).

Выполнение требований к точности эфемерид при использовании радиотелескопов комплекса “Квазар-КВО” для наблюдений КА обычно достигается использованием актуальных элементов орбиты.

#### НАБЛЮДАТЕЛЬНАЯ ПРОГРАММА

Начиная с июля 2020 года была проведена серия РСДБ-наблюдений КА с использованием 32- и 13-метровых радиотелескопов обсерваторий Светлое, Зеленчукская, Бадары РСДБ-комплекса “Квазар-КВО”. Названия экспериментов, даты проведения, длительности и комментарии приведены в табл. 2. Краткие обозначения радиотеле-



**Рис. 5.** Обработка разбитых на 5-секундные интервалы данных для центральной линии в спектре: **а** – ОСШ; **б** – полная скорость изменения задержки (черные точки) и квадратичный тренд (непрерывная линия); **в** – остаточная скорость изменения задержки (вычтен квадратичный тренд).

скопов, используемые в тексте и в таблице следующие: Sv – РТ-32, Светлое; Sw – РТ-13, Светлое; Zc – РТ-32, Зеленчукская; Zv – РТ-13, Зеленчукская; Bd – РТ-32, Бадары; Bv – РТ-13, Бадары. Правая и левая круговые поляризации обозначаются RCP и LCP, соответственно. Различные космические аппараты в таблице обозначены как КА<sub>1</sub>, КА<sub>2</sub> и КА<sub>3</sub>.

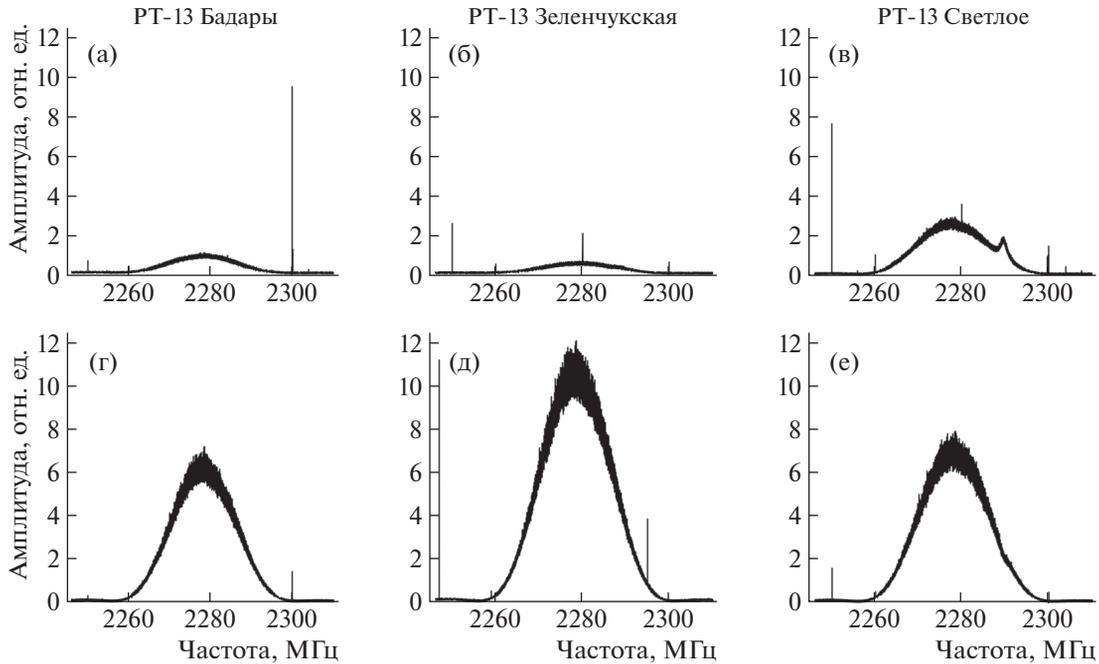
Для эфемеридных расчетов использовались достаточно грубые векторы начальных положений и скоростей КА. Эти векторы служили начальными данными для численного интегрирования уравнений движения КА с помощью программного комплекса ЭРА [7], по результатам которого составлялась программа наблюдений для системы управления MarkIV Field System [8]. Отметим, что в некоторых случаях интервал прогноза составлял больше одного месяца, а в одном случае мы имели дело с некорректными начальными данными. Эти эксперименты были обработаны на программных корреляторах RASFX [3, 4]

и DiFX [9], результаты этой обработки будут приведены в следующих разделах.

### ОБРАБОТКА ДАННЫХ СЕАНСА RU0852

В наблюдениях участвовали только радиотелескопы РТ-13 Bv, Zv, Sw. Были использованы следующие настройки оборудования: генератор пикосекундных импульсов выключен; регистрировались полосы частот шириной 512 МГц от 2163.9 до 2675.9 МГц в правой и левой круговых поляризациях. Всего было записано 6 сканов по 30 мин.

Последующий анализ спектра принятых радиосигналов позволил установить, что нами использовались некорректные начальные данные о векторе положения КА и его скорости, что позволило наблюдать КА в течение только части запланированного времени. Однако возможности комплекса “Квазар-КВО” позволили не только выделить сигнал наблюдаемого КА, но и проанализировать



**Рис. 6.** Автокорреляционные спектры сигналов от станций Bv (а, г), Zv (б, д) и Sw (в, е) в правой и левой круговых поляризациях, соответственно, по данным сеанса RU0859.

структуру его радиосигнала, а затем и получить доплеровские измерения этого КА.

Анализ полученных в сеансе RU0852 автокорреляционных спектров от отдельных радиотелескопов позволил обнаружить характерный линейчатый спектр, состоящий из пяти пиков шириной 260 кГц между крайними пиками и 130 кГц между вторым и четвертым пиками. Установлены следующие частоты для каждого пика: 2254.68, 2254.74, 2254.81, 2254.87, 2254.94 МГц.

На рис. 2 приведен автокорреляционный спектр сигналов в правой круговой поляризации со станций Zv и Bv, вырезана часть спектра с шириной полосы 4 МГц и шагом по частоте 976.5625 Гц (4096 точек на спектре). Длительность интервала усреднения при этом составляла 1 с. Полученный автокорреляционный спектр сильно отличается от ожидаемого спектра, который должен был быть похожим на спектр навигационных спутников ГЛОНАСС.

На рис. 3 приведен автокорреляционный спектр сигналов в правой круговой поляризации со станций Zv и Bv, вырезана часть спектра с шириной полосы 1 МГц и шагом по частоте около 61 Гц (16384 точек на спектре). Длительность интервала усреднения составляла 150 мкс.

Спектры радиосигналов, зарегистрированных двумя станциями, смещены друг относительно друга в результате доплеровского смещения. Регистрация одинаковых структур на инструментах, удаленных друг от друга на 4400 км, позволила до-

пустить, что наблюдается один и тот же космический объект искусственного происхождения. Для подтверждения этого предположения была проведена корреляционная обработка данных, полученных станциями Zv и Bv. Данные о движении КА в виде положений и скоростей в зависимости от времени использовались для расчета априорной модели интерферометрической задержки.

Корреляционная обработка производилась не во всей полосе 512 МГц, а на пяти выделенных участках шириной 32 кГц и с шагом по частоте 1 кГц со спектральными линиями по центру. Время накопления было установлено равным 1 мс. Сначала имеющийся 30-минутный скан был разделен на интервалы длиной 5 с, затем каждый такой интервал был обработан отдельно. Таким образом, на выходе с коррелятора были получены отсчеты взаимных корреляционных спектров: 32 точки по частоте и 5000 точек по времени. Выбранные параметры позволяют получить корреляционные окна по задержке и по скорости изменения задержки (частоте интерференции) — 640 мкс и 443.5 нс/с, соответственно.

В силу того что для наблюдений использовались некорректные эфемериды, модель задержки пришлось корректировать. Для этого в нее вводились квадратичные поправки. Стандартные средства коррекции модели задержки в корреляторе DiFX ограничены возможностью корректировки сдвига и хода часов станций. Это работает с объектами звездного типа, но не подходит для быст-

родвижущихся КА. Для работы с такими объектами было разработано программное обеспечение, которое работает по следующему алгоритму:

- на первой итерации корреляционной обработки находятся поправки часов для каждой станции, обычно с использованием наблюдений яркого радиисточника; после того как корреляционный отклик выставляется в нулевую задержку в корреляционном окне, происходит переход к работе с сигналом КА;

- в зависимости от величины амплитуды сигнала записанный скан разбивается на небольшие отрезки времени – интервалы, которые обрабатываются по отдельности, с тем чтобы, с одной стороны, обеспечить достаточное отношение сигнал/шум (ОСШ), а с другой – не допустить размывания корреляционного отклика из-за некорректной модели задержки; подобрав такие значения времени накопления коррелятора и длительности интервалов, программа переходит к коррекции модели;

- далее обрабатываются полные данные наблюдений, причем не обязательно делать обработку всех измерений – для скорости можно выбрать всего несколько точек в начале, в середине и в конце; после этого программой постпроцессорной обработки вычисляются значения задержки и скорости изменения задержки для каждого интервала; по этим значениям вычисляются коэффициенты корректирующего полинома, поправки вводятся в задание коррелятора, и процесс повторяется.

На рис. 4 приведены примеры кросскорреляционных откликов для одного из 5-секундных интервалов усреднения. Зависимость кросскорреляционной функции от временной задержки для спектральных компонент на частотах 2254.68, 2254.81 и 2254.94 МГц имеет форму провала (рис. 4а, 4в, 4д соответственно), для компонент на частотах 2254.74 и 2254.87 МГц – форму горба (рис. 4б, 4г соответственно). Программы постпроцессорной обработки, которые мы используем, не позволяют вычислить по таким данным задержку сигнала, но дают возможность получить частоту интерференции.

На рис. 5 приведены графики скорости изменения задержки для центральной линии по 5-секундным интервалам с трендом (рис. 5б) и с удаленным трендом (рис. 5в). Кроме того, на рис. 5а приведено отношение сигнал/шум. Полезный сигнал обнаружен в течение чуть более 20 мин первого скана, затем он пропадает полностью. Пропадание сигнала может быть связано с выходом наблюдаемого КА из диаграммы направленности антенны РТ-13 вследствие неточных целеуказаний. Согласно рис. 5а, 5в, точность измерения частоты интерференции сильно зависит от ОСШ. При значениях ОСШ около 100 и более точность измерения частоты интерференции достигает нескольких пикосекунд в секунду, а при уменьшении ОСШ до 10 составляет несколько десятков пикосекунд в секунду.

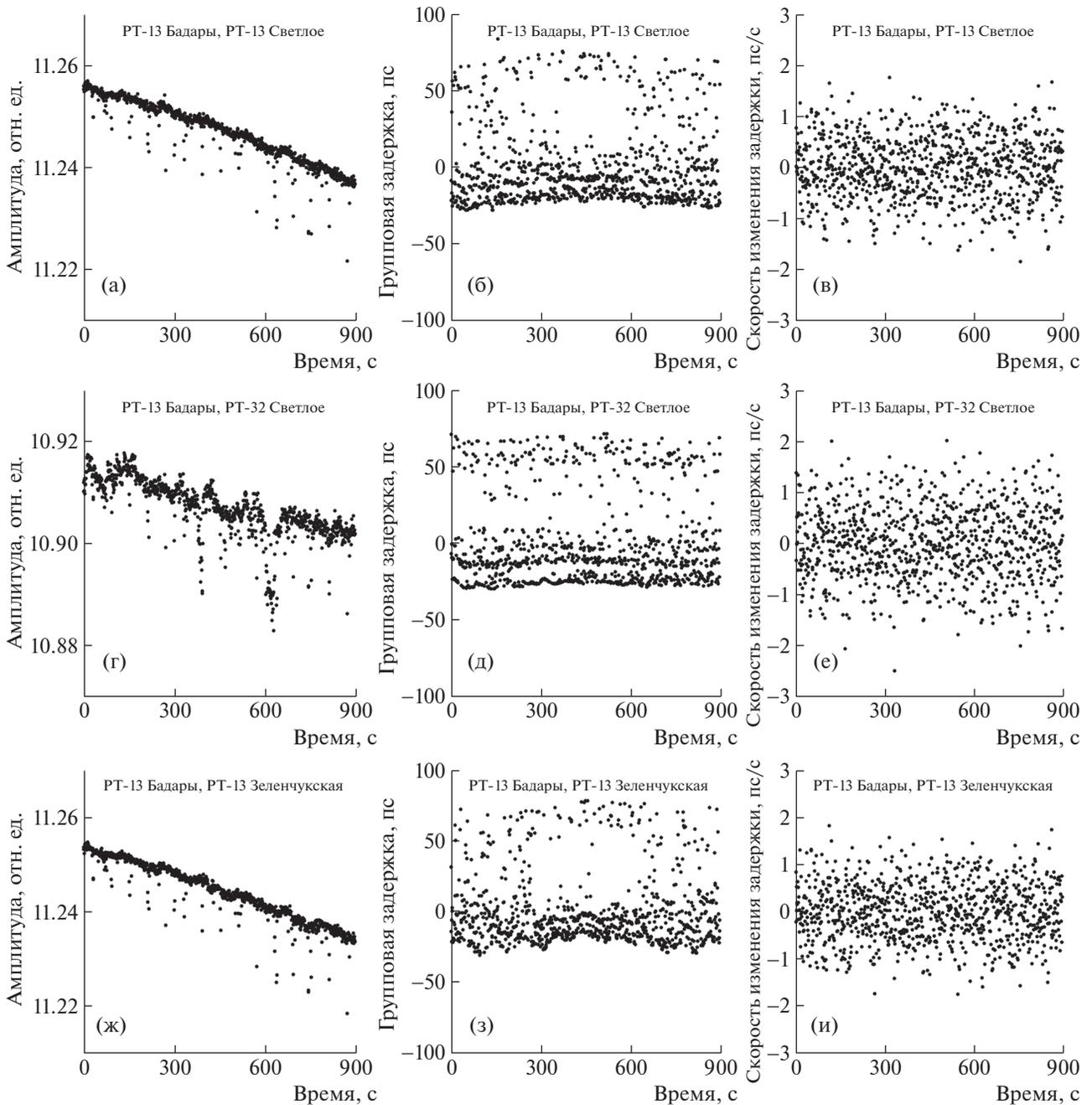
Сигнал КА, наблюдаемого в сеансе RU0852, не позволяет измерять с высокой точностью интерферометрическую задержку. Однако измерения частоты интерференции в режиме РСДБ или доплеровское смещение и интегральная фаза, наблюдаемые в режиме одиночного телескопа, дают возможность проводить траекторные измерения КА с достаточной точностью.

### ОБРАБОТКА ДАННЫХ СЕАНСА RU0859

1 декабря 2020 года был проведен 20-минутный тестовый сеанс с участием радиотелескопа РТ-32 Sv в обсерватории Светлое и с тремя радиотелескопами РТ-13 Bv, Zv, Sw. Настройки оборудования радиотелескопов РТ-13 были следующие: генератор пикосекундных импульсов выключен, регистрация полосы частот шириной 512 МГц (от 2163.8 до 2675.8 МГц) в правой и левой круговых поляризациях. Настройки оборудования радиотелескопа РТ-32 были такими: генератор пикосекундных импульсов выключен, регистрация по четыре полосы частот шириной 32 МГц (начало полос: 2251.99, 2267.99, 2283.99, 2299.99 МГц) в правой и левой круговых поляризациях. Всего было записано 2 скана: длительностью 1 мин наблюдений квазаров и 15-минутный

**Таблица 3.** Измеренные характеристики интерферометрического сигнала по базам для сеанса RU0859 по данным коррелятора DiFX

База	Точность измерения задержки (среднеквадратическое отклонение), пс	Точность измерения скорости изменения задержки (среднеквадратическое отклонение), пс/с
Bv–Sw	26.29	0.60
Bv–Sv	29.60	0.71
Bv–Zv	25.61	0.61
Sv–Sw	26.31	0.39
Sw–Zv	26.01	0.22
Sv–Zv	27.05	0.44



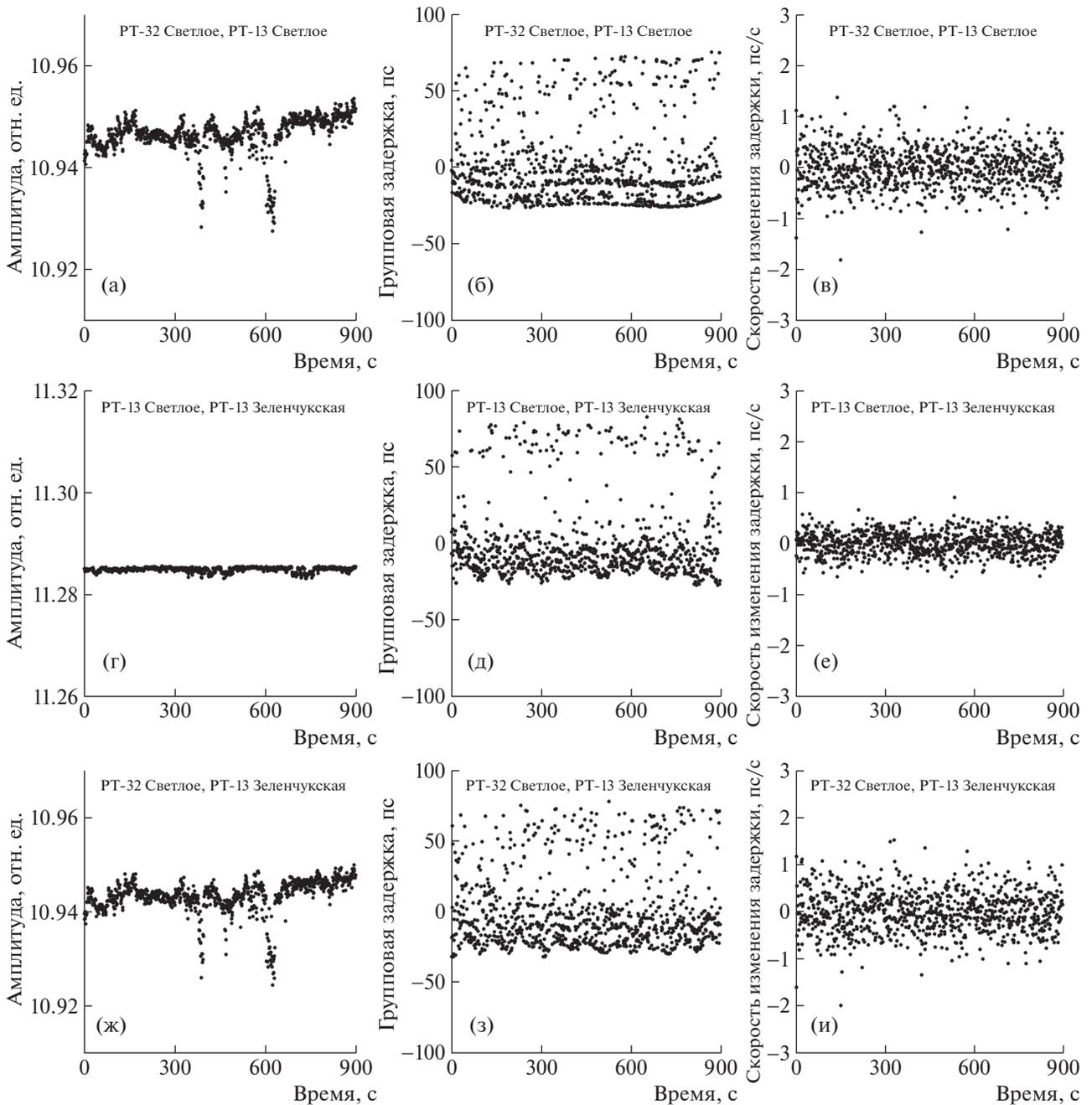
**Рис. 7.** Обработка секундных интервалов коррелятором DiFX: амплитуда (а, г, ж); остаточная групповая задержка (вычтен тренд 4-й степени) (б, д, з); остаточная скорость изменения задержки (вычтен кубический тренд) (в, е, и), соответственно, для баз Bv–Sw (а, б, в); Bv–Sv (г, д, е); Bv–Zv (ж, з, и).

скан наблюдения КА. Целеуказания были рассчитаны с использованием корректного вектора начального положения и скорости целевого КА. Обработка данных выполнялась корреляторами RASFX и DiFX с целью сравнения полученных результатов.

На рис. 6 приведены автокорреляционные спектры, полученные по наблюдениям радиотелескопов РТ-13, при времени усреднения 430 мкс

и шаге по частоте около 488 Гц. Анализ автокорреляционных спектров от отдельных радиотелескопов позволил обнаружить характерный колоколообразный спектр в правой и левой круговых поляризациях с шириной “колокола” 44 МГц.

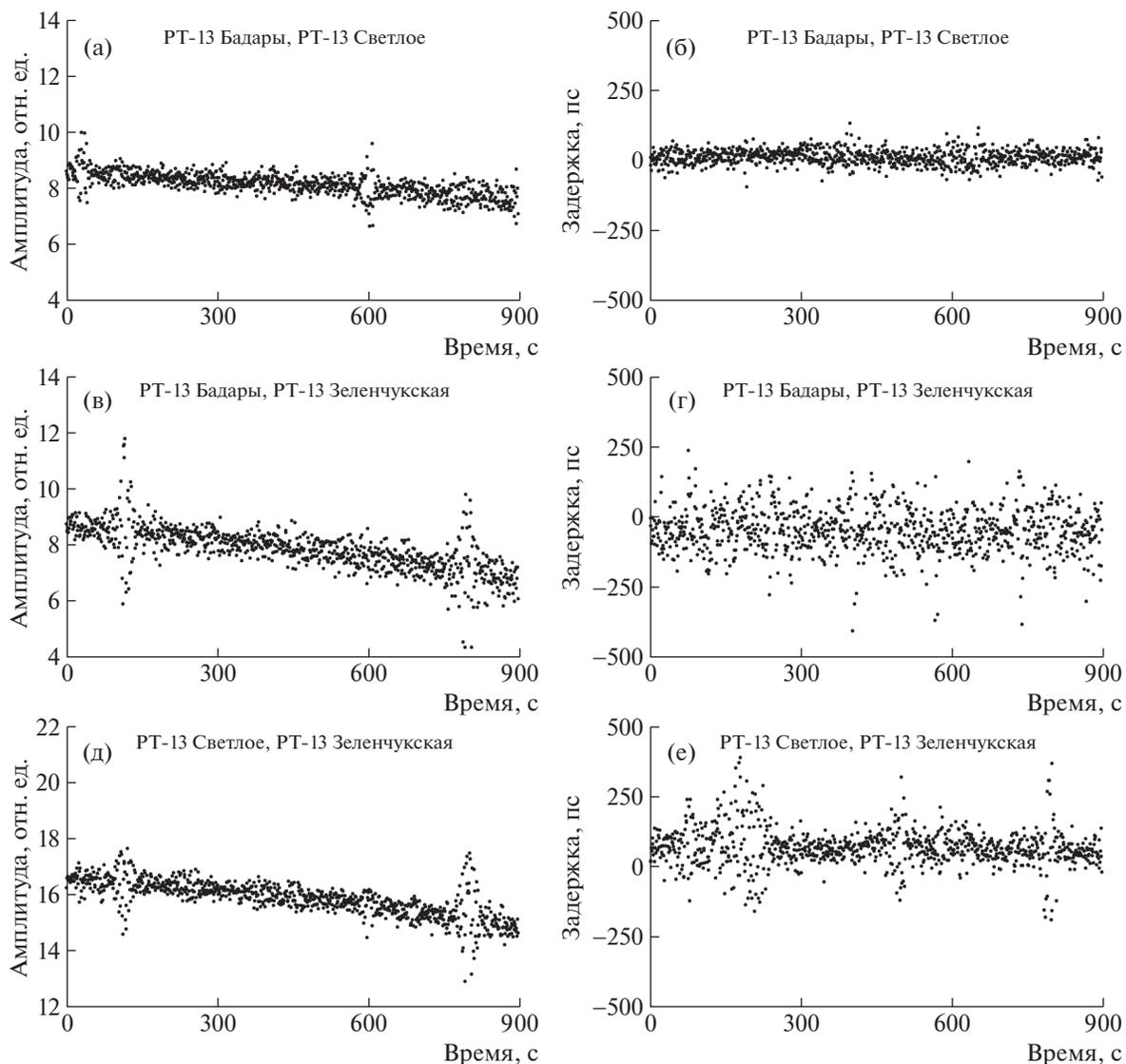
Коррелятором DiFX проводилась совместная обработка наблюдений радиотелескопов РТ-13 и РТ-32 только для левой круговой поляризации, поскольку амплитуда сигнала в левой круговой по-



**Рис. 8.** Обработка секундных интервалов коррелятором DiFX: амплитуда (а, г, ж); остаточная групповая задержка (вычтен тренд 4-й степени) (б, д, з); остаточная скорость изменения задержки (вычтен кубический тренд) (в, е, и), соответственно, для баз Sv–Sw (а, б, в); Sw–Zv (г, д, е); Sv–Zv (ж, з, и).

ляризации выше, чем в правой. Вычислялись отсчеты взаимных корреляционных спектров по центральной части “колокола” шириной 16.384 МГц с периодом накопления 2 мс и спектральным разрешением 2 кГц (8192 отсчета в спектре), что позволяло находить корреляционный отклик в корреляционном окне шириной 500 мкс по задержке и 500 Гц по частоте интерференции (соответственно 0.22 мкс/с по скорости изменения задержки).

Поскольку исходные целеуказания были довольно точными, частота интерференции оказалась небольшой, что позволило объединить периоды накопления в секундные интервалы и на каждом из них вычислить задержку и частоту интерференции. Далее модель интерферометрической задержки была итеративно скорректирована полиномами второй степени.



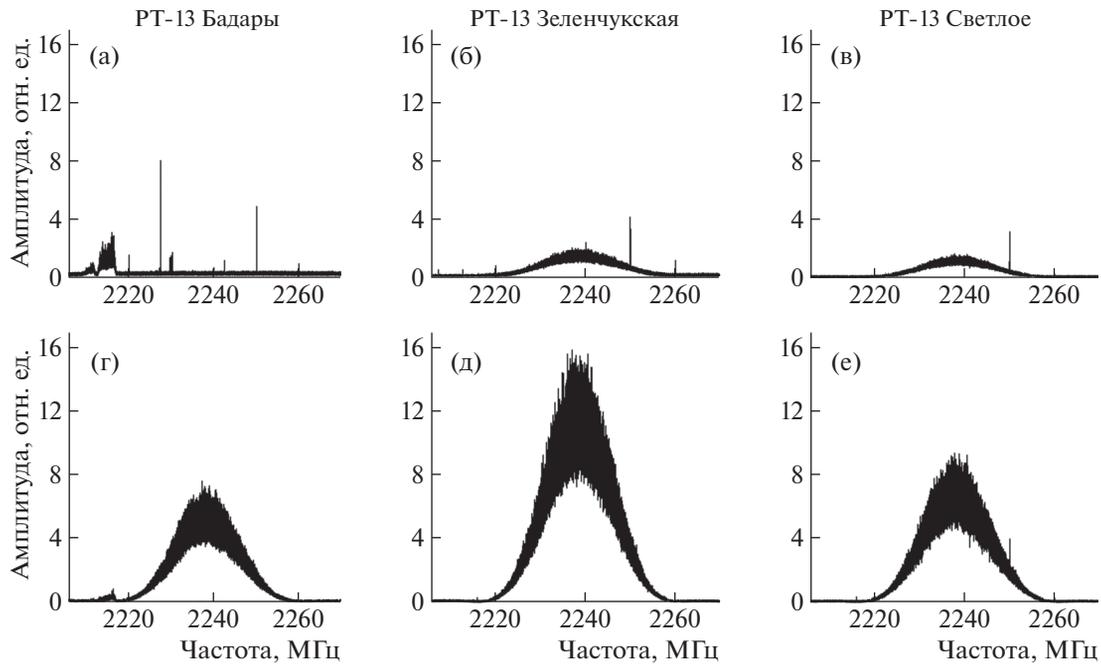
**Рис. 9.** Амплитуды корреляционных откликов (а, в, д) и невязки задержек (б, г, е), полученные по результатам обработки сессии RU0859 коррелятором RASFX: а, б – база Sw–Zv; в, г – база Bv–Zv; д, е – база Bv–Sw.

После нескольких итераций проведена окончательная обработка с периодом накопления 2 мс и спектральным разрешением 16 кГц (1024 отсчета в спектре), выходные данные усреднялись на секундных интервалах.

На рис. 7, 8 приведены графики амплитуды взаимной корреляционной функции, остаточной интерферометрической задержки и остаточной скорости изменения задержки по секундным интервалам. Сильный полезный сигнал обнаружен

**Таблица 4.** Измеренные характеристики интерферометрического сигнала по базам для сеанса RU0860 по данным коррелятора DiFX

База	Точность измерения задержки (среднеквадратическое отклонение), пс	Точность измерения скорости изменения задержки (среднеквадратическое отклонение), пс/с
Bv–Sw	27.58	0.64
Bv–Zv	26.51	0.65
Sw–Zv	26.73	0.23



**Рис. 10.** Автокорреляционные спектры сигналов от станций Bv (а, г), Zv (б, д) и Sw (в, е) в правой и левой круговых поляризациях, соответственно, по данным сеанса RU0860.

на всем протяжении 15-минутного скана. Точности измерения задержки (среднеквадратическое отклонение) и частоты интерференции для каждой базы приведены в табл. 3.

С целью отработки методики и сравнения результатов проводилась также независимая обработка данных наблюдений сеанса RU0859 коррелятором RASFX. Обработывалась вся полоса излучения КА, “колокол” шириной 44 МГц. Коррелятором вычислялись взаимные корреляционные спектры с разрешением 31.25 кГц с периодом накопления 40 мс. Полученные коррелятором RASFX авто- и взаимные корреляционные спектры аналогичны спектрам, полученным коррелятором DiFX (см. рис. 6). Далее также шло объединение данных на секундных интервалах, для каждого интервала были получены значения групповой задержки и ОСШ. Дальнейшие итерации проводились только с использованием данных левой поляризации, в которой ОСШ выше.

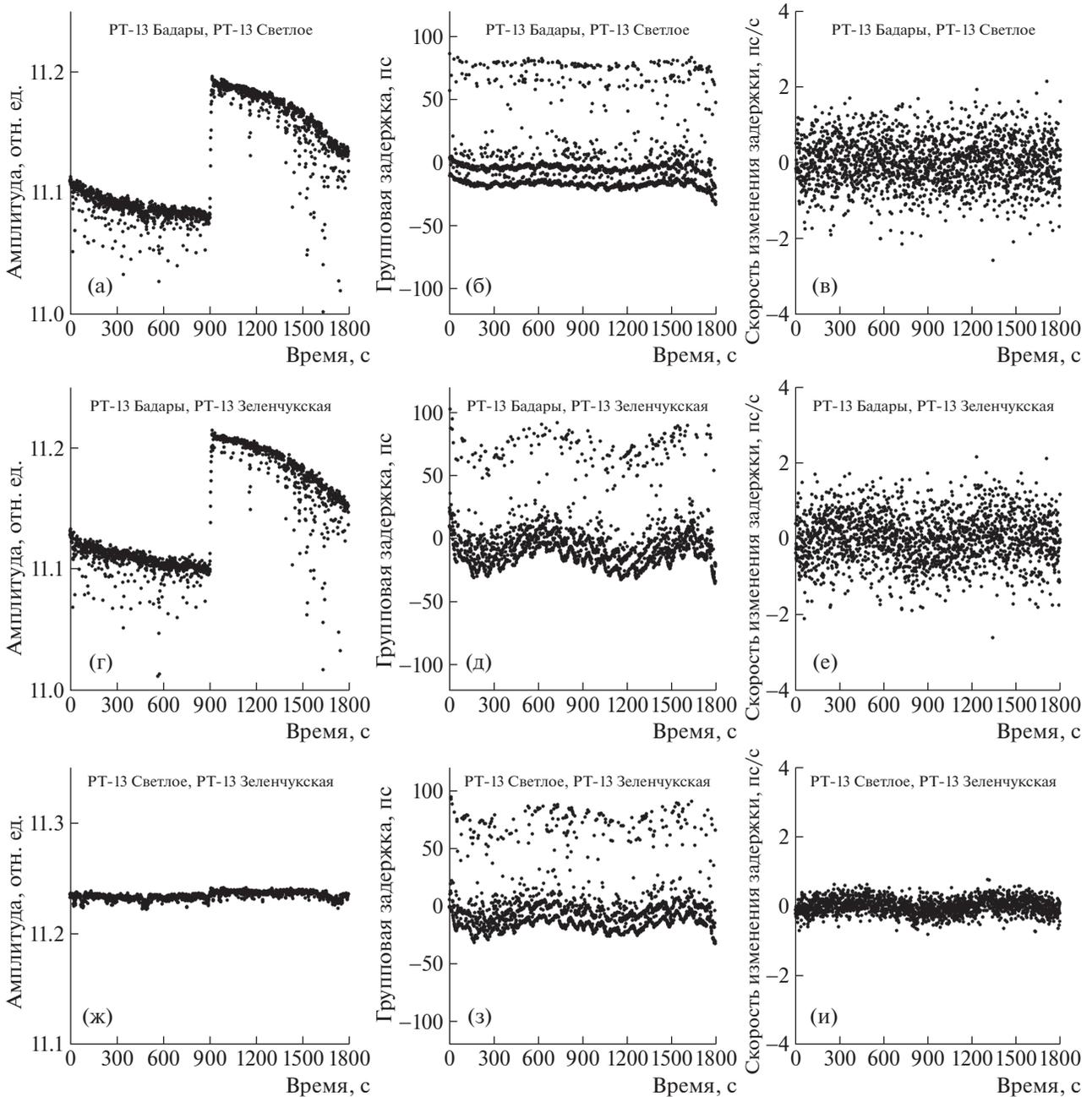
Затем была проведена вторая итерация обработки данных. По полученным в ходе первой итерации значениям РСДБ-задержек были уточнены исходные эфемеридные данные. Была проведена переработка данных. Для вычисления точности определения задержек полученные невязки были аппроксимированы полиномом второго порядка. Результаты – амплитуды корреляционных откликов и невязки задержек за вычетом аппроксимирующего полинома – представлены на рис. 9.

Точности определения задержек составили 13.2 пс для базы Bv–Sw, 52.7 пс для базы Bv–Zv и 43.2 пс для базы Sw–Zv.

Сигнал КА, наблюдаемого в сеансе RU0859, позволяет измерять с высокой точностью частоту интерференции и интерферометрическую задержку. В режиме одиночного телескопа при наличии генератора кода потенциально возможны измерения псевдодалности, доплеровского смещения и интегральной фазы, что дает возможность проводить траекторные измерения КА с точностью, аналогичной траекторным измерениям навигационных спутников ГЛОНАСС.

### ОБРАБОТКА ДАННЫХ СЕАНСА RU0860

2 декабря 2020 года был проведен 35-минутный тестовый сеанс с участием радиотелескопов РТ-32 Bd, Zc, Sv и РТ-13 Zv, Sw. Настройки оборудования для радиотелескопов РТ-13 были следующие: генератор пикосекундных импульсов выключен, регистрация полосы частот шириной 512 МГц (от 2163.8 до 2675.8 МГц) в правой и левой круговых поляризациях. Настройки оборудования радиотелескопов РТ-32 были такими: генератор пикосекундных импульсов выключен, регистрация по четыре полосы частот шириной 32 МГц (для Sv начало полос 2251.99, 2267.99, 2283.99, 2299.99 МГц; для Bd, Zc – 2257.99, 2273.99, 2289.99, 2305.99 МГц) в правой и левой круговых поляризациях. Записаны 2 скана по од-

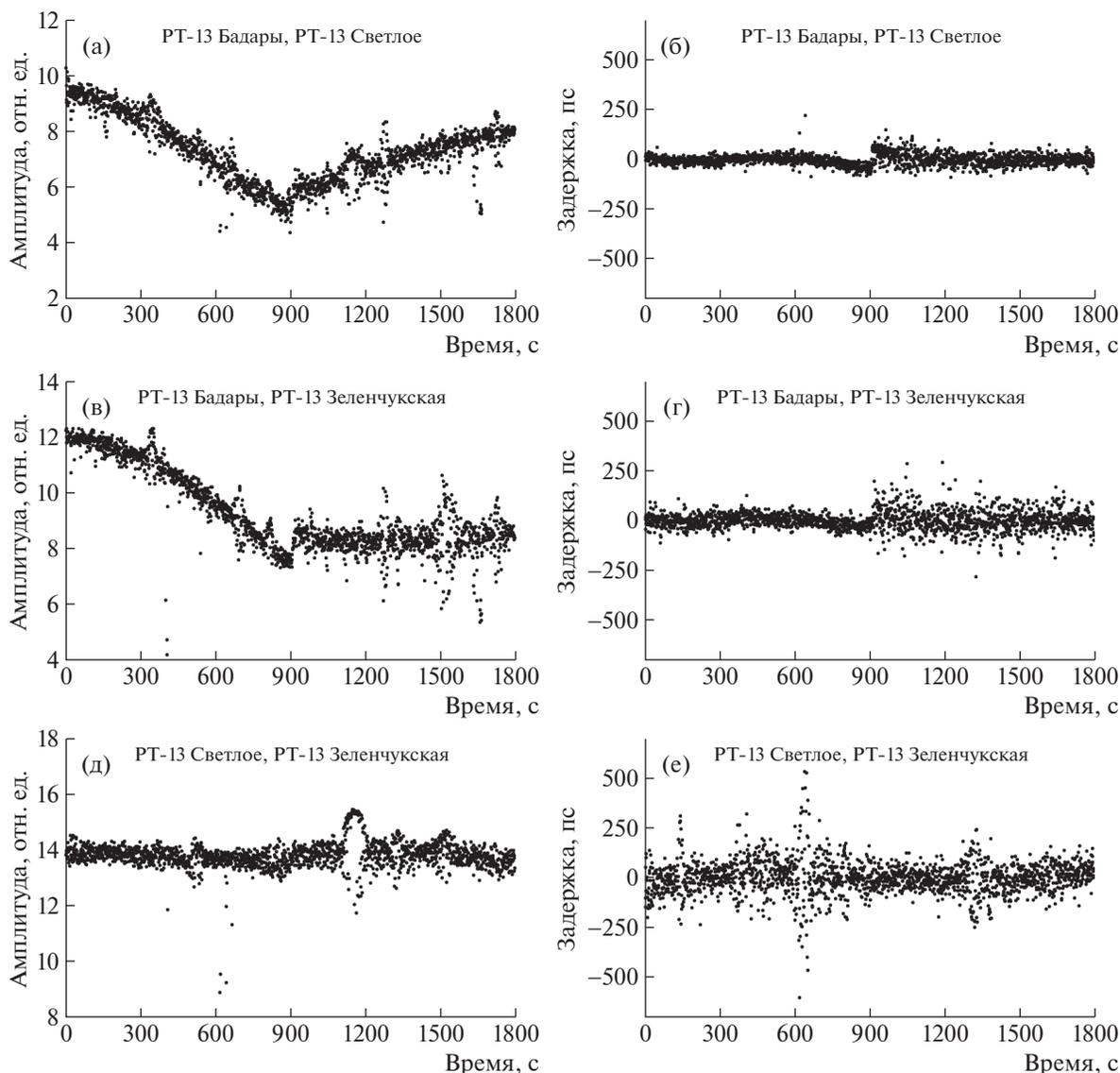


**Рис. 11.** Обработка секундных интервалов коррелятором DiFX: амплитуда (а, г, ж); остаточная групповая задержка (вычтен тренд 4-й степени) (б, д, з); остаточная скорость изменения задержки (вычтен кубический тренд) (в, е, и), соответственно, для баз Bv–Sw (а, б, в); Bv–Zv (г, д, е); Sw–Zv (ж, з, и).

ной минуте для наблюдений квазаров и 30-минутный скан наблюдений КА.

На рис. 10 приведены автокорреляционные спектры КА, полученные на радиотелескопах РТ-13 при времени усреднения 43 мкс и шаге по частоте 488 Гц. Анализ автокорреляционных спектров радиотелескопов позволил обнаружить характерный колоколообразный спектр в правой и левой поляризациях.

Обработка данных сеанса RU0860 на корреляторе DiFX проводилась аналогично обработке сеанса RU0859. Поскольку амплитуда сигнала в левой круговой поляризации выше, чем в правой, а ширина полосы РТ-13 позволяет провести обработку колоколообразного сигнала КА целиком, дальнейшая работа осуществлялась с данными РТ-13 левой круговой поляризации. Вычислялись отсчеты взаимных корреляционных спектров по центральной части “колокола” шириной 40.96 МГц



**Рис. 12.** Амплитуды корреляционных откликов (а, в, д) и невязки задержек сессии (б, г, е), полученные по результатам обработки сессии RU0860 коррелятором RASFX: а, б – база Sw–Zv; в, г – база Vv–Zv; д, е – база Vv–Sw.

с периодом накопления 2 мс и спектральным разрешением 20 кГц (2048 отсчетов в спектре), на выходе коррелятора данные усреднялись на односекундных интервалах времени. В процессе корреляционной обработки модель интерферометрической задержки была итеративно скорректирована полиномами второй степени. После нескольких итераций проведена окончательная обработка. На рис. 11 приведены графики амплитуды, остаточной интерферометрической задержки и остаточной скорости изменения задержки по секундным интервалам. Сильный полезный сигнал обнаружен на всем протяжении 30-минутного скана. Точности измерения задержки (среднеквадратическое отклонение) и частоты интерференции для каждой базы приведены в табл. 4.

Аналогично сеансу RU0859, данные сеанса RU0860 были обработаны коррелятором RASFX с определением задержки на секундных интервалах. Амплитуды корреляционных откликов и невязки задержек, полученные по результатам обработки сессии наблюдений RU0860 коррелятором RASFX, представлены на рис. 12.

Точности определения задержек составили 20.4 пс для базы Vv-Sw, 34.9 пс для базы Vv-Zv, 58.6 пс для базы Sw-Zv.

### МНОГОЧАСОВОЙ СЕАНС RU0861

15 декабря 2020 года был проведен первый многочасовой сеанс наблюдений КА для отработки следующих методик: поиска наиболее близких

к целевому КА квазаров; квазиодновременных наблюдений КА и квазаров; компенсации атмосферных задержек и ошибок часов станций РСДБ-комплекса “Квазар-КВО” в полученных РСДБ-измерениях. Наблюдения целевого КА 40-минутными отрезками времени чередовались с наблюдениями внегалактических источников по стандартной геодезической программе в течение 20 мин. Данные по внегалактическим источникам были обработаны на корреляторе и находятся в процессе анализа, ведется подготовка к обработке данных КА.

В настоящее время обработка и анализ данных сессии RU0861 продолжаются.

### ВЫВОДЫ И ПЛАНЫ

Показаны потенциальные возможности РСДБ-комплекса “Квазар-КВО” для оперативных траекторных измерений КА с различными типами излучаемых радиосигналов. Продемонстрированы возможности корреляторов ИПА РАН для анализа и обработки наблюдений КА. Оценены точности РСДБ-измерений для КА, излучающих сигналы с различными типами модуляции, спектры которых аналогичны спектрам сигналов навигационных ИСЗ GPS, ГЛОНАСС или представляют собой линейчатый набор монокромных сигналов.

Начата работа по компенсации атмосферных задержек и ошибок часов станций с использованием квазиодновременных наблюдений квазаров. С этой целью проведен сеанс RU0861 и будут проводиться многочасовые сеансы наблюдений целевого КА.

В дальнейшем планируется обработка полученных из наблюдений данных с целью уточнения орбиты целевого КА.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mikhailov N.V., Vasil'ev M.V.* // Gyroscopy and Navig. 2011. V. 2. P. 1.  
<https://doi.org/10.1134/S2075108711010068>
2. *Shuygina N., Ivanov D., Ipatov A., Gayazov I., Marshalov D., Melnikov A., Kurdubov S., Vasilyev M., Ilyin G., Skurikhina E., Surkis I., Mardyshekin V., Mikhailov A., Salnikov A., Vytnov A., Rakhimov I., Dyakov A., Olifirov V.* // Geodesy and Geodynamics. 2019. V. 10. Is. 2. P. 150.  
<https://doi.org/10.1016/j.geog.2018.09.008>
3. *Surkis I., Ken V., Kurdubova Y., Melnikov A., Mishin V., Mishina N., Shantyr V., Zhuravov D., Zimovsky V.* IAA Correlator Center Biennial Report 2015+2016. International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2015+2016 Biennial Report. NASA/TP-2017-219021 / Eds. K.D. Baver, D. Behrend, and K.L. Armstrong. 2017. P. 1635.
4. *Суркис И.Ф., Зимовский В.Ф., Кен В.О., Курдубова Я.Л., Мишин В.Ю., Мишина Н.А., Шантырь В.А.* // ПТЭ. 2018. № 6. С. 8.  
<https://doi.org/10.1134/S0032816218060150>
5. *Ильин Г.Н., Быков В.Ю., Стэмповский В.Г., Шушикин А.М., Ипатов В.В., Миллер Е.А.* // Труды ИПА РАН. 2015. Вып. 33. С. 52.
6. *Васильев М.В., Зимовский В.Ф., Ильин Г.Н., Маршалов Д.А., Мельников А.Е., Мишина Н.А., Мишин В.Ю., Михайлов А.Г., Суркис И.Ф., Шантырь В.А.* // Труды ИПА РАН. 2015. Вып. 35. С. 68.
7. *Krasinsky G.A., Vasilyev M.V.* Universal Programming System ERA for High Precision Applications of Dynamic and Ephemeris Astronomy, in Dynamics and astrometry of natural and artificial celestial bodies. IAU Coll. 165 / Eds. I.M. Wyrzyszcak, J.H. Lieske, and R.A. Feldman. Dordrecht: Kluwer, 1997. P. 239.
8. *Himwich E., Vandenberg N., Gonzalez R., Holmstrom C.* New developments in the NASA field system. Astronomical Society of the Pacific Conference Series, Symposium on New Technologies in VLBI (Gyeongju, South Korea, Nov. 5–8, 2002) 306: San Francisco, California, 2003. P. 193–198.
9. *Deller A.T., Brisken W.F., Phillips C.J., Morgan J., Aref W., Cappallo R., Middelberg E., Romney J., Rottmann H., Tingay S.J., Wayth R.* // PASP. 2011. V. 123. P. 275.  
<https://doi.org/10.1086/658907>