

На правах рукописи

**Лопез Юлия Робертовна**

**Исследование систематических разностей каталогов координат  
радиоисточников и построение сводного каталога**

01.03.01 — Астрометрия и небесная механика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург — 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Главной (Пулковской) астрономической обсерватории Российской академии наук.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук  
Малкин Зиновий Меерович

Официальные оппоненты: **Клионер Сергей Альбертович**,  
доктор физико-математических наук,  
старший научный сотрудник, профессор  
Дрезденского технического университета,  
Дрезден, Германия

**Цветков Александр Станиславович**,  
кандидат физико-математических наук,  
доцент, доцент кафедры астрономии  
Санкт-Петербургского государственного  
университета

Ведущая организация: Государственный астрономический институт имени П.К. Штернберга (ГАИШ) Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Защита диссертации состоится “01” июня 2018 года в 12 час. 45 мин.  
на заседании диссертационного совета Д 002.120.01  
Главной (Пулковской) астрономической обсерватории  
Российской академии наук (ГАО РАН)  
по адресу: 196140, Санкт-Петербург, Пулковское шоссе, д. 65, к. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГАО РАН и на сайте ГАО РАН (<http://www.gaoran.ru>).

Автореферат разослан “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2018 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

к.ф.-м.н. Булига Станислава Дмитриевна

## Общая характеристика работы

Высокоточная реализация небесной системы координат необходима для решения разнообразных фундаментальных и прикладных научных задач: изучения строения и эволюции вселенной, определения положения различных объектов на Земле и в космосе, наземной и космической навигации, определения параметров вращения Земли и других задач координатно–временного обеспечения. Построение опорных систем координат на небесной сфере, а также изучение их стабильности во времени и пространстве, является фундаментальной задачей астрометрии. Практически в астрометрии используются квазиинерциальные системы координат, оси которых не имеют вращения. Такие системы называются «фундаментальными системами координат», а их практические реализации в виде каталогов координат небесных объектов — «фундаментальными системами отсчета» или «фундаментальными каталогами». Исторически, ко второй половине XX века, сложилось несколько реализаций квазиинерциальной небесной системы отсчета:

- звездная фундаментальная система — FK5, построенная по данным наземных оптических наблюдений звезд [1],
- космическая система HCRF, построенная по данным оптических наблюдений с космического аппарата Hipparcos [2],
- система ICRF, базирующаяся на координатах внегалактических радиоисточников, полученных по данным РСДБ–наблюдений [3], [4].

Эти системы существенно отличаются методами измерений и точностью каталогов. Наилучшей реализацией квазиинерциальной системы на текущее время является система, задаваемая координатами внегалактических источников по данным РСДБ–наблюдений (РСДБ — радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами). [5], [6]. Развитие оптической системы в настоящее время базируется на наблюдениях космического телескопа Gaia [7], первый релиз данных с которого состоялся в 2016г. [8].

Начиная с публикации первого звездного фундаментального каталога (FK) в 1879 году [9] и вплоть до 1998 года, принятыми реализациями фундаментальной системы служили оптические каталоги. С 1998 г. по решению Международного астрономического союза (МАС/IAU) введена новая небесная система координат ICRS (International Celestial Reference System), практическая реализация которой — каталог координат внегалактических радиоисточников ICRF (International Celestial Reference Frame), полученный из обработки 1.6 миллиона наблюдений методом РСДБ [3], [4]. Помимо официально принятого каталога в качестве ICRF,

центры обработки РСДБ–наблюдений один – два раза в год получают собственные (индивидуальные) каталоги координат радиоисточников с использованием всех накопившихся к этому моменту наблюдений.

Со временем увеличившийся объем наблюдений и значительный прогресс в анализе РСДБ–данных привели к необходимости пересмотра каталога ICRF. В 2005 году был инициирован совместный международный проект IAU, IVS и IERS (International VLBI Service for Geodesy and Astrometry, International Earth Rotation and Reference Systems Service соответственно) по созданию новой реализации небесной системы координат — ICRF2. Основные исследования в рамках данного проекта для выбора оптимальной концепции построения новой небесной системы координат осуществлялись по следующим направлениям: исследование стабильности радиоисточников и выбор оптимального списка опорных источников; отбор исходных данных; исследование ошибок обработки; получение и исследование индивидуальных каталогов в систематическом и случайном отношении [11], [14]. Автор диссертации принимала активное участие в данном проекте. Проведенное автором сравнение ICRF с представленными в рамках проекта индивидуальными РСДБ–каталогами показало, что к тому времени каталог ICRF накопил большие систематические ошибки с амплитудой около 0.2 мс. дуги и сложной структурой [11], [12].

В то же время, опыт классической астрометрии демонстрирует, что существенного повышения точности опорной небесной системы отсчета можно добиться путем создания сводных каталогов. Уже первый опыт создания сводного каталога координат радиоисточников в ГАО РАН, представленный в рамках проекта по улучшению ICRF, показал его высокую эффективность [11].

В 2009 году, в результате работы международной группы по ICRF2, Генеральной ассамблеей МАС была принята вторая версия международной небесной системы отсчета (ICRF2) [13], [14]. Хотя каталог ICRF2 показал ряд существенных преимуществ по сравнению с ICRF, к настоящему времени выяснилось, что и он имеет ряд существенных недостатков, таких как: нестабильность радиоисточников [16], [15], [17], возрастающая систематика разностей индивидуальных каталогов с ICRF2 [18], и пр., работа над устранением которых активно ведется мировым радиоастрометрическим сообществом.

### **Актуальность темы**

Актуальность предлагаемой диссертационной работы заключается в необходимости дальнейшего улучшения международной небесной опорной системы ICRF. Данная задача имеет основополагающее значение

в фундаментальной и прикладной астрономии. В настоящее время существуют различные взгляды на методы построения и улучшения ICRF. В этой связи представляется важным дальнейшая разработка объективных методов оценки качества индивидуальных РСДБ–каталогов и совершенствования методов построения следующих версий ICRF. Работа по сравнению РСДБ–каталогов, получаемых в различных центрах РСДБ–анализа, ведущаяся в Пулковской обсерватории (ГАО РАН), позволяет быстро и эффективно выявить возможные систематические проблемы в опорной системе координат, а построение сводного каталога позволяет получить усредненную и наиболее обоснованную оценку систематических ошибок ICRF и улучшить её в случайном и систематическом отношении.

### **Цели работы**

Основная цель работы состоит в исследовании систематических разностей каталогов координат радиоисточников и повышении точности ICRF путем построения сводного каталога координат радиоисточников. Для достижения этой цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Применение строгих аналитических методов представления систематических разностей к РСДБ–каталогам и их сравнение.
2. Исследование влияния корреляционной информации в РСДБ–каталогах на результаты определения их взаимной ориентации.
3. Построение сводных каталогов PulC01 и PulC02, являющихся улучшением опорной системы отсчета в случайном и систематическом отношении соответственно.
4. Разработка нового метода вычисления структурной задержки по данным геодезических РСДБ–наблюдений, и оценка её влияния на координаты радиоисточников.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

1. Впервые проведено детальное сравнение различных методов представления систематических разностей РСДБ–каталогов.
2. Впервые применена методика сравнения РСДБ–каталогов, основанная на строгом полном разложении систематических разностей каталогов по ортогональным функциям.
3. Впервые проведено исследование связи модели вращения с аналитической моделью разложения шести и четырех параметров, применяемых IERS.

4. Впервые проведено детальное изучение систематических ошибок каталогов координат радиоисточников; обнаружены значительные систематические ошибки ICRF и ICRF2.
5. Проведено наиболее детальное исследование влияния корреляционной информации на параметры ориентации систем координат;
6. Предложен и успешно опробован новый метод вычисления и учета структурной задержки по остаточным невязкам наблюдений без привлечения дополнительной картографической информации.

### **Научная и практическая значимость**

- Анализ систематических ошибок каталога ICRF показал несостоятельность принятой авторами первой версии ICRF идеологии фиксации координат определяющих источников.
- Регулярное ежегодное сравнение современных РСДБ–каталогов и получение сводного каталога координат радиоисточников позволяет оперативно следить за возможным ухудшением ICRF со временем и определять целесообразность создания новой версии системы.
- Использование сводного каталога при обработке РСДБ–наблюдений в Пулковском центре изучения ПВЗ и опорных систем координат позволило существенно увеличить точность результатов определения углов нутации.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Результаты исследования систематических разностей каталогов координат радиоисточников. Выявлены значимые систематические ошибки каталога ICRF/ICRF2. Обнаружена увеличивающаяся со временем систематика РСДБ–каталогов.
2. Результаты исследования и применения методов аналитического представления систематических разностей каталогов координат радиоисточников.
3. Результаты исследования и численные оценки влияния корреляционной информации в каталогах на результаты определения взаимной ориентации систем координат, представленных РСДБ–каталогами.

4. Сводные каталоги координат радиоисточников ГАО РАН 2009 и 2016 годов.
5. Результаты разработки и практического применения нового метода вычисления структурной задержки протяженных радиоисточников по данным геодезических РСДБ-наблюдений.

### **Степень достоверности результатов проведенных исследований:**

Достоверность научных результатов и выводов, полученных в работе, подтверждается применением строгих математических методов, ранее апробированных при составлении фундаментальных каталогов звезд, сравнением с данными аналогичных исследований других авторов, а также независимым анализом пулковского сводного каталога в Главной астрономической обсерватории НАН Украины [27]. Полученные на первом этапе работы оценки систематических ошибок ICRF были впоследствии подтверждены результатами сравнения ICRF2 и ICRF. Предложенный метод определения и учета структурной задержки практически испытан и подтвержден в университете Тасмании, Австралия [28].

### **Апробация результатов**

Результаты диссертации докладывались на следующих конференциях:

1. Международный симпозиум “Astronomy 2005 — Current status and prospect”, Москва, Россия, 01–07 июня 2005г.
2. Международная конференция “Journees 2005”, Варшава, Польша, 19–21 сентября 2005г.
3. XXVIth IAU General Assembly, Прага, Чехия, 14–25 августа 2006г.
4. 18th EVGA Meeting, Вена, Австрия, 12–13 апреля 2007 г.
5. Международная конференция “Journees 2007”, Мейдон, Франция, 11–15 октября 2007г.
6. 5th IVS General Meeting, Санкт-Петербург, Россия, 03–06 марта 2008г.
7. 10th Finnish-Russian symposium, Орилампи, Финляндия, 01–05 сентября 2008г.
8. 28th General Assembly of the IAU, Пекин, КНР, 20–31 августа 2012 г.
9. Всероссийская астрометрическая конференция, Санкт-Петербург, Россия, 01–05 октября 2012г.

10. XII Finnish-Russian Radio Astronomy Symposium, Ламми, Финляндия, 15–18 октября 2012г.
11. IAG Scientific Assembly, Потсдам, Германия, 2–6 сентября 2013г.
12. XIII Finnish-Russian Radio Astronomy Symposium, Санкт-Петербург, Россия, 25–29 мая 2015г.
13. 23rd European VLBI Group for Geodesy and Astrometry Working Meeting, Гётерборг, Швеция, 14–19 мая 2017г.
14. Всероссийская астрономическая конференция «Астрономия: познание без границ», Ялта, Россия, 17–22 сентября 2017г.

Основная часть исследований, описанных в диссертации, была получена автором в рамках международной кооперативной работы по созданию ICRF2, и которая в 2009 г. была признана достижением Научного совета по астрономии РАН и отмечена в отчете РАН как достижение Российской академии наук.

### **Структура и объём диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 125 страниц, включая 60 рисунков и 20 таблиц. Список литературы содержит 85 наименований.

## **Содержание диссертации**

Во **Введении** приводится обоснование актуальности работы, формулируются цели, новизна, достоверность результатов, научная и практическая значимость исследований. Приводятся результаты, выносимые на защиту; указывается список конференций и публикаций, где были представлены результаты диссертационной работы.

В **Главе 1** «Обзор фундаментальных небесных систем координат и их практических реализаций» приведен обзор основных фундаментальных небесных систем отсчета и методов их построения. Кратко представлен метод РСДБ, структура международной службы РСДБ (IVS), процедура получения координат радиоисточников по данным РСДБ–наблюдений. Дана информация по официальным небесным системам отсчета по данным РСДБ–наблюдений: каталогу ICRF, первому и второму его расширению (ICRF Ext.1, Ext.2), ICRF2, и их проблемах.

Основной акцент главы сделан на обзоре методов получения и представления систематических разностей координат радиоисточников в каталогах, таких как: методы, применяемые IERS (модель вращения,



модель вращения с деформацией [20], методы, применяемые в оптической астрономии (табличный и аналитические методы – разложение по сферическим функциям (метод Броше [24]), разложение по функциям Лежандра–Фурье [25]).

В аналитическом методе (также как и в табличном и методах IERS) исходным материалом являются разности координат  $N$  общих источников двух каталогов:

$$\Delta_i = f(\alpha_i, \delta_i) = \left\{ \begin{array}{l} \Delta\alpha_i \cos \delta_i, \\ \Delta\delta_i, \end{array} \right\}, i = 1, 2, \dots, N. \quad (1)$$

Общий вид представления индивидуальных разностей в аналитическом методе имеет вид:

$$f(\alpha, \delta, m) = \sum_{j=0}^g b_j Y_j(\alpha, \delta) + \varepsilon. \quad (2)$$

в котором выбор максимального члена разложения ( $g$ ) определяет границу разделения систематической и случайной компонентами.

В методе Броше [24] сферические функции задаются выражением:

$$Y_j(\alpha, \delta) = \begin{cases} P_{n0}(\delta) & k = 0, l = 1 \\ P_{nk}(\delta) \sin k\alpha, & k \neq 0, l = 0 \\ P_{nk}(\delta) \cos k\alpha, & k \neq 0, l = 1, \end{cases} \quad (3)$$

Здесь  $k$  – номер гармоники.  $P_{n0}(\delta)$  – полиномы Лежандра,  $P_{nk}(\delta)$  – присоединенные функции Лежандра.

В **Главе 2** «Систематические разности положений радиоисточников в РСДБ–каталогах» подробно рассмотрено сравнение каталогов координат радиоисточников, изучение систематических разностей координат каталогов с применением моделей представления систематических разностей, приведенных в главе 1.

Сравнение каталогов 2005г. показало наличие значительных систематических разностей всех исходных каталогов по отношению к системе ICRF [11]. Похожая картина наблюдается и в случае сравнения индивидуальных РСДБ–каталогов 2012 и 2016 годов с ICRF2 [19]. Причем систематические различия всех РСДБ–каталогов 2016 года с ICRF2 практически одинаковые (рис. 1 на примере трех каталогов), что может говорить о наличии систематических ошибок самой системы ICRF2.

Исследование эволюции разностей координат индивидуальных РСДБ–каталогов с ICRF2 выявило растущую систематику (рис. 2). Таблица 1 демонстрирует быстрый рост взвешенных среднеквадратических (wrms) разностей координат каталогов GSFC с ICRF2.

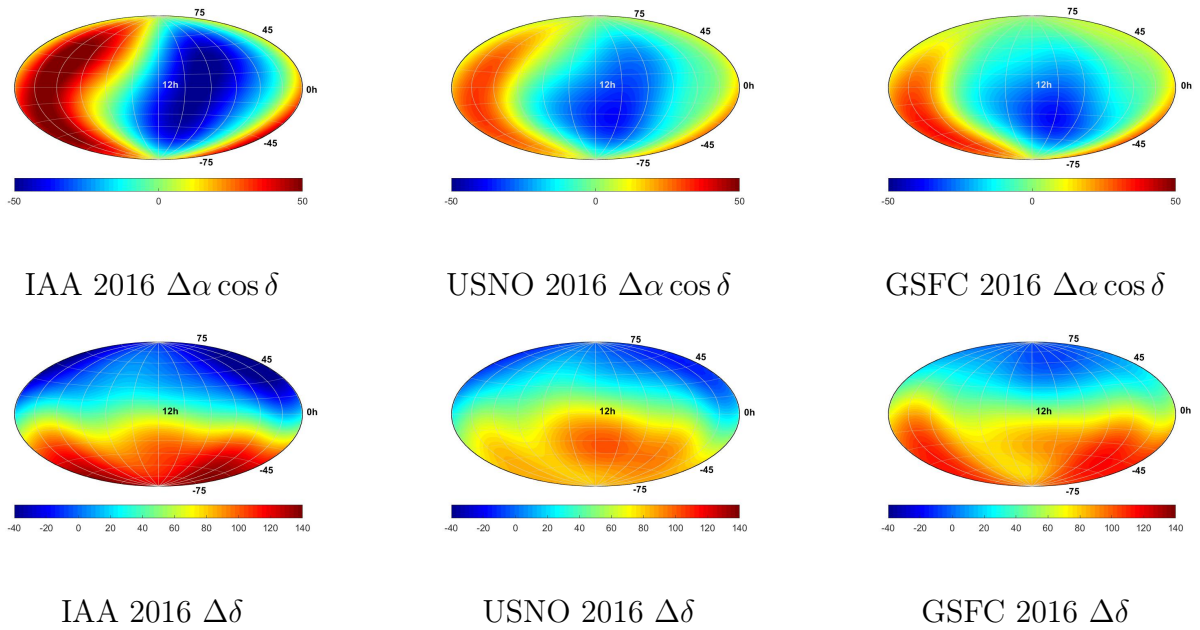


Рис. 1: Сглаженные по сфере исходные разности координат источников в каталогах 2016г. и ICRF2, ед. мкс.

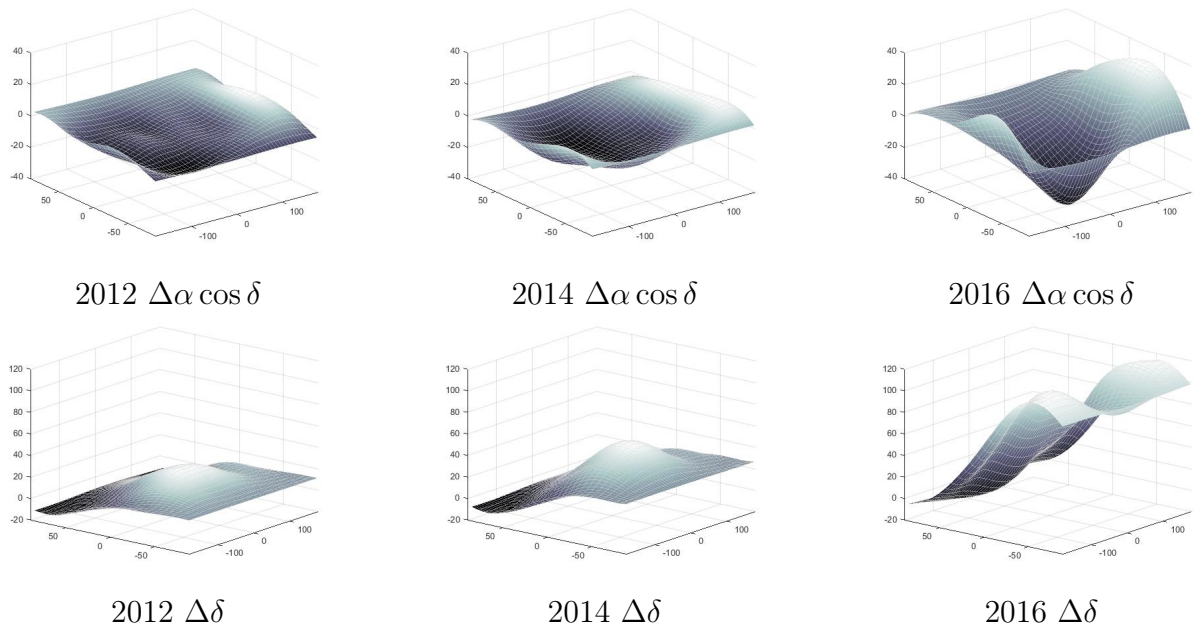


Рис. 2: Сглаженные исходные разности каталогов GSFC и ICRF2.  $\Delta\alpha$ (вверху) и  $\Delta\delta$  (внизу) в мкс. дуги.

Таблица 1: wrms разностей каталогов GSFC–ICRF2 для 274 “defining” источников, общих для всех разностей, ед.: мкс. дуги

Год	2011	2012	2014	2015	2016
wrms	48.02	50.10	57.02	75.03	82.00

В настоящее время, вопрос — связана ли данная систематика с плохой точностью определения координат в южном полушарии опорной ICRF2, или с геометрией сети или с инструментальными ошибками южных станций, или иной причиной пока открыт.

К полученным разностям индивидуальных РСДБ-каталогов были применены аналитические модели представления систематических разностей (Рис. 3).

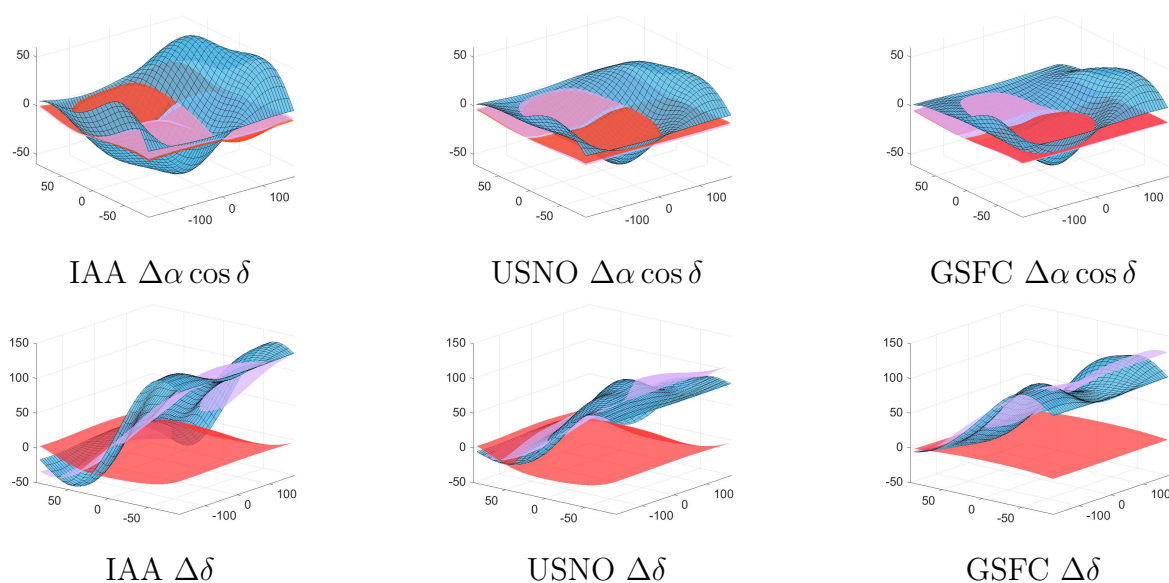


Рис. 3: Аппроксимация систематических разностей каталогов 2016г. с ICRF2 (черные линии - исходные разности) моделями: вращение – красным, вращение с деформацией – розовым, разложение по сф. функциям – голубым. По 295 опорным источникам. Значения по горизонтальным осям – в градусах, по вертикальным – мкс. дуги.

Исследование связи моделей IERS с разложением по сферическим функциям показало следующее: основные, самые мощные гармоники для разностей каталогов 2016г. с ICRF2 по  $\Delta\alpha \cos \delta$  — тессеральные (при  $[n = 1, k = 1, l = 0], [n = 1, k = 1, l = 1]$ ) не соответствуют углам вращения и не входят в модель шести постоянных; Основные гармоники по  $\Delta\delta$  — зональные. Самая мощная гармоника при  $[n = 0, k = 0, l = 1]$  — соответствует сдвигу ( $B_\delta$ ); гармоники  $[n = 1, k = 0, l = 1], [n = 3, k = 0, l = 1]$  соответствуют параметру наклона ( $D_\delta$ ); мощная гармоника  $[n = 2, k = 0, l = 1]$  — наклон, не имеющий интерпретации в рамках модели шести постоянных.

Результаты данного исследования показали несостоятельность применения моделей, используемых IERS, а наилучшим методом представления систематических разностей для всех РСДБ-каталогов оказалось разложение по сферическим функциям.

Также было проведено исследование влияния корреляционной информации в каталогах на их взаимную ориентацию. Проведенное исследование выявило, что использование полных корреляционных матриц оказывает существенное влияние на параметры ориентации систем, при этом разница в полученных значениях углов поворота может превышать 20 мкс. дуги ( $\mu\text{as}$ ) (табл. 2). Таким образом, представляется важным учитывать полную корреляционную информацию при сравнении каталогов положений радиоисточников. Для этого необходимо ввести в практику публикацию каталогов с полной ковариационной матрицей.

Таблица 2: Параметры ориентации между индивидуальными системами отсчета и ICRF2 без учета корреляций (первая строка); с учетом корреляций RA/DE для обоих каталогов (вторая строка) и с учетом полной корреляционной матрицы

Каталоги	A1	A2	A3
gsf2011a	$-24.0 \pm 2.1$	$-5.4 \pm 2.2$	$6.0 \pm 1.1$
igg2012b	$-23.9 \pm 2.1$	$-5.2 \pm 2.2$	$5.7 \pm 1.1$
854	$-0.6 \pm 2.5$	$3.4 \pm 3.5$	$0.7 \pm 1.2$

**Глава 3** «Улучшение ICRF в случайном и систематическом отношении» посвящена получению сводных каталогов PulC01 (улучшение опорной системы в случайном отношении) и PulC02 (уточнение в случайном и в систематическом отношении). Каждый индивидуальный РСДБ–каталог является своей собственной системой отсчета, обладающей своим собственным набором случайных и систематических ошибок, связанных с особенностями программных систем, различными моделями применяемых редукций, выбранной стратегией обработки и т.д. Для ослабления влияния этих ошибок целесообразно построение сводного каталога.

Сравнение сводного Пулковского каталога 2007г. с ICRF показало, что: разности между сводным решением и индивидуальными каталогами в 2.5 раза меньше, чем между сводным решением и ICRF. Это говорит о том, что данная опорная система отсчета была отягощена значительными систематическими ошибками и подвержена сильному «устареванию»; Сравнение сводного каталога с ICRF2 показало, что сводный каталог оказался намного ближе к ICRF2, чем предыдущая дополненная версия ICRF — ICRF Ext.2 (рис. 4, 5 в едином масштабе).

Применение полученного сводного каталога к обработке РСДБ–наблюдений показало улучшение точности оценки углов нутации (таб. 3) и всемирного времени. Пулковский сводный каталог был использован как основной в работе IVS центра ГАО РАН вплоть до выхода ICRF2. [11].

**Глава 4** «Вычисление структурной задержки радиоисточников по данным геодезических РСДБ–наблюдений» посвящена новому методу вычисления структурной задержки по остаточным невязкам. Большое

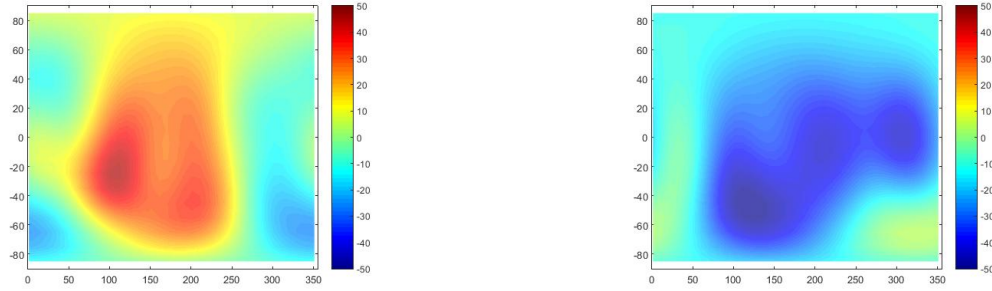


Рис. 4: Сглаженные разности между ICRF Ext.2 и ICRF2, по общим опорным источникам (Слева  $\Delta\alpha$ , справа  $\Delta\delta$ ), в мкс. дуги.

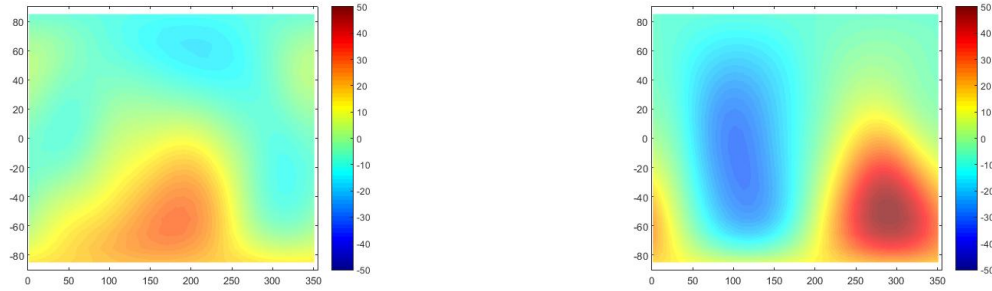


Рис. 5: Сглаженные разности между Pul(2007)C02 и ICRF2, по общим опорным источникам (Слева  $\Delta\alpha$ , справа  $\Delta\delta$ ), в мкс. дуги.

Таблица 3: Wrms разностей между двумя рядами координат небесного полюса, мкс. дуги.

Каталог	$X_c$	$Y_c$
ICRF Ext.2	104	102
Сводный 2007г.	98	99

количество радиоисточников на миллисекундном масштабе имеют сложную переменную структуру, что приводит к астрометрической нестабильности координат опорных объектов на уровне 0.1 – 1 мс. дуги. Дополнительное запаздывание сигнала, регистрируемое простым двухэлементным интерферометром («структурная задержка»), вызванное неточностью и несимметричностью распределения радиояркости источника, устанавливает ограничение не только на точность небесной системы координат, но также влияет и на определение параметров вращения Земли (в основном, углов нутации) [15], [16], [17] (рис. 6).

Совместно с О. Титовым [22] была предпринята первая попытка вычисления структурной задержки по остаточным невязкам, без привлечения картографической информации. Разработанный метод основан на применении двухкомпонентной модели Charlot (1990) (4) и (5) [15], учитывая обнаруженный характер представления систематики — зависимость от позиционного угла  $A$ , который отсчитывается от ядра

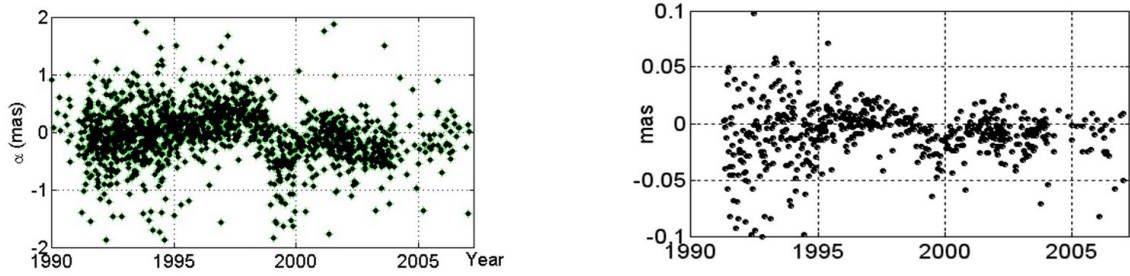


Рис. 6: Пример «нестабильного» радиоисточника 2145+067, с изменяющейся структурой. Вариации в положении радиоисточника 2145+067 – слева, вариации в нутации (dpsi) – справа. (Соколова Ю., 2008) [17]

радиоисточника и определяет направление вектора базы по отношению к Северному полюсу Мира (рис. 7).



Рис. 7: Связь структуры источника и структурной задержки по данным РСДБ-наблюдений. Углы ( $\theta$ ,  $\varphi$  и  $90-\delta$ ), образуют грани сферического треугольника, заданного положением радиоисточником ( $Q$ ), направлением вектора базы ( $b$ ) и положением Северного полюса мира ( $N$ ) в барицентрической системе координат. Переменный сферический угол при ядре радиоисточника определяет направление проекции вектора базы  $B$  по отношению к направлению на Северный полюс мира  $N$ . Направление джета по отношению к ядру задается углом  $\beta$ , не зависящим от времени. Вектор проекции базы в течение суток меняется от  $0^\circ$  до  $360^\circ$ , два раза в сутки становясь коллинеарным направлению «ядро - джет». При этом угол  $A$  принимает значения  $\beta$  и  $-\beta$ , соответственно. Угол  $\sigma$  - угловое расстояние между ядром и джетом.

$$\tau_1 = \frac{2\pi K(1-K)}{w(1+K)} \frac{[1 - \cos(2\pi R)]R}{K^2 + 2K \cos(2\pi R) + 1} \quad (4)$$

и

$$\tau_2 = \frac{\Delta\alpha K}{w} \frac{\sin(2\pi R)}{K^2 + 2K \cos(2\pi R) + 1} \quad (5)$$

где  $K$  – отношение потоков двух компонент,  $R$  – отношение между пространственным разделением компонент и проекции базы интерферометра на направление ядро-джет,  $w$  – частота интерференции, и  $\Delta\alpha$  – разность спектральных индексов компонент [15].

Апробация метода была осуществлена на примере радиоисточника 0014+813, интенсивно наблюдавшегося в ходе программы CONT'14 [26]. Остаточные невязки аппроксимировались с помощью уравнений (4) и (5) перебором всех четырех параметров, чтобы для каждой базы найти численно такую комбинацию  $(R, K, \beta, \Delta\alpha)$ , при которой среднеквадратическая ошибка окажется минимальной. Пример аппроксимации приведен на рис. 8.

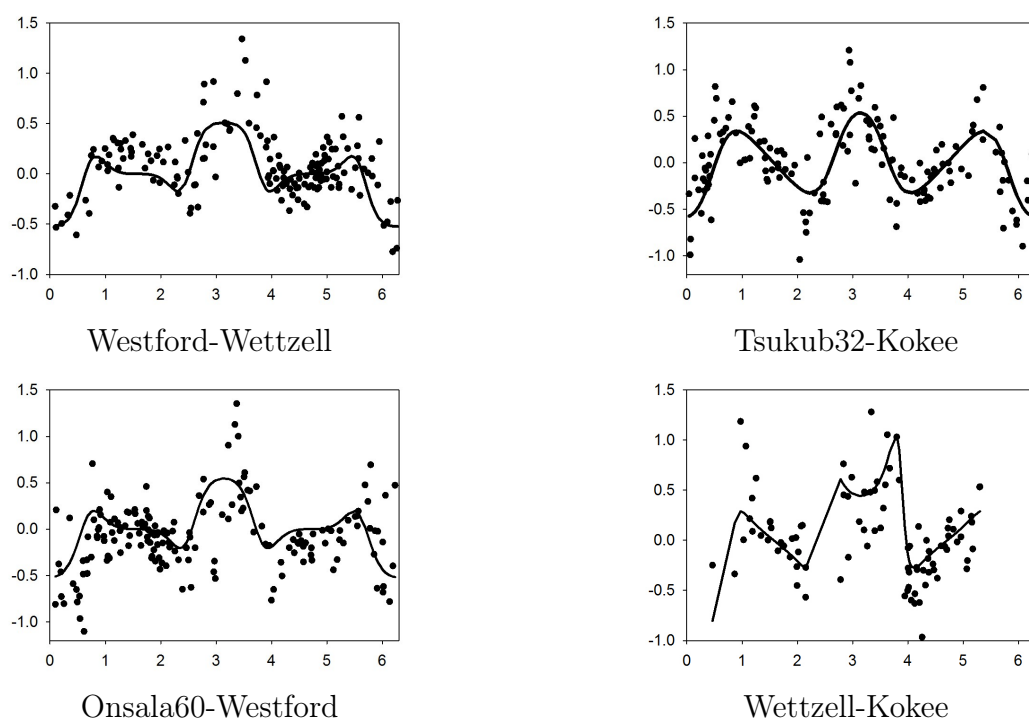


Рис. 8: Аппроксимация остаточных невязок на примере некоторых РСДБ-баз, по осям:  $y$  — см,  $x$  — угол  $A$  (радианы)

Результаты сравнение временных рядов координат радиоисточника 0014+813, полученные двумя способами: без учета структурной задержки и с применением модели (4) и (5) с полученными параметрами  $R, K, \beta, \Delta\alpha$  представлены на рис. 9 и табл. 4.

Таким образом, данное исследование показало, что смещение оценок координат, вызванное неучтенным влиянием структурной задержки, может достигать 0.1 мс дуги. В то же время результат апробации разработанного метода по учету структурной задержки показал его состоятельность и необходимость скорейшего развития и применения.

В **Заключении** приведены основные результаты диссертационной работы.

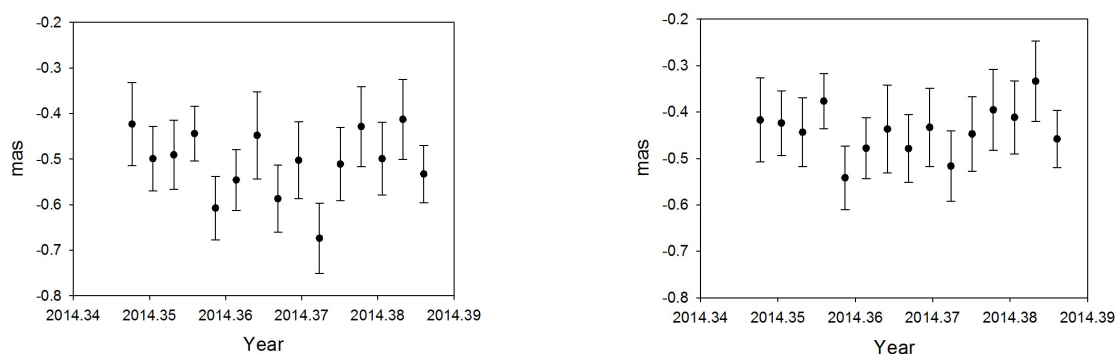


Рис. 9: Поправки к координатам радиисточника 0014+813 по склонению без применения модели структурной задержки (слева) и с применением (справа) для каждой серии программы CONT14.

Таблица 4: Сравнение координат радиисточника 0014+813, полученных двумя способами.

Решения	Без структурной задержки	Со структурной задержкой
Ср. значение поправки по RA, (мксек)	$-3.1 \pm 1.2$	$-4.2 \pm 1.1$
Ср. значение поправки по DE, (мс)	$-0.513 \pm 0.018$	$-0.442 \pm 0.013$
wrms отклонение от среднего по RA, (мксек времени)	4.7	4.1
wrms отклонение от среднего по DE, (мкс дуги)	69	53

## Публикации по теме диссертации

Материалы диссертации опубликованы в 16 работах, из них 6 статей — в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК, 4 работы — в сборниках трудов конференций, 6 — работ в других изданиях.

1. Sokolova J., Malkin Z. On comparison and combination of catalogues of radio source positions. // *Astron. Astrophys.* 2007. Vol. 474, №. 2. P. 665–670.
2. Соколова Ю.Р., Малкин З.М. О влиянии учета корреляционной информации на параметры взаимной ориентации небесных систем отсчета. // *Вестник СПбГУ.* 2013. Сер. 1. №. 4. С. 146–151.
3. Соколова Ю.Р., Малкин З.М. Пулковский сводный каталог координат радиисточников PUL 2013 // *Письма в Астрон. журн.* 2014. т. 40, №. 5. С. 306–315.



4. Fey A.L., Gordon D., Jacobs C.S., Ma C., .... , Sokolova J., et al. The Second Realization of the International Celestial Reference Frame by Very Long Baseline Interferometry // *Astron. J.* 2015. Vol. 150. №. 2. id. 58. pp. 16.
5. Sokolova J., Malkin Z. On impact of the correlation information on the orientation parameters between celestial reference frames. // In: *IAG 150 Years*, C. Rizos, P. Willis (eds.), IAG Symposia. Springer. 2016. Vol. 143. P. 41–44.
6. Титов О. А., Лопез Ю.Р. Двухкомпонентная структура источника 0014+813 по РСДБ–наблюдениям по программе CONT14 // *Письма в Астрон. журн.* 2018. т. 44, №.3. С. 163-172.
7. Malkin Z., Skurikhina E., Melnikov A., Gubanov V., Kurdubov S., Sokolova Ju. et al. IAA VLBI Analysis Center Report 2004 // In: *IVS 2004 Annual Report*, Eds. Behrend D., Baver K.D., Vandenberg N.R. NASA/TP–2005–212772. 2005. P. 215–218.
8. Sokolova J. Influence of the radiosources instability on the nutation offset estimation // *Proceedings of the Journees 2005 conference.* 2005. С. 125–126
9. Malkin Z., Skurikhina E., Melnikov A., Gubanov V., Kurdubov S., Sokolova Ju. et al. IAA VLBI Analysis Center Report 2005 // In: *IVS 2005 Annual Report*, Eds. Behrend D., Baver K.D. NASA/TP-2006-214136. 2006. P. 241–244.
10. Malkin Z., Sokolova J., Bajkova A. PUL VLBI Analysis Center Report 2006. // In: *IVS 2006 Annual Report*, Eds. D. Behrend, K. D. Baver, NASA/TP-2007-214151. 2007. P. 228–230.
11. Sokolova Ju., Malkin Z. Systematic errors and combination of individual CRF solutions in the framework of the international pilot project for the next ICRF // *XXVIth IAU General Assembly.* 2007. arXiv:astro-ph/0703194.
12. Sokolova J., Malkin Z. Comparison and Combination of CRF Catalogues. In: *Measuring the Future, Proc. Fifth IVS General Meeting*, A. Finkelstein, D. Behrend (Eds.) 2008. P. 275–278
13. Ma C., Arias E.F., Malkin Z.M.,..., Sokolova J.R. et al. The Second Realization of the International Celestial Reference Frame by Very Long Baseline Interferometry. // *IERS Technical Note* 2009. №. 35. A.L. Fey,

D. Gordon, C.S. Jacobs (Eds.), Verlag des Bundesamts fuer Kartographie und Geodaesie, Frankfurt am Main.

14. Malkin Z., Sokolova J. Pulkovo IVS Analysis Center (PUL) 2012 Annual Report // In: IVS 2012 Annual Report, Eds. Behrend D., Bayer K.D., Armstrong K.L. NASA/TP-2013-217511. 2013. P. 305–308.
15. Sokolova J., Malkin Z. Impact of Covariance Information on the Orientation Parameters Between Radio Source Position Catalogs // In: IVS 2012 General Meeting Proc., ed. Behrend D., Bayer K.D. NASA/CP-2012-217504. 2012. P. 339–341.
16. Titov O., Lopez Y., McCallum L. Two-component structure of the radio source 0014+813 using CONT14 geodetic VLBI observations. // EVGA Proc., ed. R. Haas and G. Elgered. 2017. P. 190-194.

**Личный вклад автора:** содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в проведенные исследования. В статьях 1, 3–4, 6–9, 11, 16 автор произвела все вычисления по сравнению и комбинации каталогов и приняла равное участие в обсуждении полученных результатов с научным руководителем д.ф.-м.н. З. Малкиным. В статьях 12, 13 научная работа проводилась совместно с к.ф.-м.н. О. Титовым, вклад авторов в работу равнозначный.

## Список литературы

1. *Fricke W., Schwan H., and Lederle T.* Fifth fundamental Catalogue (FK5), Part I: The basic fundamental stars. // *Veroff. Astron. Rechen Inst. Heidelberg*, – 1988. – №. 32.
2. *Perryman M.A.C., Lindegren L., et al.* The Hipparcos Catalogue // *Astron. Astrophys.* – 1997. – Vol. 323. – P. L49–L52.
3. *Ma C., Arias E., et al.* The International Celestial Reference Frame based on VLBI Observations of Extragalactic Radio Sources // *Astron. J.* – 1998. – Vol. 116. – P. 516–546.
4. *Feissel M., Mignard F.* The adoption of ICRS on 1 January 1998: meaning and consequences // *Astron. Astrophys.* – 1998. – Vol. 331. – P. 33–36.
5. *Sovers J. et al.* Astrometry and geodesy with radio interferometry: experiments, models, results // *Rev. Mod. Phys.* – 1998. – 70, 1393.

6. *Walter H., Sovers O.* Astrometry of fundamental catalogues: the evolution from optical to radio reference frames // edited by Hans G. Walter and Ojars J. Sovers. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. – 2000.
7. *Gaia Collaboration, T. Prusti, J. H. J. de Bruijne, et al.* The Gaia mission // *Astron. Astrophys.* – 2016. – Vol. 595. – pp. 36.
8. *Gaia Collaboration, A. G. A. Brown, A. Vallenari et al.* Gaia Data Release 1 - Summary of the astrometric, photometric, and survey properties // *Astron. Astrophys.* – 2016. – Vol. 595. – P. 1–23.
9. *Auwers A.* Fundamental-Katalog für die Zonen-Beobachtungen am Nordlichen Himmel // *Publ. Astron. Gesellschaft*, – 1879. – XIV.
10. *Wielen R., Schwan H. et al.* Sixth Catalogue of Fundamental Stars (FK6), Part I. // *Veroff. Astron. Rechen-Inst., Heidelberg* – 1999. – pp. 209.
11. *Sokolova Ju., Malkin Z.* On comparison and combination of catalogues of radio source positions // *Astron. Astrophys.* – 2007. – Vol. 474. – P. 665–670.
12. *Malkin Z.* ICRF – современное состояние и ближайшие перспективы // *Известия ГАО РАН №219. – вып. 4. – 2009. – P. 189–194.*
13. *C. Ma, E.F. Arias, ... , J.R. Sokolova, et al.* The Second Realization of the International Celestial Reference Frame by Very Long Baseline Interferometry IERS Technical Note No. 35 // *Verlag des Bundesamts fuer Kartographie und Geodaesie, Frankfurt am Main* – 2009.
14. *Fey A., Gordon D., Jacobs C., .... ,Sokolova J. et al.* The second realization of the International Celestial Reference Frame by Very Long Baseline Interferometry // *Astron. J.* – 2015. – Vol. 150. – id. 58.– №2. – pp.16.
15. *Charlot P.* Radio-source structure in astrometric and geodetic very long baseline interferometry // *Astron. J.* – 1990. – Vol. 99. – P. 1309–1326.
16. *MacMillan D.S.* Quasar apparent proper motions observed by geodetic VLBI networks. In *Future Directions in High Resolution Astronomy* // *The 10th Anniversary of the VLBA* (eds. Romney, J. D. and Reid, M. J.) – 2003. – <http://www.arXiv:astrop-ph/0309826v1>.
17. *Sokolova Y.* Influence of the radiosources instability on the nutation offset estimation. // *Proceedings of the Journees 2005 conference.* – 2008. – P. 125–126.

18. *Ch. Ma, D. MacMillan, et al.* Aspects of ICRF-3 // IVS 2016 General Meeting Proceedings – 2016. – P. 270–274.
19. *Соколова Ю.Р., Малкин З.М.* Пулковский сводный каталог координат радиоисточников PUL 2013. // Письма в Астрон. журн. – 2014. – т. 40. – №. 5. – P. 306–315.
20. *Arias E., Feissel M., Lestrade J.* Comparison of VLBI celestial reference frames // Astron. and Astrophys. – 1988. – Vol. 199. – P. 357–363.
21. *Vityazev V.* The ROTOR: a new method to derive rotation between two reference frames. // Astron. and Astrophys. – 1994. – Trans.4 – P. 195–218.
22. *О. Тумов, Ю. Лопез* Двухкомпонентная структура источника 0014+813 по РСДБ-наблюдениям по программе CONT14. // Письма в Астрон. журн., – 2018. – т. 44. – №. 3. – С. 163–172.
23. *Hu M., Heinkelmann R. et al.* The source structure of 0642+449 detected from the CONT14 observations // Astron. Journ. – 2016. – Vol. 152 – №. 5. – pp. 11.
24. *Brosche P.* Representation of systematic differences in positions and proper motions of stars by spherical harmonics // Veroff. Astron. Rechen-Inst., Heidelberg. – 1966. – №. 17. – P. 1–27.
25. *Valbousque A.* Simplification des calculus pour représenter les differences systematiques entre deux catalogues de positions stellaires. // Astron. and Astrophys. – 1975. – Vol. 45. – P. 5–18.
26. *Behrend D., et al.* VGOS: The New VLBI Network // IVS 2014 General Meeting Proceedings, (Ed. D. Behrend, K.D. Baver and K. L. Armstrong), Science Press, Beijing, China, – 2014. – p. 196
27. *Yatskiv Y., Malkin Z.* Next ICRF: Single global solution versus combination // Presentation at Journees 2007 Systemes de Reference Spatio-temporels, Paris, France, 17-19 Sep 2007.
28. *Titov O., Lopez Y., McCallum L.* Two-component structure of the radio source 0014+813 using CONT14 geodetic VLBI observations // EVGA proceedings (ed. R. Haas and G. Elgered.) – 2017 – P. 190-194.