

## Программа визуального отображения результатов обработки РСДБ-наблюдений космических аппаратов

© И. А. Арнаут

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

### Реферат

Особенностью РСДБ-наблюдений космических аппаратов (КА) является длительность наблюдения (десяtkи минут) с высоким отношением сигнал/шум, которая позволяет получать корреляционные отклики (амплитуды и фазы откликов, задержки) на секундных интервалах накопления данных. Однако априорно известная траектория движения КА может иметь большие ошибки, что приводит к ошибкам предвычисления задержек при корреляционной обработке. В свою очередь, это влияет на изменение амплитуды корреляционного отклика в течение скана наблюдений и взаимнокорреляционного спектра сигнала, смещение отклика внутри корреляционного окна.

Существующие средства визуализации результатов корреляционной обработки предназначены для анализа РСДБ-наблюдений квазаров, с накоплением и осреднением данных за весь скан наблюдений. Они не пригодны для анализа сессии наблюдений КА с большим количеством сканов, в которых необходимо отслеживать поведение корреляционного отклика в течение скана наблюдений.

Для визуального анализа результатов корреляционной обработки РСДБ-наблюдений КА в ИПА РАН создано программное обеспечение (ПО). Оно разработано на языке программирования *Python*, входящие в его состав библиотеки позволяют реализовать интерактивную среду взаимодействия пользователь — ПО и создать удобный интерфейс для визуального анализа спектральных характеристик. ПО имеет интерактивное окно, где пользователь имеет возможность выбирать каталог и наблюдения для визуального анализа, выводить краткую справку о наблюдении, выводить графическую информацию для выбранных авто- или взаимнокорреляционных данных.

ПО является эргономичным инструментом для визуального анализа спектральных характеристик РСДБ-наблюдений сигналов КА, позволяет быстро и удобно провести оценку полученных результатов и сформировать объективное представление о качестве проводимых наблюдений.

**Ключевые слова:** РСДБ, космический аппарат, программное обеспечение, визуальная оценка, взаимная корреляция, автокорреляция.

*Контакты для связи:* Арнаут Иван Александрович ([arnaut@iaaras.ru](mailto:arnaut@iaaras.ru)).

**Для цитирования:** Арнаут И. А. Программа визуального отображения результатов обработки РСДБ-наблюдений космических аппаратов // Труды ИПА РАН. 2026. Вып. 76. С. 3–7.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.76.3-7>

## Software for Visual Display of the Results of Processing VLBI Observations from Spacecraft

I. A. Arnaut

Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia

### Abstract

A distinctive feature of VLBI observations of spacecraft (SC) is the long-duration observation process (tens of minutes) with a high signal-to-noise ratio. This allows us to extract correlation responses (amplitude and phase responses, delays) at one-second data accumulation intervals. However, the a priori known trajectory of the SC may contain significant errors, leading to inaccuracies in the pre-calculated delays during correlation processing. Consequently, this affects the amplitude variation of the correlation response throughout the observation scan, the cross-correlation spectrum of the signal, and the displacement of the response within the correlation window.

The existing tools for visualizing the results of correlation processing are designed to analyze VLBI observations of quasars, where data are accumulated and averaged over the entire observation scan. These tools are not suitable for analyzing SC observation sessions with a large number of scans, where it is necessary to monitor the behavior of the correlation response during the observation.

To solve this problem, the Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences (IAA RAS) has developed software that enables visual analysis of VLBI correlation processing results for spacecraft observations. The software is implemented in Python and utilizes its libraries to create an interactive environment for user interaction. It provides a user-friendly interface for visual analysis of spectral characteristics. The software features an interactive window that allows users to select directories and observations for review, display brief information about each observation, and present graphical data for selected auto- or cross-correlation results.

This tool offers an ergonomic solution for visual inspection of the spectral characteristics of VLBI spacecraft signal observations, enabling quick and efficient evaluation of the results and forming an objective assessment of the observation quality.

**Keywords:** VLBI, spacecraft, software, visual estimation, cross-correlation, autocorrelation.

*Contacts:* Ivan A. Arnaut (arnaut@iaaras.ru).

**For citation:** Arnaut I. A. Software for visual display of the results of processing VLBI observations from spacecraft // Transactions of IAA RAS. 2026. Vol. 76. P. 3–7.  
<https://doi.org/10.32876/ApplAstron.76.3-7>

## Введение

Для обработки радиоинтерферометрических наблюдений радиотелескопов РСДБ-комплекса «Квазар-КВО» (Shuygina et al., 2019) в ИПА РАН был разработан программный коррелятор РАН (коррелятор RASFX) (Суркис и др., 2018). Его графический пользовательский интерфейс позволяет оператору проводить визуальную оценку результатов первичной корреляционной обработки: оценить авто- и взаимокорреляционные спектры для выбранной станции или базы в каждом частотном канале, увидеть отсутствие откликов, отклонения в сопровождении сигналов.

Также в 2021 г. было реализовано многофункциональное программное обеспечение *Vision* (Зорин и др., 2021), позволяющее проводить не только визуальный анализ спектральных характеристик, но и изучать фазовые и частотные вариации в течение скана. Добавлена информация об изменении амплитуды корреляционного отклика, стабильности отношения сигнал/шум и т. д. Итогом работы данной программы является сформированный PDF-отчет по сеансу наблюдений.

Главной особенностью вышеописанной работы программ является усреднение данных в течение всего скана (обычно продолжительностью до 2–3 мин). Для внегалактических объектов (таких как квазары) это необходимо, так как на малых интервалах усреднения не удается получить взаимно-корреляционный отклик с достаточным отношением сигнал/шум. В случае РСДБ-наблюдений сигналов КА длительность сканов может достигать 20–30 мин, при этом высокое (по сравнению с квазарами) отношение сигнал/шум позволяет получать корреляционный отклик на секундном интервале усреднения, до 1000 значений амплитуды, фазы и задержки сигнала в течение скана. Однако предварительно известная траектория движения КА может иметь большие ошибки, что приводит к ошибкам наведения антенн и ошибкам предвычисления задержек при корреляционной обработке. В результате может меняться амплитуда корреляционного отклика в течение скана наблюдений, наблюдаться смещение отклика внутри корреляционного окна, изменяться взаимокорреляционный спектр сигнала.

Отдельные дополнительные средства визуализации позволяют оценить изменение корреля-

ционного сигнала в течение скана наблюдений только для одиночного скан-файла. Для последующих скан-файлов приходится перезапускать программу, что делает неудобным просмотр десятков и более сессий, как в случае РСДБ-наблюдений КА.

Для решения задачи визуализации результатов РСДБ-наблюдений КА (в том числе ИСЗ и КА дальнего космоса) разработано ПО. Оно позволяет пользователю отслеживать качество корреляционной обработки (например: расположение спектра относительно несущей частоты, соотношение сигнал/шум, стабильность в течение всего скана спектральных и амплитудных характеристик взаимокорреляционных и автокорреляционных спектров и функций), корректировать режим корреляционной обработки и отбраковывать «плохие» данные. ПО реализовано на языке программирования *Python* и предоставляет пользователю информацию об анализируемой сессии, выводит необходимые графические окна с спектральными характеристиками и удобным интерфейсом для переключения между периодами накопления, по команде формирует отдельный текстовый документ с отобранными по результатам анализа наименованиями файлов данных.

## Основные характеристики ПО

Исходными данными для работы ПО являются файлы с результатами корреляционной обработки РСДБ-наблюдений КА, файл-задание, использовавшийся для запуска корреляционной обработки, и файл постпроцессорного анализа, из которого выбираются только вычисленные значения групповой задержки и точные значения амплитуды взаимокорреляционного отклика.

ПО работает в двух режимах. Первый — визуализация результатов автокорреляционной обработки. Итогом работы ПО для данного типа файла будет графическое окно, в котором отображается название КА, его несущая частота, полное название файла и два графика: на одном графике строится автокорреляционная функция на указанный период накопления, на втором — его изменение в течение скана. Второй режим — визуализация результатов взаимокорреляционной обработки. Итогом работы ПО для этого типа будут два графических окна. В одном окне отображается название КА, его несущая частота, полное название файла и два графика, содержащих взаимокорре-

ляционные спектр и функцию на указанный период накопления. Во втором графическом окне — изменение амплитуды взаимнокорреляционного отклика и изменение взаимнокорреляционных функции и спектра в течение скана.

Дополнительно пользователь может получить краткую информацию об анализируемом файле и при необходимости записать его наименование в создаваемый текстовый файл.

ПО разработано под операционную систему (ОС) *Linux* на языке программирования *Python* и работает как на серверах процессорного кластера коррелятора, так и на персональном компьютере. Для построения графиков и выбора периода накопления использовались библиотеки *Matplotlib* ([Matplotlib](#)) и *Textbox* ([Textbox](#)). Основное взаимодействие пользователя и программы реализовано с помощью библиотеки *cmd2* ([Cmd2](#)).

### Пример работы ПО

Результат работы программы демонстрируется на сессии наблюдений *ru0911*. Наблюдения КА глобальной навигационной спутниковой системы (ГЛОНАСС) проводились с 02.04.2024–09:00:00 по 03.04.2024–06:00:00 в диапазоне L1 с шириной полосы 16 МГц. В наблюдениях участвовали радиотелескопы РТ-32 обсерваторий «Светлое», «Бадарь», «Зеленчукская» входящие в состав РСДБ-комплекса «Квазар-КВО».

В таблице представлен формат вывода справочной информации по запросу пользователя при помощи команды *info* для каждого типа файла по запросу пользователя.

На рис. 1а и рис. 1б представлен результат работы программы для выходного файла коррелятора, содержащего взаимнокорреляционный спектр, а на рис. 1с и 1д — для выходного файла коррелятора, содержащего автокорреляционную функцию.

Как видно из рис. 1а, в графическом окне указана информация о наблюдавшемся спутнике (его короткое название и несущая частота). Далее указывается наименование исполняемого файла и ниже строятся два графика, а именно взаимнокорреляционные спектр и функция на указанный

период накопления. Под графиком имеется возможность выбора необходимого периода накопления (в данном случае выбран нулевой период). На рис. 1б представлено дополнительное графическое окно, которое формируется вместе с окном, представленным на рис. 1а. В нем представлена информация о том, как меняется амплитуда взаимнокорреляционной функции, двумерная визуализация массива взаимнокорреляционной функции и двумерная визуализация массива взаимнокорреляционного спектра.

Если пользователю понадобится исследовать характер изменения принимаемого сигнала на каждой станции, участвующей в наблюдении на выбранном скан файле, то дополнительно имеется возможность визуализации автокорреляционной функции рис. 1с, 1д.

В данном примере, по представленным результатам, видно, что наблюдения прошли успешно. На протяжении всего времени сохранялось сопровождение спутника, что видно по стабильности взаимнокорреляционного спектра относительно своей несущей частоты на рис. 1а. Последующий корреляционный анализ дал положительный результат, о чем свидетельствует стабильность взаимнокорреляционной функции на протяжении всего скана рис. 1а, 1б. В итоге наблюдений данного скана данной базой приемлемо для последующего корреляционного анализа.

Также в процессе визуального анализа сессии *ru0911* данное ПО позволило выявить результаты некорректной обработки данных. Примеры подобных отклонений приведены рис. 2а, рис. 2б.

На рис. 2а, 2б видно, что взаимнокорреляционный спектр имеет дополнительную составляющую на частоте ниже несущей частоты и обладает большей амплитудной составляющей. Из-за этого во взаимнокорреляционной функции появляются два пика, что также отражено на обоих рисунках. Подобное отклонение проявляется как в отдельном периоде накопления, так и в течение всего скана наблюдений. На данный момент причина этого неизвестна и требует дополнительных исследований.

Таблица

Результат работы команды *info*

| Для файла с автокорреляционной функцией |               | Для файла с взаимнокорреляционным спектром |               |
|-----------------------------------------|---------------|--------------------------------------------|---------------|
| Сессия:                                 | ru0911        | Сессия:                                    | ru0911        |
| Год-день-время:                         | 2024-093-1357 | Год-день-время:                            | 2024-093-1357 |
| Станции:                                | bdbd          | Станции:                                   | bdsV          |
| Кол-во каналов:                         | 4             | Кол-во каналов:                            | 4             |
| Точек в спектре:                        | 1024          | Точек в спектре:                           | 1024          |
| Кол-во периодов накопления:             | 296           | Кол-во периодов накопления:                | 296           |

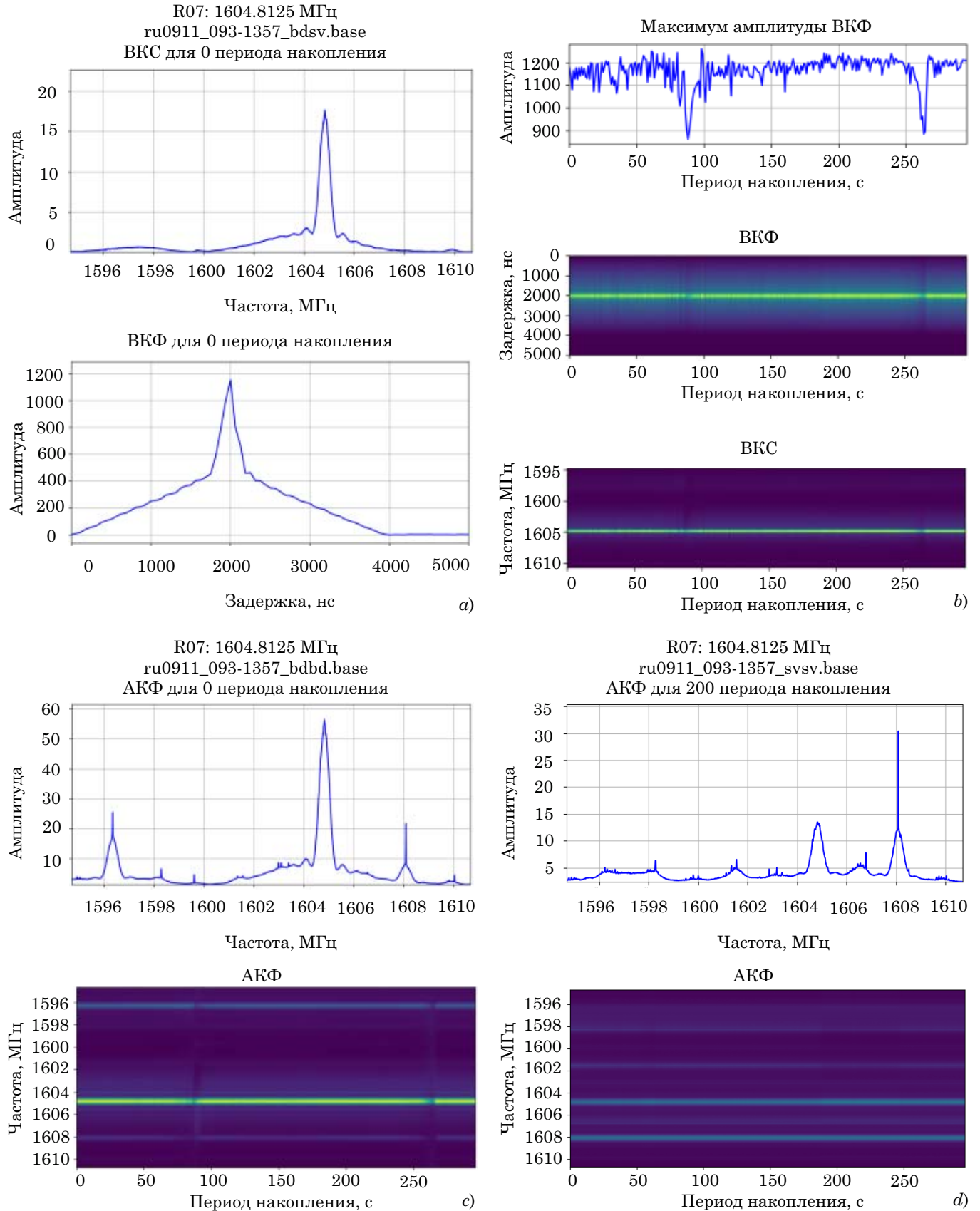


Рис. 1. Результат выполнения команды *plot* с указанием 2-го частотного канала: *a, b* — для исполняемого файла с взаимнокорреляционным спектром, *c, d* — для исполняемого файла с автокорреляционным спектром

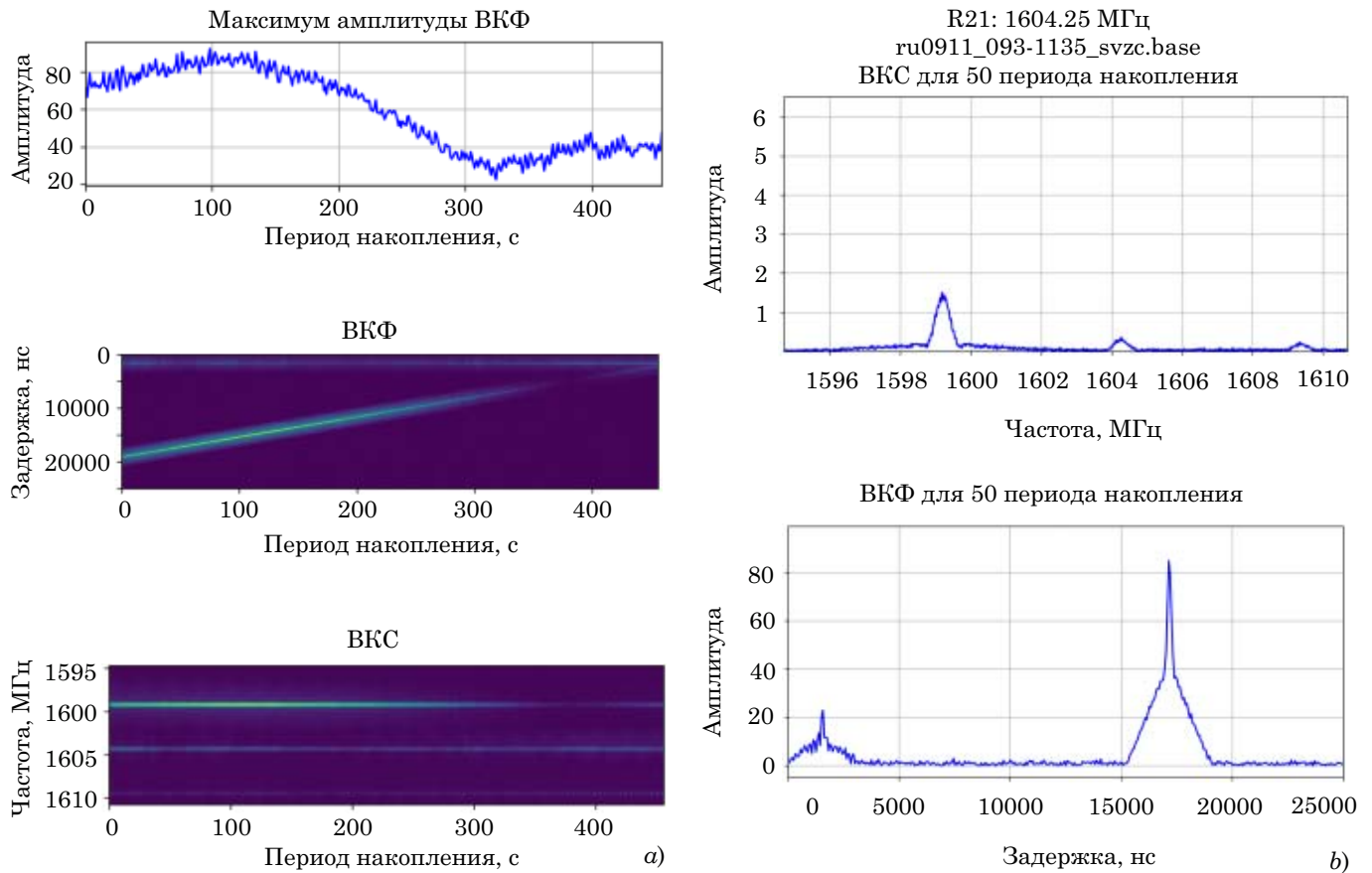


Рис. 2. Отображение результатов работы ПО, полученных в процессе визуального анализа сессии ru0911, с указанием 2-го канала: *a*, *b* — результат визуализации выходного файла коррелятора 093-1135, базы «Светлое» — «Зеленчукская»

## Заключение

Разработано ПО, позволяющее по результатам корреляционной обработки РСДБ-наблюдений сигналов КА на корреляторе *RASFX* предоставлять графически спектральные и временные характеристики для выбранного скана наблюдений по всем периодам накопления с целью коррекции режимов корреляционной обработки и отбраковки «плохих» данных. ПО оттестировано на наблюдениях ИСЗ ГЛОНАСС, но применимо и для КА дальнего космоса.

В дальнейшем планируется развивать и поддерживать разработанное автором ПО.

## Литература

Зорин М. С., Кумейко А. С., Кен В. О. Vision – программное обеспечение для визуализации результатов корреляционной обработки РСДБ-данных // Труды ИПА РАН. 2021. Вып. 58. С. 30–35.

Суркис И. Ф., Зимовский В. Ф., Кен В. и др. Радиointерферометрический коррелятор на графических процессорах // Приборы и техника эксперимента. 2018. № 6. С. 1–9.

Cmd2 [Электронный ресурс]. URL: <https://cmd2.readthedocs.io/en/stable/> (дата обращения: 15.01.2025).

Matplotlib [Электронный ресурс]. URL: <https://matplotlib.org/> (дата обращения: 15.12.2025).

Shuygina N., Ivanov D., Ipatov A., et al. Russian VLBI network “Quasar”: Current status and outlook // Geodesy and Geodynamics. 2019. Vol. 10, Is. 2. P. 150–156.

TextBox [Электронный ресурс]. URL: <https://matplotlib.org/stable/gallery/widgets/textbox.html> (дата обращения: 15.12.2025).