

УЧРЕЖДЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ АСТРОНОМИИ РАН

На правах рукописи

КУРДУБОВ Сергей Леонидович

**Уточнение опорных систем координат и  
параметров их ориентации из обработки РСДБ  
наблюдений**

01.03.01 – Астрометрия и небесная механика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2011

Работа выполнена в *Учреждении Российской академии наук Институт прикладной астрономии РАН.*

Научный руководитель: *доктор физико-математических наук,  
профессор,  
Губанов Вадим Сергеевич*

Официальные оппоненты: *доктор физико-математических наук,  
профессор,  
Витязев Вениамин Владимирович  
доктор физико-математических наук,  
Медведев Юрий Дмитриевич*

Ведущая организация: *Учреждение Российской академии наук  
Главная астрономическая обсерватория  
РАН*

Защита состоится «16» сентября 2011 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 002.067.01 при *Учреждении Российской академии наук Институте прикладной астрономии РАН*, расположенном по адресу: 191187, Санкт-Петербург, наб. Кутузова, д. 10.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке *Института прикладной астрономии РАН.*

Автореферат разослан «\_\_\_» августа 2011 г.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,

*доктор физ.-мат. наук,*



*Медведев Ю.Д.*

## Общая характеристика работы

Метод радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ) позволяет получать самые точные позиционные наблюдения в современной астрономии. Метод основан на наблюдениях внегалактических объектов в радиодиапазоне с помощью группы радиотелескопов, разнесенных на значительные расстояния.

Первые РСДБ эксперименты для решения задач геодезии проводились в 1979 году [1]. Регулярные РСДБ наблюдения в двух полосах 2.2-2.3 ГГц и 8.2-8.6 ГГц начали проводиться после внедрения более совершенных систем регистрации сигналов в 1982 году [2]. На радиотелескопах ведется запись шумового сигнала радиоисточников на магнитный носитель, в двух полосах, совместно с метками времени высокоточного водородного стандарта. После первичной обработки наблюдений на корреляторе, вычисляются задержки между моментами прихода сигнала радиоисточника на РСДБ станции, участвовавшие в данном наблюдении. Вычисление задержек в двух полосах позволяет исключить ионосферную коррекцию, зависящую от длины волны.

Получаемые из обработки РСДБ наблюдений координаты радиоисточников позволяют создать высокоточный каталог, реализующий небесную систему координат. Первой работой по построению небесной системы координат из обработки РСДБ наблюдений был каталог из 85 радиоисточников, построенный в Goddard Space Flight Center (GSFC) в 1986 году [3]. Согласно решению МАС с 1998 года международной небесной системой координат ICRF (International Celestial Reference Frame) является система, построенная на координатах 608 внегалактических радиоисточников [4], [5].

Координаты наземных станций, участвующих в РСДБ наблюдениях, позволяют реализовать на земле систему отсчёта, имеющую непосредственную связь с небесной системой координат. Несмотря на развитие сетей GPS/ГЛОНАСС станций, РСДБ сеть остается важнейшей частью международной земной системы координат ITRF (International Terrestrial Reference Frame), определяющей масштаб ITRF. Построение опорной системы координат на основе координат РСДБ станций остаётся актуальной задачей, так как только с помощью РСДБ технологии возможен мониторинг всех параметров вращения земли (ПВЗ).

Основным способом построения систем координат из обработки РСДБ данных является совместная обработка (глобальное уравнивание) всех доступных наблюдений в рамках параметрической модели. Метод наименьших квадратов (МНК) является одним из важнейших инструментов научных исследований в тех областях естествознания, где приходится иметь дело с анализом экспериментальных данных. Однако МНК нельзя считать оптимальным методом при обработке РСДБ наблюдений. Линейные модели с посто-

янными коэффициентами не могут достаточно точно описывать физические процессы, протекающие в ходе РСДБ наблюдений. В частности, динамика турбулентной атмосферы как среды распространения излучения космических объектов создаёт нестабильность измеряемых величин в широком диапазоне от  $10^{-8}$  до  $10^2$  Гц [6]. Если низкочастотные вариации состояния атмосферы вплоть до  $10^{-4}$  Гц создают эффекты типа трендов и поддаются линейному моделированию, то более высокочастотные флуктуации уже ведут себя как случайный процесс. Аналогичные проблемы могут возникать и вследствие неустойчивости измерительной системы инструмента. В РСДБ устойчивость инструментальной системы почти полностью определяется стабильностью опорных стандартов времени и частоты, однако даже у лучших водородных мазеров фазовые флуктуации на суточном интервале времени не могут быть представлены только в виде тренда, так как они содержат случайную компоненту, амплитуда которой превышает точность современных РСДБ наблюдений [7], [8]. В этих случаях в модели данных приходится вводить стохастические (случайные) параметры, которые неудовлетворительно оцениваются традиционным методом наименьших квадратов.

Для оценки стохастических параметров в работе применялся метод средней квадратической коллокации (СКК), основы которого изложены в монографиях [9], [10].

**Актуальность работы** Повышение точности практической реализации международных небесной и земной опорных систем координат ICRF и ITRF в виде соответствующих каталогов координат внегалактических радиоисточников и координат наземных станций, а также опорной системы параметров вращения Земли, является актуальной научной проблемой, имеющей фундаментальное значение для решения всех основных задач координатно-временного обеспечения современной науки и практической деятельности людей. Решение этой проблемы осуществляется с помощью отечественного программного пакета путём совместного анализа практически всех наблюдений, выполненных методом РСДБ за период 1979-2009 гг. по многочисленным международным программам (всего более 6 млн. измерений).

**Цель диссертационной работы** Основной целью работы являлось получение каталога геоцентрических координат РСДБ станций, каталога экваториальных координат внегалактических радиоисточников и взаимосогласованных параметров вращения Земли из обработки всех доступных данных РСДБ с помощью отечественного пакета обработки РСДБ наблюдений QUASAR.

#### **Научная новизна**

- Программный пакет QUASAR является единственным средством глобального уравнивания РСДБ наблюдений, полностью разработанным и созданным в России.

- Впервые в России совместное определение координат наземных станций, координат внегалактических радиоисточников и параметров ориентации Земли выполнено по единой методике, гарантирующей согласованность этих результатов.

**Научная и практическая значимость** Важной задачей является независимая обработка всех РСДБ наблюдений и получение каталогов координат радиоисточников и станций, которые могут быть использованы для решения прикладных задач, комбинирования или сравнения. В частности, полученный в работе каталог радиоисточников использовался при выводе новой международной системы небесных координат ICRF2 [A1] как один из каталогов сравнения. Основным инструментом в мире для обработки РСДБ наблюдений и построения опорных систем координат является программный пакет CALC/SOLVE, разработанный в Goddard Space Flight Centre NASA, поэтому актуальной научной задачей является создание и поддержка независимого альтернативного инструмента обработки РСДБ наблюдений — программного пакета QUASAR.

Полученные в работе каталоги координат РСДБ станций и радиоисточников используются в ИПА РАН в работе службы определения ПВЗ по национальным программам на сети "Квazar-КВО". Обработка наблюдений в рамках службы производится с помощью модернизированной в ходе данной работы версии пакета QUASAR.

**На защиту выносятся следующие основные результаты и положения:**

1. Методика совместного уравнивания РСДБ наблюдений на глобальных сетях станций с помощью программной системы QUASAR на основе метода средней квадратической коллокации. Практическая реализация новой версии программной системы QUASAR, позволяющая решать задачу глобального уравнивания РСДБ наблюдений в соответствии с современными международными требованиями и стандартами.
2. Новый каталог координат и скоростей 125 наземных станций, принимавших участие в РСДБ наблюдениях по геодезическим программам за период 1980-2009 гг. (для 15 станций с учетом смещений вследствие ремонтов и землетрясений).
3. Новый каталог координат 3009 внегалактических радиоисточников, наблюдавшихся в течение 1980-2009 гг.
4. Новые независимые ряды ПВЗ, согласованные с полученными каталогами координат радиоисточников и РСДБ станций (координаты земного полюса, всемирное время и координаты небесного полюса).

**Апробация работы** Результаты, полученные в настоящей диссертационной работе, были представлены на конференциях: КВО-2005 (С.-Петербург, 11-15 апреля 2005), 26<sup>th</sup> IAU General Assembly, (Чехия, Прага, 14-25 августа 2006), РСДБ-2012 для астрометрии, геодинамики и астрофизики (С.-Петербург, 11-15 сентября 2006), 18<sup>th</sup> Working Meeting on European VLBI for Geodesy and Astrometry (Австрия, Вена, 12-13 апреля 2007), JOURNEES 2007 (Франция, Медон, 17-19 сентября 2007), Fifth IVS General Meeting (Санкт-Петербург, 3-6 марта 2008). 19<sup>th</sup> European VLBI for Geodesy and Astrometry (EVGA) Working Meeting (Франция, Бордо, 24-25 марта 2009),

**Публикации.** Материалы диссертации опубликованы в 21 печатной работе, из них в журнале из списка ВАК — одна статья [A2], в рецензируемых журналах — 6 статей, 11 статей опубликованы в сборниках трудов международных конференций и 3 — в сборниках тезисов докладов.

**Личный вклад автора** В работе [A2] автору принадлежит обработка РСДБ наблюдений с помощью пакета QUASAR, анализ и сравнение с зарубежными аналогами полученных каталогов.

В работах [A3], [A4] автору принадлежит уточнение стохастической модели РСДБ наблюдений, обработка наблюдений.

В работе [A5] автору принадлежит обработка наблюдений по программе CONT с помощью пакета QUASAR, построение спектров временных рядов ПВЗ.

В работе [A6] автору принадлежит модернизация программного пакета QUASAR для возможности получения с его помощью глобальных решений по всем РСДБ наблюдениям.

В работе [A7] автору принадлежит модернизация пакета QUASAR для возможности получения суточных SINEX (Solution/Software INdependent EXchange format) файлов для сводной обработки международной службы РСДБ IVS (International VLBI Service).

В работах [A8], [A9], [A10] автору принадлежит получение временных рядов координат внегалактических радиоисточников с помощью пакета QUASAR и алгоритм выборки оптимального набора радиоисточников для фиксации небесной системы координат с помощью автоковариационных функций.

В работе [A1] автору принадлежит получение каталога радиоисточников из глобального уравнивания РСДБ наблюдений с помощью пакета QUASAR.

В работе [A11] автору принадлежит методика выборки оптимального набора источников для фиксации осей небесной системы координат на основе ошибок определения координат радиоисточников и их распределения по небесной сфере. Также автору принадлежит сравнение этой методики с предлагаемой другими авторами.

В работе [A12] автору принадлежит построение SINEX файлов для координат станций из обработки РСДБ наблюдений и построение спектров разно-

стей координат станций, получаемых различными техниками по сравнению с ITRF.

В работе [A13] автору принадлежит получение величин антенных выносов станции "Светлое" из обработки РСДБ наблюдений для различных интервалов времени, анализ результатов.

В работах [A14], [A15], [A16], [A16], [A17], [A18] автору принадлежит обработка наблюдений с помощью пакета QUASAR, получение суточных SINEX файлов, построение каталогов координат РСДБ станций и радиоисточников.

**Структура и объем диссертации** Диссертация состоит из четырёх глав, введения, заключения и трех приложений. В диссертации содержится 21 рисунок, 22 таблицы, список литературы содержит 72 наименования. В приложении А приводятся полученные в работе характеристики стохастических сигналов для различных РСДБ станций. В приложении Б приводится полученный в работе каталог координат радиоисточников. В приложении В приводится полученный в работе каталог координат и скоростей РСДБ станций.

## Содержание работы

**Во Введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

**В первой главе** приводятся основы методики глобального уравнивания РСДБ наблюдений. В первом параграфе описываются особенности астрометрических РСДБ наблюдений и общий вид редуцированной модели. Приводится релятивистская формула для предвычисленной задержки, описывается параметризация, постоянные и стохастические параметры.

Второй параграф посвящен обоснованию параметризации задачи глобального уравнивания РСДБ наблюдений. В данной работе использовалась параметризация, при которой глобальными параметрами, постоянными на всем интервале наблюдений являются координаты и скорости РСДБ станций и координаты радиоисточников. К суточным параметрам относятся ПВЗ, линейный тренд влажной компоненты тропосферной задержки в зените, квадратичный тренд рассинхронизации часов станций, градиенты тропосферной задержки в двух направлениях. К стохастическим параметрам — случайная составляющая тропосферной задержки и рассинхронизации часов.

Третий параграф посвящен описанию метода СКК и особенностям его применения для обработки РСДБ наблюдений [10].

В четвертом параграфе исследуются ковариационные функции стохастических сигналов, необходимые для обработки РСДБ наблюдений мето-

дом СКК. Получены ковариационные функции внутрисуточных флуктуаций шкал времени и стохастической компоненты тропосферной задержки для всех суточных сессий всех станций. Ковариационные функции сигналов нормировались на дисперсии для получения корреляционных функций. После этого дисперсии сигналов и корреляционные функции усреднялись отдельно (в противном случае дисперсия служила бы весом для корреляционной функции). Для каждой станции, наблюдавшей достаточное число раз (более 25 суточных сессий за сезон) были получены средние корреляционные функции для каждого сезона. Различия между сезонными функциями для каждой станции и между средними для всех станций невелики. Отсутствие сильных различий в средних корреляционных функциях, полученных для одной станции, но в разные сезоны, свидетельствует о стационарности процесса.

Корреляционные функции разных станций отличаются незначительно. Для дальнейшего использования средняя корреляционная функция для каждого сигнала аппроксимировалась следующей моделью

$$q(\tau) = \sum_{i=1}^2 a_i e^{-\alpha_i |\tau|} (\cos(\beta_i \tau) + \gamma_i \sin(\beta_i \tau)). \quad (1)$$

Такая модель была выбрана потому, что выражение в правой части (1) описывает корреляционные функции решений стохастических дифференциальных уравнений второго порядка.

Параметры модели (1) оценивались градиентным методом итераций при условии положительной определённости этих функций.

Полученные параметры моделей приведены в таблице 1. В таблице ZENwet — флуктуация тропосферной задержки, CLCK-off — рассинхронизация шкал времени на станциях. Можно отметить интересную особенность — модель является суммой вырожденной, почти марковской компоненты и компоненты, в которой преобладает гармоническая часть.

Основные результаты, касающиеся дисперсий указанных выше сигналов и их шумов, представлены в приложении "А" к диссертации. Показано, что для большинства станций обнаружены значительные сезонные различия. Также заметны различия дисперсий для разных станций.

Результаты первой главы опубликованы в работах [A19], [A3].

**Во второй главе** описывается программный пакет QUASAR как основной инструмент вторичной обработки РСДБ наблюдений. Первый параграф посвящен описанию общей схемы и принципов работы пакета.

Во втором параграфе описывается произведенные в пакете модернизации, необходимые для решения поставленной задачи глобального выравнивания всех РСДБ наблюдений. Первая версия многофункционального программного пакета QUASAR была создана в ИПА РАН в 1998-2002 гг. В. С. Губановым (руководитель) и И. Ф. Суркисом при участии И. А. Верещагиной,



Таблица 1. Параметры моделей ковариационных функций сигналов

Параметр	ZEN-wet	CLCK-off
$\sigma^2$ , мм <sup>2</sup>	136.5	388.8
$a_1$	0.564	0.893
$\alpha_1$ , 1/сутки	3.216	4.620
$\beta_1$ , рад/сутки	6.092	6.740
$\gamma_1$	-0.915	-0.763
$a_2$	0.436	0.107
$\alpha_2$ , 1/сутки	36.869	42.773
$\beta_2$ , рад/сутки	7.886	27.502
$\gamma_2$	7.340	6.678

Ю. Л. Русинова и К. Я. Шабун [A20], [11]. Дальнейшие усовершенствования сделаны В. С. Губановым и С. Л. Курдубовым при участии И. Ф. Суркиса. В данной работе программный пакет QUASAR подвергся модернизации и усовершенствованию, необходимому для возможности совместной обработки всех доступных РСДБ наблюдений и получения каталогов координат станций и радиосточников, сравнимых с зарубежными аналогами.

В процессе совершенствования пакета и подготовки его к массовой обработке наблюдений производилось его тестирование, выявление и исправление различных программных ошибок. Ниже приведены основные направления модернизации пакета:

- Новая модель редукций для нутации IAU2000.

Согласно рекомендациям МАС 2003 года, было внедрено использование координат небесного полюса CIP (Celestial Intermediate Pole) и концепция невращающегося начала [12], вместо использовавшихся ранее углов нутации  $\Delta\psi$ ,  $\Delta\epsilon$ .

- Априорные ковариационные функции для метода СКК.

Для обработки РСДБ наблюдений методом СКК внедрены уточнённые корреляционные функции (подробно описанные в главе 1). В усовершенствованной версии пакета для каждой станции используется характерная для неё дисперсия стохастического сигнала, взятая из таблиц, приведенных в приложении "А".

- Ограничение использования регуляризации ПВЗ.

В ранних работах при вычислениях с пакетом QUASAR использовалась регуляризация оцениваемых параметров, что приводило к смещению

значений оценок параметров в сторону априорных значений. Следствием этого являлась, например, существенная разница между оценками ПВЗ, полученными с различными опорными рядами. Регуляризация ПВЗ теперь применяется только в специальных случаях.

- Система управления дополнительными условиями для станций и радиоисточников.

Эксперименты показали, что использовавшаяся ранее система наложения условий отсутствия вращений и сдвигов на координаты станций и радиоисточников не позволяла получить нерегуляризированные оценки координат. Поэтому была создана система управления дополнительными условиями, позволяющая выделять некоторый набор станций и радиоисточников, относительно равномерно распределённых по земной поверхности и по небесной сфере, на поправки координат которых накладываются условия. Координаты остальных станций и радиоисточников определяются свободно, за исключением случаев, когда наблюдений недостаточно — тогда накладываются мягкие условия.

- Учёт метеопараметров и картирующих функций тропосферы.

Влажная составляющая тропосферной задержки в зените всегда остаётся параметром, определяемым из наблюдений. Для распространения величины задержки в зените на другие углы места используются так называемые картирующие функции. В текущей версии пакета добавлена возможность использования картирующей функции тропосферной задержки по численной модели VMF1 (Vienna Mapping Function) [13]. Если метеопараметры некорректны и отсутствуют VMF1 данные, то используется моделирование метеопараметров.

- Учёт атмосферной нагрузки.

Была добавлена и протестирована возможность использования численной модели атмосферной нагрузки, получаемой из карт [14]. В случае, когда данные карт численной модели недоступны, атмосферная нагрузка вычисляется по регрессионной формуле с использованием величины атмосферного давления на станции.

- Учёт релятивистских эффектов в задержке и шкале времени.

Скорректирован учет релятивистских эффектов в задержке и шкале времени.

- Система формирования результатов.

Результаты обработки могут быть представлены в виде рядов ПВЗ, каталогов станций и источников в текстовых форматах. Реализована возможность получения методом СКК суточных файлов, содержащих свободные от условий матрицы нормальных систем (так называемые "Daily SINEX") для использования в комбинированных продуктах IVS. Каталоги станций и радиоисточников формируются в специальных форматах, рекомендованных IVS.

В третьем параграфе описывается получение с помощью пакета QUASAR и метода среднеквадратической коллокации SINEX файлов, необходимых для комбинации результатов, получаемых в центре анализа ИПА РАН, с результатами других международных центров.

Результаты второй главы опубликованы в работах [A20], [A6], [A7], [A21].

**В третьей главе** описывается процесс обработки РСДБ наблюдений. В первом параграфе описывается наблюдательный материал, перечисляются наблюдательные программы, которые использовались для построения глобального решения. Во втором параграфе перечисляются проблемы, препятствующие построению глобального решения, которые выявляются на этапе посессионного и на этапе предварительного глобального уравнивания. Кратко описывается система графической коррекции пакета QUASAR, с помощью которой производился поиск скачков рассинхронизации часов, выбросов и других особенностей в наблюдениях. Третий параграф посвящен выбору дополнительных условий, необходимых для устранения дефицита ранга матрицы нормальной системы.

Четвертый параграф посвящен получению и анализу временных рядов координат радиоисточников. В работе построены ряды координат радиоисточников, построены ковариационные функции рядов координат для источников, имеющих достаточную историю наблюдений.

Был предложен и обоснован критерий стабильности, исходя из ковариационных свойств полученных рядов. Наиболее нестабильные источники исключаются из списка "определяющих" ("defining"), по которым накладываются условия отсутствия вращения для небесной системы координат.

Результаты третьей главы опубликованы в работах [A8], [A9].

**В четвертой главе** приводятся характеристики главных результатов диссертационной работы — каталогов координат РСДБ станций и внегалактических радиоисточников. В параграфе, посвященном земной системе координат, приводится сравнение глобальных характеристик полученного каталога (параметров трансформации по отношению к опорной системе координат) с характеристиками зарубежных аналогов.

В таблицах 2 и 3 приведены параметры трансформации полученного каталога координат станций iaa2009b по отношению к каталогу ITRF2005 в сравнении с каталогами других центров анализа (каталог bkg2008b получен

в Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, каталог gsf2008a — в Goddard Space Flight Center). В таблицах T1, T2, T3 — параметры сдвига, D — разница масштабов, R1, R2, R3 — параметры поворота. Предыдущая версия полученного каталога iaa2008c приведена для иллюстрации исправления разницы в масштабе после приведения учета релятивистских эффектов в соответствие с международными стандартами.

Таблица 2. Параметры трансформации различных каталогов по отношению к ITRF2005 на эпоху 2000.0; сравнение выполнялось по 38 станциям

Параметр	bkg2008b	gsf2008a	iaa2008c	iaa2009b
T1, мм	0.1	-0.3	6.7	3.6
T2, мм	-2.6	3.4	-4.1	0.6
T3, мм	5.7	4.6	11.2	-1.7
D, $10^{-10}$	0.0	4.3	-19	1.7
R1, мкс дуги	-135	-98	-109	-21
R2, мкс дуги	115	27	25	-93
R3, мкс дуги	25	-22	-27	-3

Таблица 3. Параметры трансформации различных каталогов по отношению к ITRF2005 на эпоху 2008.0; сравнение выполнялось по 38 станциям

Параметр	bkg2008b	gsf2008a	iaa2008c	iaa2009b
T1, мм	2.4	-1.2	7.0	4.5
T2, мм	-3.9	5.9	-3.3	-1.6
T3, мм	16.2	20.4	22.4	-5.4
D, $10^{-10}$	1.2	2.9	-20.0	2.7
R1, мкс дуги	-130	-6	-57	-200
R2, мкс дуги	218	60	171	-119
R3, мкс дуги	-17	-13	-18	4

Для анализа точности полученных каталогов и возможности их использования в ежедневной обработке РСДБ наблюдений были вычислены ряды ПВЗ на базе полученных каталогов. Вычисления ПВЗ по 822 сессиям программ IVS-R1 и IVS-R4 с использованием полученных каталогов производились с помощью альтернативного пакета службы ИПА РАН OCCAM/GROSS. Результаты тестирования полученных каталогов путем обработки РСДБ наблюдений независимым пакетом представлены в таблице 4.

Показано, что результаты определения ПВЗ с новыми каталогами лучше (меньше взвешенные разности по сравнению с международным комбинированным рядом), чем с использованием старых опорных каталогов ITRF2005 и ICRF-Ext.2 и не уступают в точности результатам, полученным с новыми международными каталогами ICRF2 и VTRF2008.

Таблица 4. Взвешенные СКО разностей рядов ПВЗ по сравнению с международным рядом IERS Bulletin A finals. Ряды ПВЗ вычислены пакетом OCCAM/GROSS с использованием каталогов координат станций и радиоисточников, полученных в данной работе (iaa2009b.trf/iaa008c), а также международных каталогов ITRF2005/ICRF-Ext.2 и VTRF2008/ICRF2.

Параметр	iaa2009b.trf/iaa008c	ITRF2005/ICRF.ext2	VTRF2008/ICRF2
Хр, мкс дуги	83	89	86
Ур, мкс дуги	82	88	81
UT1, мкс	4.3	4.7	4.3
Хс, мкс дуги	97	100	97
Ус, мкс дуги	111	110	111

В параграфе, посвященном небесной системе координат, описывается полученный каталог координат радиоисточников в сравнении с зарубежными аналогами, а также участие в рабочей группе по построению ICRF2. В таблице 5 представлены результаты сравнения полученного каталога радиоисточников с другими каталогами, представленными в рамках рабочей группы ICRF2 (mao008a — Main Astronomical Observatory, Kiev; aus007 — Geoscience Australia, opa008b — Observatoire de Paris, usn010b — United States Naval Observatory, maoC08a — комбинированный каталог).

Таблица 5. Взвешенные СКО разностей между каталогами (из IERS TN35), микросекунды дуги, (склонение/прямое восхождение).

каталог	aus007a	bkg001a	gsf007b	iaa008c	mao008a	opa008b	usn010b
maoC08a	155/208	39/37	27/30	45/42	43/54	27/39	27/41
aus007a		137/200	141/218	139/204	139/238	141/229	135/221
bkg001a			40/39	47/47	59/61	42/42	42/69
gsf007b				49/64	41/46	15/15	24/29
iaa008c					59/52	46/40	49/49
mao008a						41/46	46/55
opa008b							24/28

Предложена и реализована методика выборки в полученном каталоге определяющих источников, отличная от использованной в конечной версии ICRF2, приводятся результаты сравнения методик.

Последний параграф посвящен проблеме определения и переменности антенных выносов станций. Показана переменность антенного оффсета станции "Светлое", показано влияние принятого в обработке значения антенного оффсета на систематические ошибки определения ПВЗ по данным наблюдений локальной сети станций.

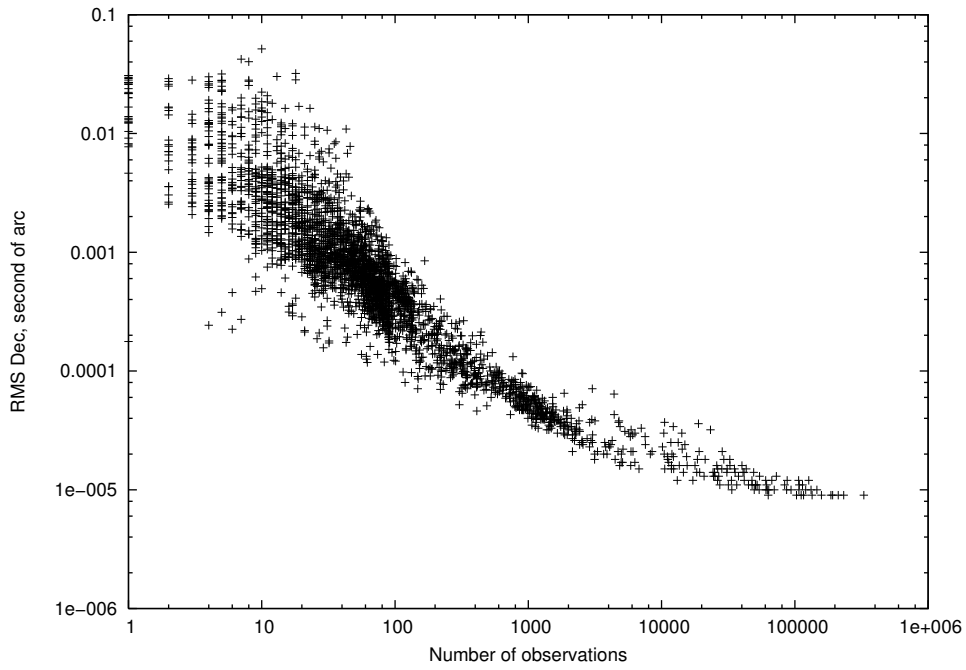


Рис. 1. Распределение формальных ошибок полученного каталога радиоисточников в склонении

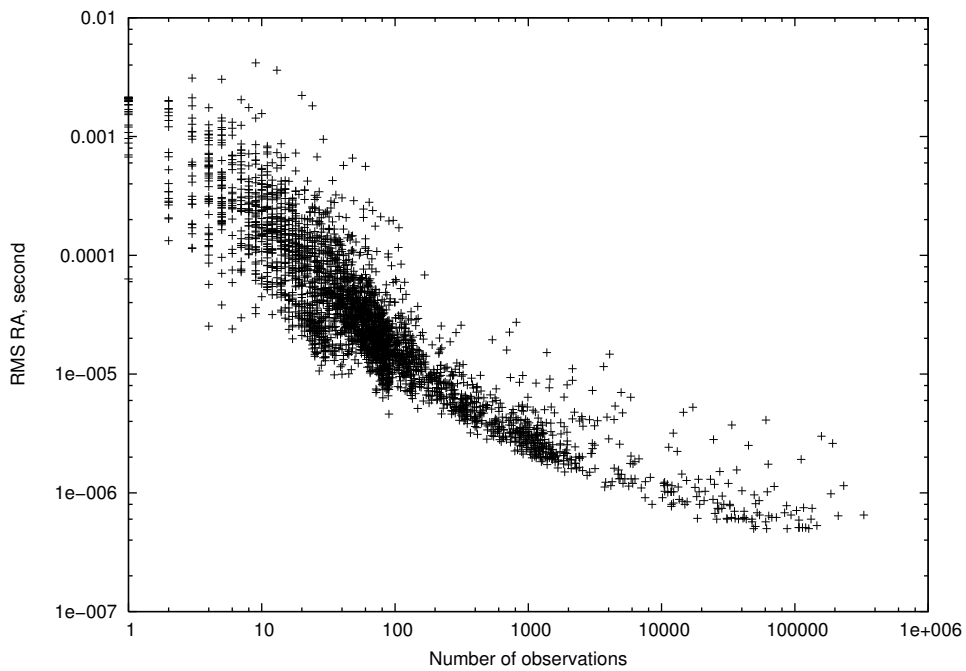


Рис. 2. Распределение формальных ошибок каталога в прямом восхождении

Результаты четвертой главы опубликованы в работах [A2], [A1], [A11] [A13].

**В Заключении** сформулированы основные результаты, полученные в

диссертационной работе.

## Список публикаций

- [A1] The Second Realization of the International Celestial Reference Frame by Very Long Baseline Interferometry, Presented on behalf of the IERS / IVS Working Group, Ed. by A. Fey, D. Gordon. — Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2009.
- [A2] *С. Л. Курдубов, В. С. Губанов.* Основные результаты глобального уравнивания РСДБ-наблюдений // *Письма в астрономический журнал.* — 2011. — Т. 37, №4. — С. 294–302.
- [A3] *В. С. Губанов, С. Л. Курдубов.* О глобальном уравнивании РСДБ-наблюдений // *Труды ИПА РАН.* — 2005. — Вып. 13. — С. 434–439.
- [A4] *В. С. Губанов, С. Л. Курдубов.* О глобальном уравнивании РСДБ-наблюдений. // "Фундаментальное и прикладное координатно-временное обеспечение"(КВО-2005), Санкт-Петербург, 11-15 апреля 2005 г., Тезисы докладов. — СПб.: ИПА РАН, 2005. — С. 203–204.
- [A5] *А. М. Финкельштейн, Е. А. Скурихина, И.А. Рахимов и др.* CONT05: Предварительные результаты // *Труды ИПА РАН.* — 2006. — Вып. 14. — С. 3–19.
- [A6] *В. С. Губанов, С. Л. Курдубов, И. Ф. Суркис.* Новая версия пакета QUASAR для обработки РСДБ-наблюдений // *Труды ИПА РАН.* — 2007. — Вып. 16. — С. 61–82.
- [A7] *С. Л. Курдубов, Е. А. Скурихина.* Подготовка пакета QUASAR для работы в службе ПВЗ ИПА РАН // *Труды ИПА РАН.* — 2007. — Вып. 16. — С. 231–237.
- [A8] *S. Kurdubov, E. Skurikhina.* Source selection for ICRF defining set from source positions time series // Proceedings of the "Journées 2008 Systemes de reference spatio-temporels-/ Ed. by M. Soffel, N. Capitaine. — Lohrman-Observatorium and Observatoire de Paris, 2009. — P. 233–234.
- [A9] *S. Kurdubov, E. Skurikhina.* Source Selection for NNR Constraints from Source Position Time Series // «Measuring the Future», IVS 2008 General Meeting Proceedings / Ed. by A. Finkelstein, D. Behrend. — SPb: Nauka, 2008. — P. 279–283.

- [A10] *C. Л. Курдубов, Е. А. Скурихина.* Участие центра анализа ИПА РАН в подготовке следующей реализации ICRF // КВНО-2009, сборник тезисов. — СПб.: ИПА РАН, 2009. — С. 127–128.
- [A11] *S. Kurdubov, E. Skurikhina.* Dependence of Catalogue Orientation Parameters Accuracy from Sources Set Selection // Proceeding of the 19th European VLBI for Geodesy and Astrometry Working Meeting / Ed. by P. C. G. Bourda, A. Collioud. — Bordeaux: 2009. — P. 5–9.
- [A12] *S. Kurdubov, N. Panafidina.* Scale difference between various TRF solutions // Proceeding of the 19th European VLBI for Geodesy and Astrometry Working Meeting / Ed. by P. C. G. Bourda, A. Collioud. — Bordeaux: 2009. — P. 23–27.
- [A13] *S. Kurdubov, E. Skurikhina.* Antenna Axis Offset Estimation from VLBI // IVS 2010 General Meeting Proceedings “VLBI2010: From Vision to Reality” / Ed. by D. Behrend, K. D. Baver. — NASA/CP-2010-215864, 2010. — P. 247–250.
- [A14] *Z. Malkin, E. Skurikhina, A. Melnikov et al.* IAA VLBI Analysis Center Report 2004 // IVS 2004 Annual Report / Ed. by D. Behrend, K. D. Baver, N. R. Vandenberg. — NASA/TP-2005-212772, 2005. — P. 215–218.
- [A15] *Z. Malkin, E. Skurikhina, J. Sokolova et al.* IAA VLBI Analysis Center Report 2005 // IVS 2005 Annual Report / Ed. by D. Behrend, K. D. Baver. — NASA/TP-2006-214136, 2006.
- [A16] *E. Skurikhina, S. Kurdubov, V. Gubanov.* IAA VLBI Analysis Center Report 2006 // IVS 2006 Annual Report / Ed. by D. Behrend, K. D. Baver. — NASA/TP-2007-214151, 2007.
- [A17] *В. С. Губанов, С. Л. Курдубов, Малкин З. М. и др.* Обработка РСДБ-наблюдений в ИПА РАН // "Фундаментальное и прикладное координатно-временное обеспечение" (КВО-2005), Санкт-Петербург, 11-15 апреля 2005 г., Тезисы докладов. — СПб.: ИПА РАН, 2005. — С. 99–100.
- [A18] *А. М. Финкельштейн, И. С. Гаязов, С. Л. Курдубов и др.* Определение ПВЗ из наблюдений на РСДБ-сети «КВАЗАР-КВО» // КВНО-2009, сборник тезисов. — СПб.: ИПА РАН, 2009. — С. 67–71.
- [A19] *С. Л. Курдубов.* Ковариационный анализ стохастическиз параметров модели РСДБ-наблюдений // *Труды ИПА РАН.* — 2006. — Вып. 14. — С. 138–157.



- [A20] *V. S. Gubanov, Yu.L. Rusinov, I.F. Surkis et al.* Project: Global Analysis of 1979-2004 VLBI Data // International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2004 General Meeting Proceedings / Ed. by N. R. Vandenberg, K. D. Baver. — Ottawa, Canada: NASA/CP-2004-212255, 2004. — P. 315–319.
- [A21] *S. Kurdubov.* QUASAR software in IAA EOP service: Global Solution and Daily SINEX // Proceeding of the 18th European VLBI for Geodesy and Astrometry Working Meeting / Ed. by J. Bohm, A. Pany, H. Schuh. — GEOWISSENSCHAFTLICHE MITTEILUNGEN, 2007. — P. 79–84.

## Цитируемая литература

- [1] *T. A. Clark.* Geodetic interferometry submission for the IUGG Quadrennial Report // *Reviews of Geophysics and Space Physics.* — 1979. — Vol. 17. — P. 1430–1437.
- [2] *A. E. E. Rogers, R. J. Cappallo, H. F. Hinteregger et al.* Very-long-baseline radio interferometry - The Mark III system for geodesy, astrometry, and aperture synthesis // *Science.* — 1983. — Vol. 219. — P. 51–54.
- [3] *C. Ma, T. A. Clark, J. W. Ryan et al.* Radio-source positions from VLBI // *Astronomical Journal.* — 1986. — Vol. 92. — P. 1020–1029.
- [4] *C. Ma, E.F. Arias, T.M. Eubanks et al.* The International Celestial Reference Frame as realized by Very Long Baseline Interferometry // *Astron. J.* — 1998. — Vol. 116. — P. 516–546.
- [5] *C. Ma.* The International Celestial Reference Frame (ICRF) and the Relationship Between Frames // International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2000 General Meeting Proceedings / Ed. by F. Takahashi. — 2000. — P. 52.
- [6] *G. Elgered, J. L. Davis, T. A. Herring, I. I. Shapiro.* Geodesy by radio interferometry - Water vapor radiometry for estimation of the wet delay // *Journal of Geophysical Research.* — 1991. — Vol. 96. — P. 6541–6555.
- [7] *A. R. Thompson, J. M. Moran, G. W. Swenson.* Interferometry and synthesis in radio astronomy. — New York: Wiley-Interscience, 1986. — P. 554.
- [8] *O. J. Sovers, J. L. Fanelow, Chr. S. Jacobs.* Astrometry and geodesy with radio interferometry: experiments, models, results // *Reviews of Modern Physics.* — 1998. — Vol. 70, no. 4. — P. 1393–1454.

- [9] *Г. Мориц*. Современная физическая геодезия. — Москва: Наука, 1983. — С. 392.
- [10] *В. С. Губанов*. Обобщенный метод наименьших квадратов. Теория и применение в астрометрии. — СПб: Наука, 1997. — С. 318.
- [11] *И. Ф. Суркис*. Обработка РСДБ наблюдений: Программный пакет QUASAR. III. Структура и схема функционирования. // *Сообщения ИПА РАН*. — 2002. — Вып. 143.
- [12] *N. Capitaine*. Recent developments in the concepts and models for fundamental astronomy // SF2A-2004: Semaine de l'Astrophysique Francaise / Ed. by F. Combes, D. Barret, T. Contini, F. Meynadier, & L. Pagani. — 2004. — P. 7–11.
- [13] *J. Boehm, B. Werl, H. Schuh*. Troposphere mapping functions for GPS and very long baseline interferometry from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts operational analysis data // *J. Geophys. Res.* — 2006. — Vol. 111. — P. B02406.
- [14] *L. Petrov, J.-P. Boy*. Study of the atmospheric pressure loading signal in very long baseline interferometry observations // *Journal of Geophysical Research*. — 2004. — Vol. 109, no. B3. — P. 405.