

**РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ им. П.Н. ЛЕБЕДЕВА
АСТРОКОСМИЧЕСКИЙ ЦЕНТР**

На правах рукописи
УДК 520.27+520.872+520.876

Ермаков Алексей Николаевич

Автоматизация обработки юстировочных измерений
и применение ее к мониторингу калибровки
космического телескопа "Спектр – РадиоАстрон"
в диапазонах 6.2, 18 и 92 см в 2015–2018 гг

Специальность:

1.3.1 – физика космоса, астрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 2023

Работа выполнена в Астрокосмическом центре Физического института им. П.Н. Лебедева Российской Академии наук.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
Ковалев Юрий Андреевич

Официальные оппоненты:

Ведущая организация:

Защита состоится «___» _____ 2023 года в _____ на заседании диссертационного совета Д002.023.01 Физического института им. П.Н. Лебедева РАН по адресу: Москва, ул. Профсоюзная 84/32, Институт космических исследований РАН, зал семинаров №707.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физического института им. П.Н. Лебедева РАН по адресу: 119991, Ленинский проспект, дом 53. Автореферат и диссертация в электронном виде представлены на сайтах ФИАН <http://www.lebedev.ru> и <http://www.asc-lebedev.ru> в разделах "Диссертационный совет". Автореферат разослан «___» _____ 2023 года.

Ученый секретарь диссертационного совета

кандидат физ.-мат. наук

Н.Н.Шахворостова

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Основная задача проекта "РадиоАстрон" заключается в проведении уникальных научных экспериментов с космическим радиотелескопом (КРТ) [1]. Уникальность проекта связана с использованием огромной базы наземно–космического интерферометра при наблюдении исследуемых источников [1,2]. База — это расстояние между антеннами, совместное использование которых и образует интерферометр. Максимальный размер базы достигал значений, близких к расстоянию D от Земли до Луны [1]. Это позволяло "разглядеть" на длине волны λ тонкие детали ярких изображений галактик, квазаров и объектов нашей Галактики – с максимальным разрешением λ/D , вплоть до 8 угловых микросекунд дуги в диапазоне 1.35 см [1]. Осуществлять наблюдения любых источников в тандеме «космический радиотелескоп – наземный телескоп» (РСДБ режим) было бы практически невозможно без калибровки КРТ посредством регулярных измерений астрономических калибровочных радиоисточников [1, 3]. Калибровка позволяет устранить зависимость результатов измерений от индивидуальных особенностей приемной системы и привести результаты к общепринятым единицам. Это сохраняет особенности источников излучения и позволяет сравнивать результаты, полученные на разных телескопах.

Калибровочные измерения проводились космическим радиотелескопом в режиме одиночного телескопа, в юстировочных сеансах. Они обеспечивали калибровочными данными оба режима работы КРТ— и режим одиночного телескопа, и режим интерферометра. Калибровка выполнялась в шкалах спектральной плотности потока излучения и антенной температуры [1, 3, 4].

За 7.5 лет работы КРТ в полете в 2011–2019 гг в АКЦ ФИАН поступил большой объем данных измерений (см., например, [5–8] и список публикаций на сайте АКЦ ФИАН [9]). К середине 2018 года

было проведено около 4.5 тысяч сеансов РСДБ–наблюдений и 300 юстировочных (калибровочных) сеансов измерений калибровочных объектов. Их экспресс–обработка различными интерактивными средствами позволяла оперативно калибровать КРТ и решать основные текущие вопросы управления КРТ и сопровождения проекта в течение всего периода полета радиотелескопа [4].

Полная обработка и калибровка таких массовых измерений достаточно трудоемка и требует высокого уровня автоматизации. Однако не все этапы этой работы автоматизированы в полной мере и далеко не весь полученный материал обработан. Ввиду особой важности вопросов, связанных с мониторингом антенных параметров и калибровки телескопа, была поставлена и решена новая задача. Это – задача по автоматизации обработки таких измерений с помощью разработки нового и модернизации прежнего программного обеспечения экспресс–обработки бортовых радиометрических данных. Методика такой обработки и анализа данных – типична и хорошо известна (см., например, [1–4, 9–19]). Характеристики "первичных и вторичных" астрономических калибраторов излучения также известны и широко используются [20–26].

Цель и задачи

Задачи. 1. Разработать алгоритм и программу автоматизированной обработки калибровочных радиоисточников первичной астрономической шкалы спектральной плотности потока излучения. 2. Применить разработанную систему для калибровки космического радиотелескопа в заключительные 4 года его полета в диапазонах длин волн 6.2, 18 и 92 см в двух круговых поляризациях.

Конечная цель: максимально полная автоматизация процесса обработки астрономических калибровочных объектов, измеряемых в юстировочных сеансах. Проведение массовой обработки и калибровки юстировочных сеансов наблюдений с использованием разработанной системы. Получение результатов мониторинга калибровки КРТ за 2015–2018 гг. и анализ ее долговременной стабильности.

Основные результаты, выносимые на защиту

1. Для проекта "РадиоАстрон", в дополнение к прежним, разработаны, оттестированы и внедрены новые программные средства, объединенные в автоматизированную систему обработки юстировочных (калибровочных) сеансов наблюдений с КРТ в полете [A1].

2. Система успешно применена к обработке массовых радиометрических измерений и калибровке КРТ во 2-й половине периода его работы. Обработаны все измерения за 2015–2018 годы двух основных калибраторов первичной астрономической шкалы спектральной плотности потока излучения, – остатков Сверхновых Кассиопеи–А и Крабовидной туманности, в 3-х диапазонах длин волн 6.2, 18 и 92 см для каждой из двух круговых поляризации [A2].

3. Получены результаты 4-летнего мониторинга 30 калибровочных параметров КРТ – по пять параметров в каждом из 6 каналов левой и правой круговых поляризации: 1) эквивалентной спектральной плотности потока излучения собственных шумов КРТ (SEFD, в Янских) и 2) эквивалентной спектральной плотности потока излучения 4-х основных и резервных внутренних калибровочных генераторов шумового сигнала (ГШ, в Янских) [A2].

4. Показана высокая стабильность во времени каждого из 30 эталонных калибровочных параметров КРТ за 4 заключительных года полета – в пределах погрешности измерений в несколько процентов относительно каждого их двух астрономических калибраторов [A2].

5. Обнаружено систематическое отличие средних результатов измерений калибровочных параметров [A2]. Средние результаты по Кассиопее–А на 25–35 % систематически отличаются от аналогичных результатов, полученных по Крабовидной туманности. Это может указывать на целесообразность коррекций стандартной общепринятой шкалы [20], предложенной в 1977 году. Для текущих

РСДБ работ можно рекомендовать применять калибровки, усредненные по Кассиопее-А и Крабовидной туманности, – в стандартной шкале [20] 1977 года или ее коррекциях [21, 23–25].

6. Обнаруженное в [А2] систематическое отличие удалось устранить в [А3] переходом от стандартной общепринятой шкалы потоков 1977 года, основанной на спектре Кассиопеи А как на базовом спектре (Баарс и др., 1977), к двум новым шкалам, основанным на спектре Лебедя А, предложенными Виняйкиным (2014) и Перлеем с Батлером (2017). Примененный алгоритм обнаружения этой систематики привел в [А3] к новой методике поверки относительной точности спектральных плотностей потока излучения астрономических первичных и вторичных калибраторов потока радиоизлучения. Методика применима к большинству наземных и космических радиотелескопов для проверок корректности их амплитудных калибровок и потоков излучения наблюдавшихся астрокалибраторов [А4].

Новизна

1. Впервые разработана и внедрена в текущую плановую обработку наблюдений по проекту "РадиоАстрон" новая система автоматизированной массовой обработки радиометрических данных от бортовых интерферометрических приемников для калибровки КРТ в полете в трех из четырех рабочих диапазонах телескопа.

2. Впервые с использованием разработанной системы проведена массовая обработка всех наблюдений двух первичных астрономических калибраторов – Кассиопея–А и Крабовидная туманность – в двух круговых поляризациях на длинах волн 6.2, 18, и 92см в заключительном 4–летнем периоде работы КРТ (2015–2018 гг.)

3. По этим данным впервые получены результаты долговременного 4–летнего мониторинга калибровок для всех (вторичных) калибровочных эталонов КРТ (эталонов по собственным шумам и по

ГШ) в двух астрономических шкалах (в единицах Янский и Кельвин) в заключительные годы полета КРТ.

4. На основе анализа мониторинга калибровок исследована долговременная стабильность собственных шумов системы КРТ, измеренных в эти 4 года и откалиброванных относительно Кассиопеи–А и Крабовидной туманности. Средние эквивалентные спектральные плотности потока мощности собственных шумов КРТ измеренные относительно Кассиопеи–А в пределах 10–17 % согласуются с опубликованными по ней первыми результатами.

5. Полученные средние значения калибровок указывают на возможность взаимного рассогласования первичной шкалы спектральной плотности потока 1977 года [20], построенной по Кассиопее–А и Крабовидной туманности. Рассогласование может быть связано с изменением скорости векового расширения этих остатков Сверхновых и с другими причинами. Однако калибровки ГШ, усредненные по двум этим калибраторам, практически совпадают в данной шкале [20] и ее коррекциях, опубликованных к 2017г.

6. Предложена новая методика поверки точности астрономических калибраторов спектральной плотности потока их радиоизлучения. В ней обычный генератор шумового сигнала радиотелескопа впервые используется также в качестве индикатора относительной точности самих калибраторов – при некоторых условиях, апробированных на КРТ. Методика может быть полезной при относительных поверках астрономических калибраторов как на космических, так и на наземных радиотелескопах.

Достоверность

В систему обработки заложены две известные стандартные процедуры: метод SVD (Singular Value Decomposition [16]) и взвешенное усреднение [15] – для оценки расчетных коэффициентов аппроксимации при моделировании поведения откликов системы радиотелескопа на собственные шумы, ГШ и источник во времени. Используются алгоритмы и методы, эффективно работающие

многие годы при близкой обработке наблюдений на радиотелескопе РАТАН–600. Проведено успешное тестирование системы путем сравнения ее результатов с данными, полученными с помощью прежних интерактивных средств экспресс–обработки. Сравнение показало согласованность результатов в пределах погрешности измерений. Полученные по Кассиопее–А калиброванные результаты за 4 заключительных года полета КРТ согласуются с опубликованными результатами, полученными другими средствами в первые годы полета во всех 3–х диапазонах длин волн: 6.2, 18 и 92 см. Предложенная методика поверки астрокалибраторов потока использует в качестве индикаторов их точности хорошо известные, широко используемые внутренние генераторы шумового сигнала (ГШ) в радиотелескопах. Получены условия применимости методики к наземным и космическим радиотелескопам, которые апробированы на КРТ в полете.

Научная и практическая значимость

Разработанная система предназначена для автоматической обработки данных от бортовых астрономических приемников при измерениях калибровочных астрономических объектов по потоку излучения в трех диапазонах длин волн 6.2, 18 и 92 см. Она успешно внедрена в плановую работу по проекту "РадиоАстрон" и применена в этих диапазонах для обработки всех измерений с КРТ в 2015–2018 гг относительно 2–х калибраторов первичной астрономической шкалы спектральной плотности потока излучения.

Каждый из 30 параметров при его использовании обеспечивает телескоп "стандартным калибровочным эталоном" для юстировочных измерений основных антенных параметров, а 24 из них — калибровочным эталоном для РСДБ сеансов, в режиме работы КРТ как элемента наземно–космического радиоинтерферометра.

Обнаруженное рассогласование результатов относительно Кассиопеи–А и Крабовидной туманности может стимулировать

новые работы по уточнению физики долговременной эволюции их спектров излучения. Как отмечено в публикации [А3] и примерах раздела 3.3 диссертации, переход от использованной общепринятой стандартной калибровочной астрономической шкалы – *Vaars et al.* (1977) [20] – к альтернативным шкалам [21, 23–25], предложенным для ее коррекций, устраняет обнаруженное отличие.

До полного решения этого вопроса, для практических целей текущей калибровки индивидуальных РСДБ экспериментов с КРТ можно рекомендовать использовать средние по двум значениям ГШ, откалиброванных по Кассиопее–А и Крабовидной туманности. Они различаются для шкал [20] и [21] в пределах 3, 4 и 9 процентов в диапазонах 6.2, 18 и 92 см, соответственно. Или использовать новые калибровки в одной из двух шкал – [20] или [25].

Алгоритм анализа калибровок в Главах 3 и 4 может быть положен в основу методики поверки относительной точности калибровочных источников и шкал спектральной плотности потока радиоизлучения космических и наземных радиотелескопов при указанных условиях.

Разработанную автоматизированную систему можно рекомендовать применить к контролю калибровок КРТ и к аналогичной обработке данных по этим двум калибраторам для первой половины периода полета КРТ – с 2011 по 2014 годы. Система применима также к обработке всех калибровочных объектов, наблюдавшихся с КРТ в 2011–2018 годы (после небольших коррекций в некоторых случаях). Аналогичный подход может быть использован для разработки автоматизированной обработки данных и калибровки КРТ в четвертом рабочем диапазоне телескопа – 1.35 см, а также для работ по проекту "Спектр–Миллиметрон" и другим будущим космическим проектам.

Список публикаций по теме диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в четырех статьях [А1-А4] в ведущих рецензируемых журналах в 2020–2023 гг. из Перечня ВАК, в т.ч.: по Главе 2 в [А1], Главе 3 в [А2], Главе 4 в [А3-А4]:

А1. **А. Н. Ермаков**, Ю. А. Ковалев. Проект "РадиоАстрон". Калибровка космического телескопа в полете – автоматизация обработки измерений // Труды ИПА РАН. 2020. Вып. 54. С. 21–26. <https://doi.org/10.32876/Appl.Astron.54.21–26>

А2. Ю. А. Ковалев, В. И. Васильков, **А. Н. Ермаков**, Е. Н. Виняйкин, М. В. Попов, В. А. Согласнов, М. Г. Ларионов, Н. Я. Николаев, Е.Н. Миронова, М. С. Бургин, Ю.Ю. Ковалев, П. А. Войцик, М. М. Лисаков, А. М. Кутькин, А. В. Алакоз, Н. Н. Шахворостова, К. Г. Белоусов, А. В. Коваленко. Проект "РадиоАстрон". Калибровка космического телескопа в полете в диапазонах 6.2, 18 и 92 см в 2015–2018 гг. // Труды ИПА РАН. 2020. Вып. 54. С. 32–39. <https://doi.org/10.32876/Appl.Astron.54.32–39>

А3. Ю. А. Ковалев, **А. Н. Ермаков**, В. И. Васильков, В. А. Согласнов, М. М. Лисаков, Ю. Ю. Ковалев. Шумы системы и точность первичных калибраторов и шкал плотности потока излучения по данным космического телескопа "РадиоАстрон". // Астрофизический бюллетень, 2022, том 77, № 3, с. 360–368, <https://doi.org/10.1134/S1990341322030087>

А4. Ю.В.Сотникова, Ю.А.Ковалев, **А.Н.Ермаков**, Л. Н. Вольвач, А.Е.Вольвач.

Исследование калибровочных источников на частота 22 и 37 ГГц на РТ-22 КРАО РАН // Астрофизический бюллетень, 2023, том 78, №1, с. 112-123, <https://doi.org/10.1134/S1990341323010091>

Отдельные результаты диссертации с различной степенью подробности обсуждались и частично были опубликованы также в следующих изданиях по материалам конференций В1-В6 в 2021-2022 гг:

В1. Ермаков А.Н. Автоматизация обработки измерений калибровочных радиоисточников в проекте наземно-космического интерферометра "РадиоАстрон" // В сб.: XVIII конференция молодых ученых "Фундаментальные и прикладные космические исследования", тезисы докладов, ред. А.М. Садовский, М.: ИКИ РАН, 2021 (171 с.), с. 9-10.

В2. Ермаков А.Н., Ковалев Ю.А., Васильков В.И. и др. Калибровка космического телескопа "РадиоАстрон" в диапазонах 6.2, 18 и 92 см в 2015–2019 гг. // Там же, с. 8.

В3. Ермаков А.Н., Ковалев Ю.А., Васильков В.И. Автоматизация обработки юстировочных измерений и применение ее к калибровкам космического телескопа "Спектр-РадиоАстрон" в диапазонах 6.2, 18 и 92 см в 2015–2019 гг. // В сб.: 18-я Конференция молодых ученых "Фундаментальные и прикладные космические исследования", под ред. А.М. Садовского, М.: ИКИ РАН, с.31-45, 2021.

В4. А. Н. Ермаков, Ю. А. Ковалев, Ю. Ю. Ковалев, В. А. Соголаснов, В. И. Васильков, М. М. Лисаков, Ю. В. Сотникова, Л. Н. Вольвач, П. Г. Цыбулев. Быстрый способ поверки точных астрономических калибраторов и шкал плотности потока радиоизлучения. // В сб: "Всероссийская радиоастрономическая Конференция Радиотелескопы, аппаратура и методы радиоастрономии (ВРК-2022), тезисы докладов": ИПА РАН, 2022, с.25.

В5. Ermakov A. N., Kovalev Y. A., Vasilkov V., Soglasnov V., Lisakov M., Kovalev Y. Y. A new Method for Verification of Astronomical Spectral Flux Density Calibrators based on SRT Data. // Publication in: "The Multifaceted Universe: Theory and Observations - 2022", 23-27 May 2022, SAO RAS, Nizhny Arkhyz, Russia; published in "Publications of Sciences" (PoS) on December 14, 2022. Online at <https://pos.sissa.it/cgi-bin/reader/conf.cgi?confid=425>

В6. Kovalev Yu. A., Vasil'kov V., Ermakov A., Vinyaikin E., Lisakov M., Popov M., Soglasnov V., Larionov M., Nikolaev N., Mironova E., Burgin M., Kovalev Yu. Yu., Voitsik P., Kutjkin A., Alakoz A., Shakhvorostova N., Belousov K., Kovalenko A., Nizhelsky N., Zhekanis G.. "RadioAstron" project: calibration of the space radio telescope in

flight in 2011-2019 // In: "Astronomy at the Epoch of Multimessenger Studies, Proceedings of the VAK-2021 conference, held 23-28 August, 2021 in Moscow".ed. Cherepashchuk V.M. et al., pp.59-60, 2022.
DOI:10.51194/VAK2021.2022.1.1.011

Апробация

Основные результаты докладывались и обсуждались автором или с его участием на следующих семинарах и конференциях в 2020–2022 гг.:

1. Сообщения диссертанта по разработанной системе обработке наблюдений и результатам ее применения — на планерке по проекту "РадиоАстрон" (июнь – 2020), на семинарах и заседаниях ученого совета Астрокосмического центра ФИАН (2020–2021).

2. Два устных доклада диссертанта на «XVIII конференции молодых ученых, посвященной дню космонавтики: фундаментальные и прикладные космические исследования» (Институт космических исследований РАН, апрель-2021, см. также выше публикации тезисов по ним [B1, B2] и статьи в "Трудах КМУ", ИКИ РАН, 2021 [B3]).

3. Устный совместный доклад на Всероссийской астрономической конференции ВАК-2021 (ГАИШ, МГУ, август 2021). "Проект "РадиоАстрон". Калибровка КРТ в полете в 2011–2019г" – публ.в [B6].

4-6. Три постерных доклада на следующих конференциях 2022г.:

– на Всероссийской научной конференции «Многоликая Вселенная: теория и наблюдения - 2022», посвященная 90-летию Ю.Н. Парийского. (САО РАН, п. Нижний Архыз, 23-27 мая 2022 г.) «Новая методика поверки астрономических калибраторов по потоку по данным КРТ» – опубликован в [B5];

– на Конференции, посвященной 90-летию Николая Семеновича Кардашева «Вселенная: от большого взрыва до наших дней».

(АКЦ ФИАН, Москва, 25-26 апреля 2022г.). «Проверка точности плотностей потока излучения первичных калибраторов в трех шкалах в диапазонах 6, 18 и 92 см по данным космического телескопа «Спектр-РадиоАстрон» в 2015-2019 гг.»;

– на Всероссийской Радиоастрономической Конференции ВРК-2022 (ИПА РАН, Санкт-Петербург, сентябрь-2022): "Быстрый способ проверки точных астрономических калибраторов и шкал плотности потока радиоизлучения" – опубликован в [В4].

Личный вклад

Все основные результаты получены в соавторстве. Вклады при работе над системой обработки распределились следующим образом.

Первый программный блок-системы (публикация [А1]) производит первичную обработку данных из телеметрического «tmi» файла заданной бинарной структуры. Результат соавтора.

Ключевой второй программный блок [А1] выделяет данные из соответствующих столбцов текстовой таблицы, поступающей от первого блока, и с помощью моделирования записи сеанса обрабатывает параметры телескопа: уровни собственных шумов системы, радиометрических откликов калибровочных источников и внутренних калибровочных генераторов шума (ГШ). Полностью разработка диссертанта.

Третий программный блок [А1] производит дальнейшую обработку и финальный расчет калибровки по данному сеансу. Разработка диссертанта совместно с соавтором (равный вклад).

Во второй публикации [А2] все наблюдения калибраторов были проведены соавторами, а основная часть обработки и калибровки результатов по ГШ и шумам системы КРТ с применением новой автоматизированной системы выполнена диссертантом.

В третьей публикации [А3] вся расчетная часть выполнена, в основном, диссертантом, а анализ – совместно с соавторами. В

четвертой публикации [А4] диссертант участвовал в детальном обсуждении методики поверки калибраторов [А3] в приложении к наземным полноповоротным радиотелескопам типа РТ-22 (совместный результат).

Диссертант принимал также активное участие на всех этапах анализа и обсуждения результатов, написания и редактирования статей. Таким образом, личный вклад диссертанта в представленные результаты обработки и анализа данных можно оценить как основной в обработке и равный с соавторами в анализе данных.

Структура и объем диссертации

Диссертация содержит 150 страниц текста, включая 79 рисунков на 59 страницах, 17 таблиц на 10 страницах и библиографию из 77 наименований на 7 страницах. Состоит из Введения, четырех Глав, Заключения, двух Приложений и списка цитируемой Литературы.

Содержание работы

Во **Введении** обоснована актуальность темы диссертации. Приведены основные результаты, выносимые на защиту. Отмечены новизна результатов и их апробация. Показана научная и практическая значимость результатов и личный вклад автора в проведенные исследования. Дано краткое содержание диссертации и список опубликованных работ с основными полученными результатами.

В Главе 1 по литературе кратко рассмотрены основные особенности космического радиотелескопа (КРТ) и научные задачи проекта "РадиоАстрон", обоснованы важность и место рассмотренной в диссертации задачи калибровки среди других задач проекта,

выполнено сравнение с другими системами обработки, с проектом VSOP, сформулированы цель и задачи работы.

В Главе 2 описана разработанная система программных средств для обработки наблюдений, выполненных с КРТ в юстировочных (калибровочных) сеансах. Система состоит из 3-х ключевых программ. Рассмотрим каждую из них подробнее.

Программа №1 выполняет первичную обработку телеметрических данных. Написана на языке C в операционной системе LINUX с использованием известного программного пакета GNUPLOT. Программа обрабатывает бинарные файлы с телеметрической информацией в 512 каналах в форматах, соответствующих 7 из 16 Программ Формирования Кадров НПО им. С.А.Лавочкина. Данные собраны штатной бортовой телеметрической системой космического аппарата "Спектр-Р" (ТМС КРТ). Программа №1 состоит из двух относительно самостоятельных программных блоков, объединенных командным файлом.

Первый программный блок производит первичную обработку данных из телеметрического tmi-файла заданной бинарной структуры. Второй программный блок – средства многоканальной автоматической визуализации текстовых табличных данных фактически представляет собой "Электронный эмулятор самописца", для визуального экспресс-контроля параметров при необходимости.

Программа №2 предназначена для автоматической обработки радиометрических откликов, написана на языке программирования **Python** с использованием подпрограммы, написанной на **Fortran**, вычислительная библиотека «SVD» – из Форсайта и др. [16].

Задача программы №2 – взять необходимые данные из файла-таблицы формата «.tmi» (выходные данные программы №1) и обработать последовательно наблюдения по каждому диапазону длин волн (6, 18, 92см). Заключительный этап работы программы №2 – записать полученные результаты обработки наблюдения (в ед. Вольт) в файл заданной структуры.

Условно работу программы №2 можно разделить на 4 этапа:

1. Выделение необходимого наблюдения из текстового файла «.tmi». В файле содержатся наблюдения на длинах волн 6, 18, 92 см

2. Очистка наблюдения от «зашумления» в некоторых цифровых каналах.

3. Измерение откликов на шумы системы, источника и Генератора Шума (ГШ) посредством модельной аппроксимации.

4. Запись результатов обработки в файл заданной структуры. Обсудим этапы и задачи, которые решает программный комплекс.

Этап 1 программы №2. Выделение наблюдения. На вход Программы №2 подается файл с расширением “.tmi” из Программы №1. Файл представляет из себя таблицу, где каждый столбец — это значения во времени для определенного датчика бортового комплекса аппаратуры (БКНА). Всего в таблице 130 столбцов. Наблюдение источника может проводиться в 3-х диапазонах длин волн 6, 18, 92 см почти в их любых сочетаниях. Задача этапа – из файла-таблицы достать наблюдения и выделить непосредственно само наблюдение, поскольку оно занимает 20% из всего файла. На **рис. 1** – пример необрезанного наблюдения, записанного телеметрической системой по радиометрическому выходу приемника на 92 см.

Этап 2 программы №2. Очистка от «зашумления». Результат выделения наблюдения представлен на **рис. 2**. Зашумленность наблюдения обусловлена особенностью работы телеметрической системы (когда в некоторых сеансах выбираемая этой системой скорость опроса датчиков оказывалась слишком близкой к предельной скорости преобразования АЦП приемника на цифровом выходе [1]). Первостепенная задача этапа – очистить наблюдение от шумовых точек. Но присутствуют и резкие провалы сигнала в ноль. Необходимо удалить их и соединить оборванные участки. Все перечисленные проблемы затрудняют обработку и определение параметров. Этап – крайне важен. Его результат см. на **рис. 3а**.

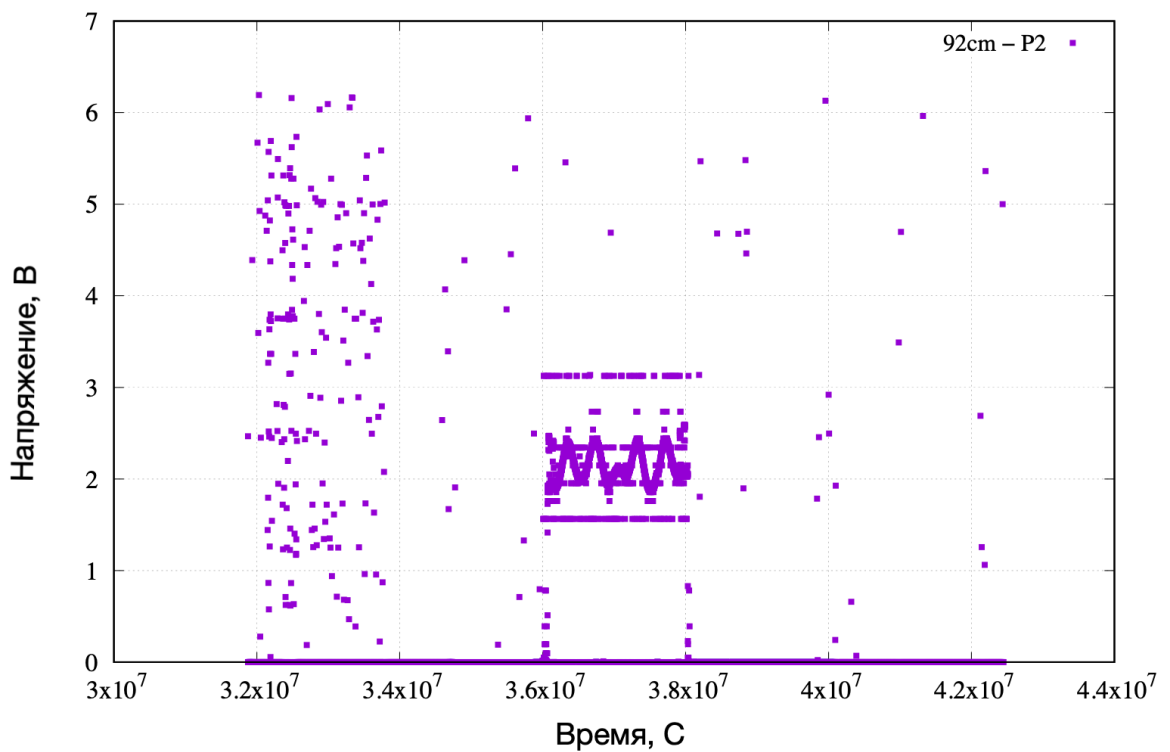


Рис 1. Зависимость выходного сигнала от времени. "Сырое, неочищенное» наблюдение на длине волны 92см. Результат диссертанта из [А1].

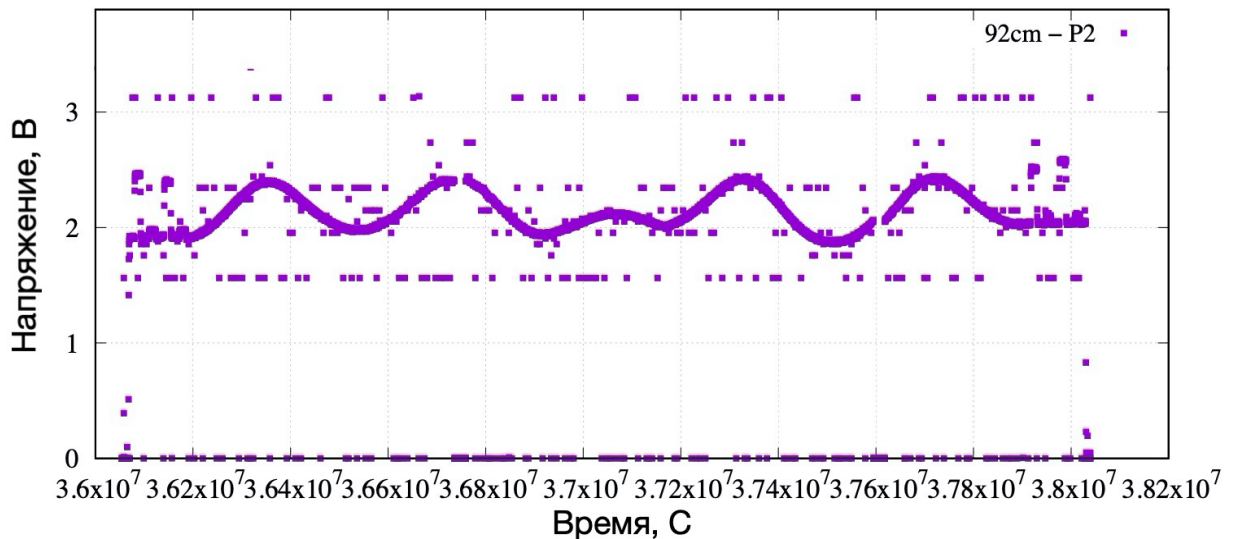


Рис 2. Пример "зашумленной" записи телеметрических данных на длине волны 92см. Результат диссертанта из работы [А1].

Этап 3 программы №2. Аппроксимация откликов и вычисление параметров. Этап заключается в определении следующих параметров (рис. 3b):

1. Отклики на калибровочный источник (U_{cal}). Отклик имеет вид гауссовой функции. Необходимо определить амплитуду каждого из четырех откликов и погрешность выделения отклика.

2. Отклики на шумы при включении ГШ. Откликов на генератор шума существует два типа: с высокой (U_{nsh}) и низкой (U_{nsl}) амплитудами. Необходимо определить амплитуду каждого включения генератора шума. Всего в каждом наблюдении 8 откликов: 4 в начале и 4 в конце сеанса.

3. Отклики на уровень шума системы (U_{sys}). Под каждым откликом на шумы и источник для 3-х диапазонов длин волн (6, 18, 92см) замеряется амплитуда до базиса отклика источника. Базисом считается линия, проведенная от начала отклика до его конца.

Необходимые параметры легко вычисляются после аппроксимации записи сеанса модельной кривой экспериментальных данных. Экспериментальные данные в нашем случае – реальное наблюдение. Пример результата аппроксимации наблюдения модельными кривыми представлен на **рис. 4**:

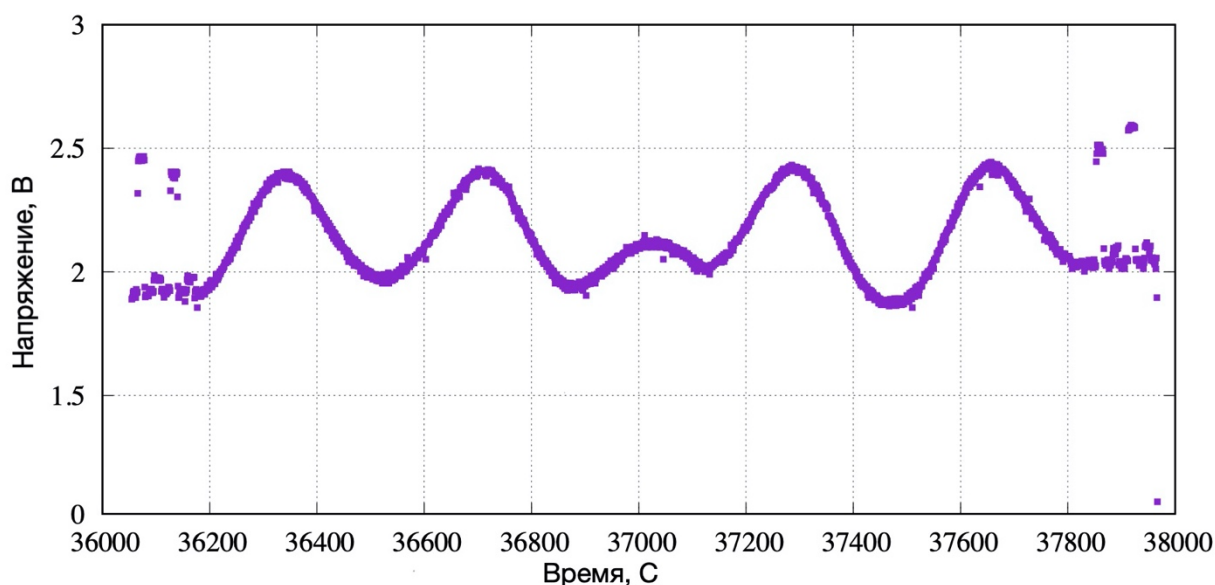


Рис 3а. "Очищенное" наблюдение, длина волны 92см. Результат диссертанта из работы [А1].

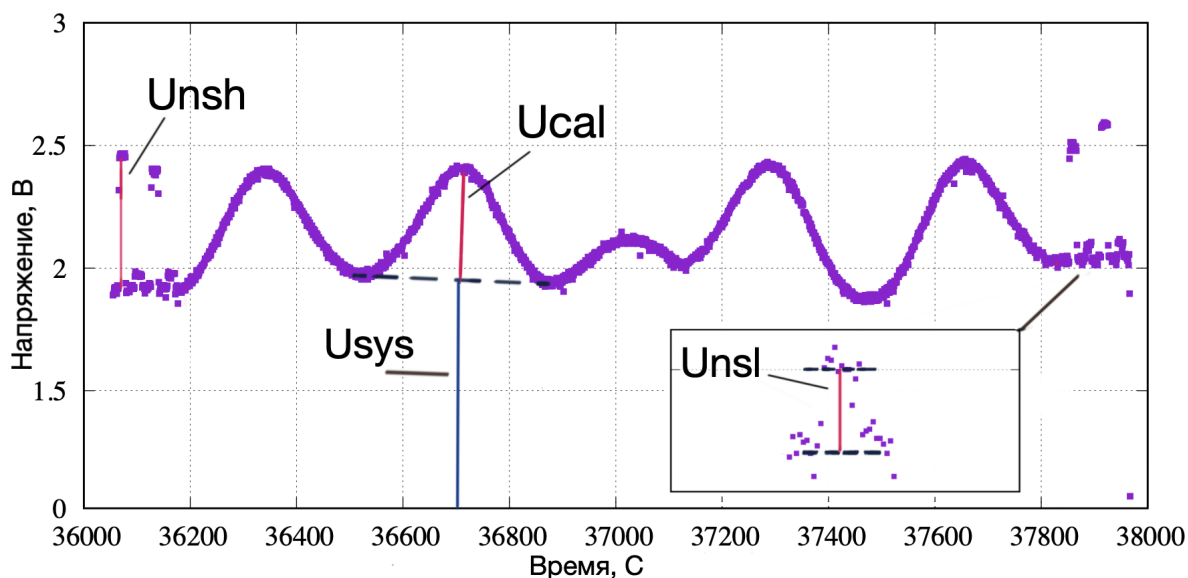


Рис 3в. Параметры, которые необходимо найти программным путём. Пример для наблюдения на длине волны 92см. Результат диссертанта, на защиту не выносится. Приведен для пояснения текста диссертации.

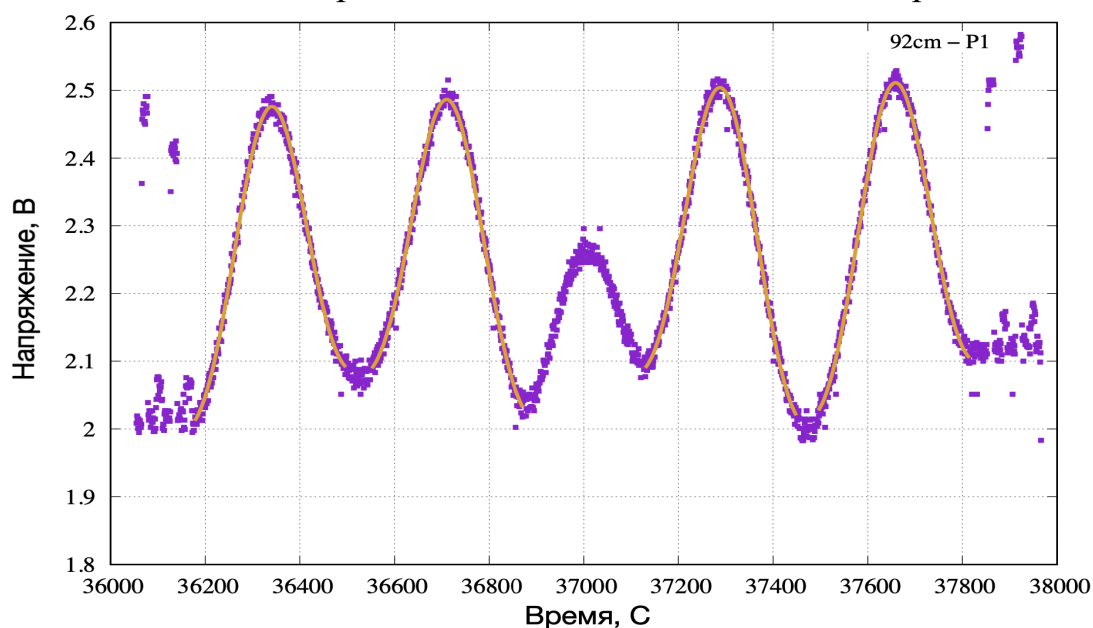


Рис 4. Результат модельной аппроксимации (линии) измерений (точки) и отбора наилучших моделей. Пример наблюдения в диапазоне 92см. Результат диссертанта, на защиту не выносится, – поясняет текст диссертации.

Этап 4 программы №2. Запись в результирующий файл. После обработки откликов необходимо записать полученные данные для каждого диапазона каждого поляризационного канала в выходной файл в табличном виде специально заданной структуры (пример фрагмента файла приведен в Приложении 2).

Весь описанный сценарий обработки наблюдения, состоящий из 4 этапов, – только одна итерация работы программы. Наблюдение ведется в двух каналах поляризации на каждой длине волны (6, 18, 92 см) – итого в программе 6 итераций.

Программа №3 написана на языке C в операционной системе LINUX. Содержит набор таблиц с "паспортными" значениями величин для калибровочных источников. Файл поступает от **Программы №2** в виде текстовых строк с результатами обработки измерений в Вольтах, а на выходе **Программы №3** к ним добавляются аналогичные строки с откалиброванными значениями измерений уровней ГШ и шумов системы – откалиброванными в единицах потока (Янский) и антенной температуры (градусы К).

В Главе 3 представлены основные результаты применения системы, описанной в **Главе 2**. Обработаны и откалиброваны все данные, полученные по измерениям первичных калибраторов Кассиопеи–А и Крабовидной туманности, выполненным в юстировочных сеансах наблюдений в диапазонах 6.2, 18 и 92 см в течение 4–х заключительных лет работы КРТ — с 2015 г. по 2018 г. Результаты суммированы на рис. 5–12. Они содержат данные мониторинга во времени для значений амплитуд внутренних калибровочных генераторов шумового сигнала (по четыре ГШ в каждом поляризационном канале каждого диапазона) и собственных шумов системы КРТ (по одному уровню в каждом поляризационном канале каждого диапазона). Результаты откалиброваны в единицах эквивалентной спектральной плотности потока излучения (Ян).

Для удобства и наглядности на всех рисунках и в таблицах эти данные представлены в эквивалентной антенной температуре (К), приведенной ко входу телескопа, предполагая аналогично [3], что эффективная площадь КРТ постоянна и в каждом диапазоне равна значениям, измеренным в первые годы его полета [1, 3].

Анализ рис. 5–10 показывает, что с погрешностью измерений в несколько процентов все исследованные калибровочные ГШ были стабильны в диапазонах 6.2, 18 и 92 см в течение 4–х лет с 2015 г. по 2018 г. Из рис. 11–12 следует, что в этот период с

погрешностью в несколько процентов были стабильны и эквивалентные собственные шумы системы КРТ в этих диапазонах.

Сравнение собственных шумов системы КРТ, измеренных относительно первичного калибратора Кассиопеи–А, в 2015–2018 гг. на рис. 11а и 12а и по Кассиопее–А в первые годы измерений в 2011–2013 гг. [1] показывает их согласие — в пределах 11 % в диапазонах 6.2 и 92 см, и в пределах 17 % в диапазоне 18 см.

Выполнено сравнение всех калибровок, проведенных относительно Кассиопеи–А с калибровками относительно Крабовидной туманности. Обнаружена рассогласованность калибровочных шкал, которая может быть практически устранена, если использовать усредненные калибровки по этим двум источникам. Для текущих РСДБ работ с КРТ можно рекомендовать использовать усредненные калибровочные значения от измеренных по Кассиопее–А и Крабовидной туманности.

В Главе 4 рассогласованность калибровок устраняется переходом от общепринятой шкалы потоков 1977 года, основанной на первичном спектре излучения Кассиопеи А, к двум новым шкалам – 2014 и 2017 гг. – на основе спектра излучения Лебедя А (см. [А3-А4]). В результате перехода к другой шкале потоков новые значения калибровок относительно CasA и Crab становятся ближе друг к другу для одного и того же кода ГШ и длины волны. Это достигается за счёт скорректированной спектральной плотности потока F_{cal} для CasA и Crab в шкалах PB17 и V14. Следовательно значения F_{NS} измеренные относительно калибраторов должны совпадать друг с другом в пределах ошибок измерений. Данный вывод следует из постоянства антенной температуры ($T_{ns} = P_{ns} / 2kV = const$), мощности ГШ ($P_{ns} = const$) и полосы частот приемника ($V = const$). И наоборот постоянство F_{ns} также влечет постоянство T_{ns} и A_{eff} . Но условие постоянства эффективной спектральной плотности потока ГШ ($F_{ns} = const$) нарушается, если для калибровки использовать источник с переменным (неточным) потоком F_{cal} или вследствие изменчивости антенной температуры Генератора Шума или эффективной площади Антенны (A_{eff}).

При устранении обнаруженного эффекта несоответствия калибровок при их непосредственном сравнении в общепринятой шкале 1977 года в Главе 4 диссертации сформулирована и применена новая методика поверки калибраторов и шкал спектральной плотности потока. Основные результаты Главы 4 опубликованы в статье [A3], а применение методики для относительной поверки астрономических калибраторов в наземных телескопах суммировано в разделе 5 статьи [A4].

В Заключение сформулированы основные результаты работы.

В Приложения 1 и 2 вынесен вспомогательный материал:

- 1) краткое описание работы с системой обработки измерений;
- 2) примеры фрагментов файлов с результатами обработки и "паспортными данными" первичных астрономических калибраторов.

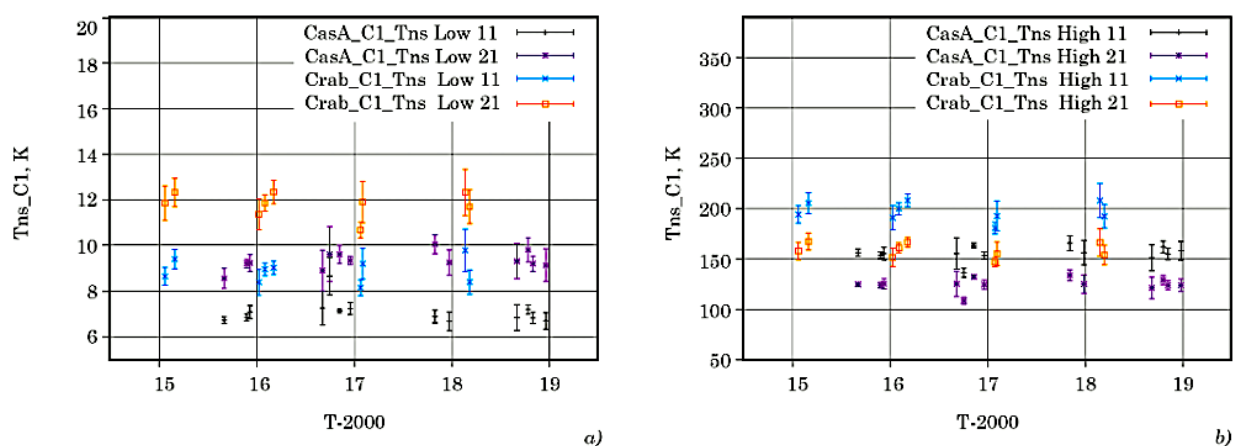
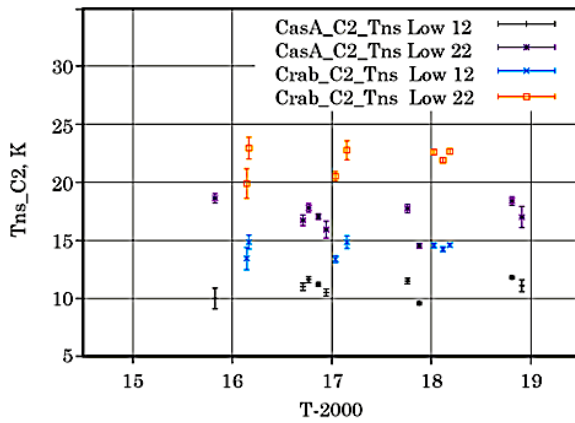
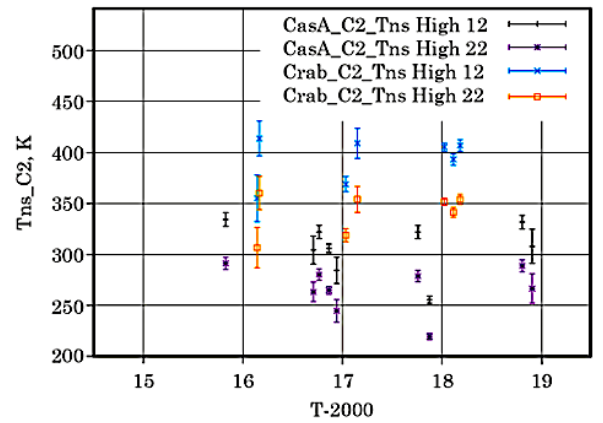


Рис. 5. Диапазон 6.2 см, поляризационный канал 1 (код канала C1). Антенная температура T_{ns} четырех калибровочных генераторов шума из каналов 1 и 2 (L1, L2 и H1, H2) по измерениям относительно Кассиопеи–А и Краба в 2015–2018 гг.: *a* — Low (ГШ с низкими уровнями шума), *b* — High (ГШ с высокими уровнями шума). Цифровые коды каналов: первая цифра после кода Low / High обозначает номер канала (1 или 2), в котором расположен данный ГШ, вторая — номер канала (1 или 2), куда по кабелю подается сигнал от этого ГШ. Каждый ГШ обслуживает оба канала. Совместный результат диссертанта из работы [A2].

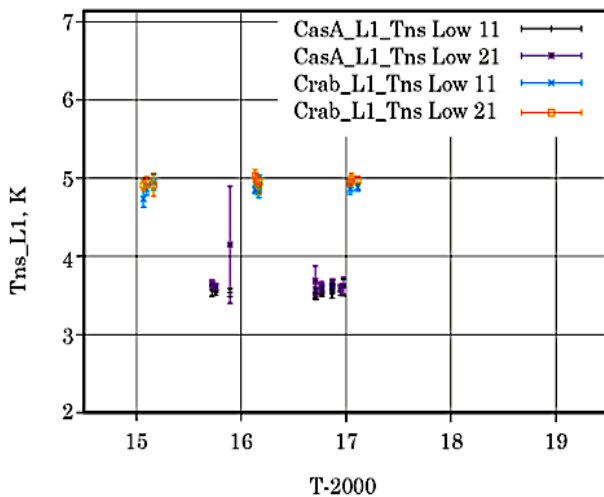


a)

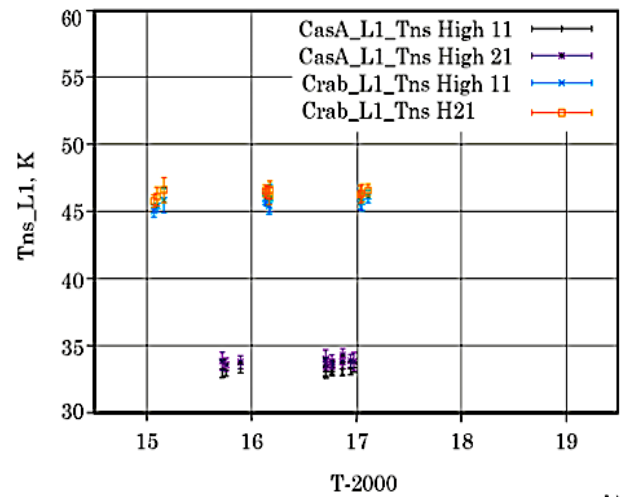


b)

Рис. 6. Диапазон 6.2 см, поляризационный канал 2 (код канала C2). Антенная температура T_{ns} четырех калибровочных генераторов шума из каналов 1 и 2 (L1, L2 и H1, H2) по измерениям относительно Кассиопеи–А и Краба в 2015–2018 гг.: *a* — Low (ГШ с низкими уровнями шума), *b* — High (ГШ с высокими уровнями шума). Совместный результат диссертанта из работы [A2]

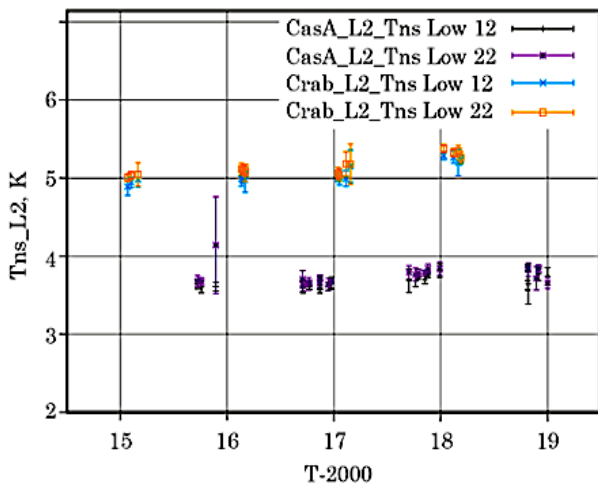


a)

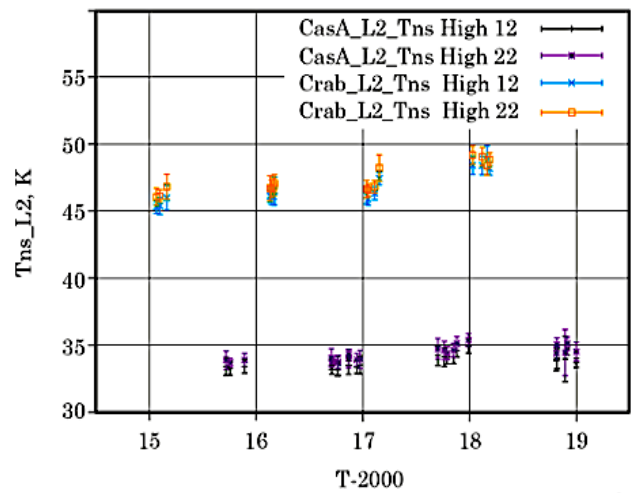


b)

Рис. 7. Диапазон 18 см, поляризационный канал 1 (код канала L1). Антенная температура T_{ns} четырех калибровочных генераторов шума из каналов 1 и 2 (L1, L2 и H1, H2) по измерениям относительно Кассиопеи–А и Краба в 2015–2018 гг. в диапазоне 18 см, в поляризационном канале 1 (код канала L1): *a*) Low — ГШ с низкими уровнями шума, *b*) High — ГШ с высокими уровнями шума. Совместный результат диссертанта из работы [A2].

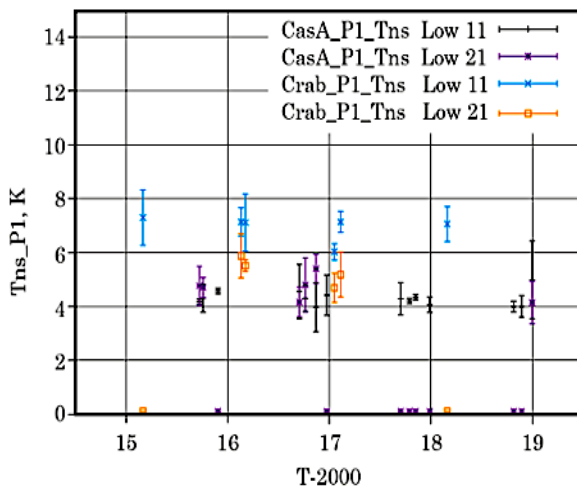


a)

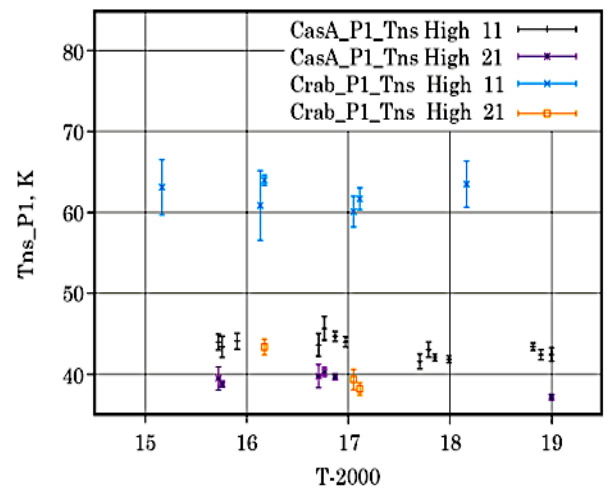


b)

Рис. 8. Диапазон 18 см, поляризационный канал 2 (код канала L2). Антенная температура T_{ns} четырех калибровочных генераторов шума из каналов 1 и 2 (L1, L2 и H1, H2) по измерениям относительно Кассиопеи–А и Краба в 2015–2018 гг.: a) Low — ГШ с низкими уровнями шума, b) High — ГШ с высокими уровнями шума. Совместный результат диссертанта из работы [A2].



a)



b)

Рис. 9. Диапазон 92 см, поляризационный канал 1 (код канала P1). Антенная температура T_{ns} четырех калибровочных генераторов шума из каналов 1 и 2 (L1, L2 и H1, H2) по измерениям относительно Кассиопеи–А и Краба в 2015–2018 гг.: a) Low — ГШ с низкими уровнями шума, b) High — ГШ с высокими уровнями шума. Совместный результат диссертанта из работы [A2].

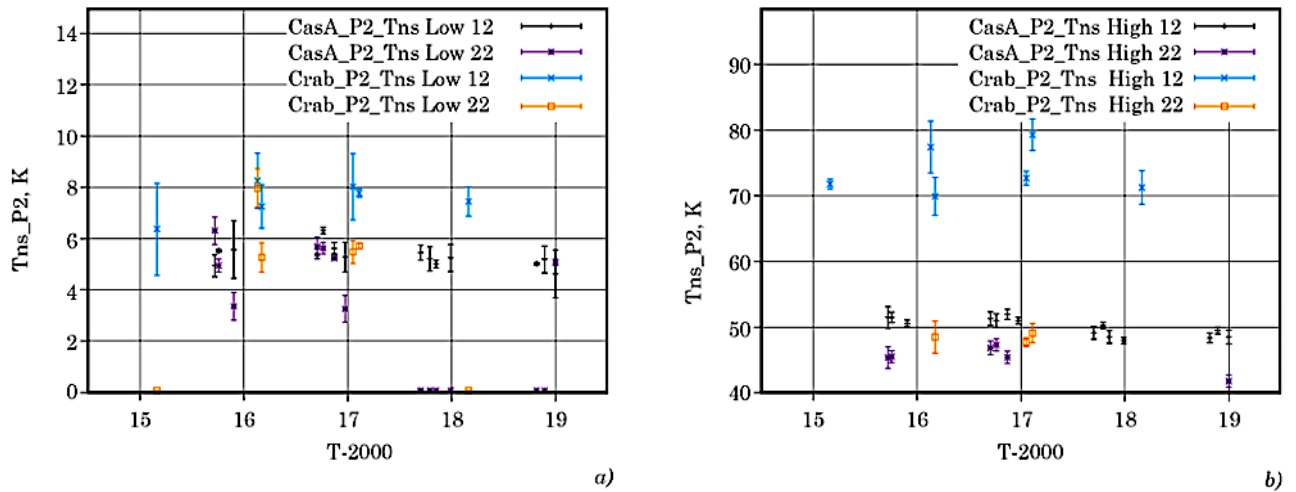


Рис. 10. Диапазон 92 см, поляризационный канал 2 (код канала P2). Антенная температура T_{ns} четырех калибровочных генераторов шума из каналов 1 и 2 (L1, L2 и H1, H2) по измерениям относительно Кассиопеи–А и Краба в 2015–2018 гг.: *a* — Low (ГШ с низкими уровнями шума) и *b* — High (ГШ с высокими уровнями шума). Совместный результат диссертанта из работы [A2].

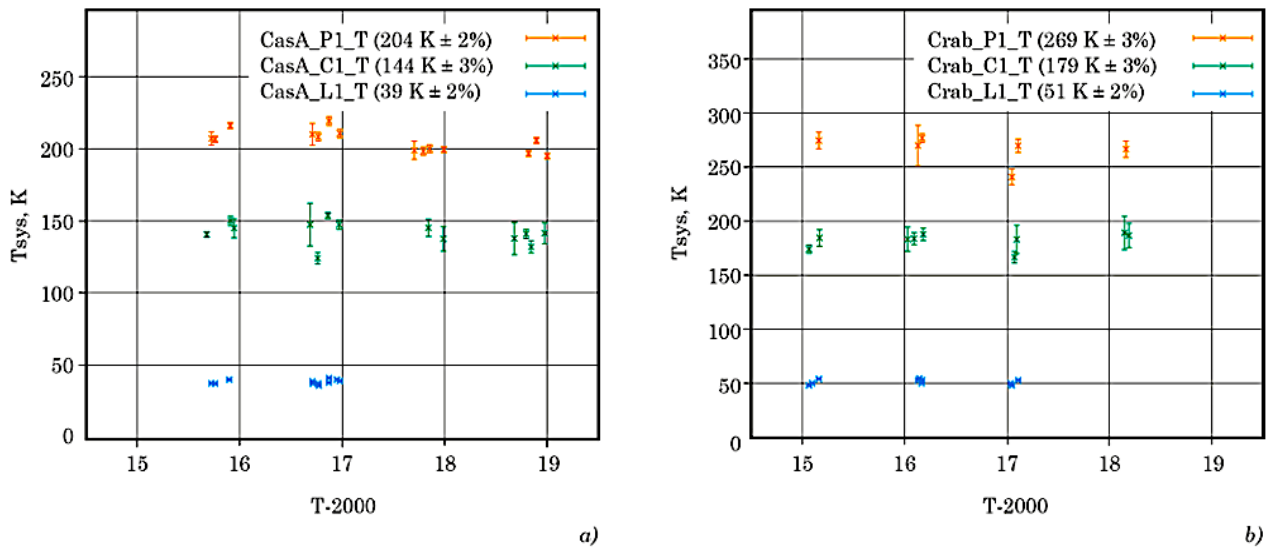


Рис. 11. Диапазоны 6.2 (C1), 18 (L1) и 92 (P1) см в канале 1 (левая круговая поляризация). Эквивалентная шумовая температура системы КРТ, измеренная относительно первичных астрономических калибраторов по потоку *a*) Кассиопеи–А и *b*) Крабовидной туманности в 2015–2018 гг. В скобках приведены средние значения этих температур. Шумы Галактики не исключены. Данные в канале L1 с марта 2017 г. отсутствуют — канал вышел из строя из-за предполагаемого влияния космических лучей на электрические параметры малошумящего усилителя, вынесенного в открытый космос. Совместный результат диссертанта из работы [A2].

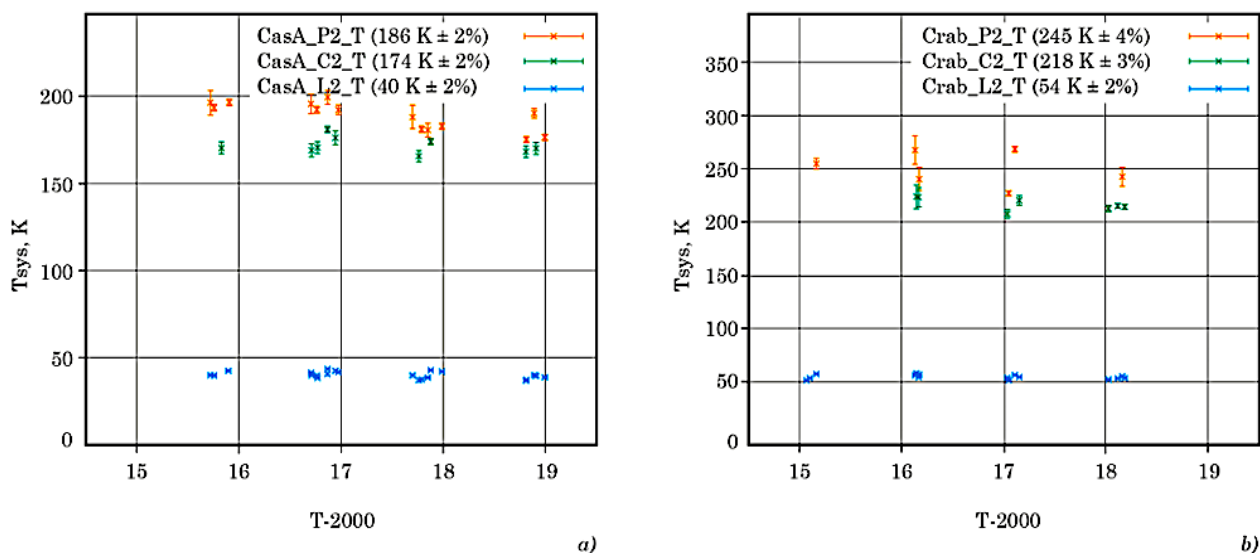


Рис. 12. Диапазоны 6.2 (C2), 18 (L2) и 92 (P2) см в канале 2 (правая круговая поляризация), Эквивалентная шумовая температура системы КРТ, измеренная относительно первичных астрономических калибраторов по потоку: *a)* Кассиопеи–А и *b)* Крабовидной туманности в 2015–2018 гг. В скобках приведены средние значения этих температур. Шумы Галактики не исключены. Совместный результат диссертанта из работы [A2].

Цитируемая литература

1. Кардашев Н.С., Хартов В.В., Абрамов В.В. и др. "РадиоАстрон" — телескоп размером 300 000 км: Основные параметры и первые результаты наблюдений // Астрон. журн. — 2013. — Т. 90, № 3. — С. 179–222.
2. Матвеев Л.И., Кардашев Н.С. и Шоломицкий Г.Б. О радиоинтерферометре с большой базой // Радиофизика — 1965 — Т.8, №4, — С.651.
3. Ковалев Ю.А., Васильков В.И., Попов М.В. и др. Проект "РадиоАстрон". Измерения и анализ основных параметров космического телескопа в полете в 2011–2013 гг // Косм. иссл. — 2014 — Т. 52, вып. 5 — С. 393–402
4. Кардашев Н.С., Белоусов К.Г., Бирюков А.В., и др. Технические решения и практика эксплуатации приборного комплекса космического телескопа наземно–космического

- радиоинтерферометра "РадиоАстрон".// Труды ИПА РАН - 2018 - Вып. 47 — С. 31–37.
5. Kovalev, Y. Y., Kardashev, N. S., Sokolovsky, K. V., et al. Detection statistics of the RadioAstron AGN survey // *Advances in Space Research* — 2020 — Т. 65 — С. 705
 6. Gomez, J. L., Lobanov, A. P., Bruni, G., et al. Probing the Innermost Regions of AGN Jets and Their Magnetic Fields with RadioAstron. I. Imaging BL Lacertae at 21 Microarcsecond Resolution // *Astrophysical Journal* — 2016 — Т. 817 — С. 96
 7. Popov, M. V., Bartel, N., Burgin, M. S., Gwinn, C. R., Smirnova, T. V., & Soglasnov, V. A. Substructure of visibility functions from scattered radio emission of pulsars through space VLBI. // *Astrophysical Journal* — 2020 — Т. 888 — С. 57
 8. Кардашев, Н. С., Алакоз, А. В., Андрианов, А. С., и др. Радио Астрон: итоги выполнения научной программы исследований за 5 лет полета//Вестник НПО им.С.А.Лавочкина 2016 №3. С.4
 9. Астрокосмический центр Физического ин-та им. П.Н.Лебедева РАН, <http://www.asc.rssi.ru/radioastron/publ.html>
 10. Ковалев Ю.А., Сотникова Ю.В., Эркенов А.К., и др. Особенности калибровки космического радиотелескопа "РадиоАстрон" и радиотелескопа РАТАН-600 // Труды ИПА РАН —2018 — вып..47— С. 38-42.
 11. Кузьмин А.Д., Саломонович А.Е. Радиоастрономические методы измерения параметров антенн — М.: Сов.радио, 1964.
 12. Есепкина Н.А., Корольков Д.В., Парийский Ю.Н. Радиотелескопы и радиометры. — М.: Наука, 1973. — 416 с.
 13. Краус Дж.Д. Радиоастрономия, пер. с англ. под ред. Железнякова В.В. — М.: Сов.радио, 1973. — 456 с.
 14. Конникова В.К., Лехт Е.Е., Силантьев Н.А. Практическая радиоастрономия, — М.: Изд-во МГУ. — 304 с.
 15. Агемян Т. А. Основы теории ошибок для астрономов и физиков. — М.: Наука, 1972. — 172 с.
 16. Форсайт Дж., Малькольм М., Моулер К. Машинные методы

- математических вычислений. — М.: Мир, 1980. — 280 с.
17. Верходанов О.В. Кандидатская диссертация. Санкт-Петербург, СПб Филиал Спец.астрофиз.обсерв. РАН, 1993
 18. Kovalev Y. Y., Nizhelsky N. A., Kovalev Y. A., et al. Survey of Instantaneous 1–22 GHz Spectra of 550 Compact Extragalactic Objects with Declinations from -30 to +43 Degrees // *Astron. Astrophys. Suppl.* — 1999. — Vol. 139, no 1. — P. 545–554
 19. Удовицкий Р.Ю., Сотникова Ю.В., Мингалиев М.Г., и др. Автоматизированная система обработки наблюдательных данных на радиотелескопе РАТАН-600. *Астрофиз. Бюлл.* — 2016 — Т.71 — С. 532-542.
 20. Baars J. W. M., Genzel R., Pauliny-Toth I. K. K., Witzel A. The Absolute Spectrum of Cas A; An Accurate Flux Density Scale and a Set of Secondary Calibrators // *Astron. Astrophys.* — 1977 — Vol. 61, no 1. — P. 99-106.
 21. Perley R. A., Butler B. J. An Accurate Flux Density Scale from 50 MHz to 50 GHz // *Astrophys. J. Suppl.* — 2017. — Vol. 230, no 7. — 18 pp.
 22. Patridge B., Lorez-Caniego M., Perley R. A., et al. Absolute Calibration of the Radio Astronomy Flux Density Scale at 22 to 43 GHz Using Planck. // *Astrophys. J.* — 2016 Vol. 821, no 1, id.61, 13 pp.
 23. V.P. Ivanov, A.V. Ipatov, I.A. Rakhimov, et al. Spectra of Standart radio Sources at the current epoch // *Astron Rep.* — 2018 — Vol. 62, no. 9 — P. 574-583.
-
24. Виняйкин Е.Н. Эволюция радиоизлучения Крабовидной туманности по многолетним наблюдениям на частотах 927 и 151.5 МГц // *Астрон. журн.* — 2007 — Т.84 — С. 634-641.
 25. Виняйкин Е.Н. О частотной зависимости эволюции радиоизлучения остатка Сверхновой Кассиопея-А // *Астрон. журн.* — 2014 — Т. 91 — С.720-734.
 26. Виняйкин Е.Н. О спектре интегрального радиоизлучения ДевыА . // *Астрон. журн.* — 2017 — Т. 93 — С. 738-746.