

Министерство образования и науки Украины
Научно-исследовательский институт
«Николаевская астрономическая обсерватория»

На правах рукописи

УДК 521.9, 521.91, 521.181.4

Майгурова Надежда Васильевна

УТОЧНЕНИЕ СВЯЗИ РАДИО И ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМ
КООРДИНАТ НА ОСНОВЕ ПЗС-НАБЛЮДЕНИЙ ИЗБРАННЫХ
ВНЕГАЛАКТИЧЕСКИХ РАДИОИСТОЧНИКОВ
В ОПТИЧЕСКОМ ДИАПАЗОНЕ

01.03.01 – Астрометрия и небесная механика

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико–математических наук

Научный руководитель:
Пинигин Геннадий Иванович
доктор физ.-мат. наук,
профессор

Киев – 2006

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ.	4
ВВЕДЕНИЕ	6
ГЛАВА 1. ОПОРНЫЕ СИСТЕМЫ ОТСЧЕТА И ИХ СОГЛАСОВАНИЕ В АСТРОНОМИИ	
1.1 Построение и задание небесных опорных систем	17
1.2 Обзор оптических опорных систем наземной астрометрии	21
1.3 Опорная система ICRS и каталог ICRF.	27
1.4 Опорная система HCRF.	31
1.5 Привязка системы каталога HIPPARCOS к ICRS	36
1.5 Краткие выводы	40
ГЛАВА 2. НАБЛЮДЕНИЯ: ПРОГРАММА И АППАРАТУРА	
2.1 Телескопы, использовавшиеся для наблюдений ERS	41
2.1.1 Российско-турецкий 1.5-м телескоп (RTT150)	42
2.1.2 Мультиканальный телескоп НАО	47
2.1.3 Телескоп Юнаньской обсерватории (1м)	49
2.2 Проведение совместной программы наблюдений и анализ полученного материала	52
2.5 Краткие выводы	55
ГЛАВА 3. РЕДУКЦИЯ НАБЛЮДЕНИЙ	
3.1 Предварительная обработка ПЗС- кадров	57
3.1.1 Процедура учета остаточного сигнала после считывания изображения.	57

3.1.2 Калибровка темного кадра	59
3.1.3 Учет кадра плоского поля	63
3.2 Астрометрическая редукция наблюдений.	65
3.2.1 Поиск объектов и определение их координат в системе матрицы.	65
3.2.2 Определение сферических координат объектов.	68
3.2.3 Анализ существующих астрометрических каталогов, использовавшихся для получения каталога оптических положений. Оценка внутренней и внешней сходимости.	73
3.5 Краткие выводы.	81

ГЛАВА 4. ПАРАМЕТРЫ ОРИЕНТАЦИИ ОПТИЧЕСКОЙ И РАДИО СИСТЕМ КООРДИНАТ.

4.1 Современное состояние проблемы связи оптической и радио систем координат.	82
4.2 Статистический анализ массива разностей (оптика - радио).	85
4.3 Получение параметров связи оптической и радио систем координат	88
4.5 Краткие выводы	91

ГЛАВА 5. КАТАЛОГ ЗВЕЗД 10 - 21^m. В ПЛОЩАДКАХ ВОКРУГ РАДИОИСТОЧНИКОВ.

5.1 Методика получения каталога слабых звезд в площадках вокруг радиоисточников	92
5.2 Сравнение с другими каталогами (оценка внешней и внутренней точности полученных результатов)	96
5.3 Краткие выводы	99

ЗАКЛЮЧЕНИЕ	100
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	101

ПРИЛОЖЕНИЕ 1	113
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	136

СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ

ADU (analog–digital unit)	единица измерения отсчетов в пикселе ПЗС
Bias	уровень шума считывания сигнала с ПЗС – матрицы
ERS, ВРИ	внегалактические радиоисточники
Fit-RMS	отклонение профиля реального изображения от теоретического распределения по Гауссу
FK1, 2, 3, 4, 5, 6	серия фундаментальных каталогов Немецкого астрономического общества
FWHM	полная ширина на половине максимума фотометрического профиля звездного изображения
HC	HIPPARCOS catalogue, космический каталог, полученный спутником “Гиппархос”
HCRF	HIPPARCOS Celestial Reference Frame
ICRF	International Celestial Reference Frame
ICRS	Международная небесная опорная система координат Международная небесная опорная система отсчета
MERLIN	Радиоинтерферометрическая сеть радиосвязанных в реальном времени антенн
S/N	отношение сигнал/шум
USNO	United States Naval Observatory, Военно-Морская

	обсерватория Соединенных Штатов
USNO-A2.0	Каталог, полученный в обсерватории US Naval Observatory (версия A2.0)
USNO-B1	Каталог, полученный в обсерватории US Naval Observatory (версия B1)
VLBI, РСДБ	Very Long Baseline Interferometry, радиоинтерферометрия с длинными базами
зв.вел.	звездная величина
МАС	Международный астрономический союз
МНК	метод наименьших квадратов
ПЗС	прибор с зарядовой связью
угл. сек.	угловая секунда
ИСЗ	искусственный спутник Земли

ВВЕДЕНИЕ

Основной задачей астрометрии является установление со все более и более высокой точностью инерциальной системы координат в астрономии и определение в ней положений и движений некоторого числа опорных небесных объектов (звезд, квазаров, ядер радиогалактик и др.), необходимых для отнесения к указанной системе координат и движений всех небесных тел. В настоящее время в астрометрии используется два базовых понятия: опорная система координат и опорная система отсчета (в англоязычной литературе соответственно *reference system* и *reference frame*). Опорная система координат представляет собой абстрактную математическую конструкцию, которая в рамках существующих физических теорий в зависимости от вида решаемых задач наделяется конкретными физическими свойствами, а опорная система отсчета создается астрометристами и является материализацией опорной системы координат, не совпадающей с ней по двум основным причинам:

- вследствие неизбежного существования ошибок наблюдателей (отличие инструментальных систем отсчета от локальных систем координат)
- неполноты редукций наблюдений от локальных к глобальным системам, возникающая из-за ограниченности наших представлений о Вселенной [2,3].

С 1 января 1998 года по решению 23 Генеральной ассамблеи МАС в качестве стандарта в астрономии принята новая система ICRS (*International Celestial Reference System*) [107]. Практической реализацией новой системы стал каталог ICRF (*International Celestial Reference Frame*), который представлен

положениями 212 “определяющих” (define) внегалактических радиоисточников, равномерно распределенных по всей небесной сфере. Кроме списка определяющих объектов, каталог включает еще две группы: 294 кандидата (candidate) и 102 (other) [73]. Наблюдения радиоисточников получены на радиоинтерферометрах со сверхдлинными базами (РСДБ). Точность новой внегалактической системы лучше $0.001''$, кроме того она строится на принципиально другой идее. Каталог FK5 и его предшественники FK4, FK3 реализовывали опорную систему координат, построенную на понятии динамического равноденствия. Нуль-пункты отсчета зависели от определения двух основных плоскостей – средней плоскости экватора и плоскости эклиптики. Склонения отсчитывались от плоскости экватора, которая определялась вращением Земли. Нуль-пункт отсчета прямых восхождений находился в точке пересечения плоскости экватора и плоскости эклиптики, которая определяется обращением Земли вокруг Солнца. Так как обе эти плоскости движутся в пространстве вследствие лунно-солнечной и планетной прецессии, то зафиксировать направление в пространстве основных осей опорной системы координат можно было только на определенную среднюю эпоху. Полученные координаты относились к среднему равноденствию и среднему экватору фиксированной эпохи. Перевод координат на другую эпоху требовал учета прецессии и зависел от значений целого ряда других фундаментальных постоянных (массы планет, спутников и т.д.). Эти постоянные периодически пересматривались МАС.

В новой системе направления осей фиксируются в пространстве раз и навсегда и впредь их направления не меняются. Выбор начала и направлений координатных осей определены в 1991 году резолюциями МАС [106], в которых указывается, что основная плоскость новой небесной системы координат должна быть как можно ближе к плоскости среднего экватора на эпоху J2000.0, а начало отсчета в этой плоскости должно быть как можно ближе к динамическому равноденствию эпохи J2000.0. Это сделано с

точностью, которая превышает точность наземных оптических наблюдений, для обеспечения непрерывности в процессе смены систем отсчета. Началом отсчета системы ICRS является барицентр Солнечной системы.

Внегалактические радиоисточники, которые составляют каталог ICRF, настолько далеки, что можно говорить об отсутствии у них собственных движений на современном уровне достигнутой точности измерений. Это позволяет считать новую систему почти инерциальной.

В качестве основной реализации ICRF в оптическом диапазоне, где проводится большая часть астрономических исследований, согласно той же резолюции МАС, принят каталог HIPPARCOS, полученный в результате космической миссии спутника HIPPARCOS и содержащий информацию о 118218 звезд до 12 звездной величины. Точность оптических положений на среднюю эпоху наблюдений J1991.25 в каталоге HIPPARCOS составляет менее 1 mas, точность собственных движений 0.25 mas в год. Оптическая система, связанная с каталогом HIPPARCOS, получила название HCRF. Расширение оптической системы HCRF на большее количество и в область более слабых звезд осуществляют опорные каталоги TYCHO [59], TYCHO2 [60] и UCAC2 [103]).

Эти две системы (HCRF и ICRF) содержат всего один общий объект – яркий квазар 3C 273B, поэтому установить прямую связь между ними невозможно. Привязка результатов, полученных спутником HIPPARCOS к внегалактической системе отсчета (так иногда называют ICRS) была осуществлена с помощью сложных процедур, включающих в себя:

- измерение координат и собственных движений радиозвезд в радиодиапазоне методами РСДБ и в оптическом диапазоне непосредственно на спутнике HIPPARCOS;
- оптические наблюдения компактных радиоисточников в системе предварительного каталога HIPPARCOS;

- измерения угловых расстояний между звездами каталога HIPPARCOS и радиоисточниками с помощью Космического телескопа имени Хаббла использование собственных движений звезд, “абсолютизированных” относительно галактик использование параметров ориентации Земли, полученных методами классической астрометрии в системе каталога HIPPARCOS и методами РСДБ по программе Международной службы вращения Земли [2].

Над этой задачей работало более десятка научных групп, что позволило осуществить привязку каталога HIPPARCOS на среднюю эпоху наблюдения 1991.25 по координатам с точностью 0.6 mas, при этом оценка остаточного вращения составила 0.25 mas в год [66].

Актуальность темы. Несмотря на достигнутую высокую точность связи систем HCRF и ICRF, на момент средней эпохи наблюдения каталога HIPPARCOS эта задача остается актуальной в силу следующих причин:

- точность связи падает со временем вследствие того, что звезды каталога HIPPARCOS имеют невысокую точность определения собственных движений, по причине краткосрочности эксперимента (3.5 года);

- ПЗС-матрицы, которые приобрели широкое распространение при наблюдениях в оптическом диапазоне, имеют малые поля зрения, что приводит к необходимости использования для редукированных промежуточных систем координат, которые реализованы на каталогах содержащих достаточное количество опорных звезд в поле зрения, но с точностью существенно ниже первичной реализации системы HCRF;

- квазары и другие внегалактические объекты, составляющие каталог ICRF могут иметь сложную структуру и нестабильность излучения, что приводит к неопределенности центра излучения (центры максимума радио и оптической эмиссии могут различаться) [89].

Связь работы с научными программами, планами, темами. Диссертационная работа является составной частью следующих научно-

исследовательских работ Николаевской астрономической обсерватории, утвержденных Министерством науки и образования Украины:

Темы «БЕТА» – “Вдосконалення зоряної системи координат із спостережень на меридіанних інструментах з сучасними системами реєстрації та контролю, 1997-1999рр.”, ответственный исполнитель этапа, разработка программ и методик наблюдений,

Темы «СВЯЗЬ» – «Зв'язок радіоінтерферометричної й оптичної небесної системи координат», 1998-1999, ответственный исполнитель, разработка методики и обработка наблюдений

Темы «Сфера» – «Поширення оптичної опорної системи координат ICRF на слабкі зірки у вибраних площадках і уточнення її зв'язку з радіо системою координат ICRF». № 0101U000218, фундаментальная (основная), 2000-2003, ответственный исполнитель этапа, разработка методики редукций ПЗС –кадров и получения астрометрических координат.

- Наблюдения оптических компонент внегалактических радиоисточников были выполнены в рамках международного проекта по уточнению параметров ориентации опорных систем согласно следующим договорам о сотрудничестве: «Определение точных положений 44 внегалактических радиоисточников по наблюдениям на 1.5 метровом телескопе Шанхайской астрономической обсерватории в системе опорных звезд Аксиального меридианного круга Николаевской астрономической обсерватории», согласно Протоколу N1 сессии китайско-украинской комиссии по научно-техническому сотрудничеству от 02.06.1997г. в г. Пекин (Китай), согласно Приказа Миннауки Украины N114 от 14.04.98г..

•«Уточнение углов связи радио и оптической опорных систем координат на основе ПЗС-наблюдений расширенного списка внегалактических источников Николаевской и Шанхайской астрономическими обсерваториями », М/267-2003.

•Совместный проект о международном сотрудничестве – Joint Project «Improvement of the link between radio and optical reference frames» (Международная конференция «Extension and Connection of Reference Frames Using Ground Based CCD Technigue», MAO,2001г.[15])

Цели, задачи и методы исследований. Целью данной работы являлось:

- получение оптических положений внегалактических радиоисточников, которые входят в список ICRF,
- расширение каталога HIPPARCOS на слабые звезды (до 21^m звездной величины) путем создания дифференциального каталога звезд в площадках вокруг радиоисточников
- получение параметров связи оптической опорной системы координат (HCRF) с радио системой координат (ICRF), используя полученные оптические положения внегалактических объектов списка ICRF.

В связи с этим намечалось решение следующих задач:

1) Разработка и улучшение методических и программных средств для составления программ наблюдений внегалактических радиоисточников и звезд в площадках вокруг них с учетом проникающей способности различных телескопов и параметров ПЗС матриц, которыми они оснащены.

2) Обработка всех полученных наблюдений до получения экваториальных координат всех объектов и создание дифференциального каталога оптических положений внегалактических радиоисточников.

3) Получение параметров взаимной ориентации радио и оптической опорных систем, анализ и интерпретация полученных данных.

4) Создание дифференциального каталога положений слабых звезд в площадках вокруг радиоисточников.

Объект исследования: внегалактические радиоисточники списка ICRF.

Предмет исследования: Международная небесная опорная система координат, ее реализации в радио и оптическом диапазоне и их согласование.

Методы исследования: метод ПЗС-регистрации излучения; методы фотографической астрометрии и математический аппарат метода наименьших квадратов (МНК). Для оценки ошибок полученных результатов использовались методы теории вероятности и статистического анализа.

Научная новизна полученных результатов. В ходе выполнения работы получены следующие новые результаты:

- получены ПЗС наблюдения более 300 площадок вокруг внегалактических источников списка ICRF.
- создан дифференциальный каталог оптических положений 213 внегалактических радиоисточников, для 142 из них положения получены с использованием опорных звезд каталога UCAC2. Средняя точность положений радиоисточников в полученном каталоге составляет 38 и 37 mas по прямому восхождению и склонению.
- получен дифференциальный каталог положений звезд 10 - 21 звездной величины в площадках вокруг радиоисточников, который может быть использован в качестве расширения оптической системы HCRF на слабые звезды.
- с использованием точных астрометрических положений внегалактических радиоисточников, полученных в ходе выполнения данной работы, были найдены параметры связи оптической и радио опорных систем отсчета: $\omega_x = -4.1 \pm 6.1$, $\omega_y = 1.9 \pm 5.8$, $\omega_z = 12.4 \pm 4.9$ mas . Показана возможность улучшения уровня точности полученных параметров связи путем привлечения позиционных данных других авторов [35, 36] .

Практическое значение полученных результатов. Практическая ценность работы определяется:

- оригинальными астрометрическими данными для оптических компонент внегалактических радиоисточников списка ICRF;

- возможностью использования полученных данных при постановке новых научных задач и при планировании космических миссий;
- полученные параметры связи оптической и радио систем координат, могут быть использованы для уточнения таких важных параметров как положение экватора оптической системы и исследования ее систематических ошибок ;
- полученные астрометрические положения звезд в площадках вокруг радиоисточников могут использоваться для текущих и будущих ПЗС-наблюдений
- полученные астрометрические положения оптических компонент внегалактических радиоисточников могут быть использованы для уточнения, изменения и расширения основного списка объектов, которые закрепляют ICRS на небесной сфере
- во время выполнения работы был создан ряд вычислительных программ, необходимых для работы с наиболее широко используемыми астрометрическими каталогами (USNO A2.0, ERLCAT).

Личный вклад автора. Соискатель принимала участие в получении всех результатов, которые приведены в диссертации: планировании работы и программы наблюдений, наблюдениях (на МКТ МАО), создании программного обеспечения по работе с астрометрическими каталогами и созданию баз данных положений радиоисточников и звезд. Редукция измерений и получение положений оптических компонент радиоисточников и звезд в площадках вокруг них были выполнены автором в объеме 70 %. Получение параметров связи, оценка систематических и случайных ошибок и интерпретация полученных результатов выполнены самостоятельно.

Соискателем опубликовано 18 работ в соавторстве.

В работе [85, 13, 16] соискатель выполнила астрометрическую редукцию данных наблюдений. В работах [39, 86, 87, 95] соискатель выполнила работу по выбору и анализу площадок из каталога АМС 1В для сводного каталога. В работах [33, 34, 15] соискателю принадлежат 70% предварительной обработки и астрометрической редукции наблюдательных данных, систематизация данных результатов обработки, получение параметров связи оптической и радио систем, анализ разностей и оценка случайных и систематических ошибок каталогов UCAC2 и USNO B1.0. В работе [74, 84, 32] соискателем выполнена предварительная и астрометрическая редукция наблюдательных данных на 70%, вычислены предварительные параметры связи двух систем с использованием каталога USNO A2.0, в работе [74] - проведен сравнительный анализ точности наблюдательного материала, полученного на разных телескопах. В работе [97] соискатель выполнила анализ площадок каталога АМС 1В на предмет наличия в них опорных звезд для обработки кадров размером 6' x 6'. В работах [95, 94, 32] соискателю принадлежит предварительная и астрометрическая редукция наблюдательных данных на 70%.

Апробация результатов диссертации. Результаты диссертационной работы были доложены на научных семинарах и заседаниях Ученого совета НИИ “Николаевская обсерватория” и были представлены на конференциях в Украине и за рубежом:

- Международная конференция “Astronomy in Ukraine 2000 and Beyond”, Киев, 5- 8 июня, 2000 г.,

- Всероссийская астрономическая конференция, 6-12 августа 2001 г., Санкт-Петербург,

- Международная конференция “Extension and Connection of Reference Frames Using Ground Based CCD Technique” г. Николаев, 10-13 октября, 2001 г.,

- Journess-2002, Bucharest, 25 - 28 September, 2002,

- Journess-2003, S-Petersburg, 22-25 September, 2003,

- XXVth General Assembly of the IAU 13-26 July 2003, Sydney, Australia,

- Workshop “Optical and Radio Sources – Location and Connection”, Nikolaev, 2003,

- Международная конференция “Астрономія в Україні – минуле, сьогодення і майбутнє”, г. Киев, 15-17 июля 2004 г.,

- Всероссийская астрономическая конференция “Горизонты Вселенной”, г. Москва, 3-10 июня, 2004 г.,

- “Dynamics and Physics of Solar System System”, г. Киев, 22-26 мая 2005 г.,

- Third meeting of the Sub-regional European Astronomical Committee, Bucharest, Romania, September, 16-18, 2005.

Публикации. Результаты, приведенные в диссертации, опубликованы в 18 научных статьях в профессиональных журналах, в том числе 5 [34, 39, 85-87] – в ведущих отечественных и зарубежных журналах: “Кинематика и физика небесных тел” и “Romanian Astronomical Journal”.

ГЛАВА 1

ОПОРНЫЕ СИСТЕМЫ ОТСЧЕТА И ИХ СОГЛАСОВАНИЕ В АСТРОНОМИИ

Фундаментальное координатно-временное обеспечение есть область знаний о пространственных координатных системах, шкалах времени и соотношениях между ними. Уровень ее развития в современное время определяется уровнем развития целого ряда наук о Земле и Космосе. Астрометрия занимает в этом ряду одно из главных мест, поскольку является основным источником координатной информации. В работе [4] перечислены основные задачи пространственно-временного обеспечения, которые, по мнению авторов работы, состоят в следующем :

- установление небесной опорной системы координат;
- установление динамической подсистемы небесной опорной системы координат с учетом гравитационного влияния всех тел Солнечной системы;
- установление земной опорной системы координат ;
- определения параметров взаимной ориентации этих систем - постоянный мониторинг вращательного движения Земли; определение локальных и глобальных движений точек земной коры;
- установление связи между различными и, прежде всего, радиоастрономическими и оптическими, небесными опорными системами координат;
- поддержание глобальной шкалы атомного времени.

В этом разделе рассматриваются вопросы построения небесной системы координат и установления связи между двумя ее небесными реализациями: радиосистемы ICRF и оптической HCRF.

1.1 Построение и задание небесных опорных систем.

Астрометрия – наука, которая на основе получения координат небесных тел и изучения вращения Земли, понимаемого в широком смысле, создает опорную инерциальную пространственную систему координат и согласованный комплекс фундаментальных астрономических постоянных, реализующий связь этой системы с Землей [17, с.10]. В связи с этим выбор, задание и построение основных координатных систем был и остается важной задачей фундаментальной астрометрии. В работе [20] предлагается разграничить эти понятия. Под **заданием** координатной системы следует понимать словесное описание, сопровождаемое пояснительным рисунком, который определяет выбор начала и направление осей системы координат. **Заданием** системы координат указывается какое тело принимается за тело отсчета и каким образом с ним связывается система координат. **Построение** координатной системы определяет последовательность действий, посредством которых визирной линии инструмента может быть придано направление, заданное в этой системе, в частности, направление любой из ее осей. Как отмечено в работе [26, 27], на практике задание и построение систем координат представляют собой сложный многоступенчатый процесс, включающий в себя априорный выбор начала и направления осей системы координат, выполнение определенного состава наблюдений небесных тел (из разных точек и в разные эпохи), взаимное согласование результатов этих наблюдений и отнесение их к выбранной системе координат, что непосредственно связано с вопросами реализации такой системы. В связи с этим в астрометрии разграничивают два базовых понятия – опорная система координат и опорная система отсчета (reference system и reference frame в англоязычном варианте) [3, 10]. Первая есть абстрактная математическая конструкция, которая в рамках различных физических теорий наделяется различными физическими свойствами, в то время как вторая создается астрометристами и является всего лишь

реализацией системы координат, не совпадающей с ней. Детальному обсуждению этих понятий посвящены работы [2, 3], в которых сформулированы требования, которым должно удовлетворять задание и построение основных координатных систем на современном этапе развития астрономии и геодинамики :

1. Эти системы должны быть строго и однозначно заданы, причем способы их задания должны быть простыми и методологически независимыми.
2. Задание и построение основных координатных систем, по возможности, не должны зависеть от астрофизических и геофизических гипотез.
3. Точность построения основных координатных систем должна быть близкой к $0.001''$, т.е. $5 \cdot 10^{-9}$ рад (что на поверхности Земли составляет несколько сантиметров).
4. Движение земной системы координат должно как можно ближе соответствовать поступательно – вращательному движению Земли в целом относительно инерциальной системы отсчета.

В принципе для описания всех астрономических событий достаточно одной системы, однако на практике для описания разного класса объектов используют различные системы координат. В работе [57] перечислены семь основных типов координатных систем (КС), которые являются следствием иерархической структуры Вселенной. Авторы выделяют следующие типы: космологическая, внегалактическая, галактическая, барицентрическая Солнечная система, геоцентрическая, топоцентрическая, геоцентрическая и топоцентрическая вращательные координатные системы. Каждый из этих типов используется для решения своих задач. Положения квазаров и радиогалактик определяются методами радиоинтерферометрии с использованием внегалактической КС. Создание звездных каталогов относится к разным типам галактических КС. Эфемериды планет и малых тел Солнечной

системы вычисляются в барицентрической системе, а координаты искусственных спутников – в топоцентрической, вращательные системы используются для задания координат станций наблюдений за ИСЗ.

Кроме этого вышеперечисленные системы имеют разные начало и направления основных осей. Начало всех перечисленных координатных систем (за исключением топоцентрической, которая связана непосредственно с осями инструмента наблюдений) помещают в центр масс соответствующих астрономических подсистем. Поскольку большая часть наблюдений небесных тел выполняется с Земли, которая сама в свою очередь совершает сложное движение в пространстве, для перевода наблюдений в другую систему необходимо выполнение достаточно сложных редуций. Основные системы координат ничем не отмечены на небесной сфере, поэтому для использования любой системы координат при решении астрономических задач необходима ее практическая материализация в виде списка некоторых опорных объектов с заданными положениями. Систему координат можно считать идеальным образом системы отсчета, которая отличается от нее за счет всегда существующих ошибок наблюдений и ошибок редуций, вызванных ограниченностью наших знаний о Вселенной.

Поскольку в астрометрии непосредственно определяются только углы, а не расстояния до небесных объектов, то теоретически любую небесную опорную систему (полюс, основную плоскость и начало отсчета) можно было бы определить двумя фиксированными точками. На практике для определения используется гораздо более обширный список объектов, равномерно разнесенный по координатной сфере, так как это улучшает точность задания осей и возможность привязки к опорным объектам в любом месте небесной сферы. Определить основные плоскости и оси системы отсчета можно двумя способами: кинематическим и динамическим.

Кинематический способ построения невращающейся системы небесных координат предполагает, что сумма абсолютных движений опорных объектов равна нулю. Если существуют выбранные тела, координаты которых известны и постоянны, то с этими телами можно связать инерциальную или, как говорят астрометристы, фундаментальную систему координат. В действительности координаты небесных тел точно не известны из-за ошибок наблюдений и, кроме этого, могут меняться по ряду причин. В этом случае наилучшим приближением к инерциальной системе будет система, определяемая

объектами, координаты которых известны с наилучшей точностью и искажены лишь случайными ошибками. Мы можем говорить, что подобная система в среднем не имеет вращения, и можем назвать ее квазиинерциальной. В настоящее время наилучшей системой является система, задаваемая координатами внегалактических радиоисточников, которые не имеют глобального систематического движения. Наилучшей оптической реализацией квазиинерциальной системы является космический каталог звезд HIPPARCOS.

Динамический способ основывается на том, что, имея аналитические теории движения естественных тел и, определив из наблюдений необходимые константы, можно в каждый заданный момент времени найти положение этих объектов и определить оси опорной системы по отношению к телам Солнечной системы, поместив начало этой системы в центр масс (барицентр). Барицентр Солнечной системы – это единственная точка Солнечной системы, движение которой не возмущается планетами, спутниками и самим Солнцем. В действительности ни положение плоскости орбиты в пространстве, ни положение большой полуоси в плоскости орбиты не остаются постоянными из-за возмущений со стороны других тел солнечной системы и влияния эффектов общей теории относительности. Поэтому динамическая система отсчета задается эфемеридами - таблицами положений Солнца, Луны и больших планет. В настоящее время широко используются эфемериды DE200/LE200, DE403/LE403 и DE405/LE405, вычисленные Лабораторией реактивного движения (Jet Propulsion Laboratory, JPL). Эфемериды DE405/LE405 рекомендованы Международной службой вращения Земли (International Earth Rotation Service, IERS) для использования в качестве стандартных, и ожидается, что они в скором времени заменят эфемериды DE200/LE200, которые сейчас являются основой при составлении ежегодников. Для того чтобы определить положение динамической эклиптики в кинематической системе, необходимы специальные исследования (изучение движения Луны, наблюдения космических зондов относительно квазаров, т.е. одновременно и в

кинематической, и в динамической системах, и т.д.). В качестве наиболее перспективного метода привязки динамической точки весеннего равноденствия к кинематической системе является наблюдение пульсаров на РСДБ относительно квазаров и одновременно с этим хронометрирование пульсаров.

1.2 Обзор оптических опорных систем наземной астрометрии.

Как отмечено в разделе 1.1, небесная система координат может быть материализована на небесной сфере в виде каталога положений и собственных движений опорных объектов. В зависимости от метода составления можно выделить четыре основных типа каталогов [1]:

1. Абсолютные каталоги, в которых положения звезд или других объектов получены абсолютными методами. Они содержат небольшое число звезд и служат основой для составления других типов каталогов.

2. Дифференциальные каталоги получают в результате наблюдений относительными методами. Число объектов в них может достигать несколько миллионов (каталог Военно-Морской обсерватории США USNOB1.0 содержит более 1 миллиарда звезд.)

3. Фундаментальные каталоги, в которых положения объектов даны в виде сводных результатов, взятых из многих абсолютных и дифференциальных каталогов.

4. Сводные каталоги составляются из нескольких каталогов в уже известной системе и поэтому не представляют оригинальной фундаментальной системы.

Первые каталоги положений звезд были составлены еще в древнем Китае около 360-350 гг. до н.э.. Из дошедшей до нас древнегреческой истории каталогом, сыгравшим значительную роль в развитии астрономии, по праву считается каталог Гиппарха. И не случайно название астрометрической миссии HIPPARCOS (аббревиатура от английского High Precision PARallax Collecting

Satellite) напоминает нам об этом выдающемся античном астрономе. Таким образом, представляется естественно, следуя [21], разбить всю историю астрометрии на два периода до и после ИСЗ HIPPARCOS. Период от Гиппарха до запуска спутника HIPPARCOS имеет более чем двухтысячелетнюю историю, состоящую из двух эпох – эпохи до телескопической астрометрии и эпоху телескопической наземной астрометрии.

Каталог Гиппарха содержал эклиптические долготы и широты видимых звезд на эпоху 123 г. до н.э. с точностью $\sim 15'$. Он был воспроизведен Птолемеем и, несмотря на то что, по-видимому, Птолемей не производил перенаблюдение звезд каталога, а только пересчитал значения положений за прецессию, которую открыл и вычислил Гиппарх, каталог Птолемея является самым известным из древних каталогов. Он содержит значения астрономических широт и долгот 1025 звезд на эпоху 138 г. н. э. Этот каталог переиздавался много раз и переводился на другие равноденствия. Звезды из каталога Птолемея перенаблюдались заново и из них составлялись другие каталоги, как, например, каталог Улугбека (1018 звезд для эпохи 1437,5), Ротмана (1004 звезды для эпохи 1594 г.), Тихо Браге (1005 звезд для эпохи 1601 г.) и Гевелия (1564 звезды для эпох 1661 и 1701 годов). Положения в этих каталогах определялись без применения трубы и только в каталоге Гевелия положения 335 южных звезд определены с использованием трубы и наряду с долготами и широтами содержат экваториальные координаты (прямые восхождения и склонения) звезд, которые впоследствии стали основными координатами в астрономии. Начало развитию фундаментальной астрометрии как науки положил Тихо Браге. Им впервые была реализована идея квазифундаментальной системы, опирающейся на положения 9 ярких звезд, относительно которых определялись положения всех остальных светил. Точность его наблюдений составила предельную точность глазомерных наблюдений - $1-2'$. Они стали основой для открытия Кеплером законов движения планет.

Начиная с 17 века астрономы переходят на более точную экваториальную систему координат, которая и сегодня является общепринятой в астрономии, а сами наблюдения начинают выполняются с применением астрономической трубы, что приводит к увеличению точности наблюдений в десятки раз. Телескопическая наземная астрометрия имеет также большую историю, включающую в себя несколько направлений. Проблема построения инерциальной (невращающейся) опорной пространственно-временной системы отсчета осуществлялась с помощью следующих астрометрических методов:

- метода меридианной астрометрии;
- метода фотографической астрометрии;
- радиоинтерферометрического метода (РСДБ).

Началом систематических наблюдений звезд можно считать 1675 год - год организации Гринвичской обсерватории. Гринвичские астрономы Флемстид, Маскелайн и в особенности Брадлей своими работами приблизили точность определения координат к современному уровню. Первый фундаментальный каталог был создан Бесселем в начале 19 века, осреднением своих каталогов 1815 и 1825 года и переработанных им наблюдений Брадлея для вывода собственных движений. На основании этого каталога были составлены "Кенигсберские таблицы для приведения астрономических наблюдений, вычисленные с 1750 по 1850 г." (TR) [40], содержащие средние и видимые места 36 экваториальных звезд Маскелайна и двух близполюсных звезд. Бесселевские идеи абсолютных наблюдений получили свое развитие в работах Пулковской школы В.Я. Струве и заложили основу для создания фундаментальных каталогов. Фундаментальная система, выведенная Бесселем, использовалась до 1861 года в качестве основной при публикации данных «Берлинского ежегодника» [18]. Современные фундаментальные системы обязаны своим появлением трём астрономическим школам, создавшим серии фундаментальных каталогов. К числу таких фундаментальных каталогов

относятся каталоги С. Ньюкомба, Л. Босса и А. Ауверса. Каталоги Ньюкомба (N_1 , 32 часовых экваториальных звезды, 1872 год и N_2 , 1257 звезд по всему небу, 1898 [81]) были созданы для уточнения теории движения больших планет и определения астрономических постоянных. Система каталогов Ньюкомба использовалась десятилетиями в последующих каталогах, а равноденствие Ньюкомба принималось неизменным до 1935 года.

Фундаментальные каталоги Босса ставили задачу создания фундаментальной системы, охватывающей по возможности как можно большее количество звезд. Полученный в результате каталог GC (General Catalogue) [41], содержит положения и собственные движения 33342 звезд для эпохи 1950,0. К его недостаткам следует отнести неравномерность распределения звезд по небесной сфере и низкую точность собственных движений.

Наиболее последовательное и широкое распространение фундаментальных систем представляют собой Каталоги Германского Астрономического общества (AGK). Эта работа на протяжении долгого времени объединяла усилия астрометристов многих стран. Каталог AGK был задуман и осуществлен как серия из 15 зонных каталогов, содержащих все звезды “Боннского обозрения” (BD), составленного Аргеландером в 1863 году. Он содержал звезды до $9^m.0$, в зоне склонений от $+80^\circ$ до -2° , а затем был продолжен на юг до -22° . Все каталоги были получены на меридианных инструментах относительным методом. Наблюдения проводились узкими зонами по склонению разными обсерваториями. Для однородности получаемых данных необходимо было создать фундаментальный каталог опорных звезд. Это был первый фундаментальный каталог, выведенный Ауверсом, который содержал положения и собственные движения 539 звезд [38]. Он получил название FC и положил начало опорной системе NFK, которая просуществовала до 1940 года. Каталог NFK, основанный на постоянной прецессии Ньюкомба, был получен Петерсом в 1927 году и содержал положения 925 звезд, распределенных по всему небу [82] и был заменен Третьим фундаментальным каталогом – FK3

[65]. Этот каталог был использован в качестве опорного при создании 20 каталогов AGK, содержащих положения около 200 000 звезд.

В 1924 году для целей распространения фундаментальной системы на слабые звезды было принято решение о перенаблюдении зонных каталогов AGK фотографическим методом (AGK₂). Для этой работы, необходима была новая фундаментальная система, которая и была выведена Копфом. Для вывода новой системы, которая получила название FK3, было использовано 77 каталогов. По наблюдениям Солнца и больших планет было исправлено положение точки весеннего равноденствия и поправка экватора. Каталог FK3 [65] содержит 873 основные и 662 дополнительные звезды, распределенные по всему небу. Точность положений составляет 0.03" для эпохи 1900.0 и 0.08" для эпохи 1950.0. По рекомендации Парижского съезда МАС (1935 г.) система FK3 была принята в качестве основной фундаментальной системы для астрономических и геодезических работ всего мира и использовалась в Астрономических ежегодниках до 1964 года. Несмотря на достаточно хорошую для своего времени точность в случайном и систематическом отношении, система каталога FK3 была недолговечной вследствие невысокой точности собственных движений, для вывода которых привлекались старые каталоги. В 1952 году на съезде МАС в Риме было одобрено начало работ по созданию новой фундаментальной системы FK4, которая была начата под руководством Копфа и завершена уже после его смерти. В 1963 году Фрике опубликовал Четвертый фундаментальный каталог звезд – FK4 [53]. Вывод системы положений каталога FK4 основан на абсолютных каталогах 20 века, а система собственных движений получена при помощи более ранних каталогов, из регулярных наблюдений на обсерваториях (главным образом Гринвичской и Пулковской). Каталог FK4 содержит 1535 ярких звезд для всего неба, случайная погрешность положения которых характеризуется средней квадратической ошибкой $\pm(0''.02—0''.03)$, а собственных движений звезд за 100 лет — $\pm(0''.10—0''.15)$. Систематическая погрешность положений звезд в

системе FK4 близка по величине к случайной. Для южных звёзд точность оказалась несколько меньше, чем для северных. Расширением FK4 служат координаты 1987 ярких звезд до $7^m.0$ звездной величины [54]. С 1964 года система FK4 была принята в качестве новой опорной системы. Впоследствии выяснилось, что в каталоге существуют значительные систематические ошибки прямых восхождений звезд, а так же большие случайные ошибки в склонениях и собственных движениях звезд южной полусферы. В положении точки весеннего равноденствия существовала ошибка, зависящая от времени, что требовало пересмотра принятого значения постоянной прецессии.

Учитывая все это, в 1973 году на XV Генеральной Ассамблее МАС в Сиднее было принято решение про создание новой фундаментальной системы координат - FK5. Каталог FK5 имел ряд отличий и усовершенствований по сравнению со своими предшественниками. Он базировался на положениях 1535 ярких звезд, которые составляли каталог FK5 [55] и дополнительных 3117 звезд каталога FK5-supl [56]. В случайном отношении точность каталога FK5 была такой же как и у FK4. Точность положений системы составила примерно $0''.1$ по координатам, собственных движений – $0''.001$ в год. Поскольку каталог FK5 имел почти предельную точность для оптических наземных наблюдений, поэтому дальнейшее развитие точности опорных систем могло быть сделано только за счет развития новых методов регистрации и выноса инструментов в космос. Последним в серии каталогов FK стал каталог FK6 [102], который является комбинацией результатов миссии HIPPARCOS и наземных наблюдений, собранных в течение двух веков, итогом которых был каталог FK5. Часть I каталога FK6 содержит 878 основных фундаментальных звезды с прямым решением (direct solution). Такое решение подходит для одиночных звезд, собственные движения которых уверенно показывают, что они не двойные. Из 878 звезд в части I было отобрано 340 объектов, которые можно назвать "астрометрически превосходные звезды", так как их мгновенные собственные движения (т.е. полученные на коротком промежутке времени) и

средние (за большие промежутки времени) отличаются весьма незначительно. Большинство этих звезд являются кандидатами в одиночные звезды с уверенно определяющимся собственным движением. Эти звезды являются наиболее подходящими для астрометрических работ, требующих высокой точности. Типичная средняя ошибка FK6(I) в собственном движении для одиночной звезды составляет 0.35 mas/год. Это почти в два раза лучше, чем ошибка HIPPARCOS для этих звезд 0.67 mas/год. В долгосрочном режиме, в котором учитывается влияние "космической ошибки", собственные движения FK6(I) имеют среднюю ошибку всего 0.50 mas/год, что уже в 4 раза лучше соответствующей ошибки HIPPARCOS 2.21 mas/год (космическая ошибка включена). Часть III каталога FK6 содержит 3272 звезды. В качестве первой эпохи использовались расширение FK5 для ярких звезд (735 звезд), остающиеся звезды из основного каталога FK5 (Sup 732) и расширение звезд FK5 на слабые звезды (1805 звезд). Из части III было также выбрано 1828 объектов в качестве "астрометрически превосходных звезд". Созданием каталога FK6 завершился этап наземных наблюдений в построении оптических опорных систем [23].

Достигнутая координатная точность на уровне 0.001" методами радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами привела к созданию принципиально новой опорной системы, базирующейся на положении внегалактических радиоисточников.

1.3 Опорная система ICRS и каталог ICRF.

С 1 января 1998 года в астрономии вместо опорной системы FK5 введена новая координатная система ICRS. В качестве ее первичной реализации на небесной сфере принят каталог положений внегалактических радиоисточников ICRF, полученный методами РСДБ. Принятию этого решения предшествовал длительный период. Еще в начале XX ст. дальнейшее развитие получила идея Лапласа о выборе удаленных внегалактических объектов в качестве опорных

при определении абсолютных собственных движений звезд. Однако при реализации уже первых наблюдательных программ обнаружилось те большие трудности, которые возникают на пути точного определения координат «опорных объектов», имеющих большие угловые размеры и звездные величины $m > 14$ [26]. В 1963 году было открыто внегалактическое происхождение квазаров и наличие у них мощного радиоизлучения [88] и идея использования радиоинтерферометров для высокоточных координатно-временных измерений получает широкое распространение и знаменует рождение нового этапа в задании опорных систем координат в астрономии [6].

Согласно рекомендациям рабочих групп, занимающихся вопросом построения новой опорной системы, МАС 1991 года [106] принял решение о создании каталога положений удаленных внегалактических объектов, на положениях которых будет реализована новая международная небесная опорная система. Поскольку квазары и ядра активных галактик являются одними из самых далеких объектов во Вселенной, то выбор подобных объектов для закрепления новой системы на небесной сфере представляется достаточно логичным по двум причинам:

- 1) отсутствию собственных движений у этих объектов на уровне измерений современной техники;
- 2) существованию к тому времени большого количества наблюдений методами РСДБ, точность которых во много раз превосходило точность существовавшей старой опорной системы.

XXII съезд МАС утвердил список объектов, который состоял в основном из квазаров и компактных радиоисточников. Такой каталог был создан в 1998 году и детально описан в работе [73].

Каталог ICRF состоит из 608 внегалактических радиоисточников, которые массово наблюдались методами VLBI. Источники условно разделены на три группы:

- 212 ВРИ составляют группу основных (Define) со средней неопределенностью положений 0.4 mas и закрепляют на небе положения осей новой координатной системы. Критерии отнесения объекта в группу Define были следующие: период наблюдений более двух лет более 20 наблюдателями, точность лучше 1 миллисекунды, отсутствие видимых собственных движений, отсутствие переменности излучения и значение структурного индекса в X полосе [51,64];
- 294 ВРИ относятся к группе кандидатов в основные (Candidate), точность их положений такая же как у источников группы Define, однако они имеют более короткую наблюдательную историю;
- 102 ВРИ образуют группу “другие” (Others). Они имеют точность положений несколько ниже чем источники группы Define, но оптически они – более яркие и являются доступными для наблюдений оптическими методами и могут быть использованы в качестве общих объектов для определения связи радио и оптической опорных систем отсчета .

Каталог положений 608 ВРИ получен с использованием 1.6 миллиона наблюдений, собранных на протяжении 15 лет рабочими группами со всего мира. Поскольку объекты каталога ICRF должны закреплять сетку новой системы ICRF на небесной сфере одним из критерием включения их в каталог было условие равномерного распределения по небу. К сожалению, в южной полусфере достичь этого в полной мере не удалось, где наблюдается некоторый дефицит источников по сравнению с северной полусферой.

На рис 1.1 показано распределение всех 608 ВРИ по небесной сфере.

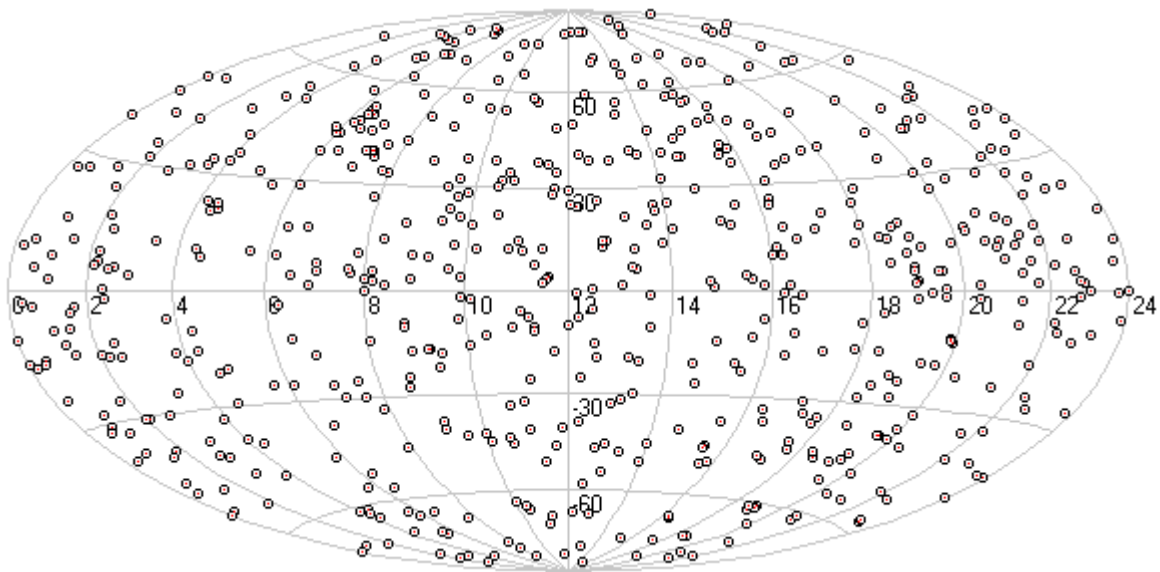


Рис. 1.1 Распределение радиоисточников каталога ICRF в экваториальных координатах.

С 1 января 1998 г. по решению МАС определена Международная небесная система координат (International Celestial Reference System - ICRS) [30, 73], оси которой фиксированы по отношению к внегалактическим источникам, причем направления осей согласованы с системой FK5. Система ICRS реализуется координатами опорных радиоисточников каталога ICRF и основывается на кинематическом принципе: считается, что оси системы остаются неподвижными относительно удаленных внегалактических объектов. Для обеспечения непрерывности в процессе смены систем отсчета выбор основной плоскости ICRF был сделан так, чтобы ее ориентация в пространстве в пределах ошибок оптических наземных наблюдений, совпадала с положением “динамического экватора” каталога FK5 на эпоху наблюдения J2000.0. В соответствии с рекомендациями МАС полюс системы ICRS согласуется с полюсом FK5 в пределах ошибок последнего: 50 mas дуги, однако оказалось, что средний небесный экватор на эпоху J2000.0 не совпадает с экватором системы ICRS (см. рисунок 1.2 [7]). Причиной этого являются ошибки в теории нутации, принятой МАС в 1980 году. Эти ошибки были найдены из наблюдений на РСДБ [43, 91] для коррекции принятой МАС теории нутации.

Полученные результаты двух независимых исследований позволили совместить полюс ICRS и средний полюс J2000.0 на 20 mas уровне точности.

Начало отсчета прямых восхождений также должно было быть привязано к динамическому экватору J2000.0. Ось Ox системы ICRS неявно определена по прямым восхождениям 23 радиисточников, положения которых были взяты из каталогов GSFC, JPL, NGC. Эти каталоги были компилированы с фиксированным значением прямого восхождения квазара 3C 273B ($12^{\text{h}} 29^{\text{m}} 06^{\text{s}}.6997$), которое было взято из FK5 на ту же эпоху [58]. Ошибка нуля-пункта FK5 оценивалась величиной ± 80 mas. Так как в работах [71, 79] было установлено, что ошибки положений каталога FK5 имели значение порядка 100 mas полученная точность привязки казалась достаточной. Уточнение положения динамического экватора, сделанное авторами работы [52] показало, что ось Ox системы ICRS отличается от среднего экватора эпохи J2000.0 на величину 78 ± 10 mas, что отвечает требованиям МАС о совпадении начала отсчета прямых восхождений в старой и новой системах.

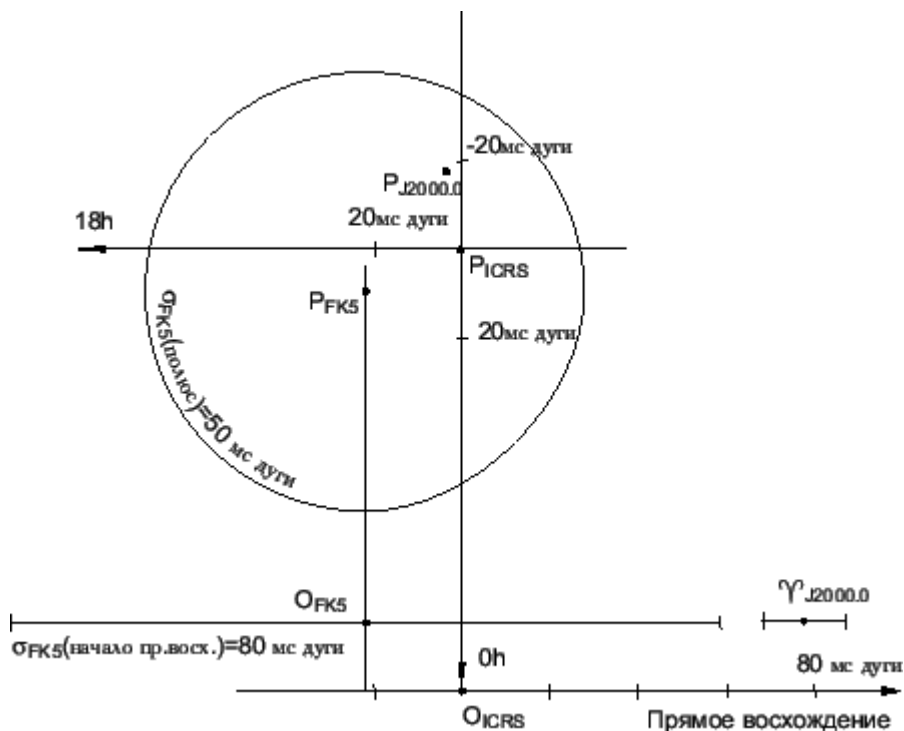


Рис. 1.2 Полнос FK5 – P_{FK5} , полюс ICRS - P_{ICRS} , полюс J2000.0 – $P_{J2000.0}$.

1.4. Опорная система ICRF.

Объекты каталога ICRF, которые стали основными реперами новой опорной системы, наблюдений высокой точности в оптическом диапазоне не имели. Поэтому актуальной оказалась задача распространения новой системы на оптическую область спектра. Успешное завершение космического проекта HIPPARCOS сделало возможным использование высокоточных наблюдений астрометрического спутника в качестве оптической реализации ICRS.

Идея создания космического каталога типа Hipparcos была выдвинута французским астрономом Пьером Лакрутом еще в 1966 году [67]. Только спустя более 10 лет в 1980 году Европейское Космическое Агентство (ESA) приступило к реализации проекта. Запуск космического аппарата Hipparcos (High Precision Parallax Collecting Satellite) состоялся 8 августа 1989 года. Аббревиатура названия отражает основную цель проекта – получение высокоточных положений, собственных движений и параллаксов около 100 тысяч звезд. Спутник проработал на орбите 37 месяцев по результатам его работы были получены три астрометрических каталога: Hipparcos Catalogue (HC), каталог Tycho и каталог Tycho 2. Каждая звезда наблюдалась не менее 110 раз, за счет чего была достигнута беспрецедентная точность экваториальных координат $\pm 0.1mas$ и годовых собственных движений $\pm 1mas/год$. Ошибки тригонометрических параллаксов составили $\pm 1mas$, для 50000 звезд расстояния определены на 20 % уровне точности [10].

Каталог Hipparcos, характеристики которого представлены в табл. 1.1, является основным результатом работы космической миссии.

Таблица 1.1

Основные характеристики каталога HC [76].

Каталожная эпоха	J1991.25
<i>Опорная система</i>	ICRS
Несоответствие ICRS	± 0.6 mas
Отклонение от инерциальности	± 0.25 mas/yr
Количество звезд	118 218
Астрометрического назначения	117 955
Фотометрического назначения	118 204
Количество звезд на deg²	~3
Предельная звездная величина	$V \sim 12.4$
Полнота каталога	$V = 7.3 - 9.0$

Первоначальный проект работы спутника включал в себя создание только одного каталога высокоточных положений звезд. Данные, полученные с устройства отождествления звезд, планировалось использовать только для определения параметров ориентации спутника. Уже на этапе реализации проекта Хегом было внесено предложение по научному использованию этих данных и в проект были внесены изменения [59]. Каталог Tycho Catalogue (TC), характеристики которого представлены в табл.1.2, включает в себя более 1 миллиона звезд и является хорошим расширением системы каталога HIPPARCOS в оптическом диапазоне.

Таблица 1.2

Основные характеристики Tycho Catalogue

Каталожная эпоха	J1991.25
Система	ICRS
Несоответствие ICRS*	± 0.6 mas
Отклонение от инерциальности*	± 0.25 mas/yr

Количество звезд	1 058 332
На основе данных Tycho	1 052 031
На основе данных Hipparcos	6301
Средние астрометрические стандартные ошибки**	
$V_T < 9$ mag	7 mas
Все звезды	25 mas
Средние фотометрические стандартные ошибки:	
$V_T < 9$ mag	0.019 mag
Все звезды	0.06 mag
Количество звезд на deg²**	~25
Предельная звездная величина	$V \sim 11.5$
Процент звезд 90 %	$V \sim 10.5$
Процент звезд ~ 99.9%	$V \sim 10.0$
Общее количество наблюдений	$\sim 130 \times 10^6$

* - вокруг всех 3-х осей;

** - в зависимости от галактической широты.

«Сырые» данные, полученные со спутника, содержали сведения еще о 1.5 млн. звезд, с менее надежными измерениями (отношение сигнал – шум для которых было меньше 1.8), которые не вошли в каталоги Tycho и Hipparcos. На основе этих данных невозможно было получить собственные движения звезд, хотя координаты их определялись достаточно надежно. Это побудило авторов к созданию каталога нового поколения – Tycho-2. Для вывода собственных движений в этом каталоге были привлечены обширные ряды наземных наблюдений, а для вывода положений данные спутника HIPPARCOS. В результате появился астрометрический каталог Tycho-2, распространяющий систему HCRF на 2.5 миллиона звезд. Основные характеристики этого каталога приведены в таблице 1.3.

Таблица 1.3

Основные характеристики Tycho-2 Catalogue

Каталожная эпоха	J2000.0
<i>Опорная система</i>	ICRS
Количество звезд	2 539 913
Астрометрические ошибки	
Положения для звезд с $V_T < 9^m$	7 mas
Положения остальных звезд	60 mas
Собственные движения	2.5 mas/год
Ошибки звездной величины	118 204
для звезд с $V_T < 9^m$	0.013 ^m
остальные звезды	0.10 ^m
Количество звезд на deg²	~3
b = 0°	150
b = ±30°	50
b = ±90°	25
Полнота с вероятностью 90 %	$V_T \sim 11.5$
Полнота с вероятностью 99 %	$V_T \sim 11.0$

Каталоги Hipparcos и Tycho являются первыми широкомасштабными реализациями ICRS в оптическом диапазоне. Их также можно рассматривать как расширение и улучшение системы FK5 (J2000) с сохранением глобальной ориентации этой системы, но без зональных систематических ошибок [24].

Тот факт, что положения звезд каталогов миссии Hipparcos приведены в системе ICRS, означает что они непротиворечивы по отношению к современной внегалактической радиосистеме координат. Для собственных движений это означает, что они показывают угловые скорости звезд по отношению к лучшей на сегодняшний день реализации инерциальной

системы отсчета (т.е. не вращающейся по отношению к удаленным галактикам).

Так как параллаксы звезд получены исключительно в процессе обработки данных космического аппарата, направления на звезды, представленные прямым восхождением и склонением на эпоху каталога $T_0 = J1991.25$ (ТТ), являются строго барицентрическими. В предшествующих астрометрических каталогах неопределенность, вызванная параллактическим смещением, проникала в окончательные координаты звезд каталога.

В то время как собственные движения звезд, полученные из наземных наблюдений, традиционно определялись на разности эпох от 20 до 50 лет, собственные движения каталога Hipparcos определены на временном базисе всего в несколько лет. «Наземные» собственные движения дают среднее значение движения звезды за период несколько десятков лет, а собственные движения каталога Hipparcos можно назвать почти мгновенными. Здесь нет никакого противоречия до тех пор, пока мы имеем дело с равномерно движущейся звездой, по крайней мере, одиночной. Однако много видимых одиночных звезд являются в реальности двойными и движение компонент или фотоцентра двойной звезды может быть в значительной мере неравномерным. Для таких объектов может наблюдаться значительное разногласие между «наземными» и «космическими» собственными движениями, которые нельзя приписать случайным ошибкам или разностями между фундаментальными системами [24]. Поскольку число кратных звезд в каталоге составляет значительный процент (первоначальная оценка [70] в 15 %, по-видимому, является очень заниженной) в структуре каталога отведено специальное поле для отметки кратности системы. Кроме основного каталога характеристики кратных систем приведены в таблицах MSA (Multiple Systems Annex).

1.5 Привязка системы каталога HIPPARCOS к ICRS.

Проблема связи радио и оптической систем координат возникла еще в конце 60-х годов, когда развитие радиоинтерферометрических методов радиоастрономии позволило получать точность определения положений небесных объектов с точностью, превышающей точность наблюдений в оптическом диапазоне [6]. Существование во Вселенной класса удаленных объектов (радиогалактик и квазаров), обладающих мощным радиоизлучением, и являющихся практически неподвижными на небесной сфере позволило установить новую высокоточную систему координат в астрономии. Эта система основана на положениях, определенных методами РСДБ, и является независимой от оптических систем координат. Единственной общей точкой является нуль-пункт прямого восхождения, который согласуется по прямому восхождению квазара 3C 273В. Использование высокоточной радиосистемы для традиционного класса оптических объектов и обеспечение единой системы координат в астрономии требует решения проблемы согласования и поддержания связи оптической и радио систем координат.

В общем виде система координат HIPPARCOS может быть приведена к любой опорной системе посредством произвольного поворота и вращения, линейно зависящего от времени. Если R и R' - матрицы вращения, то единичный вектор направления на звезду E и вектор ее собственного движения M могут быть заменены на векторы

$$E' = (R + (t - t_0) R') E(t),$$

$$M' = R' M.$$

Записав эти уравнения для некоторого числа объектов, положения и собственные движения которых известны в обеих системах, можно решить их относительно R и R' . Сложность этой задачи состоит в том, что радиоисточники, слишком слабы в оптическом диапазоне, для того чтобы быть включенными непосредственно в программу наблюдений Hipparcos, а радиозвезды, которые наблюдались спутником Hipparcos либо слабы в радиодиапазоне, либо имеют значительные размеры, что мешает получению

координат с высокой точностью, поэтому для установления связи пришлось использовать наземные наблюдения. Было использовано шесть независимых методов определения матриц R и R' [72]:

1. **Наблюдения методом VLBI** – радиоинтерферометрические наблюдения (1984 – 1994г.) 12 равномерно распределенных по северной части неба радиозвезд относительно квазаров. Ошибки положений этих звезд были получены с точностью менее 1 *mas*. Это была основная программа наблюдений для привязки Hipparcos, наблюдения которой вошли с максимальным весом при определении матриц R и R' .

2. **Другие радионаблюдения.** Проект “MERLIN” - наблюдения 12 радиозвезд на интерферометре MERLIN (Великобритания). Ошибка положений звезд относительно радиоисточников составила 4 *mas*. Однако эти наблюдения были использованы только для вычисления матрицы R вследствие малой разности эпох. Наблюдения 30 радиозвезд (1984 – 1994г.) с помощью очень большого антенного поля VLA (Very Large Array) Национальной радиоастрономической обсерватории США (NRAO) для точного определения матрицы R' . Точность определения положений здесь составляла несколько сотых секунд дуги, матрица R по этим наблюдениям определялась с худшей точностью.

3. **Наблюдения на космическом телескопе имени Хаббла.** На протяжении 1993–1994 г. определялись дуги между 46 звездами каталога Hipparcos и 34 внегалактическими радиоисточниками. Точность определения матрицы R по этим наблюдениям составила от 1.5 до 2.2 *mas*, а матрицы R' - от 1.5 до 3.4 *mas/год*.

4. **Фотографические и ПЗС – наблюдения оптических положений объектов, списка ICRF.** Это делалось в рамках совместной программы по связи систем отсчета, которая выполнялась в Гамбургской и Военно-морской обсерватории США. Были получены большие поля звезд вокруг 78 избранных радиоисточников, что позволило определить их оптические

положения с точностью 30 mas . Для вычисления матрицы R' были привлечены 13 звездных полей Боннской обсерватории с разностью эпох около от 70 до 100 лет. Точность вычисления по 88 звездам Гиппархоса составила 1 mas . С несколько меньшей разностью эпох (от 20 до 40 лет) были получены собственные движения звезд Hipparcos из наблюдений Потсдамской обсерватории. Ошибка матрицы R' по этим наблюдениям составила 0.5 mas/год .

5. Определение собственных движений звезд из фотографических обзоров неба. Для северного полушария был использован Ликский обзор неба, для южного – Йельский. Были определены собственные движения более 10000 звезд Гиппархоса. Также следует отметить аналогичную программу по определению собственных движений 900 звезд Hipparcos из каталога КСЗ. Эти работы позволили определить R' с точностью лучше 1 mas/год .

6. Наблюдения по определению параметров вращения Земли, выполненные методами РСДБ в двух системах координат: земной и небесной.

В результате объединения было получено шесть независимых решений для матрицы R и двенадцать для R' . Наиболее вероятное решение дало следующие оценки точности окончательного результата: ошибка привязки осей каталога Hipparcos на его среднюю эпоху наблюдения (1991.25) составила 0.6 mas для каждого компонента матрицы R , 0.25 mas/год – для компонентов R' (скорости вращения осей каталога).

Согласно резолюции В2 XXIII Генеральной Ассамблеи МАС (1997) каталог HIPPARCOS рекомендован в качестве основной реализации новой международной опорной системы координат (ICRS) в оптическом диапазоне спектра за исключением звезд, помеченных флажками C, G, O, V, X (согласно дополнению резолюции XXIV Генеральной Ассамблеи МАС). Система отсчета, связанная с этим каталогом, получила название HCRF.

Реальное появление космической астрометрии привело к коренным изменениям как в традиционной позиционной астрометрии, так и в ее приложениях. После проведения миссии Hipparcos изменились акценты некоторых задач, часть программ потеряла актуальность (FK6, IRS). Одной из основных задач стала поддержка международной небесной системы координат ICRS, которая опирается на положения внегалактических радиоисточников, полученных методами РСДБ.

Основные тенденции развития фундаментального координатно-временного обеспечения в области небесных опорных систем, по мнению авторов работы [4] состоят в следующем:

- рост точности координат опорных объектов: для внегалактических радиоисточников - до 0.01 mas, для звезд - до 0.001 mas на эпоху наблюдений;
- замедление роста количества опорных внегалактических радиоисточников, задающих радиоастрономическую систему (в настоящее время их более 600), вследствие малой радиояркости новых источников, сложностью их структуры и обнаруженной переменностью этой структуры;
- рост количества звезд, задающих звездную подсистему, до миллионов и даже десятков миллионов для детального изучения динамики Галактики и обеспечения позиционных и фотометрических наблюдений движущихся, переменных и новых объектов в малых полях с помощью ПЗС-матриц;
- обеспечение всеволнового доступа (оптика, радио, ИК, УФ, рентгеновский и гамма диапазоны) к опорным объектам небесной системы благодаря внедрению новых приемников излучения и координации наблюдательных программ.
- постоянный мониторинг стохастического вращения Земли.

1.6. Краткие выводы

1. Описаны общие принципы построения и задания опорных систем. Сформулированы основные требования, которые предъявляются к современным небесным системам отсчета.
2. Приведена история развития небесных систем координат. Особое внимание уделено серии фундаментальных каталогов FK, которые более 100 лет задавали опорную систему отсчета в астрономии.
3. Дано описание каталогов ICRF и HIPPARCOS, которые являются первичными реализациями новой системы ICRS на небесной сфере. Показано, что работы по установлению и контролю параметров взаимной ориентации радио и оптической систем являются актуальными на сегодняшний день.

ГЛАВА 2 НАБЛЮДЕНИЯ: ПРОГРАММА И АППАРАТУРА

В резолюции "Поддержка и установление опорных систем координат и систем отсчета", принятой Генеральной Ассамблеей МАС в 2000 г. (Манчестер) отмечено, что вследствие уменьшения точности связи каталога HIPPARCOS и ICRF со временем, задача поддержки оптической системы и ее связи должна быть высокоприоритетной для наземных и космических наблюдений. Одним из методов контроля и установления связи, как было отмечено в гл.1, являются прямые наблюдения объектов списка ICRF в оптическом диапазоне. Поскольку эти объекты имеют достаточно слабые звездные величины – их изображения могут быть получены только с помощью светосильных телескопов. Астрофизические телескопы, оснащенные ПЗС-приемниками, с диаметром зеркала от 1 до 2 м могут быть использованы для этих целей. Поле зрения подобных приемников мало, поэтому поставленная задача может быть успешно решена только при наличии опорных звезд в поле кадра, что приводит к необходимости расширения оптической системы в область слабых величин.

Настоящая работа была выполнена на основе прямых наблюдений ERS, полученных в рамках Международного проекта (Joint Project) по уточнению углов связи оптической и радио систем координат [13,15].

В проекте принимали участие следующие обсерватории:

- НИИ «Николаевская Астрономическая Обсерватория» (NAO),
- Казанский государственный университет (KSU),
- Шанхайская астрономическая обсерватория (ShAO),
- ТУБИТАК Национальная обсерватория Турции (TUG)

Для наблюдений использовались телескопы, оснащенные ПЗС – приемниками. В таблице 2.1 приведены некоторые характеристики

инструментов, на которых получены наблюдения внегалактических источников.

Таблица 2.1

Характеристики телескопов

Телескоп φ (широта)	РТТ150, (Анталия Турция), +36 ⁰		1m (Юнань, КНР), +31 ⁰	МКТ (Николаев, Украина), +47 ⁰
Тип	Рефлектор		Рефлектор	Рефрактор
D,F (mm)	1500 11700		1000 13000	160 2044
ПЗС	ST-8E 1530x 1020 9 x 9 mkm 0."16/pix 4' x3'	Andor DW436 2048x2048 13.5x13.5mkm 0."24/pix 8' x8'	TI 1024x 1024 24x24 mkm 0."25/ pix 6.5' x 6.5'	ISD017A 1040x1160 16x16 mkm 1."6/ pix 28' x 31'
Режим ПЗС	кадровый,	кадровый, дрейф-скан	кадровый	кадровый, дрейф-скан
Диапазон зв. величин	17 ^m ÷ 22 ^m	17 ^m ÷ 22 ^m	14 ^m ÷ 19 ^m	12 ^m ÷ 14 ^m

2.1 Телескопы, использовавшиеся для наблюдений ERS

2.1.1 Российско-турецкий 1.5-м телескоп (РТТ150). Российско-турецкий телескоп РТТ150 Национальной Обсерватории Турции установлен на юге Турции, в 50 км от города Анталия, на горе Бакырлытепе (Bakırlıtepe). РТТ150 является международным проектом Российской Федерации и Турции. Он изготовлен на ЛОМО и является аналогом телескопа АЗТ-22, установленного на горе Майданак в Узбекистане. Результаты юстировки зеркала и научные данные, полученные на телескопе, свидетельствуют об очень высоком качестве оптики и благоприятном астроклимате в месте его установки: разрешающая способность достигает 0.7 угл. сек, а проникающая способность доходит до 23^m за экспозицию 15 минут. Географические

координаты телескопа: широта - $\varphi = 36^{\circ} 49' 30''$ северной широты, долгота - $\lambda = 30^{\circ} 20'$ к востоку от Гринвича,
высота над уровнем моря - 2550 м.

Изображение телескопа приведено на рис. 2.1. Телескоп оснащен двумя гидами – телескопами системы Ричи-Кретьена с диаметром зеркал 36 см, которые могут использоваться самостоятельно. Полное поле зрения телескопа в варианте Ричи-Кретьена при установке корректора составляет 80 угловых минут (300мм). Для малых полей, ограниченных размерами ПЗС матриц, корректор не используется [34].

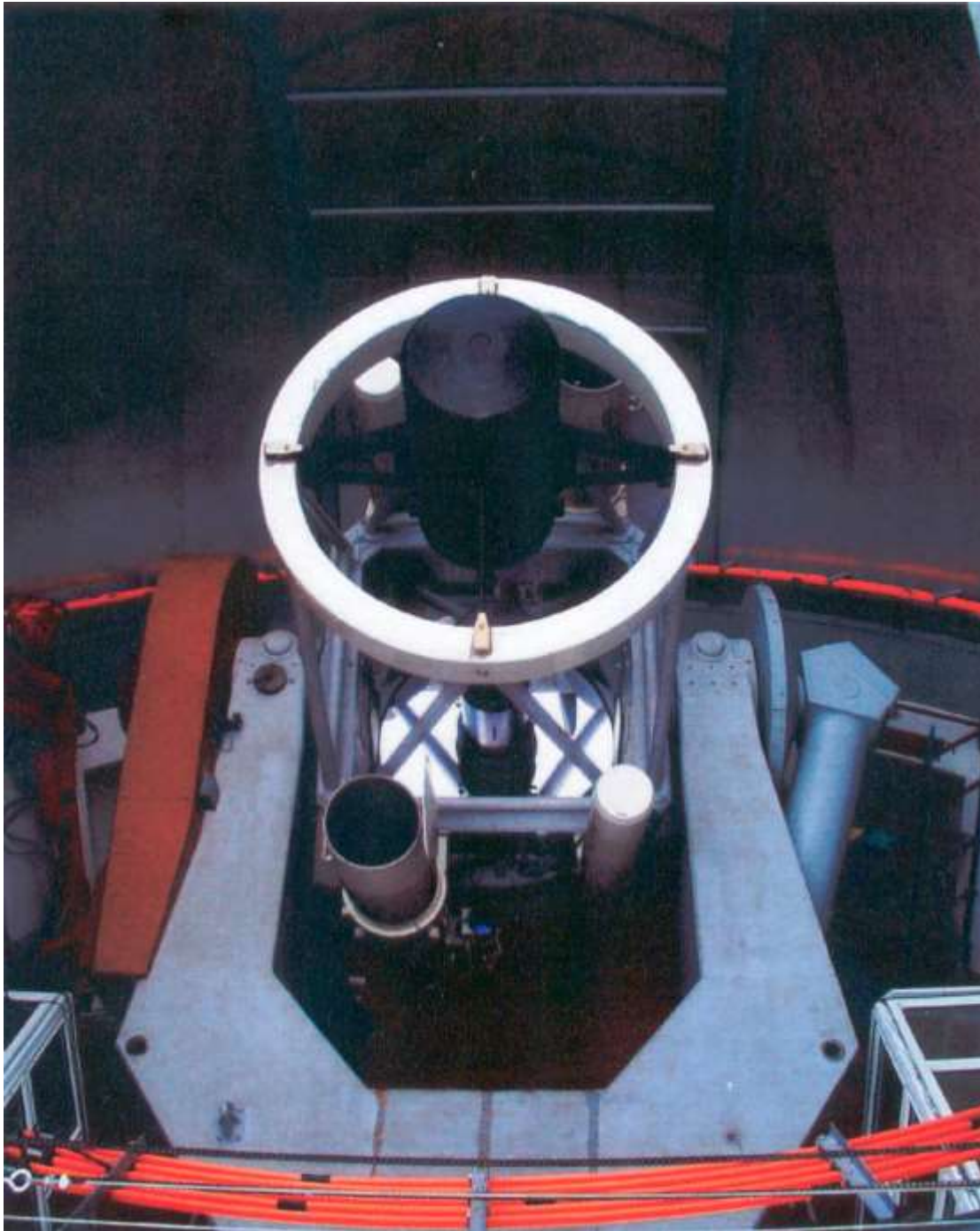


Рис 2.1 Российско-турецкий 1.5м телескоп (RTT150).

Наблюдения радиоисточников на RTT150 выполнялись в период с сентября 2000 года по ноябрь 2003. Первый массив наблюдений (сентябрь 2000 - май 2002 года) получен с ПЗС-матрицей ST-8E фирмы SBIG (в настоящее время используется в системе автогидирования), установленной в касегреновском фокусе 1:8. Основные технические характеристики матрицы ST-8E приведены в таблице 2.2 (взято с сайта <http://hea.iki.rssi.ru>).

Таблица 2.2

Характеристики ПЗС-матрицы ST-8E.

<i>Тип</i>	<i>ПЗС Kodak KAF-1602E</i>
<i>Размеры активной области</i>	<i>1530 x 1020 пикселей</i>
<i>Линейные размеры</i>	<i>13.8 x 9.2 мм</i>
<i>Размер пиксела</i>	<i>9 x 9 мкм</i>
<i>Затвор</i>	<i>Электромеханический</i>
<i>Экспозиция</i>	<i>0.11 - 3600 с, разрешение 10 мс</i>
<i>А/Ц преобразователь</i>	<i>16 бит</i>
<i>А/Ц усиление</i>	<i>2.3e-/ADU</i>
<i>Шум считывания</i>	<i>15e- RMS</i>
<i>Режимы сбивания</i>	<i>1 x 1, 2 x 2, 3 x 3</i>
<i>Скорость оцифровки пикселей</i>	<i>30 кГц</i>
<i>Время считывания кадра</i>	<i>60 с</i>
<i>Вынос фокуса</i>	<i>2.3 см</i>

Матрица была оснащена набором стандартных фильтров UBVR1 фотометрической системы Джонсона-Крон-Козинса. Наблюдения радиоисточников проводились в фильтрах V (510-590 нм) и R (595-805 нм) в режиме сбивания 2x2 (765x510 пикселей). Всего было получено более 1500 кадров 127 полей вокруг радиоисточников. Распределение полученных полей по небесной сфере представлено на рисунке 2.2.

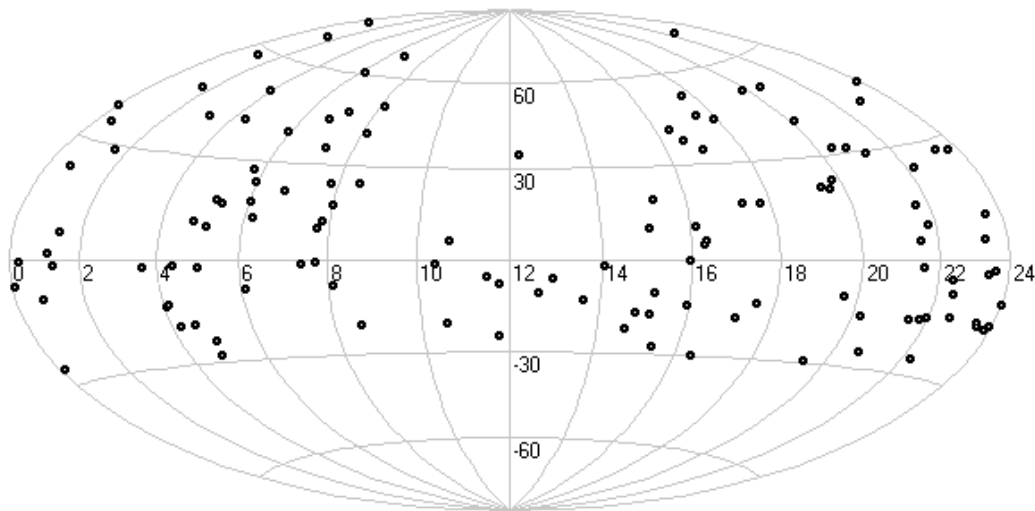


Рис.2.2 Распределение ERS по небесной сфере (матрица ST8E, 4.1' x 2.7')

В период весна-осень 2002 года в качестве основного фокального приемника на телескопе использовалась матрица AP-47p, размером 1024x1024 пикселей. Список полей, полученных с этой матрицей приведен в таблице 2.3.

Таблица 2.3

Поля вокруг ERS, полученные с матрицей AP47p

n/n	Name	RA (J 2000.0) h, m, s	Dec (J 2000.0) °, ', "	M_v	$N_{\text{кадр}}$
1	0528+134	05 30 56.416	13 31 55.149	20.0	5
2	0536+145	05 39 42.365	14 33 45.561	-*	4
3	0537-158	22 02 43.291	42 16 39.979	18.0	2
4	0544+273	05 47 34.149	27 21 56.842	-	3
5	0556+238	05 59 32.033	23 53 53.937	-	2
6	0600+177	06 00 09.130	17 42 16.810	-	2
7	0722+145	07 25 16.807	14 25 13.746	-	6
8	0742+103	07 45 33.059	10 11 12.692	-	2

Осенью 2002 года на телескопе RTT150 была установлена новая система автогидирования и в качестве основного фокального приемника установлена ПЗС-матрица Andor DW436 размером 2048x2048 пикселей. Пробная эксплуатация ПЗС-матрицы Andor DW436 в качестве фокального приемника телескопа RTT150 началась весной 2003 года. Матрица была размещена на месте матрицы AP-47p, внутри корпуса с матрицей ST-8E, служащей в качестве автогида. Во время наблюдений в режиме автогидирования матрица Andor DW436, охлаждаемая до -60°C , показала крайне низкий уровень шумов и исключительно высокое качество получаемого изображения. Основные технические характеристики матрицы, приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4

Характеристики ПЗС-матрицы *Andor DW436*

<i>Тип</i>	<i>Andor DW436 ПЗС</i>
<i>Размеры активной области</i>	<i>2048x2048 пикселов</i>
<i>Линейные размеры</i>	<i>27.6x27.6 мм</i>
<i>Размер пиксела</i>	<i>13.5 x 13.5 мкм</i>
<i>Шум считывания</i>	<i>3.5 e- rms</i>
<i>Минимальная рабочая температура</i>	<i>-75°C</i>
<i>Темновой ток</i>	<i>1.7 e-/пикс/ч</i>

С этой матрицей получен второй массив наблюдений внегалактических радиоисточников с полем 8.1 x 8.1- изображения 62 полей (около 500 кадров). Их распределение по небесной сфере представлено на рисунке 2.3.

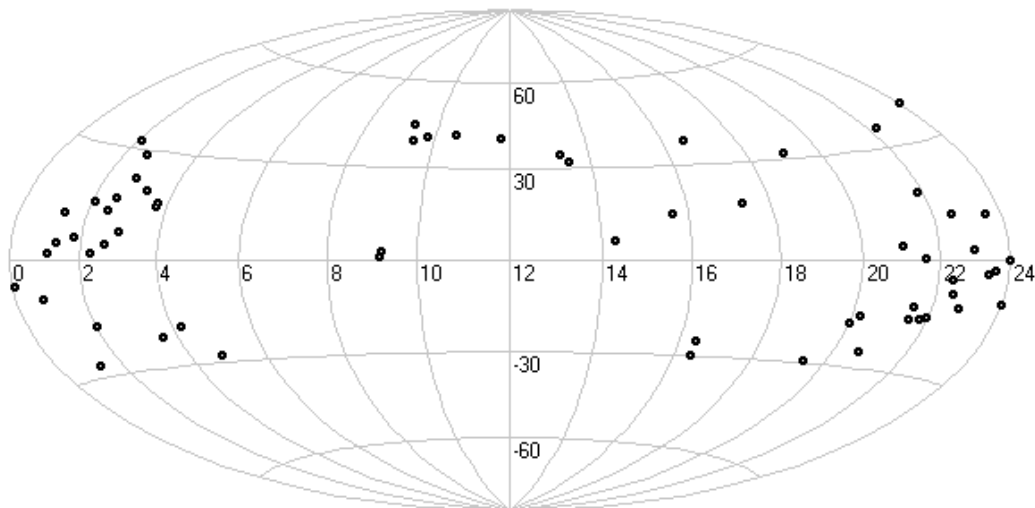


Рис. 2.3 Распределение полей вокруг ERS, полученные с матрицей Andor DW436 (размер поля 8'.1 x 8'.1).

Кроме кадров с изображениями полей вокруг радиоисточников практически каждый вечер получались кадры для учета смещения, калибровок темнового тока и плоского поля. Дополнительно в ночи с плохой погодой получались большие серии (до 100 штук) кадров смещения и кадров с темновым током. Кадры плоского поля снимались как правило сериями 5-10 кадров, со всеми фильтрами, которые применялись при получении кадров с радиоисточниками.

2.1.2 Мультиканальный телескоп (МКТ) НАО. Мультиканальный телескоп НИИ НАО имеет следующие географические координаты долгота - $\lambda=31^{\circ}58'$, широта - $\varphi=46^{\circ}58'$ к востоку от Гринвича, высота над уровнем моря $h = 54$ м. Телескоп имеет 4-линзовый объектив, диаметром 120 мм, фокусным расстоянием 2044 мм. Он установлен на параллактической монтировке немецкого типа (см. рис.2.4) и оснащен универсальной ПЗС-камерой (1160×1094 pixels, 16×16 мкм²), что позволяет наблюдать небесные явления с полем зрения 28'×32' и масштабом 1.61"/pix. Основная труба находится в одном кожухе с телескопом-гидом, диаметр которого 115 мм и фокусное

расстояние 2000 мм. На кожухе установлен искатель, диаметром 80 мм и фокусным расстоянием 700 мм.

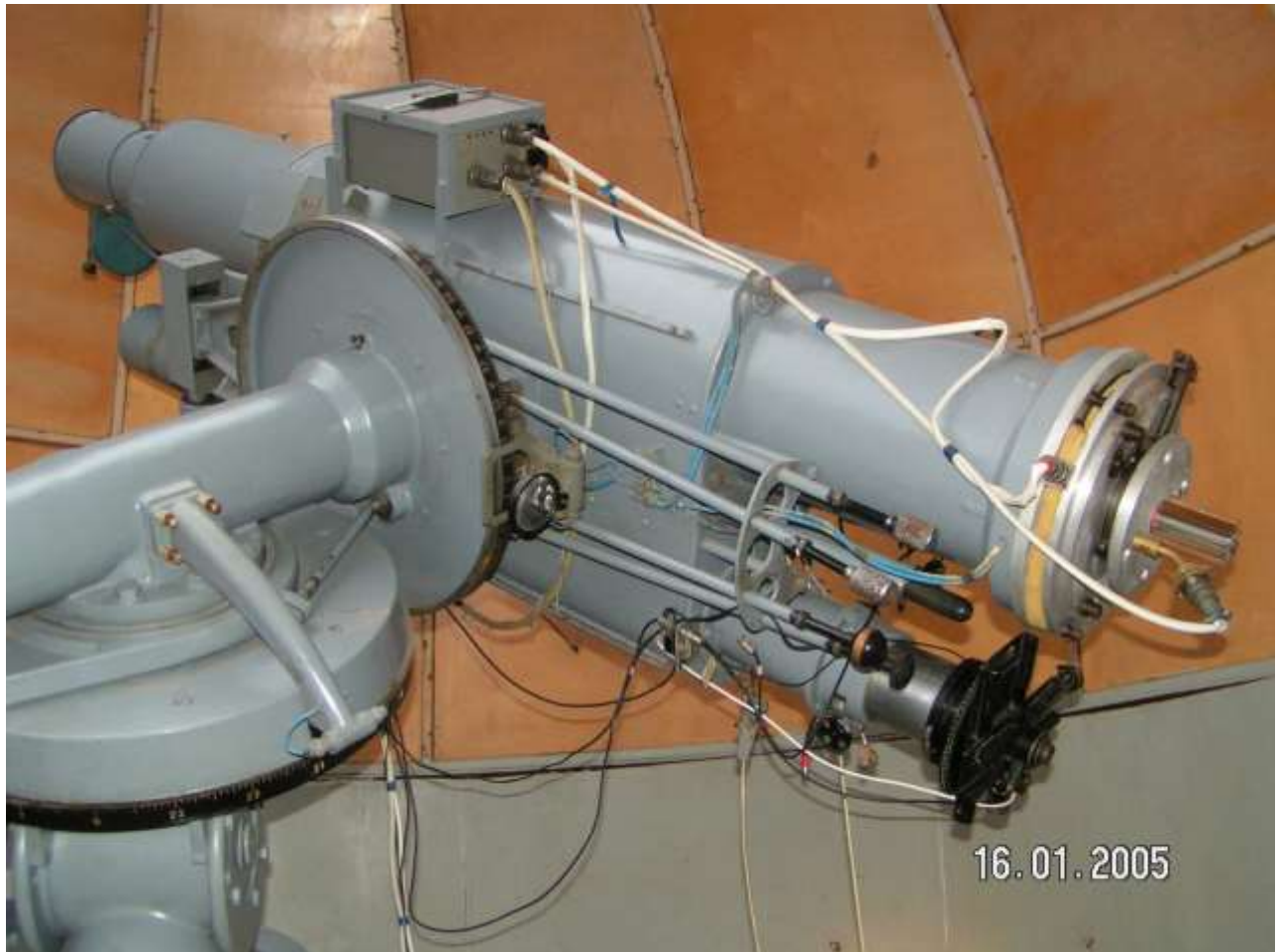


Рис. 2.4 Общий вид мультиканального телескопа (МКТ) НИИ НАО.

В рамках выполнения проекта предполагалось использовать этот телескоп для наблюдений ярких внегалактических радиоисточников до 15 звездной величины. Оказалось, что изображения оптических компонент ярких внегалактических радио источников имеют протяженную структуру и функция Гаусса не описывает распределение яркости в их изображении с достаточной точностью, что не позволило получить их точные положения. Тем не менее, эти кадры были использованы при получении каталога звезд в полях вокруг радиоисточников (см. главу 5).

Таблица 2.5 содержит сведения о полях радиоисточников, которые наблюдались на телескопе МКТ .

Таблица

2.5

Список ERS, наблюдения которых получены на МКТ .

n/n	Name	RA (J 2000.0) h, m, s	Dec (J 2000.0) °, ', "	M_v	$N_{\text{кадр}}$
1	0147-076	1 50 2.697	- 7 25 48.490	15.6	5
2	0238-084	2 41 4.798	- 8 15 20.751	12.3	5
3	0241+622	2 44 57.696	62 28 06.515	12.2	5
4	0316+413	3 19 48.160	41 30 42.103	12.5	5
5	1424+240	14 27 0.391	23 48 0.034	15.0	5
6	1652+398	16 53 52.216	39 45 36.608	13.8	5
7	2200+420	22 2 43.291	42 16 39.979	14.7	5
8	2344+092	23 46 36.839	09 30 45.515	16.0	5

2.1.3 Телескоп Юнаньской обсерватории (1м). Наблюдения радиоисточников в Китае выполнялись астрономами Шанхайской обсерватории (КНР), согласно договору М/267-2003 [97] между Шанхайской и Николаевской обсерваторией. Первые наблюдения были получены на 1.56м телескопе Шанхайской обсерватории. Однако, вследствие больших искажений поля, вызванных применением корректирующей линзы, расширяющей поле зрения, они оказались непригодными для получения астрометрических положений объектов. Наблюдения были продолжены на 1м телескопе

Юнаньской обсерватории. Юнаньская обсерватория одна из четырех крупнейших обсерваторий Китая расположена на горе Феникс (Phoenix Hill) в восточном пригороде Кунь-Миня. Это самая южная обсерватория Китая. Географические координаты телескопа: широта $\varphi = 25^{\circ}01'46''$ северной широты, долгота $\lambda = 102^{\circ}47'18''$ к востоку от Гринвича, высота над уровнем 2000m .

Диаметр зеркала телескопа составляет 1016 мм. В качестве основного приемника в фокусе Ричи-Кретьена 13.3м использовалась матрица размером ТЕК 1024x1024 пикселей. Общий вид телескопа представлен на рисунке 2.5.

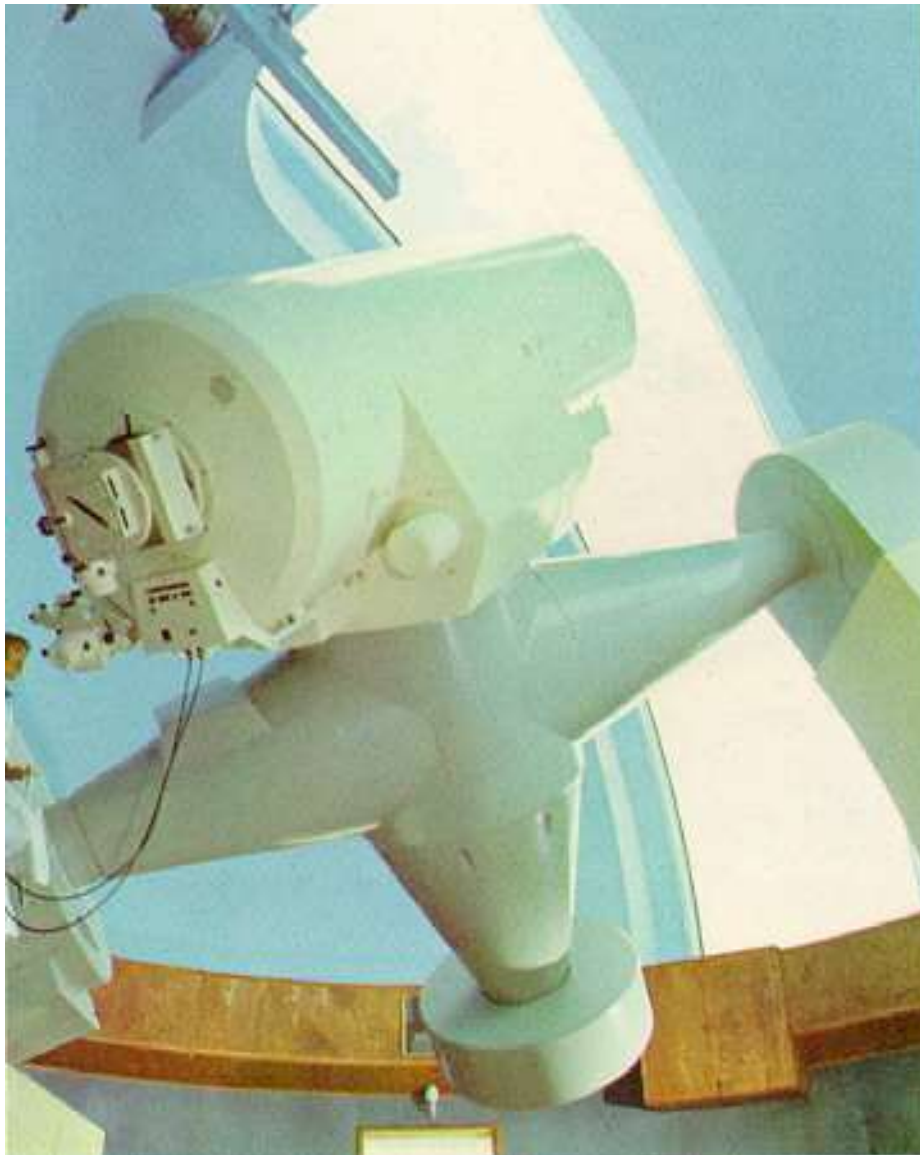


Рис 2.5 Общий вид 1м телескопа Юнаньской обсерватории

Всего за период с 2000 по 2003 год было получено 129 полей вокруг радиоисточников (более 1000 кадров). На рисунке 2.6 представлено распределение этих полей по небесной сфере.

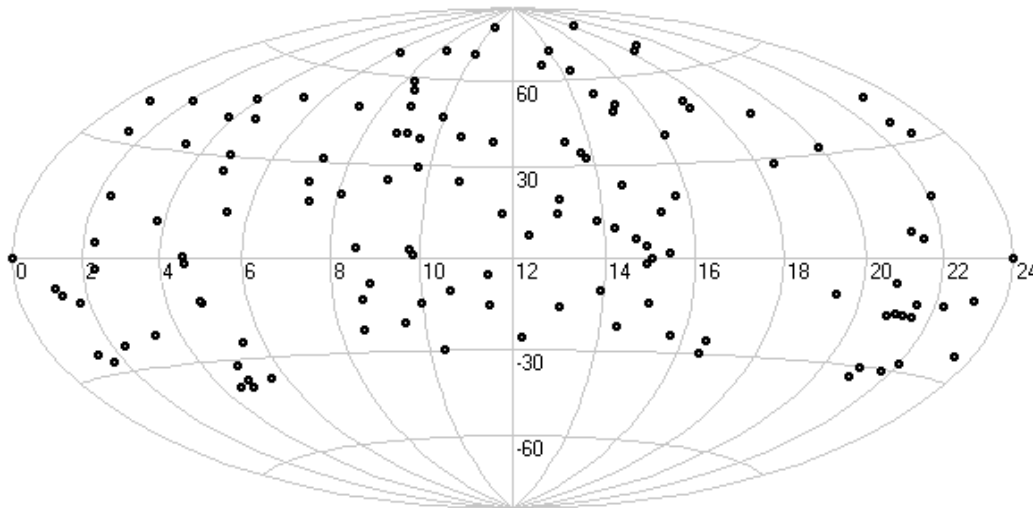


Рис.2.6 Распределение по небесной сфере полей вокруг ERS полученных на 1м телескопе Юнаньской обсерватории (размер поля 6'.4 x 6'.4)

Кроме этого китайскими астрономами были получены наблюдения шести внегалактических источников на 2.16 м телескопе Пекинской обсерватории. Телескоп оснащен матрицей 2048x2048 пикселей и имеет рабочее поле 10'.5 x 10'.5, которое содержит достаточное количество опорных звезд каталога UCAC2 для астрометрических редуций. В таблице 2.6 приведен список полученных полей.

Таблица 2.6

Список радиоисточников, полученный на 2м телескопе ВАО

n/n	Name	RA (J 2000.0) h, m, s	Dec (J 2000.0) °, ', "	M_v	$N_{\text{кадр}}$
1	0552+398	5 55 30.805	39 48 49.165	18.0	7
2	0607-157	6 09 40.950	-15 42 40.67	18.0	8
3	0642+449	6 46 32.025	44 51 16.590	18.5	8

4	0745+241	7 48 36.109	24 0 24.110	19.0	7
5	0748+126	7 50 52.046	12 31 4.83	18.0	9
6	2143-156	21 46 22.979	-15 25 43.885	17.3	7

2.2 Проведение совместной программы наблюдений и анализ полученного материала.

Работа по согласованию программ и списков для наблюдений в разных обсерваториях была выполнена автором с учетом особенностей каждой из них. Общая программа наблюдений должна была учесть следующие требования:

1)проницающую способность каждого из инструментов, которая может быть получена при заданной экспозиции. Для этого было выполнено отождествление тестовых кадров с каталогом USNO A2.0. Для составления программ был использован список внегалактических источников ICRF [44], для которых приведены звездные величины в визуальной области спектра [29]. Однако следует отметить , что для 30 % части радиисточников не удалось получить изображения оптических аналогов. Причинами этого может служить переменность источников в оптическом диапазоне, отличие инструментальных фотометрических систем разных инструментов, а также не точные значения визуальных величин радиисточников, приведенных в каталоге.

На рисунке 2.7 приведена сравнительная гистограмма распределения по звездным величинам ВРИ программы наблюдений и ВРИ, для которых удалось получить оптические изображения и выполнить астрометрические редукиции для получения положений.

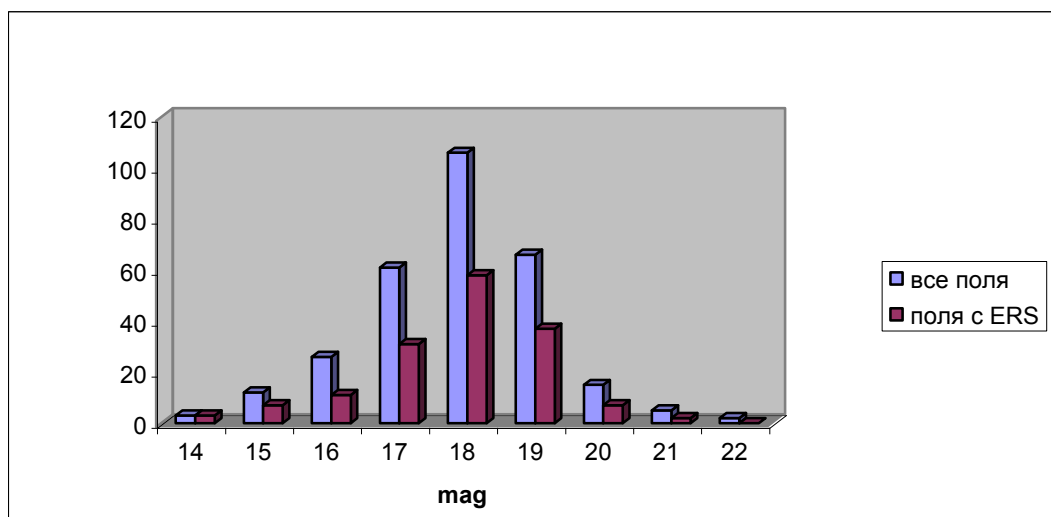


Рис.2.7 Сравнительная гистограмма распределения по звездным величинам.

- 2) широту обсерватории, что ограничило зону доступных склонений интервалом от -35° до $+80^{\circ}$.
- 3) наличие опорных звезд в поле зрения матрицы – число опорных звезд должно быть не менее 3 для осуществления астрономических редукиций. Для этого были сделаны предварительные выборки звезд из различных каталогов (USNO A2.0, USNO B1.0, ERL_CAT, AMC1, UCAC2) с учетом размеров рабочего поля, получаемого с конкретной матрицей. Поля, в которых отсутствуют опорные звезды, были исключены из программы наблюдений.
- 4) распределение объектов программы наблюдений по возможности должно быть как можно более равномерным по обеим координатам.

На рисунках 2.8 представлено полученное распределение источников по прямому восхождению. Программный список составлялся так, чтобы часовые зоны включали приблизительно равные количества источников.

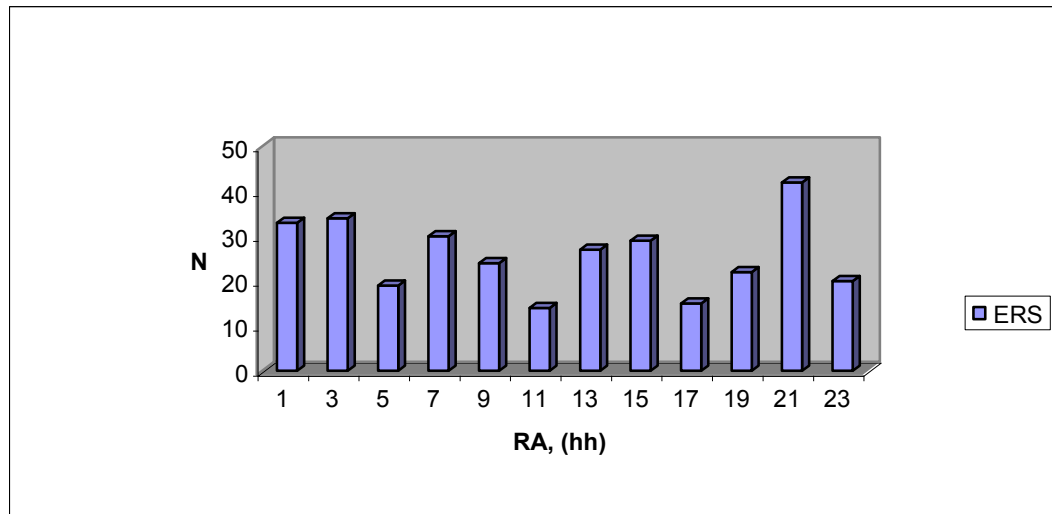


Рис.2.8 Распределение полученных ERS по прямому восхождению

Малое количество источников в зонах Млечного пути $RA = 6^h$, 18^h , связана с трудностями при выделении источников в густонаселенных полях (блендирование изображений яркими звездами), зона 11-12 часов мало наблюдалась в силу коротких ночей в этот период и нестабильных погодных

условий. Распределение полученных полей по склонению приведено на рисунке 2.9. Южная граница склонений определяется широтой обсерватории. Северная область наблюдалась до $+80^\circ$, однако, при обработке области выше $+40^\circ$ возникали трудности, связанные с отсутствием этой зоны склонений в точных опорных каталогах.

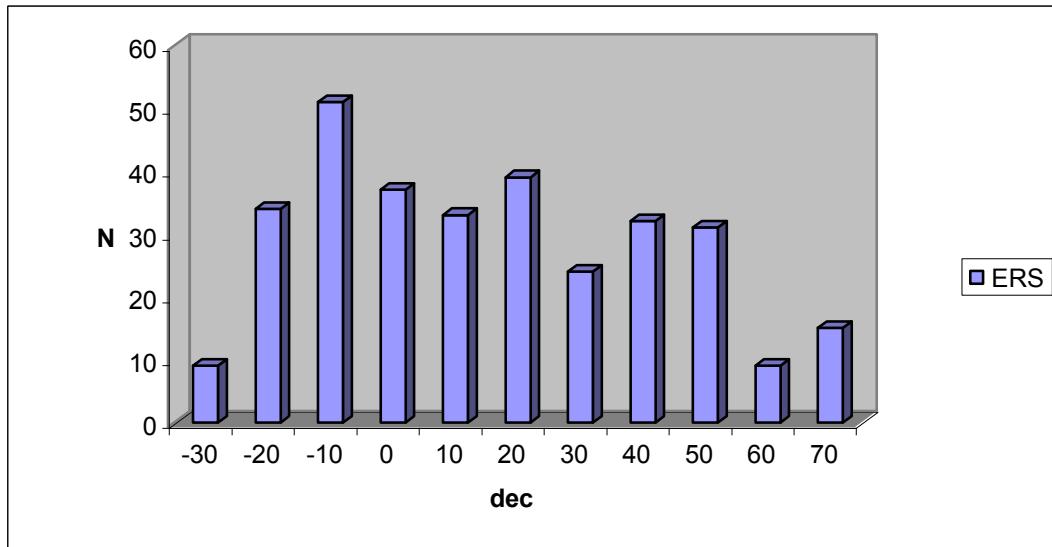


Рис.2.9 Распределение полученных ERS по склонению

Программа наблюдений включала внегалактические источники всех трех групп списка ICRF. Их процентное соотношение приведено в виде круговой диаграммы на рисунке 2.10.

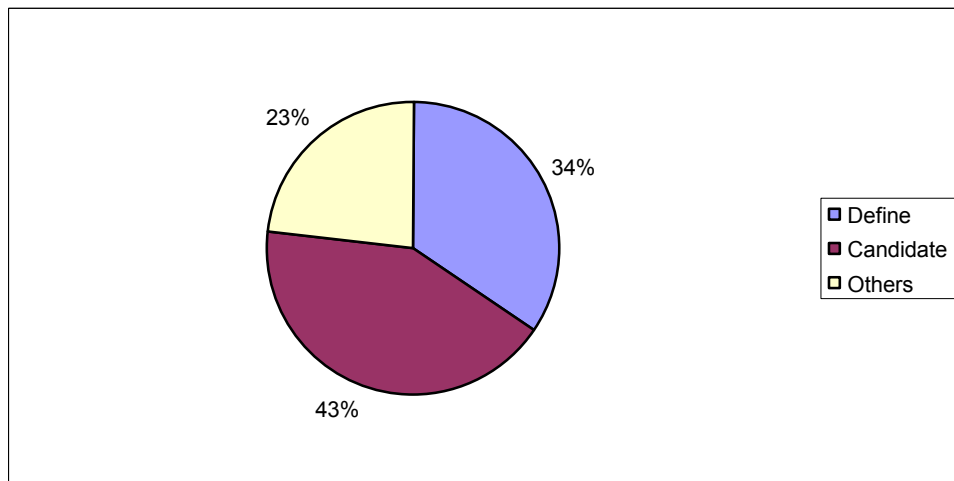


Рис.2.10 Диаграмма процентного соотношения различных групп ERS

Вследствие частичного перекрытия наблюдательных списков число отдельных полей, для которых получены наблюдения составило более 300, из них только для 70 % на кадрах присутствуют изображения оптических компонент внегалактических радиоисточников. Поэтому число полученных положений радиоисточников значительно меньше числа полученных полей со звездами вокруг радиоисточников. На рисунке 2.11 представлено распределение всех полученных в данной программе наблюдений внегалактических радиоисточников по небесной сфере.

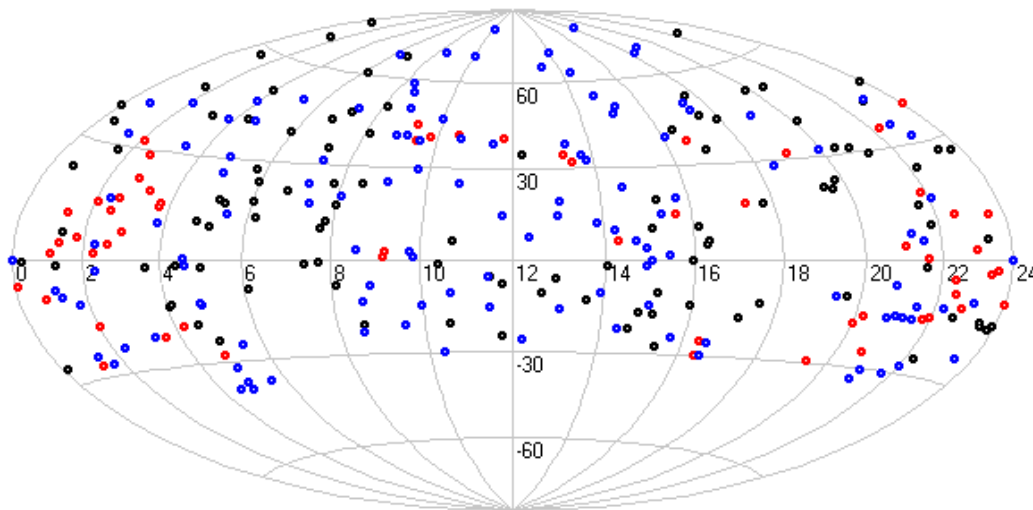


Рис. 2.11 Распределение полученных наблюдений полей вокруг ERS по небесной сфере

2.3 Краткие выводы

1. Приведено описание инструментов и некоторых характеристик ПЗС-приемников, использовавшихся для получения изображений внегалактических радиоисточников.
2. Описаны основные принципы и требования, которые учитывались при составлении программы наблюдений для разных обсерваторий.
3. Выполнен анализ полученного наблюдательного материала, приведено распределение наблюденных полей по небесной сфере. Всего за период

наблюдений получено более 300 полей вокруг радиоисточников (число кадров составило более 2500).

ГЛАВА 3

РЕДУКЦИЯ НАБЛЮДЕНИЙ

Двухмерные приборы с зарядовой связью (ПЗС, charge-coupled device, CCD) – были изобретены в конце 1969 года двумя сотрудниками известной телефонной корпорации Bell [42]. Способность кремния реагировать на видимый свет, привела разработчиков к мысли попробовать использовать его для получения изображений светящихся объектов. Астрономы были одними из первых, кто начал активно применять ПЗС для получения изображений небесных объектов. В 1972 году группа американских ученых из Лаборатории реактивного движения NASA основала программу развития этих приемников света для астрономии и космических исследований. Три года спустя совместно с учеными Аризонского университета эта команда получила первое ПЗС-изображение астрономического объекта – Урана [90]. Широкое применение ПЗС-приемников в астрономии началось позже, когда размеры матриц стали достаточно большими.

ПЗС-приемники имеют большие преимущества перед другими электронными и фотографическими устройствами получения изображений. К их основным достоинствам следует отнести следующие: высокую квантовую эффективность, большой динамический диапазон, линейность отклика, неограниченный срок службы, прямой ввод данных в компьютер. Все это привело к тому, что ПЗС-приемники стали альтернативой не только фотоэлектрическим способам регистрации, но практически полностью вытеснили и фотографические методы регистрации в астрономии. При этом методика редукций на небесную сферу, разработанная для фотографического дифференциального метода, осталась практически без изменений.

Но существуют и два главных недостатка ПЗС: неоднородность чувствительности, связанная с неидентичностью элементов матрицы и малые

размеры. Первый исправляется путем выравнивания кадров с помощью специально получаемых плоских полей, второй – развитием новых технологий, позволяющих получать мозаики матриц. В данной работе был использован наблюдательный материал, полученный с разными матрицами. В этой главе приведено описание этапов калибровки ПЗС-кадра, методика и результаты обработки полученного наблюдательного массива.

3.1 Предварительная обработка ПЗС-кадров

3.1.1 Процедура учета остаточного сигнала после считывания изображения. Даже при быстром считывании практически с нулевой экспозицией картинка появляющаяся на кадре хоть и случайна, но значение интенсивности, усредненное по кадру не равно нулю. Это происходит вследствие того, что при считывании изображения на матрицу подается напряжение, которое изменяет систематически нулевую точку шкалы накопленного сигнала. Эта систематическая часть называется электронным смещением (**bias**) и учитывается путем усреднения интенсивности по изображению, полученному с экспозицией практически нулевой длительности ($\sim 10^{-3}$ с) при закрытом затворе. Затем это среднее значение вычитается из каждого кадра изображения и плоского поля [80]. Среднеквадратическое отклонение от среднего значения, полученного по темновому кадру, характеризует шум считывания, который практически постоянен в течение существенного периода времени и определяется особенностями электронной схемы считывания, иногда проявляя слабую зависимость от температуры охлаждения матрицы. Для более точного учета этой величины все кадры **bias**, полученные за ночь, усредняются медианным или простым арифметическим способом. Результирующий кадр–усредненный байес или супербайес вычитается из всех полученных кадров.

Для использовавшихся матриц были получены кадры супербайеса и определены среднее значения электронного смещения и их

среднеквадратичные ошибки. Численные данные приведены в таблице 3.1. Поскольку среднее значение определяется с достаточно малой ошибкой для учета кадра электронного смещения достаточно простого вычитания среднего из всех кадров.

Таблица 3.1

Среднее значение величины bias (полученное по усредненным кадрам)

Телескоп, матрица	Период Наблюдений	Значение, (ADU)
RTT150, ST8E	2000 –2002	117±6
RTT150, AP47p	Ноябрь, 2002	1551±5
RTT150, AndorDW436	Май, 2003	17±1
	Июнь, 2003	19±1
	Июль, 2003	8±1
	Сентябрь, 2003	10±1
	Октябрь, 2003	9±1
1m YNO	Сентябрь, 2000	259±1
	Июнь, 2003	265±1

При получении кадров bias следует учитывать следующее обстоятельство: главная задача при редукции ПЗС кадров состоит в том, чтобы изменение отношения S/N исходного изображения в результате всех калибровок было по возможности минимальным. В работе [80] приводятся формулы, позволяющие оценить изменение S/N при исправлении сигнала за величину электронного смещения, происходящее на этом этапе редукции кадра:

$$\frac{S}{N} = \left[1 - \frac{const}{S_1} \right] \left(\frac{S}{N} \right)_i.$$

Здесь $\frac{S}{N}$ и $\left(\frac{S}{N} \right)_i$ – это отношения сигнал/шум для полученного и исходного изображения соответственно, а S_1 – накопленный сигнал в каждом пикселе исходного изображения. Чтобы не ухудшать качество исходного изображения, накопленный сигнал в каждом пикселе должен существенно превосходить величину bias. Поскольку величина экспозиции кадра составляла от 60^с до 300^с, это условие было выполнено.

3.1.2 Калибровка темнового кадра. В процессе приема и обработки сигнала в матрице возникают различного рода помехи, так называемые шумы. Одним из наиболее неприятных является шум темнового тока — результат генерации пикселями термоэлектронов. Количество этих “паразитных” электронов зависит от двух основных параметров: продолжительности экспозиции и температуры матрицы. Главная проблема, связанная с темновым током состоит в том, что он накапливается с разной скоростью в каждом пикселе. Если не компенсировать темновой ток, то он может существенно повысить уровень шума в изображении. Этот эффект может быть устранен вычитанием темнового кадра. Темновой кадр - снимок, полученный с той же экспозицией и при той же температуре матрицы, что и научный снимок, но при закрытом затворе. Так как темновой ток в каждом пикселе постоянен при постоянной температуре, то он компенсируется простым вычитанием темнового кадра. Для того, чтобы избежать увеличения уровня шума при вычитании темнового кадра получают средний темновой кадр, как результат сложения нескольких экспозиций темновых кадров. Кроме случайного шума практически все ПЗС-матрицы имеют так называемые «горячие» пиксели, которые генерируют большие количества темнового тока и «битые» (дефектные) пиксели. После калибровки они становятся менее яркими. Есть несколько методов удаления

этих шумящих пикселей. Один путь состоит в том, чтобы просто заменить их средним значением по окрестности пикселей. На рисунке 3.1 представлен вид исходного кадра и кадра после выполнения калибровочных процедур.

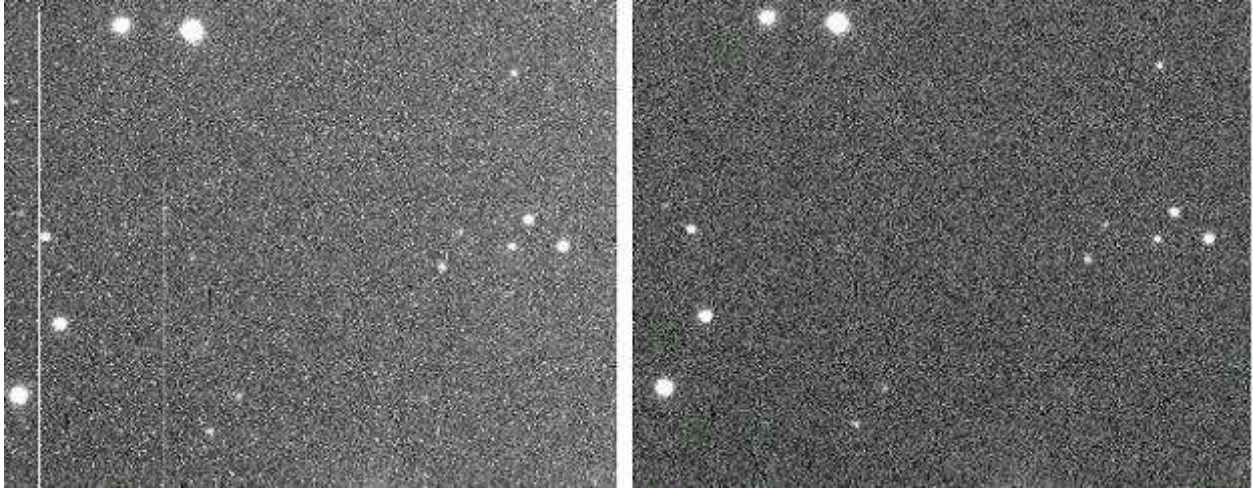


Рис. 3.1 Слева – кадр с исходным изображением, справа – кадр, полученный в результате вычитания среднего значения bias и усредненного кадра темнового тока

Для исследования влияния калибровки темнового тока на точность определения положений были взяты серии из 5 кадров радиоисточников 1901+319 (телескоп RTT150, матрица Andor DW436, 1 m телескопе YNO) и 1923+210 (телескоп RTT150, матрица ST8E). Эти внегалактические источники находятся в области Млечного пути, поэтому число опорных звезд в исследуемых полях составляет несколько сотен. В результате проведенного исследования оказалось, что учет темнового кадра необходимо производить только для массива данных, полученных с матрицей *ST8E*. Матрица освещена напрямую и имеет квантовую эффективность около 30-60%. Охлаждается она до температуры -35° относительно температуры окружающей среды. Из-за этого матрица имеет относительно высокий темновой ток. Его величина сильно зависит от температуры матрицы, а следовательно, от температуры

окружающей среды. Поэтому правильная калибровка темнового тока оказывается крайне важной.

Влияние процедуры учета кадра с темновым током на точность полученных положений представлено на рисунке 3.1.

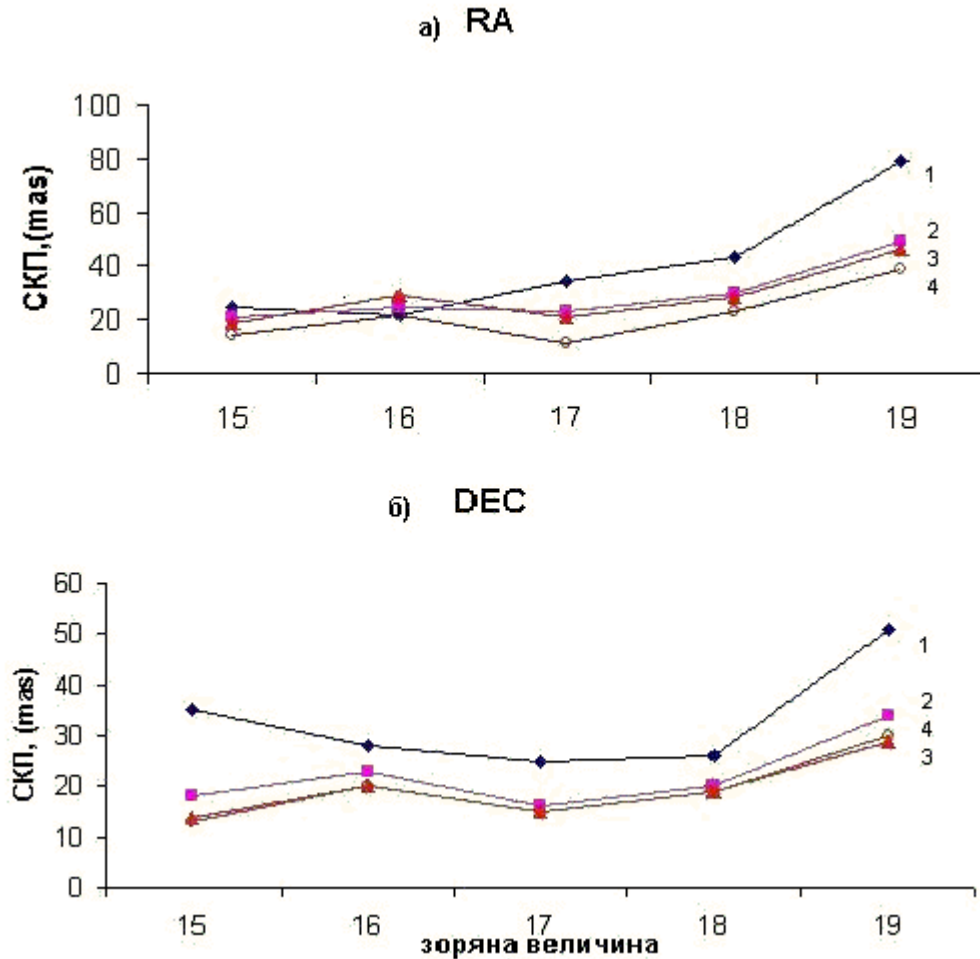
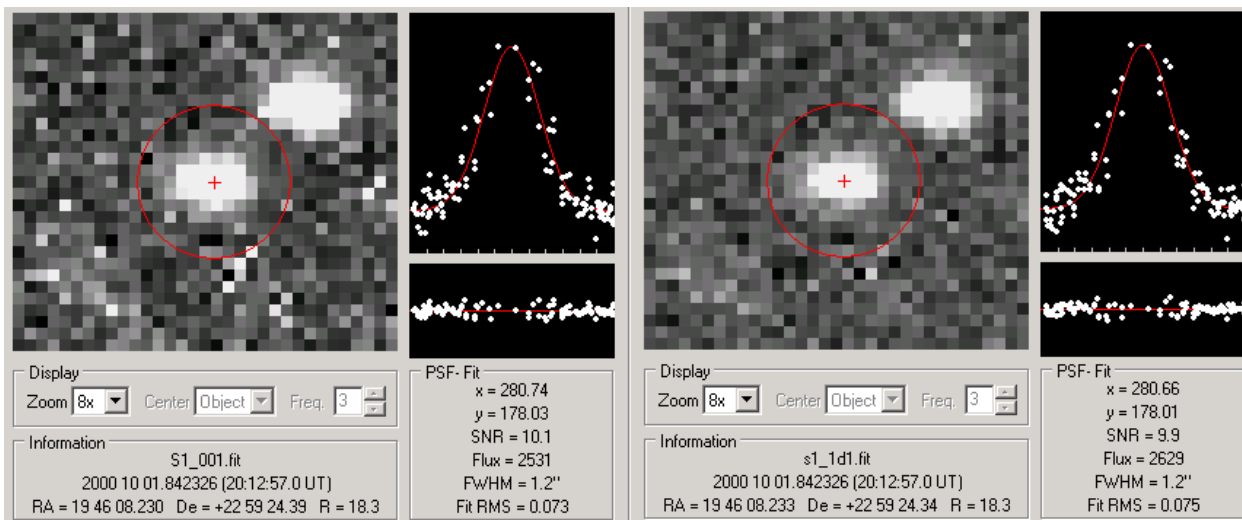


Рис. 3.2 Зависимость СКО положения звезды в зависимости от звездной величины (а) – по прямому восхождению, б) – по склонению) для матрицы *ST8E* (RTT150).

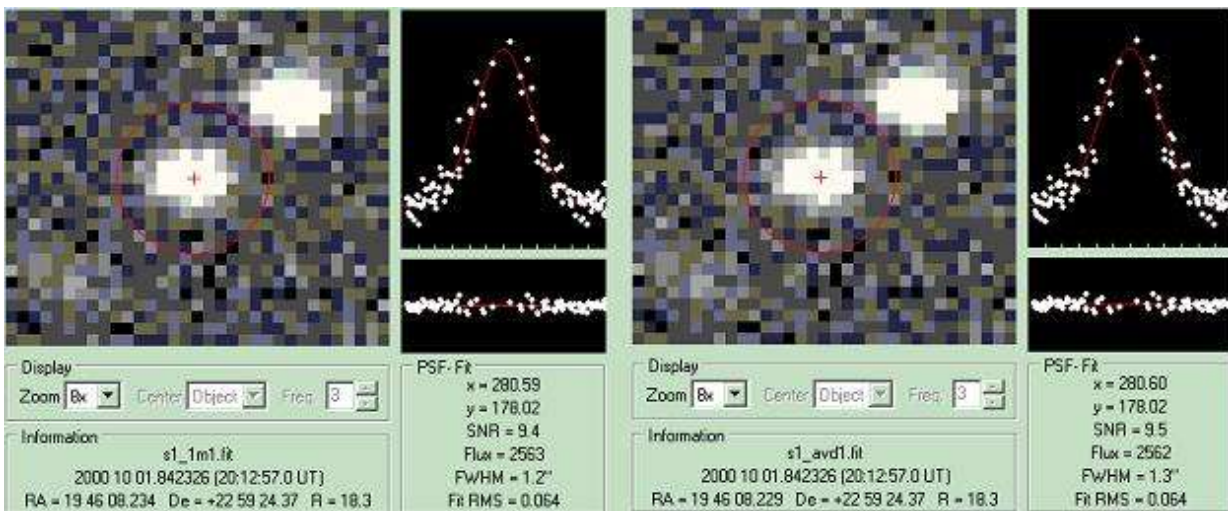
Данные для ряда 1 получены в случае без учета темнового кадра, ряд 2 – выполнялась коррекция кадра с использованием темнового кадра, полученного при тех же условиях что и исходный кадр, ряд 3 – выполнялась коррекция кадра с применением среднего темнового кадра, полученного в результате усреднения серии темновых кадров с экспозицией равной экспозиции кадра с изображением (100 кадров, экспозиция $t=60^s$), ряд 4 –

выполнялась коррекция кадра с применением темнового кадра, полученного усреднением по медиане серии из 5 кадров. Этот этап калибровки приводит к тому, что изображения на кадрах, где вычтен темновой ток более точно соответствуют профилю распределения Гаусса, которое принималось в качестве аппроксимации для вычисления центров изображений. На рисунке 3.2 показаны данные фотометрического разреза обработки для одной и той же звезды, полученные с различными вариантами учета кадра с темновым током. Рисунок показывает, что вычитание усредненного темнового кадра (варианты 3 и 4) улучшает точность определения центра изображения на 9% (Fit RMS = 0.073 и 0.064 соответственно).



1)

2)



3)

4)

Рис 3.3 Изображение звезды и ее фотометрический разрез в зависимости от варианта учета темнового кадра

Для матриц Andor DW436 (телескоп RТТ150) и ТЕК 1024x1024 (1м телескоп YNO) уровень темнового тока настолько мал, что практически не влияет на значения центров изображений объектов на матрице и не учитывался при обработке полученных наблюдений.

3.1.3 Учет кадра плоского поля. Каждый пиксел в ПЗС-камере имеет слегка различную чувствительность к свету. На фоне яркого неба любые изменения чувствительности от пиксела к пикселу отражаются на изображении; более чувствительный пиксел обнаруживается как более яркая точка. Кадр плоского поля – это карта чувствительности каждого пикселя матрицы. Для получения кадра плоского поля оптическая система должна быть освещена однородным источником света. Обычно, на практике для получения хорошего кадра плоского поля подбирают экспозиции, которые дают интенсивность, соответствующую от 30 % до 50 % уровня насыщения. Для выравнивания плоского поля производится нормирование кадра плоского поля на среднее значение по матрице. Пикселу, который является более чувствительным, присваивается число, чуть меньше 1; любому пикселу, который является менее чувствительным, присваивается число чуть больше единицы. Когда этот кадр умножается на кадр с исходным изображением, то удаляется разброс чувствительности. Часто для получения равномерно освещенного поля используют сумеречное небо как диффузный источник света [99].

Для корректного учета плоского поля сами кадры с плоским полем должны быть калиброваны, из них необходимо вычесть значение электронного смещения $bias$ и выполнить коррекцию темнового тока. Установлено, что учет калибровки плоского поля зависит от цвета излучающего света. Это означает, что кадры плоского поля должны быть получены со всеми фильтрами,

которые использовались при получении научных данных. Корректировка плоского поля важна для формирования изображений хорошего качества и абсолютно необходима для точных фотометрических измерений. В работе [80] сделан анализ изменения отношения сигнал/шум в случае коррекции за плоское поле. Если одно изображение делится на другое, то отношение S/N для результирующего изображения имеет следующий вид:

$$\frac{S}{N} = \left[1 + \left(\frac{(S/N)_1}{(S/N)_{ff}} \right)^2 \right]^{-1/2} \left(\frac{S}{N} \right)_1,$$

где $(S/N)_{ff}$ – отношение сигнал/шум для изображения плоского поля. Из этого уравнения видно, что отношение сигнал/шум для результирующего изображения равно 0.707 от исходного значения в том случае, если величины $(S/N)_1$ и $(S/N)_{ff}$ равны между собой. Чтобы не ухудшать отношение сигнал/шум для исходного изображения, необходимо иметь результирующее изображение плоского поля, для которого отношение сигнал/шум каждого пикселя было бы

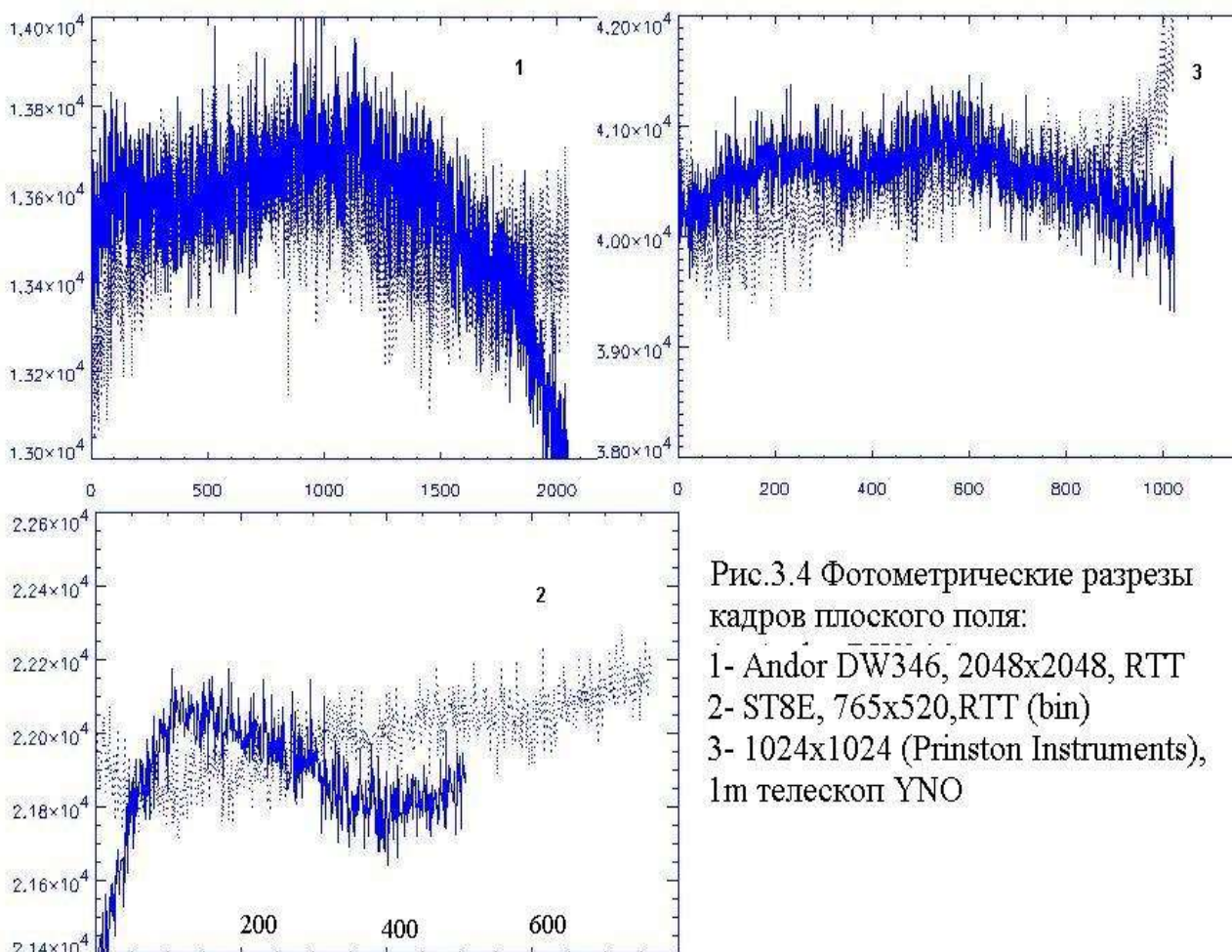


Рис.3.4 Фотометрические разрезы кадров плоского поля:

- 1- Andor DW346, 2048x2048, RTT
- 2- ST8E, 765x520,RTT (bin)
- 3- 1024x1024 (Princeton Instruments), 1m телескоп YNO

намного больше отношения сигнал/шум для каждого пикселя исходного изображения. Это

достигается путем усреднения достаточного количества хорошо насыщенных индивидуальных изображений плоских полей. Практически это реализуется выбором кадров плоского поля, на которых еще не проявляются звезды, а среднее

значение интенсивности сравнимо с величиной интенсивности сигнала «непередержанных» звезд. В течение каждого периода наблюдений на RТТ150 были получены изображения плоских полей для каждого светофильтра и при той конфигурации прибора, которая использовалась при наблюдениях радиоисточников. Исследование этих кадров показало хорошее качество матриц ST8E и Andor DW436. На рисунке 3.4 приведены разрезы изображения плоского поля по строкам и столбцам для разных матриц. Кадры плоского поля были учтены при обработке кадров с изображениями, хотя сравнение различных вариантов обработки показало, что на определение центров изображений звезд они практически не влияют.

3.2 Астрометрическая редукция наблюдений

3.2.1 Поиск объектов и определение их координат в системе матрицы.

Следующая задача, которая встает при обработке исходного кадра: найти на поле объекты и определить их координаты. При отождествлении обычно используют некоторые критерии, позволяющие выделить звезды поля из фона, оценить их компактность и, тем самым, отсеить ложные объекты, такие как следы космических лучей или галактики. Часто используется кластерный алгоритм: исследуется группа пикселей, расположенных на площади, не превышающей ожидаемый размер изображения с амплитудой сигнала, превышающей заранее заданное значение S/N . Изображение звезды как

правило представляет из себя размытое пятно, может быть, несимметричное. Для описания профиля изображения звезды вводится понятие функции рассеяния точки (в английском языке – point-spread-function (PSF)). PSF - это двумерная функция распределения яркости. Чаще всего для описания профиля изображения звезды используют симметричное распределение Гаусса [37, 92]:

$$I_{(x,y)} = H \times e^{-\frac{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2}{2\sigma^2}} + B$$

Здесь $I_{(x,y)}$ – освещённость в точке с координатами x, y ; x_0, y_0 – координаты центра изображения; σ – величина, характеризующая размытость изображения, которая связана с шириной гауссианы на половине максимума интенсивности (FWHM – Full Width of Half Maximum) соотношением $\sigma = FWHM/2.355$; H – величина, определяющая интенсивность изображения, зависящая от звездной величины объекта; B – величина, характеризующая уровень фона (см. рис.3.5).

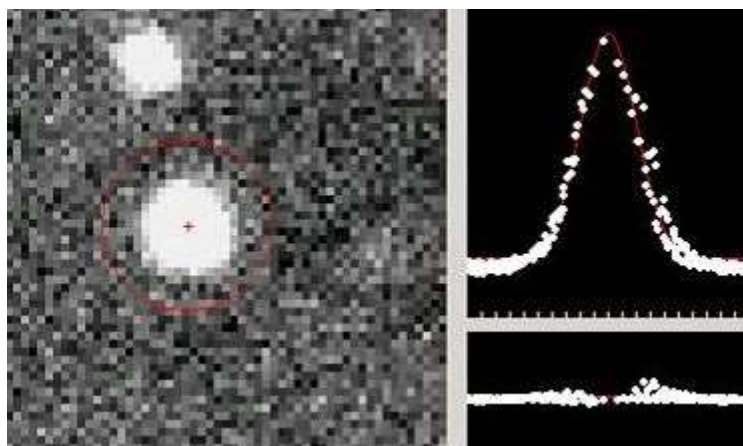


Рис.3.5 Изображение звезды на ПЗС-кадре (слева) и аппроксимация PSF функцией Гаусса.

Если мы найдём параметры H , B , x_0 , y_0 , σ , задача будет решена. Очевидно, надо найти способ, как отыскать искомые параметры, используя интенсивности пикселей, на которые приходится изображение. Если изображение звезды занимает несколько пикселей, световая энергия, приходящаяся на один пиксель, будет:

$$I_i(H, B, \sigma, x_0, y_0) = \int_{x_i}^{x_i + \Delta x} \int_{y_i}^{y_i + \Delta y} \left(H \times e^{-\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{2\sigma^2}} + B \right) dx dy$$

Здесь i – номер пикселя, x_i , y_i – координаты одного из углов пикселя, Δx , Δy – размеры пикселя по осям x и y , σ – величина, характеризующая размытость изображения, B – параметр фона. Таких уравнений можно написать столько, сколько пикселей занимает изображение звезды, и считать, что они образуют систему уравнений, где неизвестными являются параметры функции рассеяния точки. Решив эту систему уравнений способом наименьших квадратов, найдём неизвестные параметры.

Этот простой способ не лишён многих недостатков. Например, для разных звёзд параметр σ несколько различается, хотя функция рассеяния точки на малом поле зрения ПЗС-матрицы должна определяться только свойствами оптики. Совсем не обязательно PSF является гауссовой, она может зависеть от распределения энергии в спектре звёзды т.е. наша модель не обязательно соответствует действительности. Однако сравнение различных методов определения центров изображения показывает целесообразность использования именно этой модели аппроксимации PSF по причине более высокой точности и стабильности по сравнению с другими [96]. В работе [80] приведена формула, которая позволяет оценить точность определения центра изображения данным методом:

$$\sigma_x = a \sqrt{\frac{5}{3} \left(\frac{S}{N} \right)^{-1}}$$

здесь σ_x – ошибка в определении координаты x ; $\frac{S}{N}$ – отношение сигнал/шум, a – размер пикселя. В случае, когда профиль яркости звезды аппроксимируется гауссовой функцией, величина a заменяется параметром σ гауссианы ($\sigma = FWHM/2.355$). Отношение $\frac{S}{N}$ для данного типа приемника определяется звездной величиной объекта, уровнем фона на кадре, уровнем темнового тока. Зависимость определения точности положения центра изображения от звездной величины для ПЗС-матриц, с которыми были получены наблюдения представлена на рисунке 3.6.

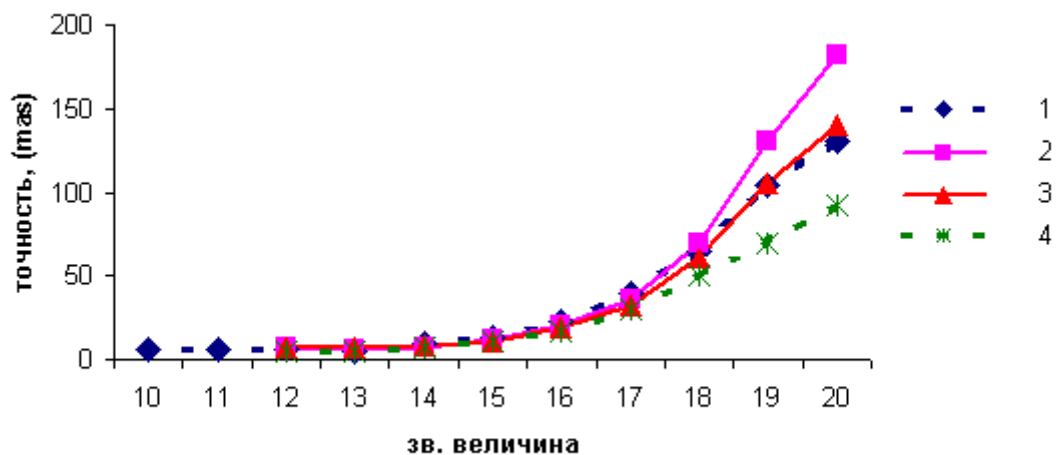


Рис.3.6 Зависимость ошибки определения центра изображения звезды от звездной величины для разных типов приемников (1 – 765x520, RTT150; 2 – 1024x1024, 1m YNO; 3 – 2048x2048, ВАО; 4 – 2048x2048, RTT150)

Окончательная ошибка, с которой можно получить положение объекта, зависит не только от точности измерения его центра, но также включает ошибку опорного каталога и ошибку выбранной для редукции модели [8].

3.2.2 Определение сферических координат объектов. Использование одной из функций в качестве PSF, что было описано в предыдущем параграфе, позволяет получить координаты объектов в плоской прямоугольной системе координат, связанной с ПЗС-матрицей. Они называются инструментальными измеренными координатами x, y в системе матрицы. Задача перехода от измеренных координат в системе матрицы к экваториальным на небесной сфере решается путем введения тангенциальных (другие их названия - идеальные, стандартные) координат ξ_s, η_s , которые связаны с экваториальными математической зависимостью.

Отличие измеренных координат от идеальных заключается в следующем:

- тангенциальные координаты привязаны к оптическому центру матрицы, тогда как начало системы измеренных координат может не совпадать с ним;
- координаты на матрице измеряются в пикселях, в то время как тангенциальные координаты выражаются в угловой или отвеченной мере;
- измеренные координаты могут быть отнесены к эпохе, отличной от эпохи каталога, использованного для вывода тангенциальных координат звезд;
- наклон матрицы к оптической оси требует введения дополнительных поправок измеренным координат [8].

Рассмотрим линейное преобразование измеренных координат x, y в систему стандартных ортогональных координат ξ_s, η_s , определенным образом ориентированных с началом в заданной точке матрицы $O(x_0, y_0)$ и с заданным масштабом M_0 (рис 3.7).

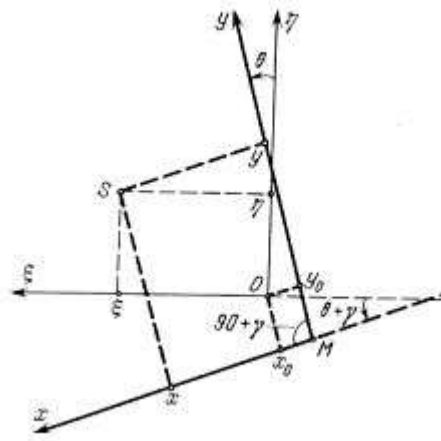


Рис.3.7 Связь измеренных и идеальных координат.

Соответствующие формулы преобразования имеют следующий вид:

$$\xi_s = M_x \times (x - x_0) \times \cos(\theta + \gamma) + M_y \times (y - y_0) \times \sin \theta$$

$$\eta_s = -M_x \times (x - x_0) \times \sin(\theta + \gamma) + M_y \times (y - y_0) \times \cos \theta .$$

Здесь M_x и M_y — отношения масштабов по осям x и y к масштабу стандартных координат M_0 ; x_0, y_0 — измеренные (инструментальные) координаты точки O , принятой за начало стандартных координат; θ — позиционный угол оси y относительно направления оси $O\eta_s$, который отсчитывается в направлении оси $O\xi_s$; $90^\circ + \gamma$ — координатный угол инструментальной системы измеренных координат.

Если за начало системы стандартных координат принять оптический центр матрицы, т.е. соединить точку O с изображением звезды, спроектированной в оптическом центре T , и направить ось $T\eta_s$ вдоль меридиана к северу, то такую

систему стандартных координат называют экваториальными тангенциальными координатами. Переход от инструментальных к тангенциальным координатам, определенный вышеприведенными формулами, в общем виде записывается в виде линейных зависимостей, включающих шесть постоянных a, b, c, d, e, f :

$$\xi_s = c + ax + by \quad (3.1)$$

$$\eta_s = f + dx + cy$$

Эти постоянные называются постоянными пластинки и имеют следующие значения:

$$\begin{aligned} a &= M_x \cos(\theta + \gamma), \\ b &= M_y \sin \theta, \\ c &= -M_x x_0 \cos(\theta + \gamma) - M_y y_0 \sin \theta, \\ f &= M_x x_0 \sin(\theta + \gamma) - M_y y_0 \cos \theta, \\ d &= -M_x \sin(\theta + \gamma), \\ e &= M_y \cos \theta, \end{aligned}$$

причем точку на матрице P с координатами x_0, y_0 следует считать совпадающей с оптическим центром T этой матрицы.

Уравнения (3.1) можно рассматривать как условные для определения постоянных пластинки и связанных с нею параметров измеренных координат [8]. Экваториальные координаты искомого объекта определяются с помощью опорных звезд. Для этого на кадре необходимо отождествить хотя бы несколько звезд экваториальные координаты которых на момент наблюдения считаются известными и определить их тангенциальные координаты, следуя классическим формулам:

$$\xi = \frac{\cos \delta \sin(\alpha - A)}{\sin \delta \sin D + \cos \delta \cos D \cos(\alpha - A)}, \quad (3.2)$$

$$\eta = \frac{\sin \delta \cos D - \cos \delta \sin D \cos(\alpha - A)}{\sin \delta \sin D + \cos \delta \cos D \cos(\alpha - A)},$$

где α, δ - экваториальные координаты звезды, A, D – экваториальные координаты оптического центра матрицы.

Определим измеренные координаты $\{x, y\}$ опорных звезд в некоторой произвольной системе матрицы. Рассмотрим вместе с данной рабочей матрицей P некоторую фиктивную матрицу сравнения Π с оптическим центром в A и D , положения звезд на которой зададим с помощью тангенциальных координат ξ, η формула (3.2). С помощью опорных звезд установим точное однозначное соответствие между точками x, y измеряемой матрицы P и точками ξ, η , матрицы сравнения Π согласно формулам линейного преобразования. Их вид совпадает с формулами (3.1), из чего следует, что они являются самыми простыми строгими формулами, которые позволяют перейти от произвольной косоугольной системы измеренных координат к стандартной прямоугольной системе, определенным образом ориентированной, т. е. к системе тангенциальных координат. Важным достоинством линейных формул общего вида является то, что в процессе редукции они позволяют учесть также и линейные эффекты дифференциальной рефракции и дифференциальной абберации.

Определив таким образом коэффициенты пластинки a, b, c, d, e, f , находим стандартные координаты всех искомым объектов на кадре и, используя формулы обратного тригонометрического преобразования, получаем сферические экваториальные координаты :

$$\operatorname{tg}(\alpha - A) = \frac{\xi \sec D}{1 - \eta \operatorname{tg} D},$$

$$\operatorname{tg} \delta \sec(\alpha - A) = \frac{\eta + \operatorname{tg} D}{1 - \eta \operatorname{tg} D}.$$

Следует отметить, что иногда для связи измеренных и тангенциальных координат применяют модели с большим количеством постоянных. В пакете «ASTROMETRICA» [61], который использовался для получения экваториальных координат внегалактических радиоисточников, реализовано

три модели связи : линейная с 6 постоянными, квадратичная с 12 постоянными и кубическая с 20 постоянными. В нашем случае, когда речь идет об обработке полей меньше $10'$, можно полностью пренебречь искажениями проекции и, чтобы выполнить строгую астрометрическую редукцию измерений, достаточно учесть влияние дифференциальной рефракции и абберации на масштаб и ориентировку измерений [8, с.228], что достигается применением линейной модели связи. Кроме того линейная модель является более эффективной по сравнению с моделями более высокого порядка (квадратичной и кубической) поскольку обеспечивает практически ту же точность при значительно меньшем количестве опорных звезд. В таблице 3.2 приведены оценки ошибок астрометрической редукции, выполненные с использованием различных моделей связи.

Таблица 3.2

Точность редукции при разных моделях связи координат

Модель редукции	σ_α, mas	σ_δ, mas
Линейная (3 x 3)	50	41
Квадратичная (6 x 6)	51	41
Кубическая (10x10)	52	42

Данные, приведенные в таблице, получены по результатам обработки серии кадров радиоисточника 1921–293 (координаты оптического центра: $\alpha = 19^h 24^m 49^s.4$, $\delta = -29^\circ 14' 12''.9$). Для определения координат радиоисточника использовалось поле размером $8'.2 \times 8'.2$, содержащее 49 опорных звезд каталога UCAC2.

3.2.3 Анализ астрометрических каталогов, использовавшихся для получения каталога оптических положений ERS. Оценка внутренней и внешней сходимости. Анализ существующих на тот момент астрометрических каталогов показал, что площадки размером от $3' \times 4'$ до

10'x10' содержат недостаточное количество опорных звезд для выполнения астрометрических редукиций непосредственно в системе HCRF. Из таблицы 3.3, в которой приведены основные характеристики существующих каталогов, видно, что в качестве опорного каталога до 2003 года могли быть использованы только каталоги USNO (USNOA1.0, USNOA2.0).

Таблица 3.3

Некоторые характеристики оптических каталогов, использовавшихся для определения положений ERS

Каталог	Количество звезд (тыс.)	Зона склонений	Диапазон звездных величин	Точность положений, mas
TC2	2 500	$\pm 90^0$	$8^m - 12^m$	10 - 100
UCAC2	48 000	$-90^0 - +52^0$	$10^m - 16^m$	20 - 70
USNO-A2.0	526 300	$\pm 90^0$	$8^m - 24^m$	250
USNO-B1.0	1 042 000	$\pm 90^0$	$8^m - 21^m$	200
CMC 13	36200	$-3^0 - 30^0$	$9^m - 17^m$	50 - 100
ERL_CAT ¹	82	398 полей	$10^m - 14^m$	50
KMAC1-CU ¹	115	192 поля ($0^\circ - 30^\circ$)	$9^m - 17^m$	50 - 90
XC1 ¹	1000	255 полей ($0^\circ - 90^\circ$)	$10^m - 20^m$	30 - 80

¹ - каталоги, содержат звезды только в полях вокруг радиоисточников

Как уже было указано ранее, всего за период наблюдений было получено свыше 2500 кадров наблюдений более 300 полей вокруг внегалактических радиоисточников. Только на 70% из них присутствуют изображения оптических компонент ERS, для которых возможно получить положения. Можно выделить следующие причины, которые привели к подобному результату:

- 1) недостаточная яркость объекта в оптическом диапазоне (объект отсутствует на кадре),
- 2) блендирование изображения радиисточника яркой звездой (невозможно разделить профили изображения источника и звезды),
- 3) отсутствие опорных звезд в поле кадра (это относится, в основном, к наблюдениям с матрицей ST8E),
- 4) ошибки при установке (менее 2%).

Каждый источник наблюдался сериями, которые включают от 5 до 15 кадров. Среднее число наблюдений одного радиисточника составило 7.2 раза. Для каждого кадра серии были получены экваториальные координаты радиисточника, которые далее усреднялись без назначения весов отдельным наблюдениям. В результате обработки определены положения 213 внегалактических радиисточников списка ICRF. Для 142 из них положения получены с использованием звезд каталога UCAC2 в качестве опорных. Полный каталог оптических положений радиисточников приведен в приложении А, где информация организована в виде, представленном таблицей 3.4.

Таблица 3.4

Организация полученных в работе данных, приведенных в приложении А

Название	Mag	α_R (J 2000.0) h, m, s	δ_R (J 2000.0) °, ', "	$\Delta\alpha\cos\delta$ (mas)	$\Delta\delta$ (mas)	$\sigma_\alpha \cos\delta$	σ_δ	Каталог
1. 0735+178	16.2	07 38 07.413	17 42 19.324	-43	2	7	3	UCAC2

В таблице дано название – порядковый и каталожный номер внегалактического радиисточника; mag – звездная величина ERS в оптическом диапазоне; α_R, δ_R – прямое восхождение и склонение ERS; $\Delta\alpha\cos\delta$, $\Delta\delta$ – значения разностей положений ERS в оптическом (полученные) и радио (из каталога ICRF) диапазонах для прямого восхождения - α и склонения - δ соответственно; σ_α , σ_δ – среднеквадратические ошибки определения $\Delta\alpha\cos\delta$ и

$\Delta\delta$ для α и δ соответственно; Каталог – опорный каталог, который использовался для вычисления положения радиоисточника.

Результаты астрометрических редуций наблюдательного массива с каталогом USNOA2.0 в качестве опорного, показали хорошую внутреннюю точность полученного материала (см. рис 3.8) и наличие значительных систематических и случайных ошибок каталога USNOA2.0 [16, 34]. На рис. 3.8 приведена гистограмма распределения среднеквадратических ошибок полученных оптических положений по внутренней сходимости. Средняя ошибка определения положения составила $\sigma_\alpha = 38 \text{ mas}$, $\sigma_\delta = 37 \text{ mas}$.

Каталог USNOA2.0 имеет сравнительно низкую точность ($>250 \text{ mas}$) и не содержит информации о собственных движениях. Учитывая значительную разницу эпох наблюдений каталога и обрабатываемого материала, стало ясно, что получить положения внегалактических источников для последующего решения задачи определения параметров связи не представляется возможным.

В начале 2003 года стал доступным для редуций каталог USNOB1.0 [77], который содержит положения и собственные движения более 1 миллиарда объектов до 21 звездной величины. Была выполнена повторная обработка всего полученного к тому времени наблюдательного материала с использованием этого каталога в качестве опорного. В результате были получены положения 198 внегалактических объектов списка ICRF. Результаты обработки показали незначительное улучшение точности в систематическом отношении по сравнению с предыдущим вариантом обработки с использованием каталога USNOA2.0.

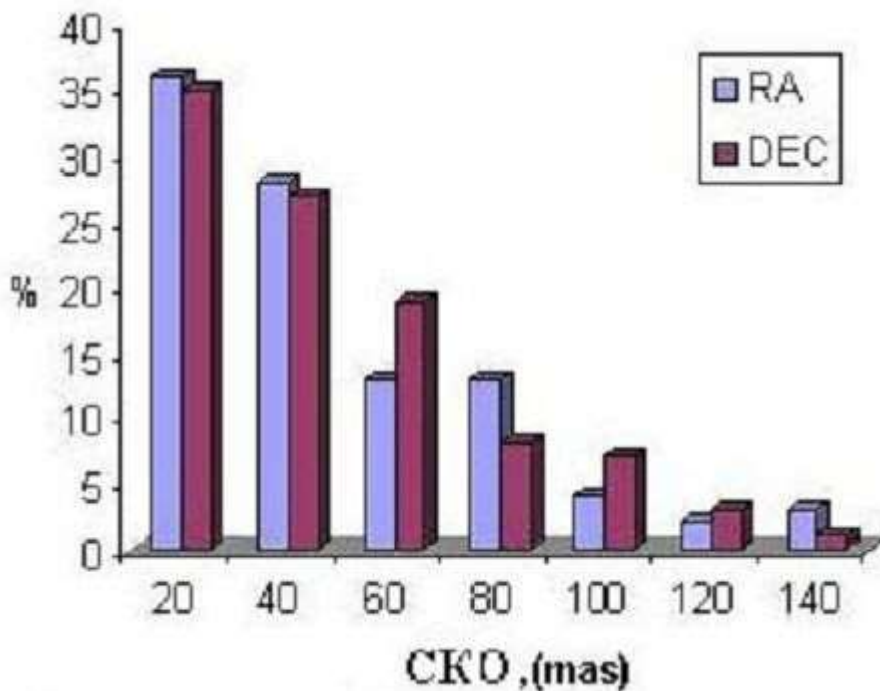


Рис. 3.8 Гистограмма распределения среднеквадратических ошибок полученных оптических положений по внутренней сходимости

Сравнение полученных оптических положений с радиоположениями из каталога ICRF показало, что средние значения разностей экваториальных координат в смысле (USNO B1.0 – ICRF) для массива, содержащего 193 источника составляют: $\Delta\alpha\cos\delta = -43\pm 133$ mas и $\Delta\delta = 179\pm 116$ mas (исключены разности, превышающие 500 mas).

На рисунке 3.9 приведена гистограмма распределения полученных разностей. Результат исследования систематического хода разностей в смысле (USNO B1.0 – ICRF) в зависимости от склонения и прямого восхождения представлен на рисунке 3.10. Как видно из графиков, ход разностей $(\Delta\alpha\cos\delta)_{\delta}(1)$ не обнаруживает значительных систематических расхождений в пределах полученной точности положений, в то время как ход разностей $(\Delta\delta)_{\delta}(2)$ указывает на существование значительного смещения в системе склонений каталога USNO B1.0 на величину 180 mas [34, 14].

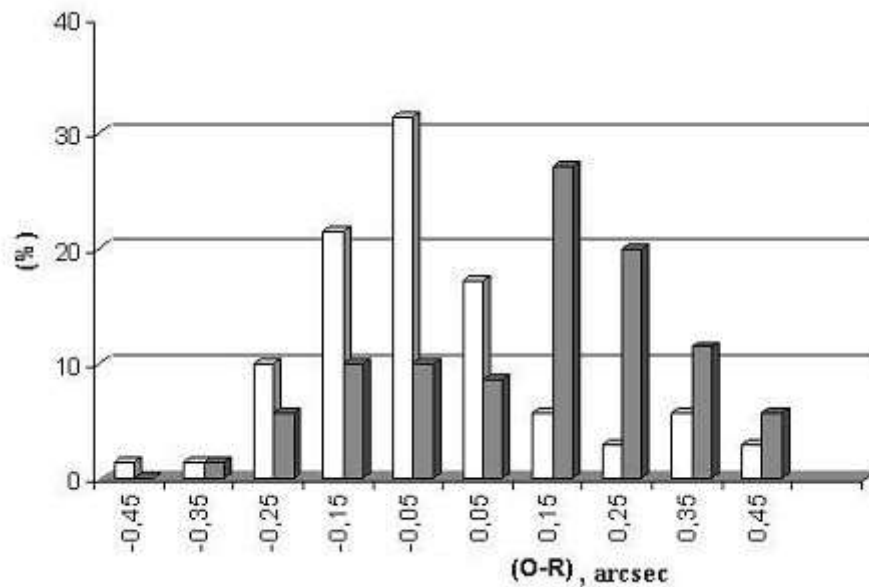


Рис 3.9 Гистограмма распределения разностей экваториальных координат в смысле (USNO B1.0 – ICRF), светлые столбцы – разности по RA, темные – Dec

Осенью 2003 года появилась возможность переобработать большую часть полученных наблюдений с каталогом UCAC2 [103]. Этот каталог содержит положения и собственные движения свыше 48 млн. звезд, точность каталожных положений которых находится в пределах 20–70 *mas*. Получить оптические положения радиоисточников с использованием каталога UCAC2 удалось только для 142 внегалактических объектов.

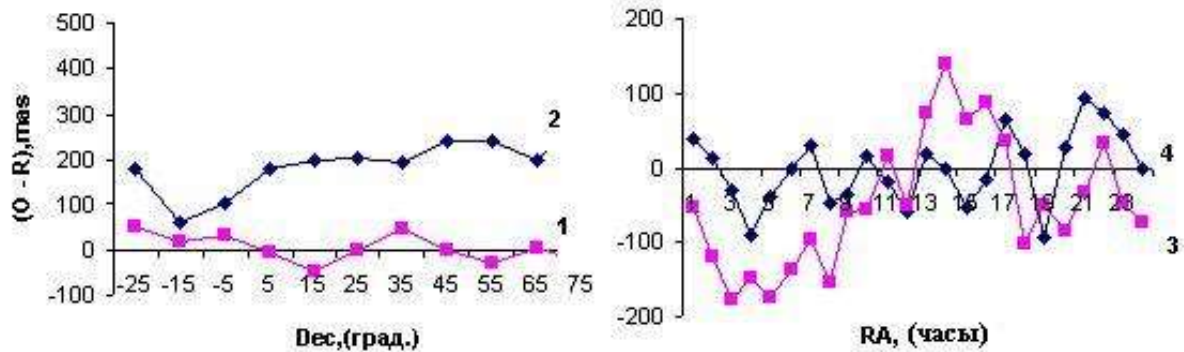


Рис. 3.10 Средние значения систематических разностей $(\Delta\alpha\cos\delta)_\delta$ (1), $(\Delta\delta)_\delta$ (2), $(\Delta\alpha\cos\delta)_\alpha$ (3) и $(\Delta\delta)_\alpha$ (4) (в смысле (USNO B1.0 – ICRF)) в зависимости от склонения и прямого восхождения.

Значительная часть наблюдений, полученных с ПЗС-камерой ST8E (размер поля $4.3' \times 2.7'$), содержит мало звезд каталога UCAC2 для выполнения астрометрических редукиций. Кроме того не удалось переобработать объекты в зоне склонений от $+52^\circ$ до $+80^\circ$, поскольку в настоящее время каталог UCAC2 содержит зону склонений до $+52^\circ$. Эти недостатки в некоторой мере удалось исправить с помощью каталогов KMAC1[68] и XC1[46], которые стали доступны в 2005 году.

Каталог KMAC1 – результат наблюдений на Киевском меридианном аксиальном круге – содержит положения более 100 тысяч звезд в площадках вокруг радиосточников в зоне склонений до $+30^\circ$. Плотность звезд в некоторых полях в нем выше, чем в каталоге UCAC2, что позволило обработать часть наблюдений с малыми полями с использованием этого каталога в качестве опорного для выполнения астрометрических редукиций.

Каталог XC1 – дифференциальный каталог положений и собственных движений звезд в системе ICRS/Tycho2, созданный в лаборатории астрометрии и звездной астрономии Научно-исследовательского института астрономии Харьковского национального университета им. В.Н. Каразина. Каталог содержит экваториальные координаты и собственные движения звезд от 10 до 20 звездной величины в градусных площадках вокруг примерно 350 источников ICRF северного неба. Материалом для создания каталога

послужили оцифрованные с помощью сканирующей машины РММ изображения Шмидтовских пластинок Паломарских обзоров POSS-1 и POSS-2. Этот каталог был использован для получения положений радиоисточников в зоне склонений выше $+52^\circ$, которая не содержится в каталоге UCAC2.

Выполненное исследование разностей экваториальных координат для массива положений 142 источников, обработанных с каталогом UCAC2 в качестве опорного, показало отсутствие систематических смещений в системе каталога на уровне декларируемой точности. Гистограмма распределения полученных значений разностей для 142 источников приведена на рис.3.11. Средние значения систематических разностей экваториальных координат в смысле (UCAC2 – ICRF) по массиву из 142 источников составили: $\Delta\alpha\cos\delta = -10 \pm 69 \text{ mas}$ и $\Delta\delta = 17 \pm 58 \text{ mas}$.

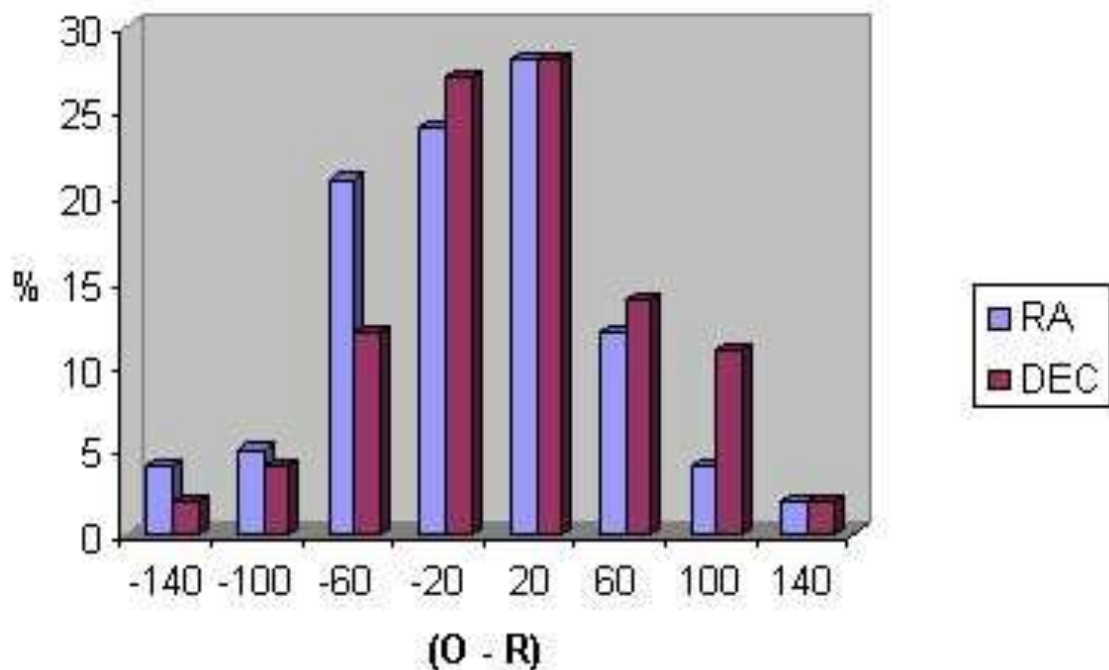


Рис. 3.11 Гистограмма распределения разностей экваториальных координат в смысле (UCAC2 – ICRF) (всего 142 источника, светлые столбцы - $\Delta\alpha\cos\delta$, темные - $\Delta\delta$)

На рис.3.12 представлен ход усредненных систематических разностей координат (UCAC2 – ICRF) в зависимости от склонения и прямого восхождения.

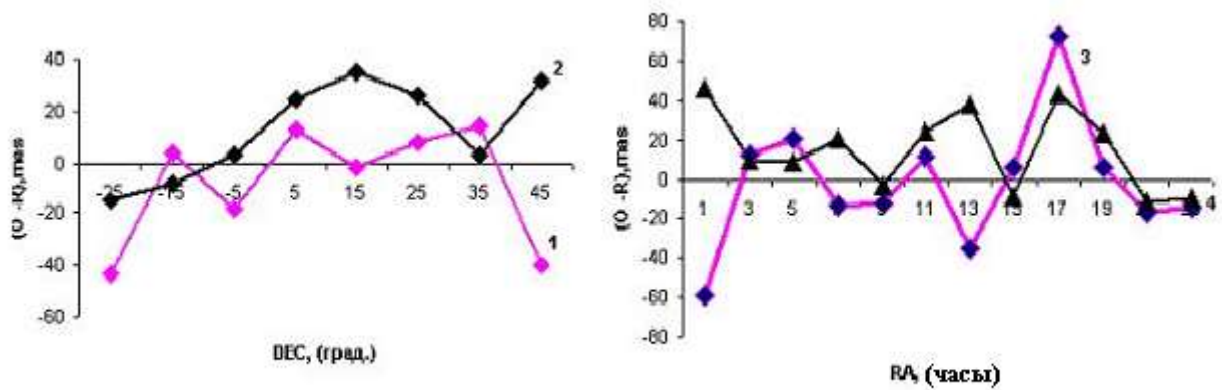


Рис. 3.12 Средние значения систематических разностей $(\Delta\alpha\cos\delta)_\delta$ (1), $(\Delta\delta)_\delta$ (2), $(\Delta\alpha\cos\delta)_\alpha$ (3) и $(\Delta\delta)_\alpha$ (4) (в смысле (UCAC2 – ICRF)) в зависимости от склонения (слева) и прямого восхождения

Выполнено внешнее сравнение полученного в данной работе каталога оптических положений радиоисточников с данными других авторов. Для сравнения были взяты 2 каталога оптических положений внегалактических радиоисточников. Один из них включает положения 172 ERS [36], положения которых были определены в системе каталога UCAC2. Вторым каталог насчитывает 327 ERS [104], привязанных к каталогу ERLCAT. Количество общих радиоисточников составляет 92 в первом случае и 110–во втором.

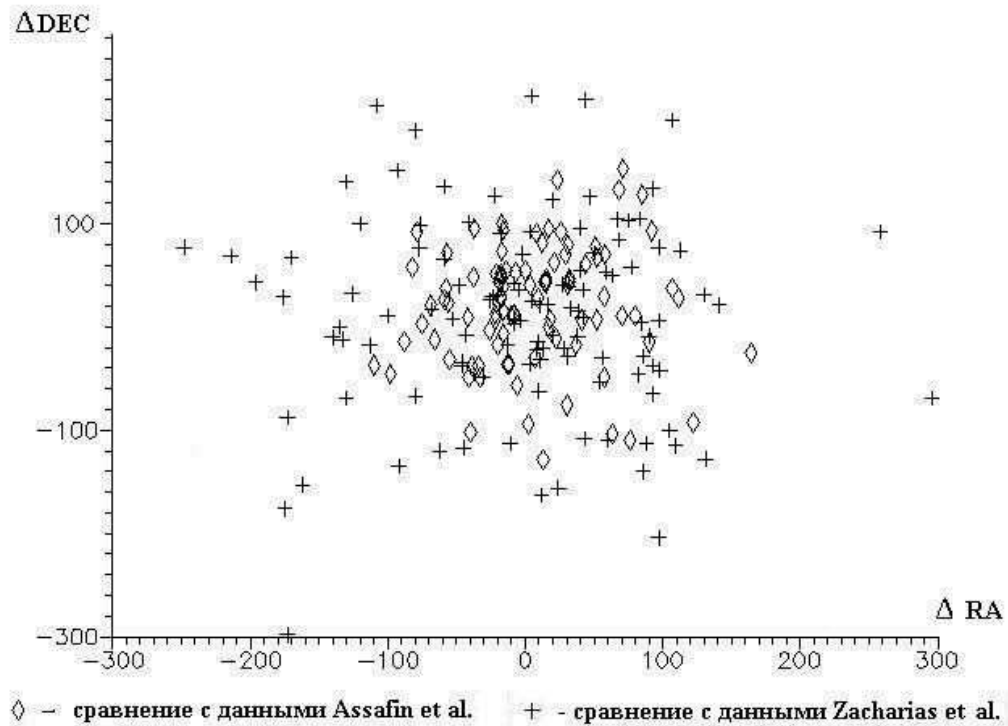


Рис. 3.13 Разности положений общих радиоисточников, полученных в данной работе и в работах других авторов

Оценка внешней точности по сравнению с данными из работы [36] составляет 64 и 63 mas по прямому восхождению и склонению соответственно; из сравнения с данными работы [104] – 92 и 89 mas.

3.3 Краткие выводы

1. Рассмотрены основные этапы редукции ПЗЗ-кадра, состоящие в учете электронного смещения, кадра темнового тока, плоского поля. Показано, что в случае матриц, с высокими значениями темнового тока для редукции следует использовать усредненный кадр, полученный в результате сложения нескольких темновых полей, что приводит к уменьшению среднеквадратической ошибки положения звезды в широких интервалах

звездных величин. Учет плоского поля, напротив, не оказывает существенного влияния на определение центров изображений объектов.

2. Выполнен анализ точности определения центров изображений звезд и соответствия профилей изображений функции Гаусса в зависимости от отношения сигнал/шум и размеров пикселя для каждой матрицы. Показано, что в случае использования Гауссовой функции как PSF среднеквадратические ошибки положений центров лежат в пределах 10-70 mas для звезд 10-19 звездной величины в зависимости от типа телескопа и приемной ПЗЗ-матрицы.

3. Проведен анализ массива положений радиоисточников, полученных с каталогами USNO B1.0 UCAC2 в качестве опорных. Подтверждено наличие смещения в системе склонений каталога USNO B1.0 на величину 180 mas, что отмечалось другими авторами.

4. Проведено сравнение каталога радиоисточников с каталогами, полученными другими авторами. Тем самым установлено, что средняя внешняя точность полученных в данной работе оптических положений внегалактических источников находится на уровне 70 mas.

ГЛАВА 4

ПАРАМЕТРЫ ВЗАИМНОЙ ОРИЕНТАЦИИ ОПТИЧЕСКОЙ И РАДИО СИСТЕМ КООРДИНАТ

4.1 Современное состояние проблемы связи оптической и радио систем координат.

Проблема согласования радио и оптической систем остается важной и актуальной для сохранения достигнутой высокой точности координат на миллисекундном уровне. Поскольку обе системы реализуются с помощью каталогов, которые имеют существенно разные принципы построения и включают в себя объекты различной природы, то эти системы неизбежно разнятся между собой в общих характеристиках, таких как ориентация, стабильность, доступность к использованию. Как отмечено в работе [19], успешное решение задачи по согласованию двух систем зависит в первую очередь от точности, с которой система фундаментального оптического каталога будет распространена на положения внегалактических источников, что включает в себя, как промежуточный этап, построение каталогов положений слабых звезд в площадках с радиоисточниками с максимально возможной точностью. В главе 1.5 были перечислены методы установления и уточнения связи между опорными системами. Как уже было отмечено, каталог HIPPARCOS был привязан к системе ICRS косвенными методами, поскольку программа наблюдений HIPPARCOS включала всего один объект списка ICRF – яркий квазар 3C 273B (источник 1226+023, RA=12 29 06.6996, Dec = +02 03 08.602), звездная величина которого $12^m.9$ находилась на пределе проникающей способности телескопа. Одним из путей определения взаимной ориентации систем является анализ разностей координат общих для обеих систем объектов, определенных независимо. Здесь следует отметить, что большой массив наблюдений внегалактических радиоисточников, полученный ранее методами наземной фотографической астрометрии [100, 5], не может

быть использован в полной мере для решения этой задачи по причине недостаточной точности, которую давал фотографический метод. Поэтому современные наблюдения ERS на телескопах больших и средних размеров с применением ПЗС-методов регистрации являются актуальными, поскольку имеют более высокую точность и позволяют получить оценку параметров связи на современном уровне точности.

К настоящему времени усилиями нескольких групп наблюдателей получено значительное число оптических положений радиоисточников, которые могут быть использованы для оценки параметров взаимной ориентации двух систем. Китайскими астрономами в период 1997 – 2003 годов были получены наблюдения более 200 радиоисточников [94 - 97]. Три бразильских астрономических института, Национальная обсерватория, Национальная лаборатория астрофизики (LNA) и обсерватория Валонго совместно с Военно-Морской обсерваторией США, ведут прямые наблюдения радиоисточников списка ICRF южной и северной полусферы на телескопе 0.9м СТЮ и 1.6 м телескопе LNA. Получены оптические положения более 200 радиоисточников в системе каталога UCAC2 [35, 36]. Успешная попытка оценить точность связи между оптической и радио системами координат была сделана в работе [104]. Были определены положения 327 радиоисточников, изображения которых получены с использованием ПЗС-матрицы 2К x 2К на телескопах с диаметром зеркала 0.9 м в обсерваториях СТЮ и KPNO в период 1994-1997 годов. Для астрометрических редукиций в качестве промежуточной опорной системы были использованы фотографические наблюдения с широкоугольными астрографами (для северной части – Гамбургский зонный астрограф, для южной – двойной астрограф USNO (Black Birch, New Zealand)). Из этих наблюдений были определены положения 82000 звезд в 398 полях вокруг радиоисточников, которые составили каталог ERLCAT. Полученный массив разностей радио и оптических положений радиоисточников был использован для вычисления углов взаимной

ориентации двух систем. Результаты решения показали, что углы связи двух систем нулевые на уровне точности 4 mas. В работе указывалось на необходимость синхронизировать эпохи наблюдений звезд промежуточной системы и радиоисточников, а также расширить список радиоисточников. Одна из таких программ реализуется в рамках проекта работ по созданию каталога UCAC2: параллельно с наблюдением каталога планируется получить наблюдения более 500 внегалактических радиоисточников списка ICRF и дополнительные наблюдения полей со звездами в площадках вокруг них [103]. В работе [93] по меридианным наблюдениям на FASTT звезд каталога HIPPARCOS, полученные углы тоже оказались равными нулю на уровне точности 3.3 mas. Это указывает на то, что привязка каталога HIPPARCOS к системе ICRS была проведена на высоком уровне точности, и ее ухудшение не было выявлено за истекшие семь лет после полета спутника [93,104].

Несмотря на большие достижения в наземной оптической астрометрии, результативность попыток определения параметров связи, по-прежнему, зависит в первую очередь, от точности оптических наблюдений и объема привлеченного материала, так как точность радиоположений по-прежнему остается на порядок выше точности опорных каталогов в оптическом диапазоне. Точность радиоастрометрических наблюдений, в свою очередь, ограничивается неточностью части ERS и непостоянством эмиссии в радио диапазоне. Это приводит к необходимости постоянных наблюдений внегалактических радиоисточников, а также расширения и пересмотра основного списка ICRF. Работы по расширению списка ICRF (в основном для южной полусферы) ведутся группой авторов [48]. Предлагается расширить список “кандидатов” каталога ICRF за счет введения новых более стабильных источников. При этом положения основных объектов списка остаются неизменными. Рассматриваются вопросы устойчивости системы, базирующейся на других списках радиоисточников, которые могли бы быть основными реперами небесной системы координат [30]. Для характеристики структуры ERS в работе [49]

предлагается использовать индекс радиоастрометрического качества (AQ), который характеризует наличие или отсутствие протяженной структуры, переменность и соответствие центров эмиссии в радио и оптическом диапазонах. Индекс выражается величиной от 0 до 100. Показатель 100 относится к астрометрически превосходным объектам, 0 – плохой объект для точных астрометрических измерений. В работе [50] показано наличие устойчивой корреляции между позиционной точностью радиоизмерений и величиной индекса радиоастрометрического качества объекта. Таблица 4.1 содержит данные о индексе астрометрического качества радиоисточников, положения которых получены в данной работе.

Таблица 4.1

Астрометрический индекс качества радиоисточников,
положения которых получены в данной работе

Индекс	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100
Кол-во (%)	28	7	30	33	12

4.2 Статистический анализ массива разностей (оптика - радио)

В данной работе для вычисления параметров взаимной ориентации двух систем были использованы полученные разности оптических и радиоположений ERS $(O-R)_{\text{ra,dec}}$. Массивы $(O-R)_{\text{ra,dec}}$ были проанализированы на предмет обнаружения грубых выбросов. Этот анализ проводился путем нахождения процентных точек t -распределения Стьюдента. Критическое значение τ_p (p -процентная точка нормированного выборочного отклонения) выражается через критическое значение распределения Стьюдента $t_{p,n-2}$:

$$\tau_{(p,n)} = \frac{t_{(p,n-2)} \sqrt{n-1}}{\sqrt{n-2 + (t_{(p,n-2)})^2}}, \text{ где } n - \text{ количество наблюдений [12].}$$

Для этого выбирают наблюдение, которое имеет наибольшее отклонение и по формуле : $\tau = |x_i - x_{cp}| / CKO$ вычисляют значение τ . Полученное значение используется для нахождения по таблице процентных точек t -распределения Стьюдента, которые пересчитываются в соответствующие точки $\tau_{p,n}$. Разность $(O-R)_{ra,dec}$ отбрасывалась только в случае, когда $\tau > \tau_{(0,1\%,n)}$. Результаты анализа разностей координат на грубые выбросы в смысле (USNOB1.0 - ICRF) и (UCAC2 - ICRF) приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2

Средние разности (USNOB1.0 - ICRF) и (UCAC2 - ICRF) и их среднеквадратические ошибки

Разности с ICRF	N	$(O - R)_{RA}$	$N_{\text{выбр}}$ RA	$(O-R)_{dec}$	$(O - R)_{RA}$	$(O-R)_{dec}$	$N_{\text{выбр}}$ Dec
USNOB1.0	198	-41±142	7	175±139	-43±133	179±116	7
UCAC2	142	-13±81	5	18	-10±69	13±58	2

Также в работе проведен анализ разностей $(O-R)_{ra,dec}$ на соответствие нормальному закону распределения случайных величин по критерию χ^2 : $\chi^2 = \sum (B - E)^2 / E$, где B – наблюдаемая частота, E – ожидаемая по нормальному распределению [12].

Результаты проверки показали, что для полученных массивов разностей гипотеза нормальности распределения может быть принята на достаточно высоком 10%-ом уровне значимости.

Вычисление показателей асимметрии и эксцесса, также подтвердили соответствие полученных разностей нормальному закону распределения.

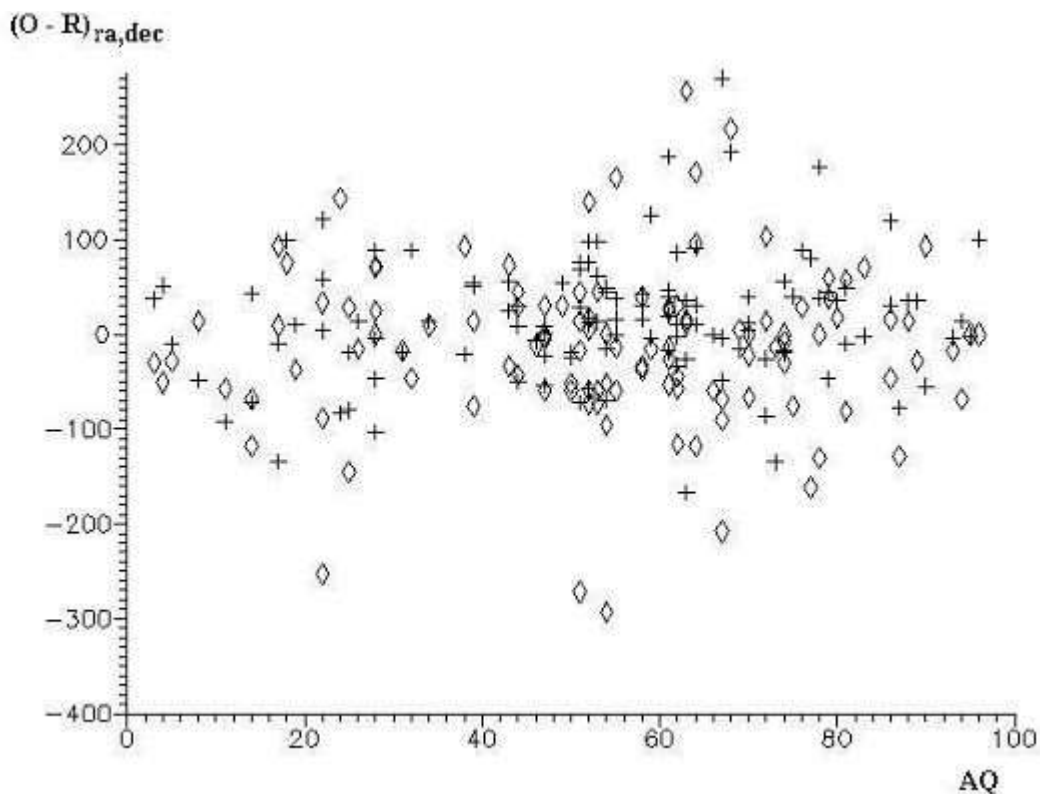
Количество anomalно больших значений составило не более 3.5%. В качестве причин anomalно больших значений разностей (O- R) можно привести следующие:

- 1) недостаточно качественные изображения слабых ERS, профили изображения которых плохо описываются распределением Гаусса;
- 2) наличие ярких звезд близко от радиоисточника, что приводит к блендированию изображения;
- 3) отсутствие хороших астрометрических звезд для редукции в исследуемых полях;

Следует отметить также существование anomalно больших разностей, которые не объясняются вышеприведенными причинами. К таким относится большое значение разности по прямому восхождению ($\Delta\alpha\cos\delta=2249$ mas) для источника 2048+312.

Попытка обнаружить корреляцию индекса радиоастрометрического качества, согласно [49], с точностью полученных положений и значениями разностей координат, показала отсутствие таковой между исследуемыми величинами. Это свидетельствует о том, что ошибки вызванные наличием протяженной структуры и несовпадением центров для оптического и радио излучения меньше достигнутой точности оптических наблюдений.

На рис. 4.1 и 4.2 графически представлены зависимости разностей оптических и радиокоординат и точности оптических положений от индекса



радиоастрометрического качества.

Рис.4.1 Зависимость разностей $(O - R)_{ra,dec}$ от AQ

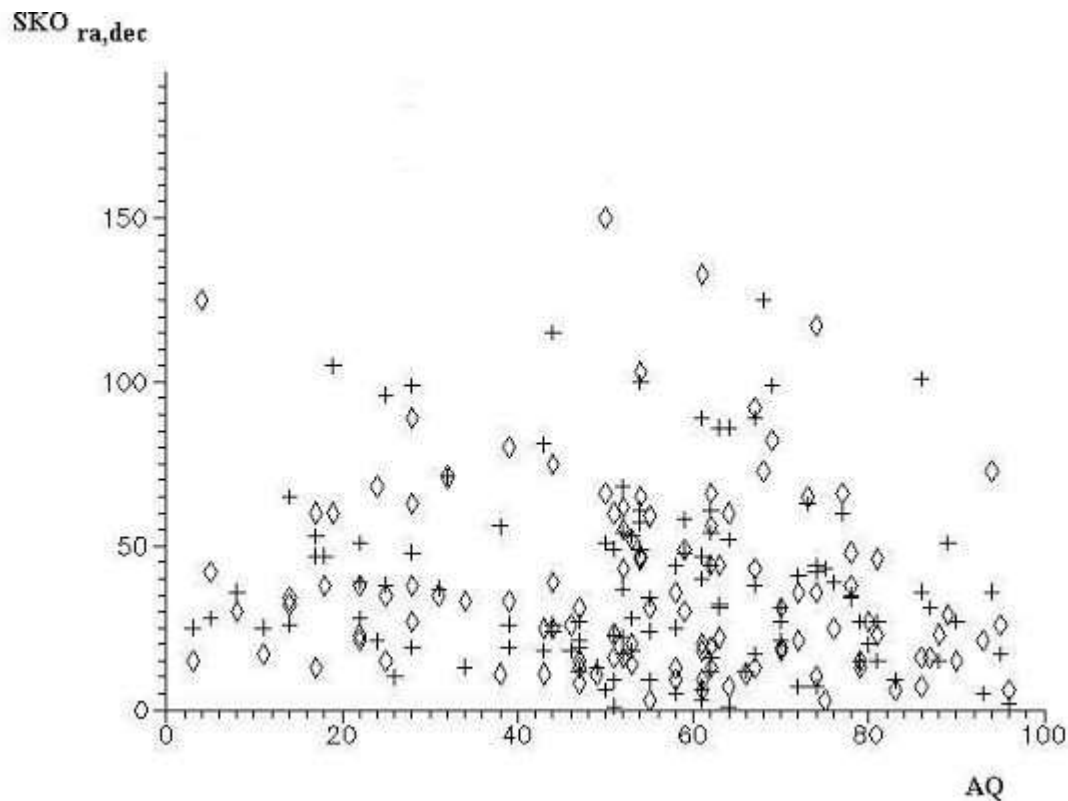


Рис 4.2 Зависимость среднеквадратичных ошибок определения положения от величины AQ

4.3 Получение параметров связи оптических и радио систем координат

Взаимную ориентацию двух систем можно описать тремя углами поворота, w_x, w_y, w_z , одной из них вокруг осей $X (\alpha = 0^h, \delta = 0^\circ)$, $Y (\alpha = 6^h, \delta = 0^\circ)$, $Z (\delta = 90^\circ)$ до совмещения с осями другой системы. Оси X и Y лежат в плоскости экватора и

направлены в точки с прямым восхождением 0^h и 6^h , а ось Z направлена в точку со склонением $+90^\circ$.

Углы взаимной ориентации двух близких систем можно определить из системы уравнений, которая приведена в [98]:

$$\begin{aligned} \Delta\alpha_{O-R}\cos\delta &= \omega_x\sin\delta\cos\alpha + \omega_y\sin\delta\sin\alpha - \omega_z\cos\delta, \\ \Delta\delta_{O-R} &= -\omega_x\sin\alpha + \omega_y\cos\alpha + \Delta\delta_0, \end{aligned} \quad (4.1)$$

где: $\Delta\alpha_{O-R} = \alpha_O - \alpha_R$ и $\Delta\delta_{O-R} = \delta_O - \delta_R$ разности координат ВРИ в оптической и радио системах координат; $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – углы поворота относительно осей x, y, z , соответственно, $\Delta\delta_0$ – смещение экватора оптической системы.

Как отмечено в работе [19], обычно при определении параметров связи определяют три угловых параметра $\omega_x, \omega_y, \omega_z$. Поправка $\Delta\delta_0$ предполагает возможную неортогональность систем и не является параметром ориентации. Будучи существенно независимым от первых трех она легко определяется и, как показывают расчеты, ее введение в состав неизвестных практически не влияет на значения углов.

Анализ полученных параметров ориентации другими авторами (таблица 4.3) показывают достаточно противоречивую картину [85]. Хотя следует отметить, что большая часть данных относится к параметрам связи каталога FK5 с радио системой. Только последняя строка таблицы относится к параметрам связи новой оптической системы, основанной на каталоге HIPPARCOS.

Таблица 4.3

Углы связи оптической и радио систем координат, определенные разными авторами

Авторы	ω_x (mas)	ω_y (mas)	ω_z (mas)	N	σ_1 (mas)
Hamburg(Ma+) (1990)	30±20	53±20	23±20	28	±86
САМС+Bord (1990)	32±18	10±19	13±18	20	66

Kiev(T-Ad+)1992	0±30	70±30	20±20	251	365
Jonston, et al, 1994	43 ± 19	31 ± 19	-29±18	43	
Kumkova et al. (1995)	38 ± 18	22 ± 16	-17 ± 16	78	
Andrei et al., (1995)	-30 ± 20	30 ± 30	20 ± 20	29	170
Stone (1998)	2.2±3.3	-2.2±3.3	-3.3±2.9	-	
Zacharias et al.(1999)	-0.2 ± 3.9	-5.4 ± 3.9	-2.5 ± 3.9	318	58

В данной работе для решения системы уравнений 4.1 использовались массивы полученных разностей экваториальных координат $\Delta\alpha_{O-R}$, $\Delta\delta_{O-R}$ после отброса грубых выбросов. Решения получались методом наименьших квадратов по всей совокупности разностей, полученных с каталогом USNOB1.0 и каталогом UCAC2. Расчеты проводились дважды - без введения весов и с весами обратно пропорциональными ошибкам определения оптического положения.

В таблице 4.4 представлены полученные решения, проведенные отдельно для положений, полученных в системах каталогов USNOB1.0 и UCAC2. Третий вариант решения, представленный в таблице (нижняя строка) получен по нашим данным и добавленным данным, взятым из работы [35,36]. Это делалось для того, чтобы показать, что для улучшения точности определяемых параметров связи необходимо увеличение объема выборки. Как уже отмечалось в главе 3 точность каталога USNOB1.0 – низкая для получения параметров связи. Поскольку этот каталог номинально получен в системе ICRS, нам показалось интересным получить элементы ориентации каталога по отношению к каталогу ICRF.

Таблица 4.4
Параметры ориентации радио и оптической систем координат.

Вариант решения	ω_x (mas)	ω_y (mas)	ω_z (mas)	$\Delta\delta_0$	σ_1 (mas)
198 ERS, (USNOB1.0)	18±13	7±12	47±11	175±10	121
140 ERS, (UCAC2)	-4,1 ± 6,1	1,9 ± 5,8	12.4 ± 4,9	12 ± 4,9	46
234 ERS ¹	-1.7±4.4	5.2±3.8	9.1±3.3	1.7±3.0	39

¹ – сводный массив (совместно с данными [35, 36]), , опорный каталог - USAC2

Из таблицы следует, что разности , полученные с каталогом USNO-B1 (рис.3.9, 3.10), указывают на наличие значительного смещения в системе склонений каталога. Его величина уверенно определяется при введении четвертого параметра $\Delta\delta_0$ в систему уравнений (4.1) и составляет 175 ± 10 mas. Достаточно большое положительное значение угла ω_z , возможно является следствием недостаточно точного определения нуля-пункта (несогласованность оптических и радио координат квазара 3C 273 B). Увеличение объема и точности оптических положений позволяет увеличить уровень точности получаемых параметров связи, при этом ошибка решения системы определяется точностью опорного оптического каталога.

4.4 Краткие выводы

1. Приведены результаты статистического анализа, указывающие на то, что массив разностей оптических положений, полученных в данной работе и радиоположений подчиняется нормальному закону распределения.
2. Получены новые значения углов ориентации оптической и радио опорных систем координат в зоне склонений от -40 до $+80$ градусов: $\omega_x = -4.1 \pm 6.1$, $\omega_y = 1.9 \pm 5.8$, $\omega_z = 12.4 \pm 4.9$ mas. Полученное положительное значение ω_z , может указывать на недостаточно точное определение нуля-пункта (несогласованность оптических и радио координат квазара 3C 273 B).
3. Увеличение объема и точности оптических положений за счет привлечения наблюдений, опубликованных другими авторами позволяет увеличить уровень точности получаемых параметров связи до 4 mas, при этом ошибка решения системы определяется точностью опорного оптического каталога.

ГЛАВА 5

КАТАЛОГ ЗВЕЗД 10 – 21^m В ПЛОЩАДКАХ ВОКРУГ РАДИОИСТОЧНИКОВ

5.1 Методика получения каталога слабых звезд в площадках вокруг радиоисточников.

Самой большой проблемой задачи определения параметров взаимной ориентации радио и оптической систем координат при использовании ПЗС-наблюдений малых полей являлось отсутствие опорного каталога звезд в площадках с радиоисточниками. Метод сравнения положений объектов в двух системах предполагает наличие достаточного количества опорных звезд с точными положениями и собственными движениями. Как уже отмечалось в главе 3, на сегодняшний день не существует глобального каталога, отвечающего этим требованиям. Плотность существующих точных космических каталогов (Hipparcos, Tycho, Tycho-2) не удовлетворяет этим условиям по причине низкой плотности звезд, частично это касается и каталога UCAC2 при работе с полями до 10' (типичное поле зрения большого наземного телескопа редко превышает 10'x10'). Кроме того эти каталоги содержат в подавляющем большинстве яркие звезды (космические каталоги до 12^m, UCAC2 до 16^m), а решение многих задач современной астрометрии требует определения координат слабых объектов. Использование ярких звезд в качестве опорных может привести к появлению систематических ошибок типа уравнения блеска. Каталоги ХС1 [46] и КАМС1[68], появившиеся недавно, несколько улучшают ситуацию в этом вопросе, но они содержат звезды, лишь в отдельных полях вокруг радиоисточников списка ICRF. Все это делает задачу определения положений слабых звезд в площадках вокруг радиоисточников достаточно актуальной на сегодня.

Материалом для создания каталога послужили наблюдения, выполненные в рамках проекта по определению параметров связи оптической и радио систем координат. Поскольку точность определения положений радиоисточников, большая часть которых имеет звездные величины слабее 17^m , оказалась достаточно высокой, показалось интересным получить и координаты слабых звезд поля в системе опорного каталога UCAC2. Кроме того часть полученного материала оставалась неиспользованной по причине отсутствия оптического изображения радиоисточника. Полученный каталог планируется использовать при создании сводного каталога звезд в площадках вокруг радиоисточников [39, 86, 87], в котором предполагается объединить все, имеющиеся на сегодняшний день, каталоги звезд в полях вокруг ERS.

Кроме каталога UCAC2, при получении экваториальных координат звезд использовались каталоги KMAC1 и XC1. Измерение центров изображений было выполнено программным пакетом «Astrometrica» [61]. В качестве порога выделения объекта было задано отношение сигнал/шум превышающее 3.0. Для выполнения астрометрических редуций использовались программные пакеты «Astrometrica»[61] и пакет ASTRORED [22], созданный в Пулковской обсерватории. В основе работы пакета ASTRORED лежат операции с матрицами (блок **MWORK**), которые позволяют оперативно и удобно организовать доступ и манипуляцию данными на диске. При определении экваториальных координат звезд по материалу ПЗС-наблюдений важным является момент выбора опорных звезд. Для этого необходимо отождествить изображения звезд на матрице со звездами опорного кадра. Для этого в пакете реализован алгоритм имитирующий совмещение двух кадров.

Обработка начинается с задания параметров используемых инструментов и выбора опорного каталога. Затем по параметру, который задает размер поля производится выбор опорных звезд из используемого каталога. Рисунок 5.1 иллюстрирует процесс отождествления ПЗС–кадра с изображением звездного

поля. На экране звезды опорного каталога и изображения, построенные на основе измеренных координат, обозначаются разными цветами. Совмещение изображений общих звезд полей приводит к отождествлению звезд на кадре со звездами опорного каталога.

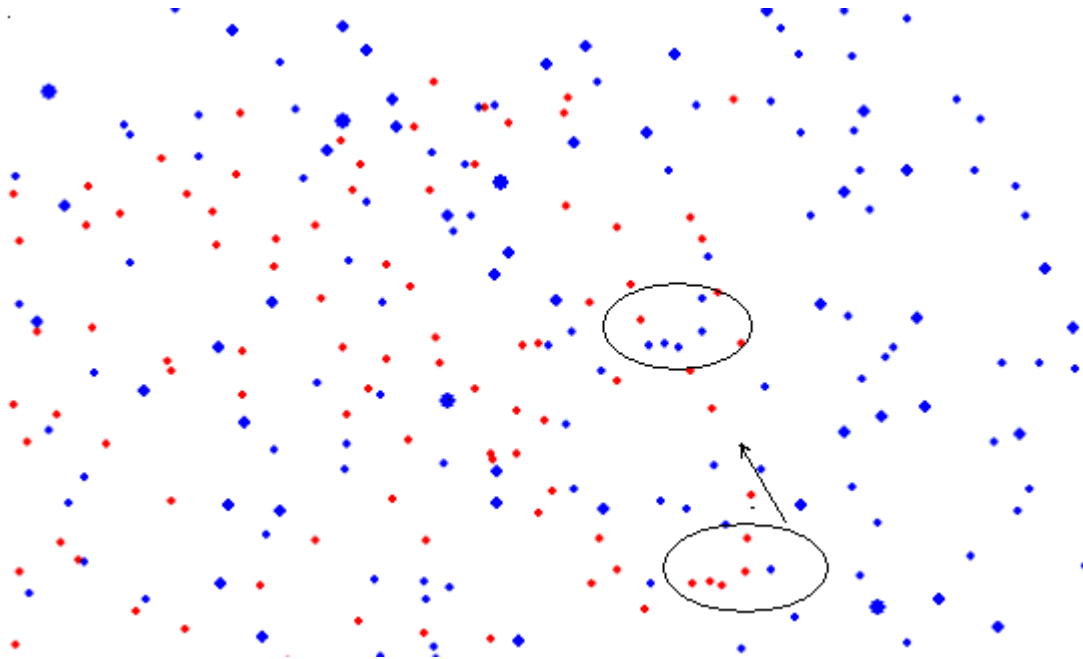


Рис 5.1 Отождествление звездных полей в программе ASTRORED

В пакете предусмотрена возможность выбора конфигурации опорных звезд по нескольким параметрам (расположение на кадре, звездная величина, показатель цвета). Пакет имеет возможность просмотра полученных значений постоянных пластинки, их ошибок и ошибок единицы веса, вектора невязок условных уравнений и ковариационных матриц как материала для анализа и исключения систематических ошибок.

Пакет ASTRORED был использован для редукций с каталогами KMAC1 и XC1. Астрометрические редукции с использованием каталога UCAC2 в качестве опорного были выполнены пакетом «Astrometrica». Для редукции использовалась линейная модель связи измеренных и тангенциальных координат с шестью постоянными. Каждый кадр серии обрабатывался отдельно. Затем все кадры серии анализировались на наличие общих объектов. Объект считался звездой если он присутствовал не менее, чем на 3

кадрах, при этом отклонения по координатам не превышали 0.5 дуговой секунды. Полученные экваториальные координаты усреднялись без назначения весов отдельным положениям.

Общее число полей, для которых оказалось возможным выполнить редукиции с вышеуказанными каталогами, составило 158. Список полей приведен в Приложении Б, где информация организована в виде, представленном Таблицей 5.1.

Таблица 5.1

Образец организации списка полей вокруг радиоисточников, вошедших в каталог звезд, приведенных в приложении Б.

Название (по ICRF)	Количество звезд	Опорный каталог
1. 000557.1+382015	31	ХС1

В таблице приведено название, соответствующее идентификации поля из списка ICRF [73], количество звезд соответствующее числу звезд в площадке, название опорного каталога, использовавшегося при получении экваториальных координат звезд.

Общее количество звезд, для которых были получены положения составляет 11473. На рисунке 5. 2 приведена гистограмма распределения звезд полученного каталога по звездным величинам.

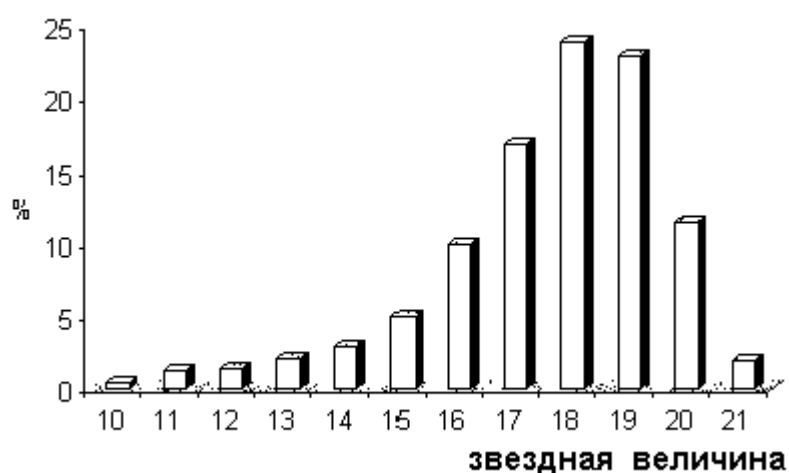


Рис.5.2 Гистограмма распределения по звездным величинам.

Данные гистограммы показывают, что около 80% звезд имеют звездные величины слабее 16.0 и не содержатся в каталоге UCAC2, который на сегодня является самым плотным астрометрическим каталогом.

5.2 Сравнение с другими каталогами (оценка внешней и внутренней точности полученных результатов)

Поскольку наблюдения полей, используемые для получения каталога, были получены на различных инструментах представляется интересным получить оценки точности для каждого отдельного случая. Среднеквадратичные ошибки полученных положений звезд для телескопов, на которых получено основное количество наблюдений приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2

Характеристика точности полученного материала

Матрица	σ_{RA} (mas)	σ_{DEC} (mas)
RTT150, ST8E	55	53
RTT150, Andor	49	46
1m teleskop Yno	50	52

Из таблицы следует, что материал, полученный на разных телескопах достаточно однородный по точности. График зависимости точности от звездной величины, полученный по всем звездам каталога приведен на рисунке 5.3. На графике заметно выделяются яркие звезды, точность которых существенно ниже точности звезд 14-19 звездной величины. Это - следствие того, что изображения ярких объектов находятся в зоне пересыщения и фотометрические профили изображений не всегда соответствуют функции Гаусса.

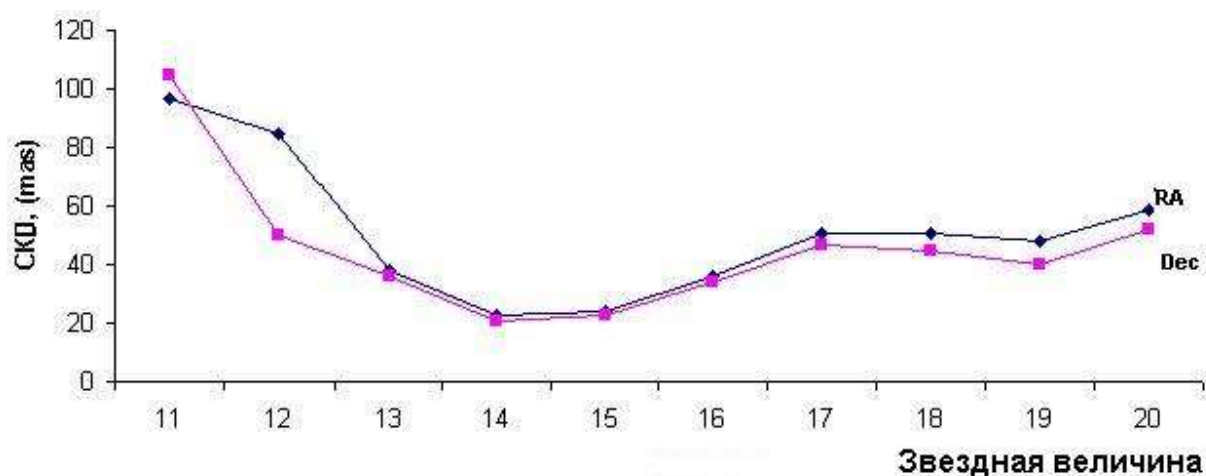


Рис. 5.3 Зависимость среднеквадратичной ошибки положения от звездной величины.

Сделана попытка оценить внешнюю точность полученных данных путем сравнения с каталогом SAM13 [62]. Каталог SAMC13 – результат наблюдений Канарского меридианного круга, содержит практически все звезды до 17 звездной величины, точность положений которых оценивается от 50 до 100 mas в зависимости от звездной величины. Для этого были выбраны 5 общих полей, имеющих достаточно большую плотность звезд в поле кадра .

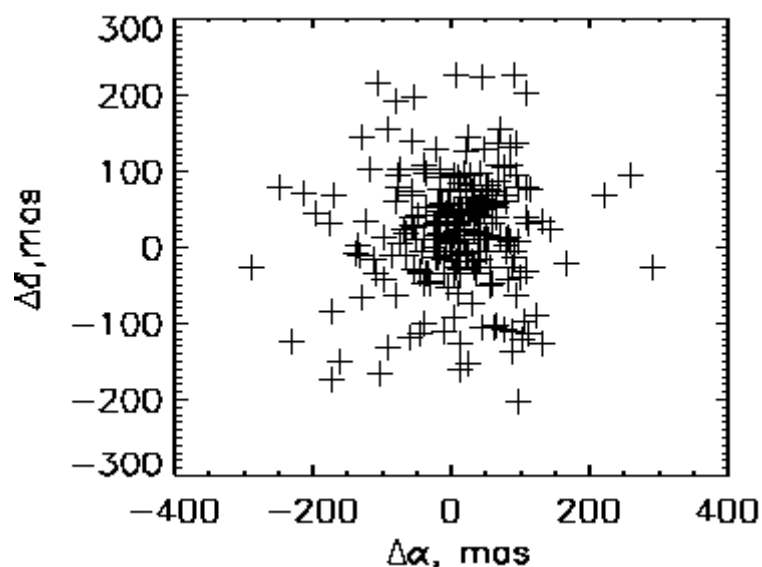


Рис.5.4 Разности координат в смысле (СМС - Cat)

К сожалению, количество общих объектов, по которым можно получить реальную оценку внешней точности оказалось небольшим по причине узкого диапазона перекрывающихся звездных величин 14 – 17, поэтому детальный анализ разностей координат в смысле (СМС13 – Cat) не проводился. Среднее значение разностей составляет 6 ± 78 mas и 17 ± 75 mas по прямому восхождению и склонению соответственно.

Каталог положений 11473 звезд будет передан для включения его в сводный каталог положений звезд вокруг радиоисточников, а также размещен в базе данных НИИ НАО. В каталоге приведены прямые восхождения, склонения звезд, среднеквадратические ошибки положений, данные о количестве наблюдений каждой звезды, использовавшихся для получения среднего значения координат, а также эпоха наблюдений.

5.3 Краткие выводы

1. Описана методика получения каталога звезд 10-21 звездной величины в площадках с радиоисточниками.
2. Сделаны оценки точности каталога по внутренней и внешней сходимости. Внутренняя точность положений составляет от 25 до 60 mas для звезд 14-20 звездной величины. Оценки внешней точности находятся на уровне 80 mas.

Заключение

Целью данной работы было создание положений оптических компонентов внегалактических радиоисточников на основе ПЗС-наблюдений, полученных на различных телескопах. В течение 2000-2200 годов была выполнена программа оптических наблюдений и получено более 2500 кадров с изображением радиоисточников. В ходе исследования было решено множество задач, связанных с унификацией обработки данных, полученных на разных телескопах, начиная от проблем первичной обработки ПЗС-кадров и заканчивая выбором наиболее оптимальных редуцированных моделей. В процессе работы проведена обработка всех кадров с изображениями радиоисточников и более чем 1000 кадров были обработаны с целью получения слабых звезд в площадках вокруг них, что является важным этапом работ по расширению оптической системы HIPPARCOS на слабые звезды.

В качестве наиболее важных результатов проведенных исследований отметим следующие.

- Получен каталог оптических положений 213 внегалактических радиоисточников со средней внутренней точностью около 40 mas. Этот каталог является основой для уточнения углов взаимной ориентации оптической и радиоастрономической систем координат, а также имеет самостоятельное значение для увеличения точности координат оптических компонентов внегалактических радиоисточников, на которых базируется координатная система ICRF.
- Получены новые значения углов ориентации оптической и радио опорных систем координат в зоне склонений от -40 до $+80$ градусов: $\omega_x = -4.1 \pm 6.1$, $\omega_y = 1.9 \pm 5.8$, $\omega_z = 12.4 \pm 4.9$ mas. Анализ полученных результатов может быть применен для дальнейшего контроля и поддержания точности оптической системы координат.

- Получен каталог более чем 10000 звезд $10-21^m$ в площадках вокруг радиисточников, который распространяет систему HIPPARCOS на слабые звезды.

Автор выражает благодарность научному руководителю Пинигину Геннадию Ивановичу за активную поддержку и помощь при выполнении работы. Также автор выражает благодарность астрономам и инженерам Национальной обсерватории Турции, астрономам Казанского Государственного университета, астрономам Шанхайской обсерватории за полученные наблюдения на телескопе RТТ150 и 1-м телескопе Юнаньской обсерватории. Автор искренне благодарен сотруднице НИИ МАО Бондарчук Л. Е. за большой объем предварительной обработки ПЗС-кадров и всему коллективу обсерватории за моральную поддержку.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бакулин П.И. Фундаментальные каталоги звезд. – М.: Наука, 1980. – 336с.
2. Витязев В.В. Системы отсчета и будущее наземной астрометрии // Труды ИПА РАН, “Астрометрия и небесная механика”, 2001.– вып.6. – С.93–101.
3. Витязев В.В., Кривов А.В. Базовые понятия и методология астрометрии // Проблемы построения координатных систем в астрономии. – Ленинград, 1989. – С.70–79.
4. Губанов В.С., Финкельштейн А.М. Основные тенденции и проблемы фундаментального координатно–временного обеспечения // Труды ИПА РАН, “Астрометрия и небесная механика”, 2001. – вып.6. – С.3–13.
5. Дементьева А.А. Положения внегалактических радиоистоников, полученные по каталог.Изв. ГАО в Пулкове. 2002. – №214. –С. 227–233.
6. Дравских А.Ф., Г.А.Красинский, А.М.Финкельштейн Радиоастрономическая инерциальная система координат, основанная на измерении дуг между радиоисточниками. // Письма в АЖ. 1975. - т. 1., №5.- С. 43–47.
7. Жаров В.Е. Сферическая астрономия. <http://www.astronet.ru/>
8. Киселев А.А., Теоретические основания фотографической астрометрии. Москва, Наука, 1989. – 260с.
9. Клещенок В., Бабенко Ю., Данильцев О., Вертиполох А., Майгурова Н.и др. Создание сводного каталога в полях с внегалактическими радиоисточниками. Предварительные результаты // Proceedings of the International Workshop “Optical and Radio Sources – Location and Connection”. – Nikolaev, 2003. – P. 17.
10. Ковалевский Ж. Современная астрометрия/ Пер. с англ. под ред. Жаров В.Е. – Фрязино: Век 2 , 2004. – 482с.
11. Кузьмин А. В., Куимов К.В., Наджип А.Э. Космическая астрометрия : от миллисекунд к микросекундам // Труды ИПА РАН, Астрометрия и небесная механика. - 2001.- вып.6. - С.60–66.

12. Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул, – М.: Высшая школа, 1982. – 240с.
13. Майгурова Н. , Пинигин Г.И., Шульга А.В., Величко Ф.П. и др. Уточнение связи между оптической и радио системами координат на основе согласованных наблюдений в обсерваториях Украины, России и КНР// Астрометрия, геодинамика и небесная механика на пороге XXI века: материалы международной конференции(19–23 июня 2000г). С–Петербург, 2000.-С133–134.
14. Майгурова Н., Пинигин Г., Процюк Ю., Шульга А., Tang Z., Wang S., Jin W., Aslan Z., Hamitov E., Гумеров Р. Итоги международного сотрудничества по уточнению связи оптической и радио опорных систем координат // Тезисы докладов на Всероссийской астрономической конф. ВАК–2004 “Горизонты Вселенной“. – Москва. – 2004. – С.213.
15. Майгурова Н., Пинигин Г., Шульга А., Процюк Ю. И др. О состоянии совместного проекта по улучшению связи между оптической и радио опорными системами координат //Proceedings of the International Workshop “Optical and Radio Sources – Location and Connection.– Nikolaev. – 2003. – P. 66–72.
16. Пинигин Г.И., Шульга А.В., Майгурова Н.В., Процюк Ю.И., Jin W, Tang Zh., Wang Sh., Величко Ф.П., Федоров П.Н., Гумеров Р.И., Бикмаев И.Ф., Aslan Z. О состоянии совместного проекта по улучшению связи между оптической и радио опорными системами координат // Всероссийская астрономическая конференция: Тезисы докладов. (С–Петербург, 6–12 августа 2001 г.) СПб.: НИИХ СПбГУ. – 2001. – С. 144.
17. Подобед В.В., Нестеров В.В. Общая астрометрия . – М.: Наука. Главная редакция физико–математической литературы, 1982. – 576с.
18. Подобед В.В. Фундаментальная астрометрия.-М.: Наука, 1968.-452с.
19. Тельнюк-Адамчук В.В. Сводные каталоги близполюсных и ярких звезд и связь оптической и радиоинтерферометрической систем отсчета: Автореф дис... д-ра физ. –мат. наук: 01.03.01/ГАО АН Украины.- К, 1992. – 47с.

20. Федоров Е. П. Общий взгляд на астрометрию // Геодинамика и астрометрия: сборник статей, - Киев, 1980 – С.74–110.
21. Харин А.С. Астрометрия в периоды до и после космического проекта HIPPARCOS. Реальность и прогнозы. // Extension and Connection of Reference Frames Using Ground Based Technique. - Nikolaev, 2001.- P.9-19.
22. Ховричев М.Ю., Хруцкая Е. В. CREADER и ASTRORED – программные пакеты для выборки данных из каталогов с большой плотностью звезд и выполнения астрометрических редукций// Изв. ГАО в Пулкове. – 2002. – № 216. – С. 324–326.
23. Хруцкая Е. В., Могилевская А. В. Прямое сравнение сводного каталога ярких звезд (New BS) с данными FK6 //Изв. ГАО в Пулкове. – 2000. -№214. - С.107–115.
24. Цветков А.С. Руководство по практической работе с каталогом HIPPARCOS: Учебно–методическое пособие. – СПб. 2005, 104С.
25. Цветков А.С. Руководство по практической работе с каталогом ТУСНО–2: Учебно–методическое пособие. – СПб., 2005, 132С.
26. Яцкив Я. С., Губанов В.С. Об основных координатных системах, применяемых в астрометрии и геодинамике // Геодинамика и астрометрия: сборник статей, - Киев, 1980 – С.110 –120.
27. Яцкив Я.С. О состоянии и тенденциях развития астрометрических исследований. I // Астрометрика и астрофизика, - 1983. - в.49. - С.3–9.

- 28 Яцкив Я.С. О состоянии и тенденциях развития астрометрических исследований. II // Астрометрика и астрофизика, - 1984. - в.50. - С.56–59.
29. Archinal B.A., Arias E.F., Gontier A. – M., Mercuri – Moreau C. Physical characteristics of radio sources // IERS Technical Note 23. – 1997. - P.II–11 – II–24.

30. Arias E.F., Bouguillon S. Representation of the International Celestial Reference System (ICRS) by different sets of selected radio sources // *Astron. Astrophys.* – 2004. – V. 422. – P. 1105–1108.
31. Arias E.F., Charlot P., Feissel M., Lestrade J. F. The Extragalactic reference system of the International Earth Rotation Service, ICRS // *Astron. Astrophys.* – 1995. – V. 303. – P. 604– 608.
32. Aslan Z. , Gumerov R., Hamitov E., Jin W., Maigurova N., Pinigin G., Protsyuk Yu., Shulga A., Tang Z., Wang S. Refinement of Linking optical–radio reference Frames on the Basis of the international Joint Project between collaborative Observatories// *Journées 2002. Systemes de Reference Spatio–Temporels.* – Sept. 25–28.– Bucharest. – 2002. – P. 27–30.
33. Aslan Z., Gumerov R., Jin W. , Khamitov I. , Maigurova N., Pinigin G., Protsyuk Yu., Shulga A., Tang Z., Wang S. About Progress on Linking Optical–Radio Reference Frame Using CCD Ground–Based Telescopes// *Journées–2003, S–Petersburg, 22–25, Sept.2003, Book of Abstracts, 22–25Sept.2003, Book of Abstracts.* - 2003. - P.4.
34. Aslan Z. , Gumerov R., Jin W., Khamitov I., Maigurova N., Pinigin G., Protsyuk Yu., Shulga A., Tang Z., Wang S. Results of Joint project on linking optical–radio reference frames // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies Suppl. Ser.– 2005.* – № 5. – P. 333–337.
35. Assafin M., Monken Gomes P.T., da Silva Neto D. N., Andrei A.H. Astrometry of International Celestial Reference Frame Sources using the second US Naval Observatory CCD Astrograph Catalog // *Astron. J.* – 2005. – V. 129. – P. 2907–2913.
36. Assafin M., Zacharias N., Rafferty T.J., Zacharias M.I. Optical positions of ICRF sources using UCAC reference stars // *Astron. J.* – 2003. – V. 125. – P. 2728–2739.
37. Auer L., van Altena V. Digital image centering. II // *Astron. J.*, -1978. -V 83.-. P 531–537.

38. Auwers A. Vorläufiger Fundamental–Catalog für die südlichen Zonen der A.G // Astron. Nachr. – 1889. – Vol. 121. – P. 2890–2891.
39. Babenko Yu., Danil'tsev A., Vertypolokh A., Maigurova N., Pinigin G., Protsyuk Yu., Shulga A., Dementyeva A., Ryl'kov V., Bocsa G., Popescu P. Reduction of compiled catalogue in the selected Extragalactic radio source fields. Preliminary Estimation// Romanian Astronomical Journal – 2003. – V.13. – № 1. – P. 77–81.
40. Bessel F.W. Tabulae Regiomontanae reductionum observatorum astronomicarum ab anno 1750 usque ad annum 1850 computatae, Regiomonti, 1830.
41. Boss L. General Catalogue // Carnegie Institution of Washington Publ. – 1937. – № 468, Vol. I.
42. Boyle, W.S. and Smith, G.E.(1970) Charge coupled semiconductor devices. //The Bell System Technical Journal – 1970. -Vol.49. , No.4. – P. 587–593.
43. Charlot P., Sovers, O., Williams J., Newhall X. Precession and nutation from joint analysis of radio interferometric and lunar laser ranging observations // Astron. J. – 1995. - V109. - P. 418–427.
44. Definition and Realization of the International Celestial Reference System by VLBI Astrometry of Extragalactic Objects. IERS Technical Note - 1997. – 23.
45. Eubanks T.M. Stability of ICRF source positions // IERS Technical Note. – 1997. – V. 23. - P.III–93 – III–172.
46. Fedorov P.N., Myznikov A.A. The catalogue of positions and proper motions of faint stars around the ICRF sources // Kinematics and Physics of Selectial Bodies. Suppl. Ser. – 2005. - N5. - P.333–337.
47. Feissel–Vernier M. Selecting stable extragalactic compact radio sources from the permanent astrogeodetic VLBI program // Astron. Astrophys. – 2004. – V. 422. – P. 1105–1108.
48. Fey A. Charlot P. VLBA Observations of Radio Reference Frame Sources. II. Astrometric Suitability Based on Observed Structure //Astrophys. J. Suppl. Ser. - 1997. - V.111. - P.95.

49. Fey A. L., Boboltz D. A., Gaume R.A. Extragalactic radio source selection for use in directly linking optical astrometric observations to the radio reference frame // *Astron. J.* – 2001. – V. 121. – P. 1741–1751.
50. Fey A., Charlot P. VLBA Observations of Radio Reference Frame Sources. III. Astrometric Suitability of an Additional 225 Sources // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* – 2000. – V. 128. – P. 17–83.
51. Fey A.L., Charlot P. Dual– frequency VLBA images and structure corrections for 193 sources // *IERS Technical Note.* -1997. –V. 23. - P.III–25 – III–92.
52. Folkner W. M., Charlot P., Finger M. H., Williams J. G. Determination of the extragalactic–planetary frame tie from joint analysis of radio interferometric and lunar laser ranging measurements // *Astron. Astrophys.* -1994. - vol. 287. - P. 279–289.
53. Fricke W., Kopff A. Fourth fundamental catalogue (FK4) // *Veröff. Astron. Rechen Inst.* – 1963. – № 10.
54. Fricke W. Preliminary Supplement to the FK4 (FK4 Sup) // *Veröff. Astron. Rechen Inst.* – 1963. – № 11.
55. Fricke W., Schwan H., Corbin T. Fifth Fundamental Catalogue (FK5), part II, the FK5 extension – new fundamental stars // *Veröff. Astron. Rechen–Institut, Heidelberg.* – 1991. – № 33. – 143 p.
56. Fricke W., Schwan H., Lederle T. Fifth Fundamental Catalogue (FK5) // *Veröff. Astron. Rechen–Institut, Heidelberg.* -1988. – № 32. – 106 p.
57. Fukushima T., Fujimoto M. – K., Kinoshita H. and Aoki S. Coordinate systems in general relativistic framework // *Proc of the IAU Symposium № 114, Relativity in Celestial Mechanics and Astrometry / Eds. Kovalevsky J., Brumberg V.A.* – Dordrecht: Reidel. –1986. – P. 145–168.
58. Hazard C., Sutton J., Argue A., Kenworthy, C. M.; Morrison, L. V.; Murray, C. A.3C 273B–Coincidence of radio and optical positions // *Nature.* 1971. - V.233. – P. 89.

59. Hog E. The Tycho Catalogue : Astrometry and Photometry // Hipparcos Venice'97, ESA, – 1997. – P. 25–30.
60. Hog E., Fabricius C., Makarov V.V., Urban S. The Tycho–2 Catalogue of the 2.5 million brighter stars // *Astron. Astrophys.* – 2000. – V. 355. – L 27– L30.
61. [http:// www.astrometrica.at/](http://www.astrometrica.at/)
62. [http:// www.ast.cam.ac.uk/~dwe/SRF/camc13.html](http://www.ast.cam.ac.uk/~dwe/SRF/camc13.html)
63. <http://www-astron.univer.kharkov.ua/astrometry/xc1/>
64. Johnston K.J., de Vegt C. Reference Frames in Astronomy // *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* -1999., –V. 37. - P.97–125.
65. Kopff A. Dritter Fundamentalkatalog des Berliner Astronomischen Jahrbuchs. II Teil. Zusatzsterne für die Epoche 1950 // *Abhandl. Preuss. Akademie Phys.–math. Klasse.* – 1938. – № 3.
66. Kovalevsky J. Connection of the Hipparcos catalogue to the extragalactic reference frame // *Hipparcos Venice'97, ESA, –1997.* – P. 11–12.
67. Lacroute P. // *Transaction of the IAU, v.XIIIB, p.63 Proceedings of the Thirteenth General Assembly, Prague, Czechoslovakia, August 22 – 31, 1967* Ed. L. Perek, 1968.
68. Lazorenko P., Babenko Yu., Karbovsky V., Buromsky M. The Kyiv Meridian Axial Circle catalogue of stars in fields with extragalactic radio sources // *Astron. Astrophys.* – 2005. -V.438.-P.377–389.
69. Lestrade J., Jones D.J., Preston R.A., Phillips R.B. Preliminary Link of the Hipparcos and VLBI reference frames // *Astron. Astrophys.* – 1995. – V. 304 – p.182 – 188.
70. Lindegren L. The Hipparcos Catalogue double and multiple systems annex // *Hipparcos Venice'97, ESA, –1997.* – P 13–18.
71. Lindegren, L.; Röser, S.; Schrijver, H.; Lattanzi, M. G. A comparison of ground-based stellar positions and proper motions with provisional HIPPARCOS results // *Astron. Astrophys.* -1995. –V.304.- P. 44- 51.

72. Lindegren L., Kovalevsky J. Linking the Hipparcos Catalogue to the extragalactic reference frame. // *Astron. Astrophys.* – 1995. –V304. –P.189-201.
73. Ma C., Arias E.F., Eubanks T.M., Fey A.L. The International celestial reference frame realized by VLBI // *IERS Technical Note* – 1997. –V.23.- p.II –3 – II–40.
74. Maigurova N., Pinigin G., Protsyuk Yu., Shulga A., Jin W., Tang Z., Wang Sh., Aslan Z., Khamitov I., Gumerov R., Development of Joint Project on Improvement of Link between Optical and Radio Reference Coordinate Systems // *Extension and Connection of Reference Frames Using Ground Based Technique (October 10–13, 2001)*. – Nikolaev: ATOL, 2001. – P. 58–66.
75. Maigurova N., Pinigin G., Protsyuk Yu., Shulga A., Jin W., Tang Z., Wang S., Aslan Z., Khamitov I., Gumerov R., Refinement of Linking Optical–Radio Reference Frames on the Base of Collaborative Observatories in the International Joint Project // *Second Latin America Meeting on Astrometry and Third Brazilian Meeting on Fundamental Astronomy (2–5 Sept., 2002, Araraquara–Sao Paulo, Brazil)*. – Abstract Series. – 2002. – P. 37.
76. Mignard F. Astrometric properties of the Hipparcos catalogue // *Hipparcos Venice'97*, ESA, –1997. – P. 5–10.
77. Monet D.G., Levine S.E., Ables H.D. et al. The USNO–B catalog // *Astronomical Journal* – 2003. – V. 125. – P. 984–993.
78. Morrison L., Argule R.W., Garrington S.T., Davis R.J. Future control of the Hipparcos frame using MERLIN // *Hipparcos Venice'97*, ESA, –1997. – P. 143–145.
79. Morrison L., Argule R.W., Requime Y., Mazurier J. Comparison of optical and radio positions of stars // *Astron. Astrophys.* – 1990. – V. 236.– P.256 – 260.
80. Newberry V. M. Signal–to–Noise considerations for sky–subtracted CCD data // *PASP.* – 1991. – V.103, № 659. – P. 122 – 130.
81. Newcomb S. Catalogue of fundamental stars for the epochs 1875 and 1900

reduced to an absolute system // A.P. – 1898. – Vol. VIII. – P.11.

82. Peters J. Neuer Fundamental–Catalog des B.A.J. // Veröff. Astron. Rechen Inst. – 1907. – № 32.

83. Peters J. Neuer Fundamental–Catalog des B.A.J. // Veröff. Astron. Rechen Inst. – 1907. – № 33.

84. Pinigin G., Shulga A., Maigurova N., Protsyuk Yu., Jin W., Tang Zh., Wang Sh., Velichko F., Fedorov P., Filonenko F., Aslan Z., Khamitov I., Gumerov R. Refinement of Linking optical\radio reference Frames // Astronomy and Geodesy in New Millenium: – September, 24–29, AstroKazan–2001. – 2001. - P. 272–273.

85. Pinigin G., Shulga A., Maigurova N.V., Protsyuk Yu., Velichko F., Fedorov P. Jin Wenjing, Tang Zhenghong, Wang Shuhe, Gumerov R.I. Bikmaev I. F. Refinement of linking optical/radio reference frames on the base of coordinated observations in observatories of Ukraine, China and Russia // Kinematics and Physics of Celestial Bodies Suppl.Ser. – 2003. – № 3. – P. 59–63.

86. Ryl'kov V., Dement'eva A., Narizhnaya N., Maigurova N., Protsyuk Yu., Pinigin G., Bocsa G., Popescu P. Compiled Catalogue of Reference Stars around 43 Extragalactic Radio Sources // Romanian Astronomical Journal Suppl. 2005. – V.15. - P. 131– 137.

87. Ryl'kov V., Dement'eva A., Narizhnaya N., Pinigin G., Maigurova N., Protsyuk Yu., Kleschenok V., Bocsa G., Popescu P. Reference stars compiled catalogue around extragalactic radio sources. Reduction techniques and the first results // Kinematics and Physics of Celestial Bodies Suppl. Ser.– 2005. – № 5. – P. 328–332.

88. Schmidt M. 3C 273: a star–like object with large red–shift// Nature. – 1963. - V.197. - P.1040

89. Silva Neto D.N., Andrei A.H., Vierra Martins R. A pattern of noncoincidence between radio and optical positions of ICRF sources //Astron. J. – 2002.-V. 124. - P. 612-618.

90. Smith B. A. Astronomical imaging applications for CCDs.// In JPL Conf. on

Charge–Coupled Device Technol. and Appls. – 1976. – P. 135–138.

91. Souchay J., Feissel M., Bizouard C., Capitaine, N.; Bougeard, M. Precession and nutation for a non–rigid Earth: comparison between theory and VLBI observations// *Astron. Astrophys.* -1995. - V.299. - P.277–287.

92. Stone R. C. Comparison of digital centering aigoritms // *Astron. J.* – 1989 – Vol. 97. – P.1227–1237.

93. Stone R.C. CCD observations linking the radio and optical references frames// *Astron. J.* – 1994. – V. 108. – P. 313–325.

94. Tang Z.H., Jin W.J., Wang S.H., Pinigin G., Protsyuk Yu., Maigurova N., Shulga A. Preliminary Results of the Optical Positions of Extragalactic Radio Sources // XXIVth General Assembly of the IAU (7–18 August 2000). Manchester, 2000. – P. 145.

95. Tang Z.H., Jin W.J., Wang S.H., Pinigin G., Protsyuk Yu., Maigurova N., Shulga A. Determination of optical positions for extragalactic radio sources under the collaboration between SHAO and MAO // “Towards Models and Constants for Sub–Microarcsecond Astrometry”, Proc. IAU Colloquium N180, Johnston, McCarthy, etc.(eds), USNO, 2000. - P.57–60

96. Tang Z., Wang S., Jin W. Determination of optical position 22 southern extragalactic radio sources // *Astron. J.* – 2002. – Vol. 123. – P.125–131.

97. Tang Z., Wang S., Jin W., Maigurova N., Protsyuk Yu., Pinigin G., Shulga A., Kovalchuk A. Determination of optical positions for 38 extragalactical radio sources // *Extension and Connection of Reference Frames Using Ground Based Technique* (October 10–13, 2001). – Nikolaev: ATOL, 2001.– P. 66–72.

98. The HIPPARCOS and Tycho Catalogues.– Noordwijk: ESA Publ., 1997.–V.1–7.

99. Tyson, N.D. and Gal R.R. An exposure guide for taking twilight flatfields with large format CCDs // *Astron. J.* – 1993. – V. 105. - P.1206-1212.

100. Vegt C., Genlich U. Precise optical positions of radio sources in the FK 4–system - Results from a pilot program // *Astron. Astrophys.* – 1978. – V. 67. – P. 65–

71.

101. Vishnevsky G.I., Galyatkin I.A. et al. Scientific and technical collaboration between Russian and Ukrainian researchers and manufacturers on the development of astronomical instruments equipped with advanced detection services // *Astron. and Astrophys. Trans.* – 2003. – Vol.22. – P. 777 – 786.

102. Wielen R., Schwan H., Dettbarn C. Sixth catalogue of Fundamental Stars (FK6). Part I: Basic Fundamental Stars with Direct Solutions. // *Veroff. Astron. Rechen-Institut, Heidelberg*, N 35, p. 1 –14, 1999.

103. Zacharias N., Urban S.E., Zacharias M.I., Wycoff G.L. The second US Naval Observatory CCD astrograph catalog (UCAC2) // *Astron. J.* – 2004. – V. 127. – P. 3043–3059.

104. Zacharias N., Zacharias M.I., Hall D. M., Johnston K.J. Accurate optical positions of extragalactic radio reference frame sources // *Astron. J.* – 1999. – V. 118. – P. 2511–2525.

105. Walter H.G., Hering R. Precession from Hipparcos and FK5 proper motions compared with current values: Reasons for discrepancies // *Astron. Astrophys.* – 2005. – V. 431. – P. 721–727.

106. XXIst General Assembly – Transactions of the IAU Vol. XXI B Proceedings of the Twenty–First General Assembly Buenos Aires, Argentina, July 23 – August 1, 1991.

107. XXIIIrd General Assembly – Transactions of the IAU Vol. XXIII B Proceedings of the Twenty–Third General Assembly Kyoto, Japan August 18 – 30, 1997, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 1999.