

Министерство образования и науки Украины  
Харьковский национальный университет радиоэлектроники

На правах рукописи

МОВСЕСЯН ЯНА САМВЕЛОВНА

*Підпис*

УДК 519.6:004.932

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ВЫБОРА ОПОРНЫХ ЗВЕЗД НА ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ

01.05.02 – математическое моделирование и вычислительные методы

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
Саваневич Вадим Евгеньевич  
доктор технических наук,  
профессор

Цей примірник дисертаційної роботи  
ідентичний за змістом з іншими, поданими до спеціалізованої вченої ради  
Д 64.052.02.

Вчений секретар спецради Д 64.052.02

*Підпис*  
*печатка*

Л.В. Колесник

Харьков – 2017

## СОДЕРЖАНИЕ

Содержание.....	2
Перечень символов, единиц, сокращений и терминов .....	4
Введение.....	5
Раздел 1. Анализ особенностей автоматической привязки цифровых изображений к каталогам объектов.....	12
1.1 Относительный метод определения координат и необходимость качественного выбора опорных звезд.....	12
1.2 Основные характеристики и особенности условий формирования измерений на цифровых изображениях.....	16
1.3 Существующие вычислительные методы и программные обеспечения отождествления и привязки измерений на цифровых изображениях.....	21
1.3.1 Вычислительные методы обработки цифровых изображений для отождествления и определения углового положения объектов в пространстве по данным изображений.....	21
1.3.2 Программные комплексы для отождествления и привязки измерений на цифровых изображениях.....	28
1.4 Постановка целей и задач исследований.....	34
Выводы по разделу 1.....	39
Раздел 2. Разработка вычислительных методов отождествления цифровых изображений.....	41
2.1 Аналитические выражения отклонений между оценками положений небесных объектов в задаче отождествления ПЗС-кадра.....	41
2.2 Разработка метода частного предварительного отождествления измерений цифровых кадров одной серии.....	56
2.3 Разработка метода полного предварительного отождествления	

цифровых кадров с существенной неопределенностью их параметров.....	66
Выводы по разделу 2.....	88
Раздел 3. Разработка и исследование вычислительных методов автоматического выбора опорных звезд на цифровых изображениях.....	89
3.1 Вычислительный метод автоматического выбора опорных звезд на цифровых изображениях.....	89
3.2 Метод исследования показателей точности оценок углового положения опорных звезд в пространстве по данным изображений....	100
3.3 Реализация вычислительного метода автоматического выбора опорных звезд на цифровых изображениях в программном комплексе автоматизированного обнаружения астероидов и комет CoLiTec...	113
3.4 Исследование показателей точности разработанных вычислительных методов автоматического выбора опорных звезд на цифровых изображениях.....	118
Выводы по разделу 3.....	150
Выводы.....	153
Список использованных источников.....	157
Приложение А. Акты использования и внедрения результатов диссертационных исследований.....	179
Приложение Б. Список обозначений.....	183
Приложение В. Диплом за первое место в конкурсе инновационных проектов «IT-Kharkiv» .....	190

## ПЕРЕЧЕНЬ СИМВОЛОВ, ЕДИНИЦ, СОКРАЩЕНИЙ И ТЕРМИНОВ

АКО – астероидно-кометная опасность.

АСЗ – астероид, сближающийся с Землей.

ПЗС – прибор с зарядовой связью.

ИСЗ – искусственный спутник Земли.

ПО – программное обеспечение.

СКО – среднеквадратическое отклонение.

ССО – объект Солнечной системы.

CoLiTec – программа автоматического поиска астероидов и комет на серии ПЗС-кадров.

MPC – англ. Minor Planet Center, Центр малых планет.

OLDAS – OnLine Data Analysis System.

SSOAnSe – программа для исследования статистических характеристик ПЗС измерений положения и блеска объектов Солнечной системы.

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** Обработка цифровых изображений – интенсивно развивающаяся отрасль, которая с каждым годом находит все новое и новое применение. Одним из таких применений является определение локационных данных по изображению, то есть определение данных о положении объектов на изображении и в пространстве по данным изображений [65, 73]. Для высоких показателей точности определения данных о положении объектов в пространстве по данным изображений используется относительный метод [10, 23, 39].

Выбор опорных объектов при реализации относительного метода совместно с определением положения объектов на цифровых изображениях определяют потенциальную точность наблюдений. При этом методы определения положения объектов на цифровых изображениях описаны достаточно подробно [191]. Так же имеет место значительное количество статей, посвященных отождествлению кадров [151, 152, 130, 131]. В свою очередь методы отбора опорных объектов на цифровых изображениях исследованы и отображены в специальной литературе достаточно скудно. Поэтому актуальной является **научно-техническая задача** разработки и анализа вычислительных методов автоматического выбора опорных звезд для оценки угловых положений объектов в пространстве по данным изображений.

**Связь работы с научными программами, планами и темами.** Диссертационная работа связана с международной программой «Защита Планеты» (Planetary Defense) от Международной Академии Астронавтики (International Academy of Astronautics – IAA) [199], международным проектом «The Space Emergency System» при поддержке программы трансграничного сотрудничества Венгрия – Словакия – Румыния – Украина (European Neighbourhood and Partnership Instrument – ENPI) [134], программами наблюдений астероидов под эгидой Центра малых планет (Minor Planet Center – MPC) Международного Астрономического Союза [137], международной программой Gaia-FUN-SSO

(Gaia Follow-Up Network for Solar System Objects) [118], НИР № 307 «Динамічний інтелектуальний аналіз послідовностей нечіткої інформації за умов суттєвої невизначеності на основі гібридних систем обчислювального інтелекту» (№ГР 0116U002539).

В рамках данной тематики диссертантом разработаны вычислительные методы частного предварительного и полного предварительного отождествления измерений цифровых кадров, метод автоматического выбора опорных звезд и метод исследования показателей точности оценок угловых положений объектов в пространстве по данным изображений, которые используются для максимизации показателей точности определения угловых положений исследуемых объектов в пространстве по данным изображений.

**Цель и задачи исследования.** Цель работы состоит в повышении показателей точности оценки угловых положений объектов в пространстве по данным изображений, за счет разработки и анализа вычислительных методов обработки цифровых изображений.

Достижение данной цели обеспечивается решением частных задач:

- разработка вычислительного метода предварительного отождествления измерений цифровых изображений одной серии;
- разработка вычислительного метода полного предварительного отождествления цифровых изображений с существенной неопределенностью их параметров;
- разработка вычислительного метода автоматического выбора опорных звезд на цифровых изображениях;
- разработка метода исследования показателей точности оценок угловых положений опорных звезд в пространстве по данным изображений.

*Объект исследования* – совокупность измерений звезд, сформированных на серии цифровых кадров.

*Предмет исследований* – процесс выбора опорных звезд и определение их углового положения в пространстве по данным изображений.

**Методы исследований.** Основные результаты работы получены на основе теории математической статистики, статистической теории проверки многоальтернативных гипотез и оценки параметров, позволивших разработать вычислительные методы частного и полного предварительного отождествления; вычислительный метод автоматического выбора опорных звезд; вычислительный метод исследования показателей точности оценок угловых положений опорных звезд в пространстве по данным изображений.

**Научная новизна полученных результатов.** В рамках решения задач диссертационного исследования получены следующие научные результаты.

1. Впервые предложен вычислительный метод автоматического выбора опорных звезд на цифровых изображениях, который использует расширенную совокупность их селективных признаков и многоэтапное увеличение порядка модели редукции постоянных пластинки с одновременным увеличением количества используемых для их расчета пар, и позволяет с высокой точностью определять угловое положение объектов в пространстве по данным изображений.

2. Усовершенствован вычислительный метод отождествления измерений объектов на серии цифровых изображений в части определения начального приближения параметров попарного соответствия между двумя множествами измерений объектов с помощью процедуры частного предварительного отождествления, что позволяет увеличить надежность отождествления измерений объектов на серии цифровых изображений.

3. Усовершенствован вычислительный метод отождествления измерений кадров с объектами каталога, в части определения начального приближения в условиях существенной неопределенности их параметров отождествления с помощью процедуры полного предварительного отождествления, что позволяет увеличить надежность отождествления измерений кадров с объектами каталога в условиях существенной неопределенности их параметров.

4. Получил дальнейшее развитие метод исследования показателей точности измерений углового положения опорных звезд в пространстве по данным

изображений, в части проведения анализа расширенного множества показателей точности измерений угловых положений опорных звезд по различным подвыборкам данных.

**Достоверность и обоснованность полученных результатов** обеспечивалась корректным использованием основных положений известного и апробированного математического аппарата. Полученные новые научные результаты подтверждаются результатами экспериментальных исследований и их применением данных исследований в программе автоматизированного обнаружения астероидов и комет CoLiTec.

**Практическое значение полученных результатов.** Разработанные вычислительные методы автоматического выбора опорных звезд позволили значительно повысить показатели точности оценки угловых положений объектов, подтверждением чего являются результаты обработки ПЗС-кадров. Например, при масштабе пикселя 2.8" среднеквадратическое отклонение экваториальных координат опорных звезд по прямому восхождению (RA) составляло 0.08", а по склонению (DE) - 0.09". Указанные значения СКО обеспечивают выполнение требований Центра малых планет [164, 165, 166, 167] к точности оценки угловых положений астероидов на цифровых изображениях. Кроме того, разработанные методы, устойчивы к различным видам артефактов на цифровом изображении. Например, наличие на изображении яркого трека ИСЗ, изображений близких объектов или объектов, не имеющих пика.

Исследование показателей точности оценок угловых положений опорных звезд свидетельствует о том, что частота критических ошибок при использовании разработанных методов в ПО CoLiTec ниже, чем у существующих его аналогов, например, ПО Astrometrica.

Разработанные вычислительные методы могут быть использованы в различных программных комплексах обработки цифровых изображений для высокоточного определения угловых положений объектов, например, в программах автоматизированного обнаружения малых тел Солнечной системы на серии

цифровых кадров. Кроме того, предложенные методы могут быть использованы для определения угловых положений объектов любой природы при распознавании этих объектов (например, распознавание текстовой информации).

Разработанные в диссертационной работе методы были внедрены в программное обеспечение автоматического поиска астероидов и комет на серии ПЗС-кадров CoLiТес. На данный момент ПО CoLiТес используется в Одесской астрономической обсерватории – Odessa-Mayaki (с. Маяки, Одесская обл, Украина, МРС код – 583) и в лаборатории космических исследований ДВНЗ «Ужгородський національний університет». Также разработанные методы используются в рамках научно-исследовательской работы № 307 «Динамічний інтелектуальний аналіз послідовностей нечіткої інформації за умов суттєвої невизначеності на основі гібридних систем обчислювального інтелекту» (№ГР 0116U002539) на базе Харьковского национального университета радиоелектроники и внедрены в рамках учебного процесса. Документальным подтверждением внедрения разработанных диссертантом вычислительных методов являются соответствующие акты о внедрении (приложение А).

**Личный вклад соискателя.** Все основные научные и практические результаты, полученные в диссертационной работе, соискатель получил самостоятельно [7, 24-32, 50, 51, 58, 59, 63, 70, 71, 75, 76, 83, 145, 146, 173, 187, 189, 190-192]. Личный вклад автора в совместно опубликованных работах такой: в работе [29] разработан вычислительный метод частного предварительного отождествления измерений цифровых изображений одной серии; в работе [26] разработан вычислительный метод полного предварительного отождествления измерений цифровых изображений в условиях существенной неопределенности; в [58] разработан вычислительный метод автоматического выбора опорных звезд; в [51] разработан метод исследования показателей точности оценок угловых положений опорных звезд; в [25] предложены уточнения выражений для отклонений различных оценок экваториальных координат небесных объектов; в [24, 28, 32] получены выражения для определения начального приближения для

отождествления отождествлений измерений на кадре; в работе [59] предложен метод отождествления измерений кадра с формулярами используемого звездного каталога с определением постоянных пластинок; в [30, 31] предложены выражения для оценки параметров видимого движения объектов; в работах [7, 27, 191, 192] исследованы показатели точности оценок положения объектов в ПО CoLiTec, в том числе по результатам наблюдений астероидов тридцати самых продуктивных обсерваторий мира, а также сравнительный анализ данных показателей в ПО CoLiTec и Astrometrica.

**Апробация результатов диссертационной работы.** Основные результаты диссертации обсуждены на 13 научно-технических конференциях: «Asteroids, Comets, Meteors 2014» 12-той международной конференции, (Финляндия, Хельсинки, 30 июня – 4 июля 2014 г.) [188]; «14-тій українській конференції з космічних досліджень» (Украина, Ужгород, 8–12 сентября 2014 г.) [83]; «40th COSPAR Scientific Assembly» (Россия, Москва, 2–10 августа 2014 г.) [187]; «Gaia-FUN-SSO-3 International Workshop 2014» (Франция, Париж, 24–26 ноября 2014 г.) [146]; International scientific and methodological conference KOLOS 2014» (Словакия, Стакчин, 4–6 декабря 2014 г.) [189]; Радиотехника и молодежь в XXI веке [50, 51]; «IAA Planetary Defense Conference 2015» (Italy, Frascati, 13 – 17 апреля 2015 г.) [145]; «15-та українська конференція з космічних досліджень» (Украина, Одесса, 24 – 28 августа 2015 г.) [71]; «International meeting on variable stars research KOLOS 2015» (Словакия, Стакчин, 3 – 5 декабря 2015 г.) [172]; «Міжнародний науковий семінар пам'яті Б.Л. Кашеєва до 96-річчя з дня народження «Радіометеори, метеори і міжпланетна складова: поблизу та на відстані» (Украина, Харьков, 15 марта 2016 г.) [70]; «Всеукраїнська науково-практична конференція молодих вчених. Теоретичні та прикладні аспекти застосування інформаційних технологій в галузі природничих наук» (Украина, Одесса, 20-22 апреля 2016 г.) [63]; «16-th Odessa International Astronomical Gamow Conference-School» (Украина, Одесса, Черноморка, 14-20 августа, 2016 г.) [173];

**Публикации.** Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 13 научных статьях профильных научных изданий Украины, 2 статьи [191, 192] входят в наукометрическую базу «Scopus», а также в материалах и сборниках тезисов 13 научно-технических конференций. Соискатель является соавтором 2 авторских прав [75, 76] на программный код.

## РАЗДЕЛ 1

### АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ПРИВЯЗКИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ К КАТАЛОГАМ ОБЪЕКТОВ

#### 1.1 Относительный метод определения координат и необходимость качественного выбора опорных звезд

На сегодняшний день обработка цифровых изображений – интенсивно развивающаяся отрасль, находящая с каждым годом новые и новые приложения. Разработка вычислительных методов автоматической обработки серий астрономических изображений является одной из быстро развивающихся предметных областей компьютерной обработки данных [85, 194]. При этом выдвигаются достаточно высокие требования к точности определения углового положения объектов на изображении и в пространстве по данным изображений. Особенно актуальной данная тематика является в области астероидных наблюдений [38, 147].

Задача определения углового положения объектов в пространстве – первая астрометрическая задача, которая успешно решена методами астрофотографии. Прежде всего, актуальность данных исследований связана с реализацией системы мер по обеспечению астероидной безопасности Земли, намеченной в международных астрономических кругах [98, 147, 171, 193, 203].

В настоящее время проблема астероидно-кометной опасности (АКО) стала весьма «модной», многие средства массовой информации достаточно часто дают материалы о близкой всемирной катастрофе из-за падения на Землю кометы или астероида. В мире науки эта проблема тоже стала более заметной, достаточно резко возросла её актуальность. Это обусловлено тем, что на рубеже XX и XXI веков началась серьёзная переоценка возможности столкновения Земли с малыми телами Солнечной системы [84]. Обнаружение опасных тел и детальное изучение их свойств – первоочередная задача, стоящая перед иссле-

дователями, занимающимися поиском путей решений АКО [209].

На данный момент существует множество проектов поиска малых тел Солнечной системы [176,177, 178, 180]. К самым значимым/результативным программам по поиску малых тел на просторах Солнечной системы можно отнести:

- PLS (поиск слабых малых планет Солнечной системы) [175, 202];
- T1S/T2S/T3S (обзор троянских астероидов) [170];
- PCAS (астероиды пересекающие орбиты планет) [128, 196, 205];
- NEAT (обзор околоземных астероидов) [139, 201];
- LINEAR (отслеживание околоземных астероидов) [112];
- LONEOS (поиск околоземных объектов) [170];
- CSS (поиск околоземных астероидов) [170];
- SSS (поиск околоземных астероидов и комет) [170];
- DES (поиск объектов пояса Койпера) [170, 185];
- Spacewatch (поиск и открытие малых тел) [170];
- BATTeRS (обнаружение и наблюдение околоземных астероидов, комет и космического мусора) [162, 170];
- UDAS (поиск астероидов) [170];
- UESAC (поиск новых спутников Юпитера, открытие новых астероидов и комет) [170];
- CINEOS (открытие новых астероидов и комет) [88, 109];
- ODAS (поиск околоземных астероидов) [88];
- NEOWISE [171];
- Pan-STARRS [90, 170, 197].

Данные проекты с помощью телескопов и необходимого программного и информационного обеспечения позволяют: обнаружить астероиды на фоне звезд; определить их экваториальные координаты за счет привязки изображений к звездам опорного каталога; отождествить выявленные астероиды с каталожными объектами, имеющими известные орбиты [104, 183]. Также, при от-

крытии нового объекта, определить из полученной серии наблюдений предварительную орбиту нового объекта и предвычислить его положение на моменты будущих наблюдений. Результаты получаются практически одновременно с процессом наблюдений [20, 21, 22, 52].

Исходя из этого, особое внимание уделяется автоматической привязке цифровых изображений к звездным каталогам, а именно определению положения объектов в пространстве по данным изображений.

Для определения углового положения объектов в пространстве используются абсолютный и относительный методы [48, 49, 143]. Абсолютный метод (рис.1.1) привязан к механике наблюдательного инструмента. Точности астрономических наблюдений настолько высоки, что использование абсолютного метода определения положения объекта в пространстве по его положению на кадре уже давно ушло в прошлое.

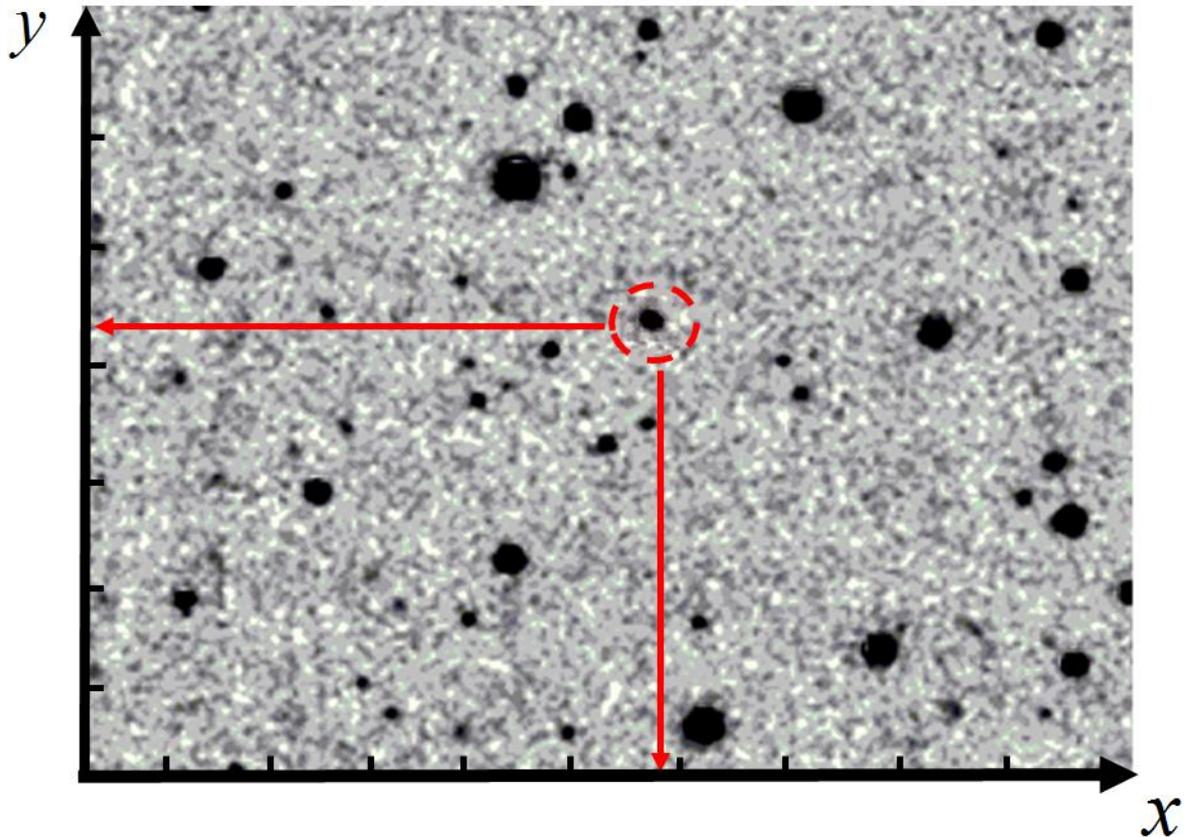


Рисунок 1.1 – Абсолютный метод определения углового положения объектов в пространстве по данным изображений

Для определения экваториальных координат, как астероидов, так и других небесных объектов, используют относительный метод (рис. 1.2) [4, 5], который должен базироваться на качественном выборе опорных звезд. Точность определения положения небесных объектов на цифровом изображении существенно зависит от точности определения положения самих опорных звезд. Это объясняет актуальность отдельного, самостоятельного исследования точности оценок углового положения опорных звезд.

При относительном методе положение исследуемого объекта в фокальной плоскости оптической системы измеряется относительно объектов, положение которых на изображении известно с высокой точностью. Данные объекты называют опорными.

Для реализации относительного метода необходимо отождествить объекты кадра с формулярами каталога (рис. 1.3) и выбрать из отождествленных объектов опорные.

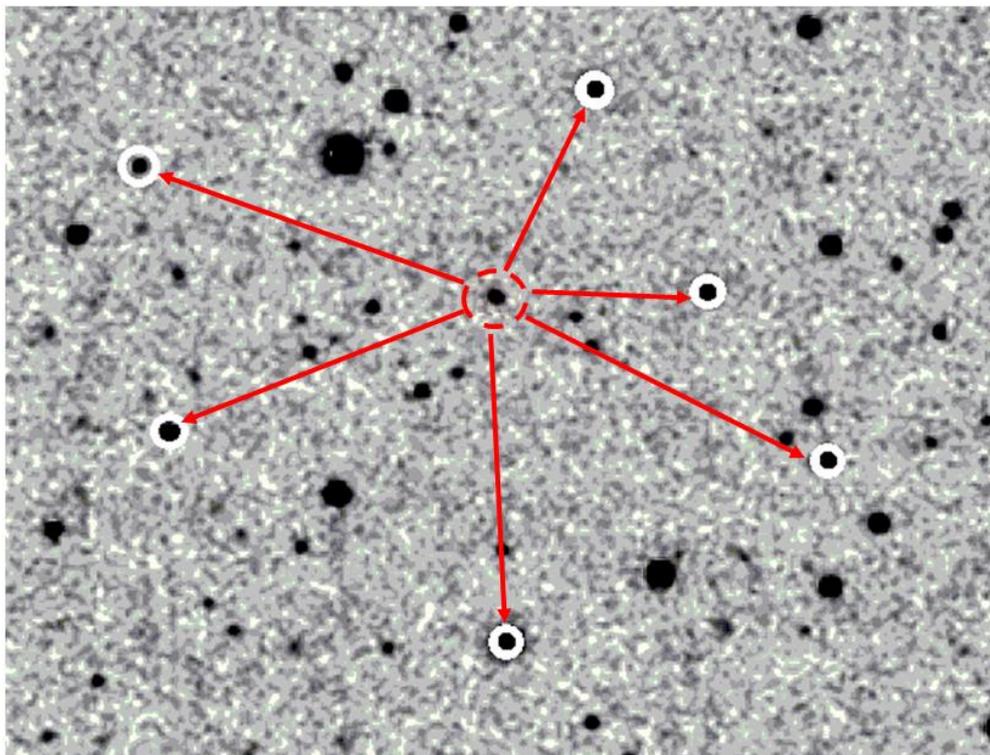


Рисунок 1.2 – Относительный метод определения углового положения объектов в пространстве по данным изображений

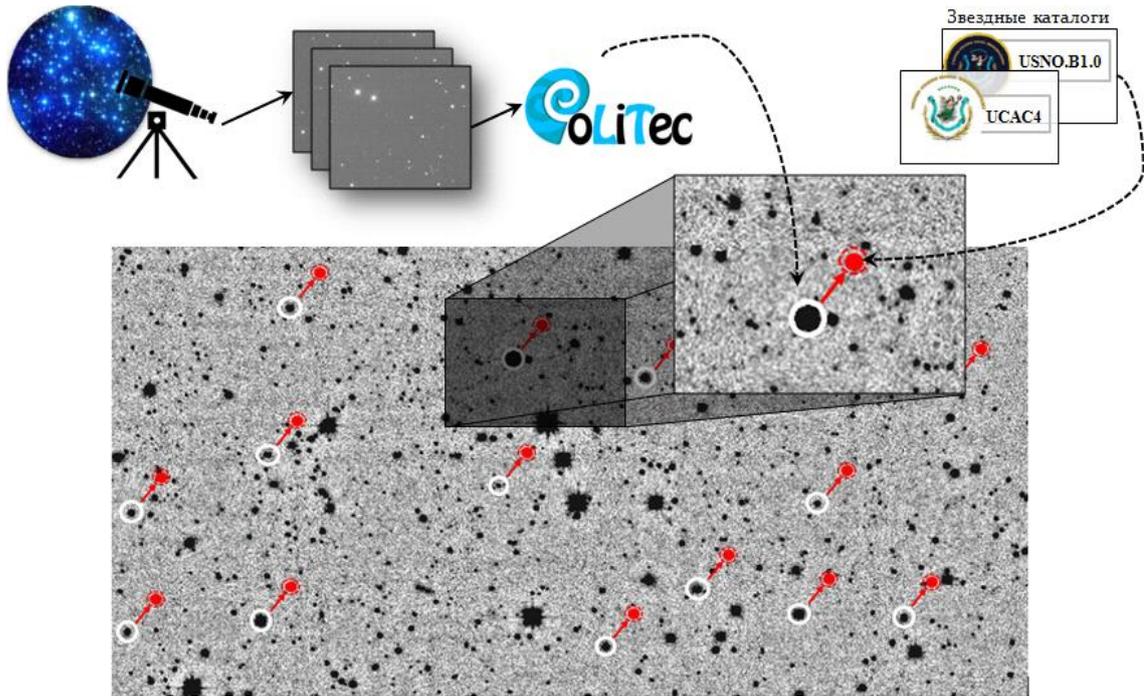


Рисунок 1.3 – Графическое представление отождествления измерений на цифровых изображениях.

При проведении отождествления [24, 28, 32, 161] необходимо найти попарное соответствие между совокупностью сформированных на кадре измерений и множеством объектов звездного каталога, принадлежащих той же области небесной сферы, что и сформированный кадр. Иными словами, под отождествлением измерения кадра и формуляров звездного каталога понимается установление взаимно однозначного соответствия между измерением и формуляром звездного каталога, то есть установление тождественности сведений, содержащихся в измерении и данном формуляре. Это обозначает, что сведения некоторого измерения и формуляра соответствуют одному и тому же небесному объекту.

## 1.2 Основные характеристики и особенности условий формирования измерений на цифровых изображениях

На сегодняшний день наблюдение небесных объектов осуществляется с

помощью телескопов, оснащенных специализированными ПЗС - камерами, которые при наблюдении определенного участка небесной сферы формируют серии ПЗС - кадров [11, 121, 133, 140].

Во время обработки исследуемого ПЗС - кадра проводится обнаружение и оценка положения и блеска обнаруженных объектов.

Методами внутрикадровой обработки на  $n_{fr}$ -го кадре формируются измерения:

$$\Omega_{nfr} = \{Y_{1nfr}, \dots, Y_{infr}, \dots, Y_{Qnfr}\}. \quad (1.1)$$

где  $Y_{infr}$  – оценка параметров объекта  $i$ -го измерения  $n_{fr}$ -го кадра.

Каждый такой объекта содержит следующие значения:

$$Y_{infr} = \{A_{infr}; \chi_{infr}\}, \quad (1.2)$$

$$\text{где } \chi_{infr} = \{x_{infr}; y_{infr}\} \quad (1.3)$$

– оценка углового положения  $i$ -го измерения  $n_{fr}$ -го кадра;

$x_{infr}; y_{infr}$  – координаты  $i$ -го измерения  $n_{fr}$ -го кадра;

$A_{infr}$  – яркость измерения.

Множество измерений серии кадров  $\Omega_{set}$  состоит из подмножеств измерений кадров  $\Omega_{nfr}$  рассматриваемой серии:

$$\Omega_{set} = \{\Omega_{1fr}, \dots, \Omega_{nfr}, \dots, \Omega_{Nfr}\}. \quad (1.4)$$

На каждом кадре присутствуют измерения, как от неподвижных

объектов, так и от ложных и подвижных объектов (объектов с ненулевым видимым движением). На одном кадре от одного небесного объекта не может быть более одного измерения. Ошибки координат  $i$ -го измерения углового положения и блеска небесного объекта на  $n_{fr}$ -ом кадре можно считать независимыми как от измерения к измерению, так и от параметра к параметру в одном измерении. Координаты измерений ложных и подвижных объектов распределены равномерно и взаимно независимы.

Оценки положения каждого объекта на кадре производятся независимо области кадра, в которых производятся оценки, не пересекаются.

В области небесной сферы, которой соответствует исследуемый кадр, находится  $Q_{sky}$  небесных объектов, доступных измерению с помощью используемых телескопа и сценария наблюдения.

Сведения об известных небесных объектах содержатся в звездных каталогах [86, 101, 113, 114, 153, 207, 208]. Основная информация, содержащаяся в астрометрических каталогах, – это точные координаты звезд и скорости их изменения (так называемые собственные движения звезд). Астрометрические звездные каталоги формируются на основе двух обзоров (серий кадров), полученных через десятилетия одна от другой [121, 140, 207, 208]. Например, широко используемые сегодня астрометрические каталоги UCAC 4 [207, 208], XPM [113, 114], Tycho-2 [135, 136] сформированы по этому принципу.

Используемый при отождествлении измерений кадра звездный каталог называется опорным звездным каталогом [45, 46]. Данные о каждом каталогизированном небесном объекте множества объектов звездного каталога  $\Omega_{cat}$  организационно сведены в формуляры. Считается, что формуляр каталога – это совокупность «каталожных» оценок параметров видимого движения небесного объекта:

$$\Omega_{cat} = \{\Theta_{catj1}, \dots, \hat{\Theta}_{catjn}, \dots, \Theta_{catQ}\}. \quad (1.5)$$

Каждый формуляр каталога содержит:

$$\hat{\Theta}_{catjn} = \{ \hat{\theta}_{j1}, \dots, \hat{\theta}_{j\mu}, \dots, \hat{\theta}_{jM} \}, \quad (1.6)$$

где  $\hat{\theta}_{j\mu}$  – оценка  $\mu$ -го параметра видимого движения  $j$ -го небесного объекта.

В звездном каталоге не содержится информация обо всех небесных объектах. Объекты, не вошедшие в каталог, называются некаталогизированными [24]. Считается, что кадру соответствует  $Q_{nocat}$  некаталогизированных и  $Q_{cat}$  каталогизированных объектов.

На первый взгляд, представляется обоснованным формирование множества опорных звезд из самых ярких объектов на кадре. Однако не все самые яркие измерения на кадре могут быть использованы в качестве опорных звезд. Известны случаи присутствия на изображении ярких ложных измерений, например, сформированных на изображениях треков от искусственного спутника Земли (ИСЗ) (рис 1.4). Данные измерения являются значимой предпосылкой ошибок отождествления.

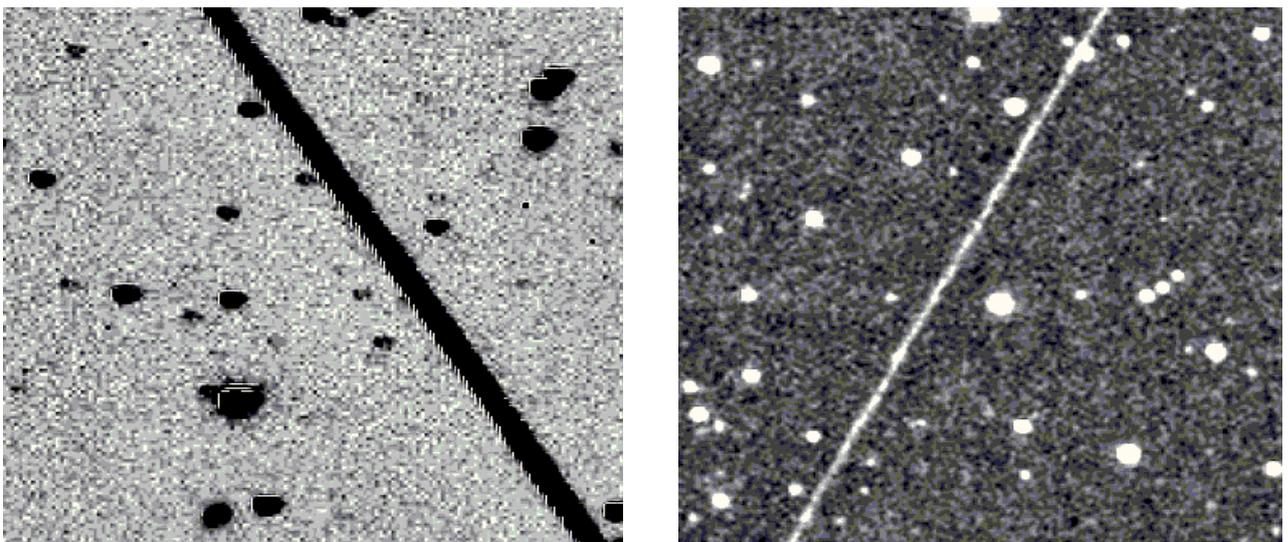


Рисунок 1.4 – Примеры изображений трека ИСЗ, зафиксированного на кадре

Довольно часто изображения самых ярких объектов на кадре могут быть передержаны и иметь низкую потенциальную точность определения их положения. К передержанным изображениям объектов [49] можно отнести так же объекты, изображения которых не имеют пика (рис 1.5 б). Наличие на кадре таких объектов может привести к значительным ошибкам отождествления, а именно, при обработке кадра специальными ПО изображения данной категории могут быть интерпретированы программой как изображения нескольких объектов.

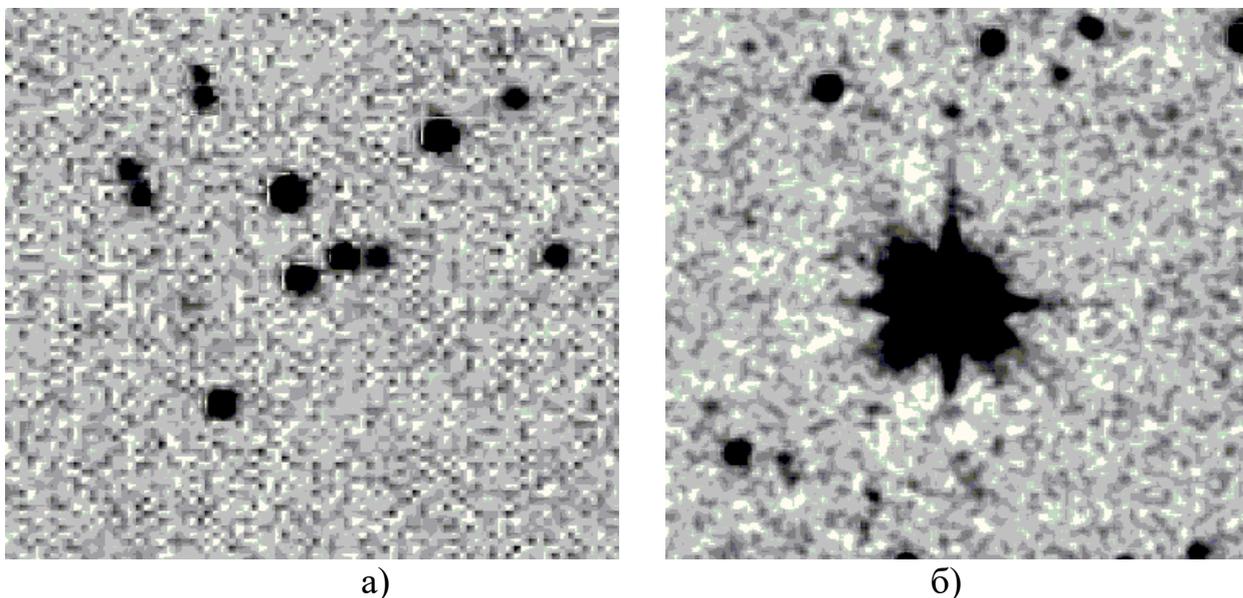


Рисунок 1.5 – Наличие на кадре а) изображений близких объектов б) изображение объектов, не имеющих пика

Так же должное внимание следует уделить пересекающимся изображениям близких объектов (рис 1.5 а). Использование «близких объектов» может привести к ошибкам перепутывания измерений и ошибочному отождествлению в целом. В разрабатываемом методе автоматического выбора опорных звезд необходимо минимизировать вклад ошибок отождествления в точность определения углового положения исследуемых объектов в пространстве. Поэтому необходимо исключить измерения, расположенные друг к другу ближе, чем наперед заданное предельно допустимое расстояние.

### **1.3 Существующие вычислительные методы и программные обеспечения отождествления и привязки измерений на цифровых изображениях**

#### **1.3.1 Вычислительные методы обработки цифровых изображений для отождествления и определения углового положения объектов в пространстве по данным изображений**

Для определения положения в пространстве необходимо определить постоянные пластинок с использованием опорных звезд [39, 66, 151, 152]. Для определения опорных звезд необходимо отождествить измерения кадра с формулярами каталога.

Известные методы решения задачи отождествления измерений кадра и формуляров каталога объектов можно разделить на стробовые и бесстробовые, байесовские и небайесовские, с последовательным и параллельным поступлением данных [13, 62, 77, 124].

Простейший метод состоит в разбиении задачи на последовательно решаемые подзадачи классификации измерений в стробах формуляров каталога, с целью выбора одного из них независимо, в каждом стробе, для подтверждения объекта каталога. Данный метод назван стробовым и относится к классу небайесовских. Стробовый метод отождествления измерений кадра с формулярами каталога целесообразно использовать при формировании измерений только по ярким объектам, малом количестве ложных измерений и больших угловых расстояниях между объектами. Иначе показатели качества отождествления существенно снижаются. Связано это как с тем, что данный метод часто приводит к перепутыванию измерений в стробах, так и с быстрым ростом его трудоемкости при увеличении количества измерений [160].

Известен метод перебора гипотез о сочетании измерений кадра и формуляров каталога с учетом их пропуска и наличия ложных [1, 2, 44]. Данный метод обладает потенциально возможными показателями качества принимаемых

решений. Однако данный метод предписывает к рассмотрению огромное количество гипотез. Поэтому поиск наилучшей гипотезы о сочетании пар измерение кадра – формуляр каталога глобальным перебором вариантов принципиально нереализуем. В настоящее время для отождествления предложено использовать аппарат задачи о назначениях [34, 37, 43, 107, 200]. При этом для решения задачи используется венгерский метод [2, 34, 44, 100, 134, 150].

Существуют реализованные в ПО на сегодняшний день вычислительные методы отождествления астрономических изображений. Наиболее известные из них разработала группа разработчиков Astrometry.net. Astrometry.net использует байесовский метод решения для отождествления кадров [36, 86, 125, 130, 131, 151, 152]. Однако методы, которые использует данный сервис, достаточно закрыты и не полно отображены в литературе, из чего следует невозможность адекватной оценки их работы.

Для выбора опорных звезд необходимо отождествить измерения кадров со звездами каталога (подраздел 1.1). В свою очередь, координаты измерений кадров представлены в системе координат цифрового кадра, а координаты звезд каталога – в экваториальной системе координат [33, 186, 198].

Для преобразования данных измерений из СК цифрового кадра в экваториальную СК и наоборот, используют тангенциальную (идеальную) СК.

Экваториальные координаты  $\alpha_i$  и  $\delta_i$  с известными идеальными координатами можно получить согласно выражению [33, 57]:

$$\begin{cases} \alpha_i = \alpha_0 + \arctg\left(\frac{-\xi_i}{\cos\delta_0 - \eta_i \sin\delta_0}\right); \\ \delta_i = \arcsin\left(\frac{\eta_i \cos\delta_0 + \sin\delta_0}{\sqrt{1 + \xi_i^2 + \eta_i^2}}\right), \end{cases} \quad (1.7)$$

где  $\xi_i$  и  $\eta_i$  – идеальные (тангенциальные) координаты опорных звезд;

$\alpha_0$ ,  $\delta_0$  – экваториальные координаты оптического центра ПЗС-матрицы.

В свою очередь, идеальные координаты  $i$ -го небесного объекта на цифровом кадре можно получить согласно формулам сферической тригонометрии [57] по его экваториальным координатам  $(\alpha_i, \delta_i)$  и с использованием известных экваториальных координат оптического центра кадра  $(\alpha_0, \delta_0)$  [66, 181]:

$$\begin{cases} \xi_i = \frac{\cos \delta_i \sin(\alpha_i - \alpha_0)}{\sin \delta_i \sin \delta_0 + \cos \delta_i \cos \delta_0 \cos(\alpha_i - \alpha_0)}; \\ \eta_i = \frac{\sin \delta_i \cos \delta_0 - \cos \delta_i \sin \delta_0 \cos(\alpha_i - \alpha_0)}{\sin \delta_i \sin \delta_0 + \cos \delta_i \cos \delta_0 \cos(\alpha_i - \alpha_0)}. \end{cases} \quad (1.8)$$

Между идеальными и экваториальными координатами существует однозначное соответствие, которое выражается формулами (1.7), (1.8) [127]. Таким образом, для определения экваториальных координат объекта при известных его прямоугольных координатах в системе координат цифрового кадра необходимо провести оценку зависимости между координатами объектов в двух прямоугольных системах координат (СК): СК кадра  $(x_i, y_i)$  и идеальной СК  $(\xi_i, \eta_i)$ .

Первоначально, из априорных соображений, задается вид этой модели. В простейшем случае, рассматривается линейная модель преобразования [66, 123, 188]:

$$\begin{cases} \xi_i = a_0 + a_1 x_i + a_2 y_i; \\ \eta_i = b_0 + b_1 x_i + b_2 y_i, \end{cases} \quad (1.9)$$

где  $x_i, y_i$  – измеренные координаты опорных звезд в системе координат цифрового кадра.

$a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2$  – линейные постоянные пластинки.

Коэффициенты системы уравнений (1.9)  $a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2$  задают зависимость между идеальной системой координат и системой координат цифрового кадра. Поэтому выражение (1.9) называют уравнением связи. Связь эта проходит через определенные соотношения, постоянные этих соотношений в работе называются постоянными пластинки [89].

Известными величинами в системе уравнений (1.9) являются идеальные  $(\xi_i, \eta_i)$  и прямоугольные  $(x_i, y_i)$  координаты  $i$ -й опорной звезды. При этом, вектор коэффициентов постоянных пластинок:

$$\Phi = \{\Phi_{xi}, \Phi_{yi}\}, \quad (1.10)$$

в котором:

$$\Phi_{xi} = \{a_0, a_1, \dots, a_p\}; \quad (1.11)$$

$$\Phi_{yi} = \{b_0, b_1, \dots, b_p\}, \quad (1.12)$$

где  $p$  - количество используемых коэффициентов.

Однако линейная модель преобразования (1.10) имеет ряд недостатков. Прежде всего она применима только к телескопам с небольшим полем зрения. Кроме того, наличие только линейных членов делают её чувствительной к любым искажениям изображения. Обычно, применение приведенной модели целесообразно только в случае определения координат объекта, находящегося в центре кадра.

Для определения координат на всем кадре иногда используют квадратичную модель [66, 188]:

$$\xi_i = a_0 + a_1 x_i + a_2 y_i + a_3 x_i^2 + a_4 x_i y_i + a_5 y_i^2; \quad (1.13)$$

$$\eta_i = b_0 + b_1 x_i + b_2 y_i + b_3 x_i^2 + b_4 x_i y_i + b_5 y_i^2. \quad (1.14)$$

Чаще всего используют модели и более высоких порядков, например кубическую [66, 188]:

$$\xi_i = a_0 + a_1 x_i + a_2 y_i + a_3 x_i^2 + a_4 x_i y_i + a_5 y_i^2 + a_6 x_i^3 + a_7 x_i^2 y_i + a_8 x_i y_i^2 + a_9 y_i^3; \quad (1.15)$$

$$\eta_i = b_0 + b_1 x_i + b_2 y_i + b_3 x_i^2 + b_4 x_i y_i + b_5 y_i^2 + b_6 x_i^3 + b_7 x_i^2 y_i + b_8 x_i y_i^2 + b_9 y_i^3. \quad (1.16)$$

или модель с полиномом пятой степени [66, 188]:

$$\begin{aligned} \xi_i = & a_0 + a_1 x_i + a_2 y_i + a_3 x_i^2 + a_4 x_i y_i + a_5 y_i^2 + a_6 x_i^3 + a_7 x_i^2 y_i + \\ & + a_8 x_i y_i^2 + a_9 y_i^3 + a_{10} x_i^4 + a_{11} x_i^3 y_i + a_{12} x_i^2 y_i^2 + a_{13} x_i y_i^3 + a_{14} y_i^4 + \\ & + a_{15} x_i^5 + a_{16} x_i^4 y_i + a_{17} x_i^3 y_i^2 + a_{18} x_i^2 y_i^3 + a_{19} x_i y_i^4 + a_{20} y_i^5; \end{aligned} \quad (1.17)$$

$$\begin{aligned} \eta_i = & b_0 + b_1 x_i + b_2 y_i + b_3 x_i^2 + b_4 x_i y_i + b_5 y_i^2 + b_6 x_i^3 + b_7 x_i^2 y_i + \\ & + b_8 x_i y_i^2 + b_9 y_i^3 + b_{10} x_i^4 + b_{11} x_i^3 y_i + b_{12} x_i^2 y_i^2 + b_{13} x_i y_i^3 + b_{14} y_i^4 + \\ & + b_{15} x_i^5 + b_{16} x_i^4 y_i + b_{17} x_i^3 y_i^2 + b_{18} x_i^2 y_i^3 + b_{19} x_i y_i^4 + b_{20} y_i^5. \end{aligned} \quad (1.18)$$

Для определения коэффициентов постоянных пластинок достаточно наличия шести (квадратичная), десяти (кубическая) или двадцати одной (модель с полиномом пятой степени) опорных звезд (количество уравнений определяется количеством неизвестных). Однако наличие ошибок снижает точность полученных коэффициентов. Поэтому для определения коэффициентов постоянных пластинок выбирают большое количество измерений, а в дальнейшем для минимизации ошибок за счет избыточности измерительной информации используют метод наименьших квадратов (МНК) [78, 154, 188].

МНК-оценкой коэффициентов модели постоянных пластинок является вектор [123, 188]:

$$\hat{\phi} = \arg \min_{\theta} (\tilde{Y} - J_1 \phi)^T (\tilde{Y} - J_1 \phi), \quad (1.19)$$

где  $\hat{\phi}$  – оценка вектора коэффициентов постоянной пластинки  $\theta$  (1.10);

$\tilde{Y} = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_{N_{ref}})$ ,  $\tilde{Y} = (\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_{N_{ref}})$  – совокупности соответствующих идеальных координат опорных звезд, рассчитанных по формулам (1.15), (1.16);

$N_{ref}$  – количество опорных звезд;

$J_1$  – матрица Якоби, общая для уравнений (1.15) и (1.16).

В общем случае матрица Якоби имеет вид [188]:

$$J_1 = \begin{bmatrix} \frac{\partial \xi_1}{\partial \hat{\phi}_1} & \dots & \frac{\partial \xi_1}{\partial \hat{\phi}_n} & \dots & \frac{\partial \xi_1}{\partial \hat{\phi}_p} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial \xi_i}{\partial \hat{\phi}_1} & \dots & \frac{\partial \xi_i}{\partial \hat{\phi}_n} & \dots & \frac{\partial \xi_i}{\partial \hat{\phi}_p} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial \xi_{N_{ref}}}{\partial \hat{\phi}_1} & \dots & \frac{\partial \xi_{N_{ref}}}{\partial \hat{\phi}_n} & \dots & \frac{\partial \xi_{N_{ref}}}{\partial \hat{\phi}_p} \end{bmatrix}, \quad (1.20)$$

где  $\hat{\phi}_n$  –  $n$ -й оцениваемый параметр из вектора оцениваемых параметров  $\hat{\phi}$ .

Матрица Якоби (1.20)  $J$  составляется из частных производных оценки идеальных координат (1.15), (1.16) по вектору коэффициентов постоянных пластинок (1.10). При этом  $i$ -й строке матрицы Якоби  $J$  соответствует значение производных по всем оцениваемым параметрам по отклонению в  $i$ -ом измере-

нии, а  $n$ -й столбец матрицы содержит производные по  $n$ -му параметру вектора оцениваемых параметров  $\hat{\phi}$  в каждом измерении. Другими словами,  $in$ -й элемент матрицы Якоби представляет собой производную оценки идеальной координаты в  $i$ -ом измерении по  $n$ -му параметру вектора оцениваемых параметров  $\hat{\phi}$  (1.19).

В свою очередь, матрица Якоби для кубической модели имеет вид [188]:

$$J_1^T = \begin{pmatrix} 1 & \dots & 1 & \dots & 1 \\ x_1 & \dots & x_i & \dots & x_{N_{ref}} \\ y_1 & \dots & y_i & \dots & y_{N_{ref}} \\ x_1^2 & \dots & x_i^2 & \dots & x_{N_{ref}}^2 \\ x_1 y_1 & \dots & x_i y_i & \dots & x_{N_{ref}} y_{N_{ref}} \\ y_1^2 & \dots & y_i^2 & \dots & y_{N_{ref}}^2 \\ x_1^3 & \dots & x_i^3 & \dots & x_{N_{ref}}^3 \\ x_1^2 y_1 & \dots & x_i^2 y_i & \dots & x_{N_{ref}}^2 y_{N_{ref}} \\ x_1 y_1^2 & \dots & x_i y_i^2 & \dots & x_{N_{ref}} y_{N_{ref}}^2 \\ y_1^3 & \dots & y_i^3 & \dots & y_{N_{ref}}^3 \end{pmatrix}. \quad (1.21)$$

В работе МНК оценка при оптимизации параметров нелинейных регрессионных моделей осуществляется при помощи метода Левенберга-Марквардта (Levenberg-Marquardt Algorithm, LMA) [132, 144, 158], для реализации которого используется матрица Якоби (1.21). Данный метод является наиболее распространенным методом оптимизации квадратичных форм, потому что он превосходит по производительности метод наискорейшего спуска и другие методы сопряженных градиентов. Связано это в том числе с тем, что метода Левенберга-Марквардта и был разработан для минимизации квадратичных форм для МНК.

На данный момент вычислительные методы выбора опорных звезд посто-

янно совершенствуются и модернизируются. Однако существующие методы имеют ряд недостатков. В особенности, данные недостатки связаны чрезмерностью вычислительных затрат и ограниченностью сведений о вычислительных методах в специальной литературе, что не позволяет реализовать известные методы в разрабатываемых наблюдательных комплексах. Особенно это касается метода автоматического (не ручного) выбора опорных звезд на цифровых изображениях, соответствующих обзорным наблюдениям, при которых исследуемые объекты могут находиться в любой части кадра (не только центральной) и измерения должны быть равноточными вне зависимости от расположения исследуемого объекта на кадре. Исходя из этого, является целесообразным разработка собственного метода автоматического выбора опорных звезд на цифровых изображениях.

### **1.3.2 Программные комплексы для отождествления и привязки измерений на цифровых изображениях**

**Автоматизированные программные средства обработки цифровых ПЗС-кадров, которые включают в себя программные средства выбора опорных звезд.** На данный момент существует множество программных средств обработки цифровых ПЗС-кадров.

Одним из самых распространенных автоматизированных программных обеспечений (ПО) обработки ПЗС-кадров является ПО *Astrometrica*. *Astrometrica* – программный инструмент для обработки позиционных ПЗС изображений. Данная программа акцентирует внимание на измерении малых тел Солнечной системы (астероидов, комет).

ПО *Astrometrica* имеет много достоинств и преимуществ перед ее аналогами такие как: быстрый выбор профиля конфигурации; калибровка ПЗС-кадров; инструменты настройки и трансформации ПЗС-изображения; поддержка локальных XPM [113, 114, 115], USNO A2.0 [86], USNO B1.0 [101], UCAC3

[206], UCAC4 [208, 209], PPMXL [207], СМС-14 [207]) и онлайн каталогов (USNO B1.0[101], UCAC4 [207, 208], XPM [113, 114, 115], UCAC3[206], СМС-14 [207], PPMXL [207]) каталогов звезд; запись координатной информации в формате WCS в заголовок FITS-кадра; интерактивный режим позиционного ПЗС-измерения объектов; инструмент «лупа»; автоматизированный поиск движущихся объектов; возможность визуальной инспекции автоматически обнаруженных движущихся объектов; выдача астрометрических ПЗС-измерений в формате Minor Planet Center (Центр малых планет, MPC) [137, 169, 172]; отправка измерений в MPC из интерфейса ПО; отображение известных и обнаруженных объектов на кадре; техника сложения кадров Track&Stack; идентификация обнаруженных движущихся объектов с локальной базой MPCORB [167]. На рисунках 1.6, 1.7 представлен интерфейс ПО Astrometrica.

Однако основным и немаловажным недостатком ПО являются очень слабые поисковые возможности в автоматическом режиме.

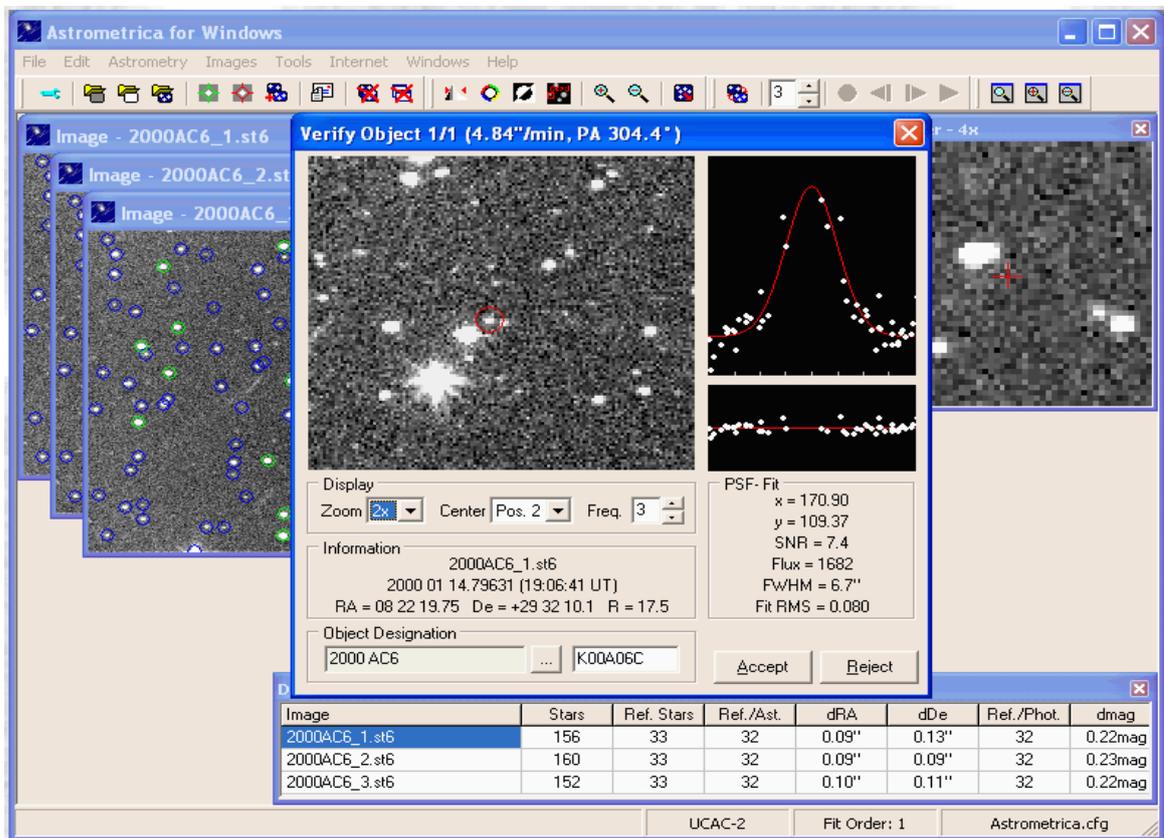


Рисунок 1.6 – Интерфейс сервиса ПО Astrometrica

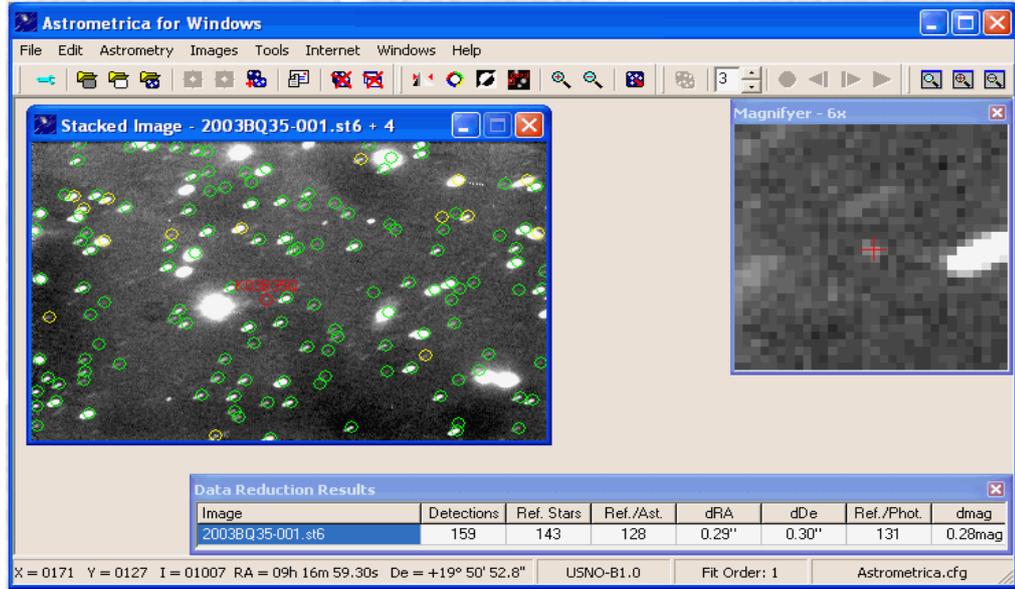
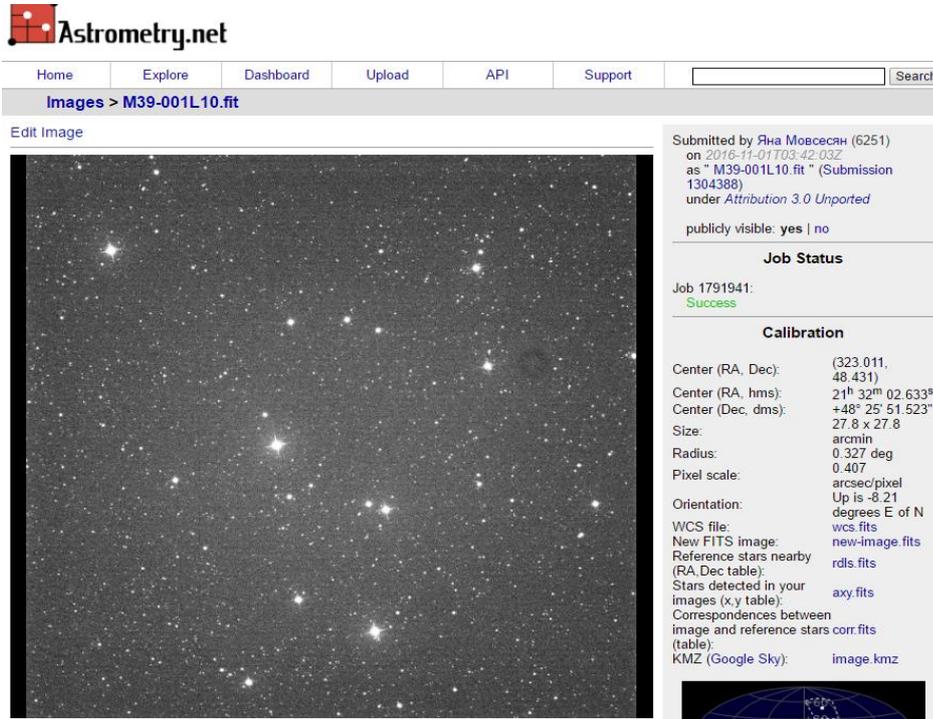


Рисунок 1.7 – Интерфейс ПО Astrometrica

Так же распространенной программой является онлайн сервис Astrometry.net. Astrometry.net – онлайн сервис обработки кадров который занимается отождествлением звёзд на цифровых изображениях. Astrometry.net в качестве опорных каталогов использует онлайн каталоги: USNO-B1, 2MASS (The Two Micron All Sky Survey); SDSS. Так же данный сервис позволяет отождествлять кадры со звёздными каталогами с большими полями зрения. Особенностью сервиса Astrometry.net является то, что в общем случае пользователю не обязательно указывать какую-либо информацию о фокусе оптического инструмента и характеристиках ПЗС-матрицы, при помощи которых получен кадр – даже приблизительный центр поля зрения указывать не нужно. При этом вычислительные затраты отождествления довольно-таки велики [18]. Сервис имеет только онлайн версию, в этом и заключается ее существенный недостаток. Во-первых, так как это онлайн сервис, достаточно часто возникают сбои и технические неполадки при подключении к нему, и Astrometry.net не работает по несколько часов. Так же наличие только онлайн версии ограничивает пользователя в действиях, так как не всегда у наблюдателя есть возможность выхода в сеть. При загрузке исследуемого кадра в течении 1-2 минут сервис выдает стра-

ницу с результирующей информацией об обработанном кадре (рис. 1.8, 1.9).



**Astrometry.net**

Home Explore Dashboard Upload API Support

Images > M39-001L10.fit

Edit Image

Submitted by Яна Мовсесян (6251) on 2016-11-01T03:42:03Z as "M39-001L10.fit" (Submission 1304388) under Attribution 3.0 Unported

publicly visible: [yes](#) | [no](#)

**Job Status**

Job 1791941: **Success**

**Calibration**

Center (RA, Dec):	(323.011, 48.431)
Center (RA, hms):	21 <sup>h</sup> 32 <sup>m</sup> 02.633 <sup>s</sup>
Center (Dec, dms):	+48° 25' 51.523"
Size:	27.8 x 27.8 arcmin
Radius:	0.327 deg
Pixel scale:	0.407 arcsec/pixel
Orientation:	Up is -8.21 degrees E of N
WCS file:	<a href="#">wcs.fits</a>
New FITS image:	<a href="#">new-image.fits</a>
Reference stars nearby (RA, Dec table):	<a href="#">rdls.fits</a>
Stars detected in your images (x,y table):	<a href="#">axy.fits</a>
Correspondences between image and reference stars (table):	<a href="#">corr.fits</a>
KMZ (Google Sky):	<a href="#">image.kmz</a>

Рисунок 1.8 – Интерфейс сервиса Astrometry.net



Submitted by Яна Мовсесян (6251) on 2016-11-01T03:42:03Z as "M39-001L10.fit" (Submission 1304388) under Attribution 3.0 Unported

publicly visible: [yes](#) | [no](#)

**Job Status**

Job 1791941: **Success**

**Calibration**

Center (RA, Dec):	(323.011, 48.431)
Center (RA, hms):	21 <sup>h</sup> 32 <sup>m</sup> 02.633 <sup>s</sup>
Center (Dec, dms):	+48° 25' 51.523"
Size:	27.8 x 27.8 arcmin
Radius:	0.327 deg
Pixel scale:	0.407 arcsec/pixel
Orientation:	Up is -8.21 degrees E of N
WCS file:	<a href="#">wcs.fits</a>
New FITS image:	<a href="#">new-image.fits</a>
Reference stars nearby (RA, Dec table):	<a href="#">rdls.fits</a>
Stars detected in your images (x,y table):	<a href="#">axy.fits</a>
Correspondences between image and reference stars (table):	<a href="#">corr.fits</a>
KMZ (Google Sky):	<a href="#">image.kmz</a>

Рисунок 1.9 – Интерфейс сервиса Astrometry.net

Программа IzmCCD [138] предназначена для высокоточной астрометрической обработки цифровых изображений небесных объектов (рис. 1.10). Программа позволяет получать как измеренные, так и экваториальные координаты малых планет, комет, спутников больших планет, визуально-двойных звезд и других объектов, а также идентифицировать уже известные малые планеты и найти на цифровых изображениях движущиеся объекты.

К недостаткам программы IzmCCD следует отнести: плохой поиск движущихся объектов; ручной ввод обозначений объектов; отсутствие самоупорядочивания строчек астрометрии в отчёте по датам и объектам; отсутствие автоматического обновления баз данных по астероидам и кометам, нет онлайн поддержки каталогов, нет удобного интерфейса с данными по объектам в поле (в том числе при сложении кадров).

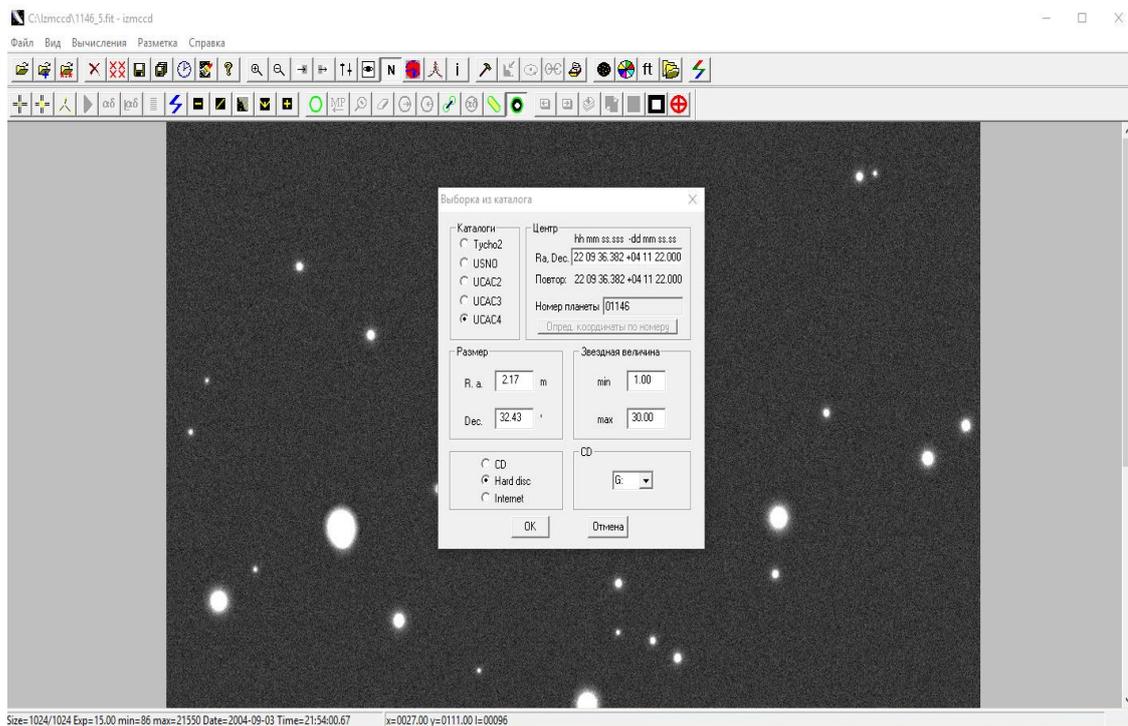


Рисунок 1.10 –Интерфейс программы IzmCCD

PinPoint [92] является инструментом для точного определения положения объектов на цифровом изображении. Однако ПО PinPoint является достаточно дорогостоящей и сложной в использовании программой. Так же закрытый код и

отсутствие описания вычислительных методов выбора опорных звезд приводят к невозможности использования данного ПО.

CoLiTec – программа автоматического поиска астероидов на серии ПЗС-кадров [12, 191, 192]. ПО находится в открытом доступе и позволяет автоматически выделять объекты с ненулевым видимым движением. ПО CoLiTec (рис.1.11) выполняет внутрикадровую и межкадровую обработку кадров. Ядром ПО CoLiTec [67, 68, 69, 73] является обнаружение объектов на основе накопления статистик, пропорциональных энергии изображений, вдоль возможных траекторий движения объекта. CoLiTec имеет блоки обнаружения очень медленных и очень быстрых объектов. Более детально ПО CoLiTec будет описано в подразделе 3.3.

Выше описанные автоматизированные программные средства обработки цифровых ПЗС-кадров имеют высокие результаты и успешно используются во многих обсерваториях мира.

Однако данные ПО содержат ряд недостатков, в связи с которыми, качественный выбор опорных звезд на цифровых изображениях с его использованием при создании отечественных программных средств реализовать невозможно.

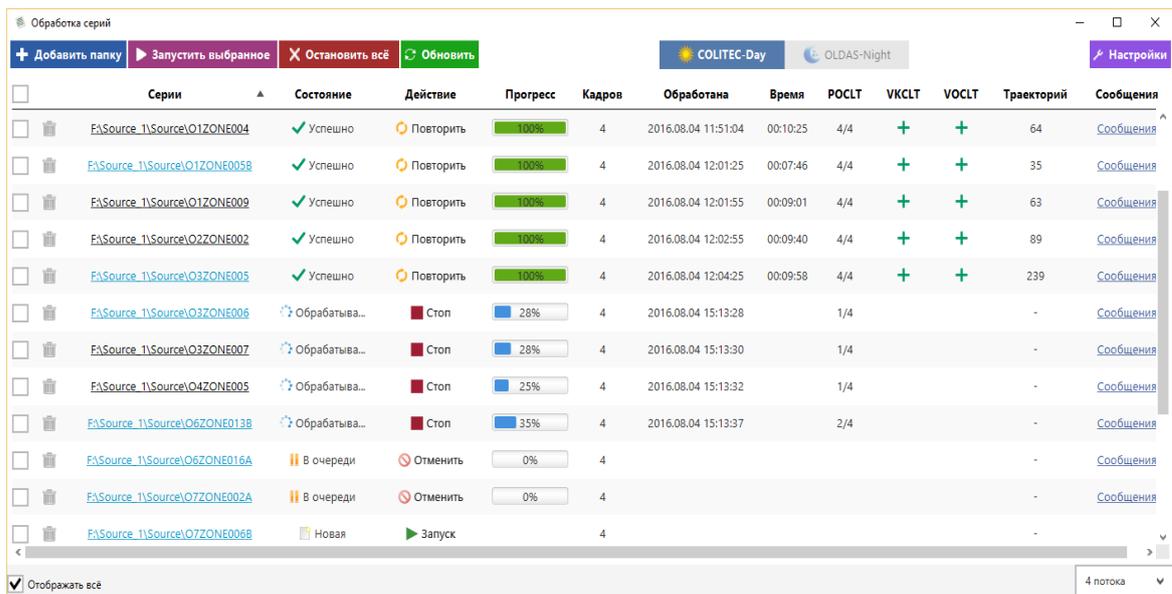


Рисунок 1.11 – Интерфейс программы CoLiTec

## 1.4 Постановка целей и задач исследований

**Общая постановка задачи.** Проведенный в диссертационной работе обзор специальной литературы, посвященной автоматическому выбору опорных звезд на цифровых изображениях, показал, что в настоящее время данная тематика является актуальной, особенно в области астероидных наблюдений. Однако методы ее решения описаны достаточно неполно и не могут быть использованы при разработке соответствующих отечественных специализированных программных средств обработки оптических наблюдений.

Для определения углового положения объектов в пространстве используют абсолютный или относительный метод (подраздел 1.1). Так как абсолютный метод не удовлетворяет предъявляемым требованиям к точности оптических астрономических наблюдений, то в настоящее время обычно используется относительный метод. При относительном методе положение исследуемого объекта измеряется относительно опорных объектов (звезд), положение которых на изображении известно с высокой точностью. Для этого необходимо предварительно отождествить измерения исследуемого кадра со звездами каталога [24, 156, 157].

Точность определения углового положения любого интересующего объекта в пространстве зависит непосредственно от того, насколько точно было определено положение объектов на кадре и какие звезды были выбраны на нем опорными.

На выбор звезд в качестве опорных влияет множество факторов. На цифровом изображении достаточно часто (подраздел 1.2) имеют место ошибки и артефакты, которые могут привести к существенным ошибкам отождествления и ошибочному определению углового положения объектов в целом. К таким ошибкам следует отнести: наличие на цифровом изображении треков от ярких ИСЗ; пересекающихся изображений близких объектов или изображений объектов, не имеющих пика, прежде всего передержанных изображений.

Очень трудно учитывать всю совокупность данных факторов наблюдателя при исследовании каждого кадра, которых за ночь наблюдений может быть даже тысячи. В этой связи актуальной является научно-техническая задача разработки и анализа вычислительных методов автоматического выбора опорных звезд для оценки угловых положений объектов в пространстве по данным изображений. Данные методы должны учитывать основные условия наблюдений исследуемых объектов, особенности формирования их изображений и позволили бы с необходимой точностью определять угловое положение любых объектов в пространстве по данным изображений.

Для выбора опорных звезд используется множество измерений  $\Omega_{nfr}$  (1.1), полученных в результате обработки цифрового кадра и множество объектов звездного каталога  $\Omega_{cat}$  (1.5), соответствующих исследуемому участку звездного неба.

Для формирования множества кандидатов в опорные звезды предварительно отождествляются измерения кадра и звезды каталога. Как было указано ранее (подраздел 1.3), с математической точки зрения отождествление измерений кадра и формуляров каталога сводится к соответствующей задаче о назначениях [91, 96, 102, 103], которая, в свою очередь, решается венгерским методом [94, 95, 97, 100, 150]. Отождествление на каждом этапе производится в системе координат (СК) цифрового кадра. Для этого, с использованием постоянных пластинок, экваториальные координаты звезд пересчитываются в идеальную систему координат, а затем в систему координат СК цифрового кадра [33, 57, 188].

В диссертационной работе в качестве показателей точности определения углового положения объектов в пространстве по данным изображений используются: квантили отклонений оценок экваториальных координат по прямому восхождению  $\alpha_q$  и склонению  $\delta_q$  (используемые в работе уровни квантиля  $q$  составляли 0.9 и 0.99); среднеквадратические отклонения (СКО) оценок экваториальных координат  $\hat{\sigma}_\alpha$  и  $\hat{\sigma}_\delta$  используемых опорных звезд; СКО  $\hat{\sigma}_\alpha$ ,  $\hat{\sigma}_\delta$  и

средние отклонения  $\hat{\Delta}_\alpha$  и  $\hat{\Delta}_\delta$  оценок экваториальных координат остальных звезд, отождествленных с используемым астрометрическим каталогом.

При этом экваториальные координаты углового положения объектов в пространстве по данным координат на кадре определяются с использованием постоянных пластинок, значения которых определяются с помощью метода наименьших квадратов (МНК) (1.20).

Зачастую исследователя на кадре интересует только один объект, который подбором сценария наблюдения стараются разместить в центре кадра. Реже используются обзорные наблюдения, в которых исследуемые объекты могут располагаться в любой части кадра. Точность в обзорных наблюдениях должна быть одинаковой на всем кадре, в любом его фрагменте. Поэтому для обеспечения наилучших показателей точности на всем кадре, необходимо чтобы дисперсия ошибок определения углового положения объектов любого фрагмента кадра существенно не превышала дисперсии ошибок определения углового положения объектов на всем кадре.

Итак, целевой функцией исследуемой научной задачи является суммарная дисперсия  $D = \hat{\sigma}_\alpha^2 + \hat{\sigma}_\delta^2$  ошибок определения экваториальных координат по прямому восхождению  $\alpha$  и склонению  $\delta$  объектов кадра, отождествленных с используемым астрометрическим каталогом [82]. На основании множеств измерений кадра  $\Omega_{nfr}$  (1.1) и звезд каталога  $\Omega_{cat}$  (1.5) необходимо выбрать множество опорных звезд, использование которых обеспечит минимальную суммарную дисперсию  $D$ , при которых остальные показатели точности определения углового положения объектов в пространстве (квантили отклонений оценок экваториальных координат  $\alpha_q$  и  $\delta_q$ ; СКО оценок экваториальных координат  $\hat{\sigma}_\alpha$  и  $\hat{\sigma}_\delta$  используемых опорных звезд; средние отклонения оценок экваториальных координат  $\hat{\Delta}_\alpha$  и  $\hat{\Delta}_\delta$  всех звезд) не превысили бы требуемых значений, а так же при условии того, что суммарная дисперсия ошибок определения угло-

вого положения объектов любого фрагмента кадра существенно не превышает суммарной дисперсии ошибок определения углового положения объектов на всем кадре, при этом экваториальные координаты углового положения объектов в пространстве, определяются с помощью постоянных пластинок  $\hat{\phi}$ , значения которых получаются при использовании метода наименьших квадратов (МНК) (1.19) (подраздел 1.3):

$$D = \hat{\sigma}_\alpha^2 + \hat{\sigma}_\delta^2 \xrightarrow{\Psi} \min; \quad (1.21)$$

при

$$\alpha_q \leq \alpha_{q\_const}, \quad \delta_q \leq \delta_{q\_const}; \quad (1.22)$$

$$\hat{\sigma}_\alpha \leq \hat{\sigma}_{\alpha\_const}, \quad \hat{\sigma}_\delta \leq \hat{\sigma}_{\delta\_const}; \quad (1.23)$$

$$\hat{\Delta}_\alpha \leq \hat{\Delta}_{\alpha\_const}, \quad \hat{\Delta}_\delta \leq \hat{\Delta}_{\delta\_const}; \quad (1.24)$$

$$\hat{\phi} = \arg \min_{\theta} (\tilde{Y} - J_1 \phi)^T (\tilde{Y} - J_1 \phi); \quad (1.25)$$

$$D_{nk} \leq 1.2D, \text{ для } \forall n, k \in N_{fr}, \quad (1.26)$$

где  $nk$ -й фрагмент кадра;

$D_{nk}$  – средняя дисперсия ошибок определения углового положения  $nk$ -го фрагмента кадра;

$D$  – суммарная дисперсия ошибок определения углового положения объектов на всем кадре.

$$\Psi = \{N_{mea}, N_{st}, \Delta N_{mea}, \Delta N_{st}, r_{star\_group}, r_{mea\_group}, M_{reg}, K_{rej}, N_{Apeak}\}. \quad (1.27)$$

–вектор параметров вычислительного метода автоматического выбора опорных звезд на цифровых изображениях.

К параметрам вычислительного метода можно отнести: количество самых ярких измерений кадра и формуляров каталога, которые участвуют при отборе

кандидатов в опорные звезды  $N_{mea}$ ,  $N_{st}$ ; предельно допустимое расстояние между соседними объектами (звездами) группы близких объектов  $r_{star\_group}$ ; количество фрагментов, на которое делится кадр по каждой координате при отборе опорных звезд  $M_{reg}$ ; на каждом следующем шаге количество измерений увеличивается на  $\Delta N_{mea}$  измерений и  $\Delta N_{st}$  звезд; критерием отсутствия пика является отклонение не более чем на  $N_{Apeak}$  значений яркостей пикселей от яркости пикселя пика в области  $C_{peak} \times C_{peak}$  ( $C_{peak}$ ) с центром в пике; предельно допустимое расстояние между соседними объектами (измерениями) группы близких объектов  $r_{mea\_group}$  пикселей; коэффициент правила отбраковки пар «измерение-формуляр» из множества опорных звезд  $K_{rej}$ .

Минимизация целевой функции в исследуемой задаче разработки вычислительного метода автоматического выбора опорных звезд для оценки угловых положений объектов в пространстве по данным изображений производится путем выбора наилучших параметров вычислительного метода автоматического выбора опорных звезд.

**Декомпозиция оптимизационной задачи минимизации суммарной дисперсии ошибок определения углового положения объектов на всем кадре.** Как было отмечено ранее, для автоматического выбора опорных звезд на кадре необходимо предварительно отождествить измерения кадра с используемым каталогом объектов. Чаще всего оптическое средство наведено на исследуемую область пространства в течении сеанса наблюдений достаточно точно, а параметрами отождествления являются только параметры сдвига, одинаковые для всех измерений кадра. Однако в ряде случаев имеет место существенная неопределенность относительно параметров отождествления в качестве параметров отождествления измерений кадра и параметров каталога выступают сдвиг кадра, угол поворота камеры и масштабов пикселя.

Центральной же задачей исследований является частная задача разработ-

ки и анализа вычислительного метода автоматического выбора опорных звезд на цифровых изображениях.

Таким образом, с целью повышения показателей точности оценок углового положения объектов в пространстве по данным изображений за счет разработки и анализа вычислительных методов обработки цифровых изображений, задачу можно декомпозировать на следующие частные задачи.

1. Разработка вычислительного метода частного предварительного отождествления измерений цифровых кадров.

2. Разработка вычислительного метода полного отождествления измерений цифровых кадров с существенной неопределенностью параметров отождествления.

3. Разработка вычислительного метода автоматического выбора опорных звезд на цифровых изображениях.

4. Разработка вычислительного метода исследования показателей точности измерения углового положения опорных звезд в пространстве.

## **Выводы по разделу 1**

Обработка цифровых изображений – интенсивно развивающаяся отрасль, которая находит с каждым годом все новое и новое применение. Одним из таких применений является определение локационных данных по изображению, то есть определение данных о положении и движении объектов на изображениях и в пространстве по данным изображений.

1. Для определения углового положения объектов в пространстве используется абсолютный или относительный метод. Абсолютный метод привязан к механике наблюдательного инструмента. Однако потенциальная точность оптических наблюдений настолько высока, что ошибки механического управления делают недостижимой указанную потенциальную точность. При относительном методе положение исследуемого объекта в фокальной плоскости изме-

ряется относительно объектов, положение которых на изображении известно с высокой точностью. Данные объекты в работе названы опорными. Для реализации относительного метода необходимо отождествить объекты на кадре и выбрать из отождествленных объектов опорные.

2. Выбор опорных звезд при реализации относительного метода совместно с определением положения объектов на цифровых изображениях определяют потенциальную точность наблюдений. При этом методы определения положения объектов на цифровых изображениях описаны достаточно подробно [191, 192]. Так же имеет место значительное количество статей, посвященных отождествлению кадров [151, 152, 191, 192]. В свою очередь, методы автоматического выбора опорных звезд на цифровых изображениях в специальной литературе отражены весьма неполно.

3. Существуют автоматизированные программные средства обработки цифровых кадров, которые включают в себя методы выбора опорных звезд. У данных программ есть свой ряд преимуществ, однако методы, которые реализуют выбор опорных звезд на цифровых кадрах, публичности не представлены. Так же существенным недостатком данных программных средств является отсутствие возможности в проведении анализа вычислительных методов автоматического выбора опорных звезд для оценки угловых положений объектов в пространстве по данным изображений.

4. Для высокоточного определения углового положения объектов в пространстве по данным изображений сформулирована постановка исследований как решение научно-технической задачи разработки и анализа вычислительных методов автоматического выбора опорных звезд для оценки угловых положений объектов в пространстве.

Материалы раздела опубликованы в работах [7, 24, 27, 28, 30, 31, 35, 58, 59, 191, 192].

## РАЗДЕЛ 2

### РАЗРАБОТКА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МЕТОДОВ ОТОЖДЕСТВЛЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

#### 2.1 Аналитические выражения отклонений между оценками положений небесных объектов в задаче отождествления ПЗС-кадра.

Исходя из ряда технических соображений целесообразно в качестве критерия отождествления использовать указанные отклонения в экваториальной системе координат [121, 130, 152]. Иными словами, часто при анализе взаимных отклонений различных оценок положения небесных объектов полное отклонение раскладывают на две составляющие. Первая из них, – отклонение  $\Delta\delta$  по склонению – представляет собой отклонение между оценками положения небесного объекта внутри меридиана одной из оценок. Естественно считать, что указанная выше оценка, соответствующая меридиану, признается за эталон. Так, например, если сравниваются оценки кадра (измерения) и каталога, то за эталон принимаются измерения каталога. Таким образом, отклонение по склонению представляет собой отклонение между оценками положения в плоскости меридиана, соответствующего оценке, выбранной в качестве эталона (в плоскости меридиана эталона). Второе отклонение – отклонение  $\Delta\alpha_j$  по прямому восхождению – является отклонением между различными оценками положений небесного объекта вне плоскости меридиана эталона.

Отклонения между различными оценками экваториальных координат (прямого восхождения и склонения) одних и тех же небесных объектов не могут быть представлены простой их разницей. В частном случае данное утверждение касается отклонений между измерениями и каталожными значениями положения небесных объектов.

В литературе [140] достаточно часто отклонение  $\Delta\delta$  по склонению представляется простой разницей оценок [4]. В свою очередь отклонение по прямо-

му восхождению представляется формулой:

$$\Delta\alpha = (\alpha_s - \alpha_g) \cdot \cos\delta_s. \quad (2.1)$$

Выражение (2.1) имеет ясный физический смысл. На экваторе отклонение  $\Delta\alpha$  по прямому восхождению равно арифметической разности значений различных оценок прямого восхождения небесного объекта. На полюсе все возможные значения прямого восхождения от 0 до 360 градусов соответствуют одной и той же точке – полюсу небесной сферы. В соответствии с этим, отклонение по прямому восхождению для полюса ( $\delta = 90^\circ$ ) будет признано равным нулю при любых значениях оценок прямых восхождений  $\alpha_s$  и  $\alpha_g$ .

В данном подразделе предложено уточнение выражений для аналитического расчета отклонений различных оценок положения звездного объекта в экваториальной системе координат, минимум суммы которых является критерием совершенного паросочетания в задаче отождествления астрономического ПЗС-кадра со звездным каталогом. Уточнение представленных в работе формул для отклонений различных оценок экваториальных координат небесных объектов позволяют повысить точность наблюдений в современной наблюдательной астрономии [54].

В работе [121, 152] показано, что задача отождествления астрономического ПЗС-кадра [130, 140] со звездным каталогом сводится к нахождению совершенного паросочетания в соответствии с некоторым метакритерием. Данный метакритерий может быть сведен к сочетанию отклонений между оценками положений небесных объектов внутри указанных пар. Последние отклонения и являются критерием отождествления кадра по звездному узору [33, 39].

**Полное отклонение между различными оценками экваториальных координат небесного объекта** является центральным углом (угол с вершиной в центре небесной сферы) между двумя положениями объекта на небесной сфе-

ре, соответствующими различным оценкам [140, 179].

Определяется полное отклонение следующим образом. Оценка положения  $j$ -го объекта, согласно данным каталога, задается экваториальными координатами  $\alpha_{catj}$ ,  $\delta_{catj}$ .

Декартовы координаты  $x_{catj}$ ,  $y_{catj}$ ,  $z_{catj}$  точки (начало системы координат находится в центре небесной сферы) с экваториальными координатами  $\alpha_{catj}$ ,  $\delta_{catj}$  на сфере единичного радиуса определяются выражением [9, 17]:

$$\chi_{catj} = \begin{pmatrix} x_{catj} \\ y_{catj} \\ z_{catj} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin \alpha_{catj} \cos \delta_{catj} \\ \cos \alpha_{catj} \cos \delta_{catj} \\ \sin \delta_{catj} \end{pmatrix}. \quad (2.2)$$

Центральный угол между двумя оценками положения объекта  $\chi_{j1}$  и  $\chi_{j2}$  определяется выражением [7, 15]:

$$\cos(\chi_{j1}, \chi_{j2}) = \frac{x_{catj1} \cdot x_{catj2} + y_{catj1} \cdot y_{catj2} + z_{catj1} z_{catj2}}{\sqrt{x_{catj1}^2 + y_{catj1}^2 + z_{catj1}^2} \sqrt{x_{catj2}^2 + y_{catj2}^2 + z_{catj2}^2}}. \quad (2.3)$$

Так как исследуемые точки лежат на сфере единичного радиуса, то знаменатель выражения (2.3) равен 1 по определению. Тем самым, значение искомого полного отклонения, значение искомого центрального угла между двумя оценками положения объекта на небесной сфере, определяется выражением:

$$\Delta_{12j} = \arccos(x_{catj1} \cdot x_{catj2} + y_{catj1} \cdot y_{catj2} + z_{catj1} \cdot z_{catj2}). \quad (2.4)$$

Для удобства изложения и восприятия материала далее в обозначении отклонений  $\Delta\alpha_j$  и  $\Delta\delta_j$  индекс  $j$  опускается.

Для вывода выражений для введенных указанным выше образом откло-

нений понадобится уравнение плоскости меридиана и прямоугольные координаты точек  $S$ ,  $W$ ,  $G$  (рис. 2.2). Считается, что точка  $S$  (рис. 2.1) характеризует измерение (например, оценку положения объекта по результатам обработки кадра), а точка  $G$  – характеризует эталон (например, каталожную оценку положения этого же объекта). В дальнейшем для упрощения изложения материала точка  $S$  будет называться измерением, а точка  $G$  – эталоном.

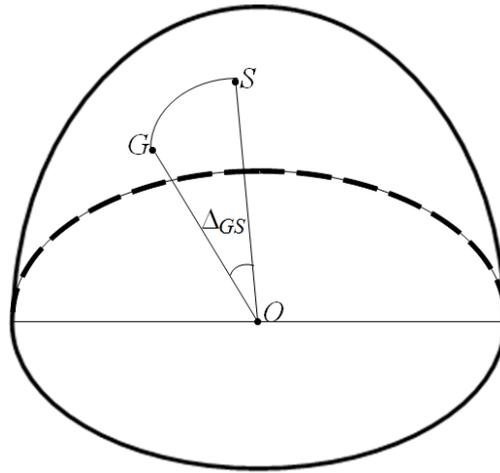


Рисунок 2.1 – Изображение измеренной  $S$  и эталонной  $G$  оценок положения объекта на сфере

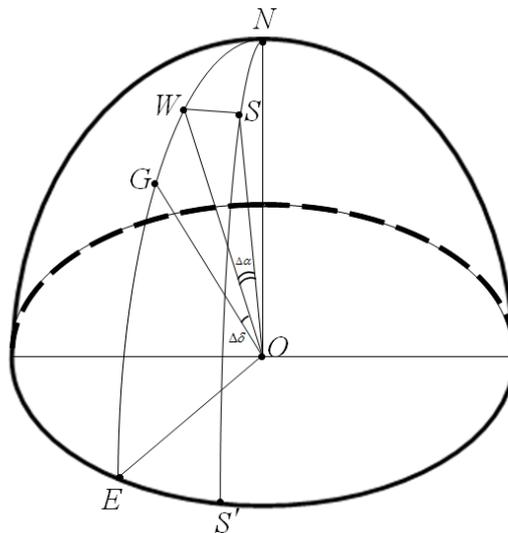


Рисунок 2.2 – Изображение измеренной  $S$ , а также ее проекции  $W$ , и эталонной  $G$  оценок положения объекта на сфере

Плоскость меридиана эталона проходит через 3 точки с известными координатами: полюс сферы N с координатами (0,0,1), центр сферы O с координатами (0,0,0) и точку E на экваторе сферы с координатами  $(\sin\alpha_g; \cos\alpha_g; 0)$ . При этом уравнение данной плоскости можно представить следующим образом [9, 17]:

$$\begin{vmatrix} x - x_0 & x_N - x_0 & x_E - x_0 \\ y - y_0 & y_N - y_0 & y_E - y_0 \\ z - z_0 & z_N - z_0 & z_E - z_0 \end{vmatrix} = 0. \quad (2.5)$$

После подстановки в выражение (2.5) выражений для координат точек полюса сферы N, центра сферы O, узла меридиана E:

$$\begin{vmatrix} x & 0 & \sin\alpha_g \\ y & 0 & \cos\alpha_g \\ z - 1 & -1 & -1 \end{vmatrix} = 0. \quad (2.6)$$

После раскрытия определителя (2.6) уравнение плоскости меридиана эталона можно записать в виде:

$$x \cos\alpha_g - y \sin\alpha_g = 0. \quad (2.7)$$

Иными словами, уравнение плоскости меридиана эталона (плоскости меридиана, проходящей через точку G, соответствующую эталонному/каталожному положению небесного объекта [9, 17]) имеет вид:

$$Ax + By + Cz + D = 0, \quad (2.8)$$

где

$$A = \cos \alpha_g; B = -\sin \alpha_g; C = 0; D = 0. \quad (2.9)$$

Относительно выражений для прямоугольных координат измерения S и эталона G (рис. 2.1). Согласно выражению (2.2) имеют место тождества:

$$x_s = \sin \alpha_s \cos \delta_s; y_s = \cos \alpha_s \cos \delta_s; z_s = \sin \delta_s; \quad (2.10)$$

$$x_g = \sin \alpha_g \cos \delta_g; y_g = \cos \alpha_g \cos \delta_g; z_g = \sin \delta_g. \quad (2.11)$$

Целесообразно ввести проекцию измерения S на плоскость ранее введенного меридиана. Данная точка на рисунке 2.2 обозначена буквой W.

Для нахождения координат точки W можно использовать параметрическое уравнение прямой, перпендикулярной плоскости рассматриваемого меридиана [9, 17]:

$$\frac{x - x_0}{A} = \frac{y - y_0}{B} = \frac{z - z_0}{C} = t. \quad (2.12)$$

Исходя из (2.12) значения координат точки W определяются выражениями:

$$x_w = At + x_s, y_w = Bt + y_s, z_w = z_s. \quad (2.13)$$

В результате подстановки выражения (2.13) для координат точки W в уравнение плоскости (2.8) можно записать выражение для формальной переменной  $t$ :

$$t = -\frac{Ax_s + By_s}{A^2 + B^2}. \quad (2.14)$$

Выражение (2.14) с учетом последнего выражения можно переписать в

следующем виде:

$$x_w = -A\left(\frac{Ax_s + By_s}{A^2 + B^2}\right) + x_s; \quad y_w = -B\left(\frac{Ax_s + By_s}{A^2 + B^2}\right) + y_s; \quad z_w = z_s. \quad (2.15)$$

Согласно (2.10), (2.11), (2.9), помня, что так как  $A = \cos\alpha_g$ , то  $(1 - A)^2 = \sin^2\alpha_g$ , можно записать выражение для координаты  $x_w$ :

$$\begin{aligned} x_w &= \sin^2\alpha_g \cdot \sin\alpha_s \cdot \cos\delta_s + \cos\alpha_g \cdot \sin\alpha_g \cdot \cos\alpha_s \cos\delta_s = \\ &= \sin\alpha_g \cdot \cos\delta_s (\sin\alpha_g \sin\alpha_s + \cos\alpha_g \cdot \cos\alpha_s). \end{aligned}$$

Используя формулу косинуса разности углов [9, 17] последнее выражение переписется в виде:

$$x_w = \sin\alpha_g \cdot \cos\delta_s \cdot \cos(\alpha_s - \alpha_g). \quad (2.16)$$

Аналогично, согласно (2.10), (2.11), (2.9), помня, что  $(1 - B^2) = \cos^2\alpha_g$  можно записать выражение для координаты  $y_w$ :

$$\begin{aligned} y_w &= \sin\alpha_g \cdot \cos\alpha_g \cdot \sin\alpha_s \cdot \cos\delta_s + \cos^2\alpha_g \cdot \cos\alpha_s \cos\delta_s = \\ &= \cos\alpha_g \cdot \cos\delta_s (\sin\alpha_g \sin\alpha_s + \cos\alpha_g \cdot \cos\alpha_s). \end{aligned}$$

Используя формулу косинуса разности углов [9, 17]:

$$y_w = \cos\alpha_g \cdot \cos\delta_s \cdot \cos(\alpha_s - \alpha_g). \quad (2.17)$$

Не трудно показать, что с учетом (2.2) согласно (2.15):

$$z_w = \sin \delta_s. \quad (2.18)$$

Отклонение  $\Delta\alpha$  по прямому восхождению с точки зрения геометрии, является центральным углом между точкой S, расположенной на сфере единичного радиуса и плоскостью NOE меридиана эталона, который соответствует точке G (рис. 2.2). Аналитическое выражение для нахождения значения отклонения  $\Delta\alpha$  по прямому восхождению можно найти следующим образом.

Угол между вектором точки G с координатами  $(x_g, y_g, z_g)$  и плоскостью меридиана эталона с параметрами A, B определяется выражением [9, 17]:

$$\sin \Delta\alpha = \frac{Ax + By + Cz}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \times \sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}. \quad (2.19)$$

Знаменатель в выражении (2.19) равен 1, так как вектор  $\overline{OS}$  и все 3 точки, используемые для построения плоскости меридиана, расположены на сфере единичного радиуса.

Исходя из выражений для параметров прямой (2.8) и координат вектора  $\overline{OS}$  (2.10) значение искомого отклонения  $\Delta\alpha$  по прямому восхождению (значение угла между плоскостью меридиана эталона (2.8) и вектором  $\overline{OS}$ ) может быть представлено выражением:

$$\Delta\alpha = \arcsin((\cos\alpha_g \cdot \sin\alpha_s - \sin\alpha_g \cdot \cos\alpha_s) \cdot \cos\delta_s).$$

Используя тождество [7, 15]:

$$\sin(\alpha - \delta) = \cos \delta \cdot \sin \alpha - \sin \delta \cdot \cos \alpha.$$

Последнее выражение можно переписать в виде:

$$\Delta\alpha = \arcsin(\sin(\alpha_s - \alpha_g) \cdot \cos \delta_s). \quad (2.20)$$

Выбор способа нахождения угла через значение его синуса связан с тем, что функция синуса однозначно определена в первом и четвертом квадрантах, в отличие от косинуса.

При проведении астрономических наблюдений исследуемые отклонения не превышают единицу угловых секунд. Известно, что значение синуса малых углов равно значению (в радианах) этих углов. Исходя из этого, в частном случае малых значений отклонений выражение (2.20) для отклонения  $\Delta\alpha$  по прямому восхождению можно переписать в виде (2.1).

Иногда кроме значения синуса искомого угла целесообразно дополнительно иметь значение косинуса данного угла. Для нахождения косинуса  $\cos(\Delta\alpha)$  отклонения по прямому восхождению необходимо найти угол между векторами  $\overline{OS}$  и  $\overline{OW}$ , где точка  $W$  является проекцией измерения (точки  $S$ ) на плоскость меридиана эталона (рис. 2.1). Для этого можно воспользоваться выражением (2.4):

$$\Delta\alpha = \arccos(x_s x_w + y_s y_w + z_s z_w). \quad (2.21)$$

С учетом выражений (2.10) и (2.11) для координат измерения (точка  $S$ ) и его проекции на меридиан эталона (точка  $W$ ) не трудно доказать тождество:

$$\begin{aligned} x_s x_w + y_s y_w + z_s z_w &= \sin \alpha_s \cdot \cos^2 \delta_s \cdot \sin \alpha_g \cdot \cos(\alpha_g - \alpha_s) + \\ &+ \cos \alpha_s \cdot \cos^2 \delta_s \cos \alpha_g \cdot \cos(\alpha_g - \alpha_s) + \sin^2 \delta_s = \\ &= \cos^2 \delta_s \cdot \cos(\alpha_g - \alpha_s) \cdot (\sin \alpha_s \cdot \sin \alpha_g + \cos \alpha_s \cdot \cos \alpha_g) + \sin^2 \delta_s = \\ &= \sin^2 \delta_s + \cos^2 \delta_s \cdot \cos^2(\alpha_g - \alpha_s) = \sin^2 \delta_s \sin^2(\alpha_g - \alpha_s) + \cos^2(\alpha_g - \alpha_s). \end{aligned}$$

Таким образом, выражение для отклонения  $\Delta\alpha$  по прямому восхождению может быть представлено как через функцию арксинуса (2.1) так и через функцию арккосинуса:

$$\Delta\alpha = \arccos(\sin^2 \delta_s + \cos^2 \delta_s \cos^2(\alpha_g - \alpha_s)). \quad (2.22)$$

Как было указано выше, отклонение  $\Delta\alpha$  по склонению представляет собой отклонение между оценками положения небесного объекта внутри меридиана одной из оценок. Для его нахождения необходимо определить координаты точки W, которая является проекцией точки S на плоскость меридиана.

Иными словами, отклонение  $\Delta\delta$  по склонению, с точки зрения геометрии сферы, представляет собой угол между векторами  $\overline{OG}$  и  $\overline{OW}$  (рис. 2.1), то есть центральный угол между направлениями на эталон и проекцию измерения на плоскость меридиана эталона. Аналитическое выражение для нахождения значения отклонения  $\Delta\delta$  по склонению можно найти следующим образом.

Значение угла между двумя рассмотренными векторами  $\overline{OG}$  и  $\overline{OW}$  определяется выражением (2.4):

$$\Delta\delta = \arccos(x_g x_w + y_g y_w + z_g z_w). \quad (2.23)$$

С учетом выражений (2.10) и (2.11) для нахождения координат измерения (точка S) и его проекции на меридиан эталона (точка W) не трудно доказать тождество:

$$\begin{aligned} x_g x_w + y_g y_w + z_g z_w &= \sin^2 \alpha_g \cdot \cos \delta_g \cdot \cos \delta_s \cdot \cos(\alpha_g - \alpha_s) + \\ &+ \cos^2 \alpha_g \cdot \cos \delta_g \cos \delta_s \cdot \cos(\alpha_g - \alpha_s) + \sin \delta_g \sin \delta_s = \\ &= \cos \delta_g \cdot \cos \delta_s \cdot \cos(\alpha_g - \alpha_s) \cdot (\sin^2 \alpha_g + \cos^2 \alpha_g) + \sin \delta_g \sin \delta_s = \\ &= \sin \delta_s \sin \delta_g + \cos \delta_s \cos \delta_g \cos(\alpha_g - \alpha_s). \end{aligned}$$

Таким образом, выражение для отклонения  $\Delta\delta$  по склонению может быть представлено также через функцию арккосинуса:

$$\Delta\delta = \arccos(\sin\delta_s \sin\delta_g + \cos\delta_s \cos\delta_g \cos(\alpha_g - \alpha_s)). \quad (2.24)$$

Как и для случая отклонения по прямому восхождению, кроме выражения для косинуса отклонения по склонению, целесообразно найти выражение для синуса данного отклонения. Значение синуса отклонения по склонению  $\Delta\delta$  между двумя заданными векторами  $\overline{OG}$  и  $\overline{OW}$  определяется как отношение модуля векторного произведения этих векторов к произведению их модулей [9, 17]:

$$\sin\Delta\delta = \frac{|\overline{OG}, \overline{OW}|}{|\overline{OG}| \times |\overline{OW}|}. \quad (2.25)$$

Модули исходных векторов  $\overline{OG}$  и  $\overline{OW}$  равны 1, так как они лежат на сфере единичного радиуса. Таким образом, значение синуса отклонения по склонению  $\Delta\delta$  может быть представлено выражением:

$$\sin\Delta\delta = |\overline{OG}, \overline{OW}|. \quad (2.26)$$

Координаты векторного произведения векторов  $\overline{OG}$  и  $\overline{OW}$  можно записать в виде [9, 17]:

$$\begin{pmatrix} x_{gw} \\ y_{gw} \\ z_{gw} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_g z_w - y_w z_g \\ x_w z_g - x_g z_w \\ x_g y_w - x_w y_g \end{pmatrix}. \quad (2.27)$$

С учетом выражений (2.11), (2.16), (2.17), (2.18), для координат эталона (точка G) и проекции измерения на плоскость меридиана эталона (точка W) координаты рассматриваемого векторного произведения примут вид:

$$\begin{aligned}x_{GW} &= \cos\alpha_g \cdot \cos\delta_g \cdot \sin\delta_s - \cos\alpha_g \cdot \cos\delta_s \cdot \cos(\alpha_g - \alpha_s) \cdot \sin\delta_g; \\y_{GW} &= \sin\alpha_g \cdot \cos\delta_s \cdot \cos(\alpha_g - \alpha_s) \cdot \sin\delta_g - \sin\alpha_g \cdot \cos\delta_g \cdot \sin\delta_s; \\z_{GW} &= 0.\end{aligned}$$

Выражение для квадрата модуля искомого векторного произведения векторов  $\overline{OG}$  и  $\overline{OW}$  имеет вид [9, 17]:

$$\begin{aligned}& \left[ \overline{OG}, \overline{OW} \right]^2 = x_{gw}^2 + y_{gw}^2 + z_{gw}^2 = \\& = \cos^2\alpha_g \cdot \cos^2\delta_g \cdot \sin^2\delta_s + \cos^2\alpha_g \cdot \cos^2\delta_s \cdot \cos^2(\alpha_g - \alpha_s) \cdot \sin^2\delta_g - \\& \quad - 2\cos^2\alpha_g \cdot \cos\delta_g \cdot \sin\delta_s \cdot \cos\delta_s \cdot \cos(\alpha_g - \alpha_s) \cdot \sin\delta_g + \\& + \sin^2\alpha_g \cdot \cos^2\delta_s \cdot \cos^2(\alpha_g - \alpha_s) \cdot \sin^2\delta_g + \sin^2\alpha_g \cdot \cos^2\delta_g \cdot \sin^2\delta_s - \\& \quad - 2\sin^2\alpha_g \cdot \cos\delta_s \cdot \cos(\alpha_g - \alpha_s) \cdot \sin\delta_g \cdot \cos\delta_g \cdot \sin\delta_s.\end{aligned}\tag{2.28}$$

Первое и пятое слагаемые последнего выражения имеют общие множители  $\cos^2\delta_g \cdot \sin^2\delta_s$ . Их индивидуальными множителями являются  $\cos^2\alpha_g$  и  $\sin^2\alpha_g$ . Следовательно, сумма данных слагаемых представляется выражением  $\cos^2\delta_g \cdot \sin^2\delta_s$ . По аналогичной причине сумма второго и четвертого слагаемых последнего выражения может быть представлена выражением  $\cos^2\delta_s \cdot \cos^2(\alpha_g - \alpha_s) \cdot \sin^2\delta_g$ . В свою очередь сумма третьего и шестого слагаемых (последнего выражения 2.28) определяется выражением  $\cos\delta_g \cdot \sin\delta_s \cdot \cos\delta_s \cdot \cos(\alpha_g - \alpha_s) \cdot \sin\delta_g$ . Таким образом, выражение (2.28) при-

мет вид:

$$\begin{aligned}
 & \left| [\overline{OG}, \overline{OW}] \right|^2 = \\
 & \sin^2 \delta_s \cos^2 \delta_g + \cos^2 \delta_s \sin^2 \delta_g \cos^2 (\alpha_g - \alpha_s) - \\
 & - 2 \sin \delta_s \cdot \cos \delta_g \cdot \cos \delta_s \cdot \sin \delta_g \cdot \cos (\alpha_g - \alpha_s) = \\
 & = (\sin \delta_s \cos \delta_g - \cos \delta_s \sin \delta_g \cos (\alpha_g - \alpha_s))^2. \quad (2.29)
 \end{aligned}$$

Таким образом, согласно (2.26), (2.29) отклонение по склонению  $\Delta\delta$  может быть представлено выражением:

$$\Delta\delta = \pm \arcsin(\sin \delta_s \cos \delta_g - \cos \delta_s \sin \delta_g \cos (\alpha_g - \alpha_s)). \quad (2.30)$$

Выражения (2.24), (2.30) представляют значения синуса и косинуса отклонения по склонению. Иногда, для однозначности расчета значений угла на интервале от 0 до  $2\pi$ , необходимо использовать оба эти значения. Почти всегда в практике современных астрономических наблюдений отклонение не превышает нескольких угловых секунд. В этих условиях для определения отклонения по склонению необходимо использовать выражение (2.30). Связано это с тем, что функция синуса однозначно определена в первой и четвертой четвертях.

Относительно анализа физического смысла выражений для отклонения по склонению  $\Delta\delta$  (2.24), (2.30). Выражение под арксинусом в (2.30) без множителя второго слагаемого  $\cos(\alpha_g - \alpha_s)$  представляет собой выражение для синуса разности  $\Delta\delta = \delta_s - \delta_g$ . Согласно современной практике астрономических наблюдений отклонение  $\Delta\alpha = \alpha_g - \alpha_s$  по прямому восхождению мало (не превышает единицу угловых секунд). Следовательно, чаще всего (рис. 2.2)

$\cos(\alpha_g - \alpha_s) \cong 1$ . Следовательно, чаще всего выражение (2.30) является тождеством  $\Delta\delta = \arcsin(\sin(\Delta\delta))$ . Иными словами, при малых значениях (что соответствует практике современных астрономических наблюдений) отклонения по прямому восхождению  $\Delta\alpha = \alpha_g - \alpha_s$ , отклонение по склонению  $\Delta\delta$  может быть определено путем простого алгебраического вычитания значений склонения, содержащихся в измерении и каталоге (или в разных каталогах):

$$\Delta\delta = \delta_s - \delta_g. \quad (2.31)$$

Для анализа (2.24), (2.30) интересен другой крайний случай. Случай, когда значение  $\Delta\alpha = \alpha_g - \alpha_s$  составляет примерно 180 градусов. Такой случай может иметь место при наблюдении полярной области (рис. 2.3, 2.4), когда «измерение» и «эталон» находятся «с разных сторон полюса».

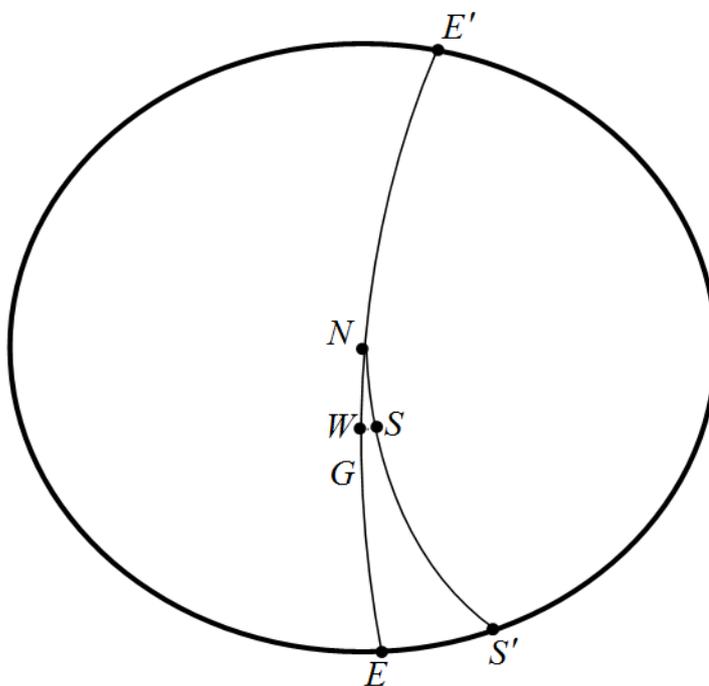


Рисунок 2.3 – Два объекта в полярной области сферы

С формальной точки зрения,  $\cos(\alpha_g - \alpha_s)$  принимает значение -1. При

этом, выражение под арксинусом в (2.30) без множителя второго слагаемого  $\cos(\alpha_g - \alpha_s)$  представляет собой выражение для синуса суммы  $\delta_s + \delta_g$ . Для анализа, с учетом рассмотрения приполярной области, обе оценки склонения удобно представить следующим образом  $\delta_s = \pi/2 - \varepsilon_s$ ,  $\delta_g = \pi/2 - \varepsilon_g$ . Используя формулы приведения [9, 17], не трудно доказать тождество  $\sin(\delta_s + \delta_g) = \sin(\pi/2 - \varepsilon_s + \pi/2 - \varepsilon_g) = \sin(\pi - (\varepsilon_s + \varepsilon_g)) = \sin(\varepsilon_s + \varepsilon_g)$ . Следовательно, согласно (2.30) выражение для отклонения по склонению в данном частном случае примет вид:

$$\Delta\delta = \varepsilon_s + \varepsilon_g. \quad (2.32)$$

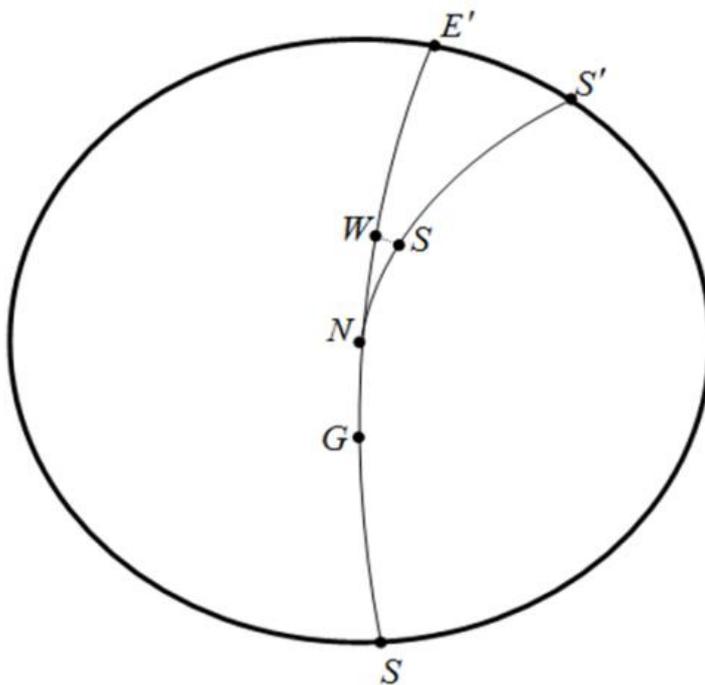


Рисунок 2.4 – Два объекта в полярной области сферы

Иными словами, в данном частном случае расположения «измерения» и «эталона» с разных сторон полюса» отклонение по склонению равно сумме дополнений значений оценок склонений объекта до  $\pi/2$ .

Например, две оценки склонения одной звезды (одного небесного объек-

та) одинаковы и составляют 89 градусов, а соответствующие им оценки прямого восхождения равны соответственно 30 и 210 градусов. Прямой расчет арифметической разности даст нулевое значение отклонения по склонению (согласно выражению (2.31)) и отклонение в 180 градусов по прямому восхождению. Анализ рисунка 3 свидетельствует в пользу ложности данных вычислений. Обе рассматриваемые оценки находятся на одном меридиане (на одной дуге большого круга, проходящей через полюс сферы). Следовательно, отклонение по прямому восхождению должно быть равно 0, а отклонение по склонению – 2 градуса ( $2=(90-89)+(90-89)$ ). В отличие от прямого расчета разности формула (2.32) явно указывает на правильный ответ в 2 градуса. Естественно, такой же ответ будет дан при использовании вместо нее более общей формулы (2.30).

## **2.2 Разработка метода частного предварительного отождествления измерений цифровых кадров одной серии**

Отождествление изображений серии между собой и эталонными изображениями продолжает оставаться сложной задачей, которой посвящено большое количество работ [24, 130, 131, 151, 152], которые, в том числе учитывают специфику предметной области решаемой задачи. Одной из таких быстро развивающихся предметных областей является разработка вычислительных методов автоматической обработки серий астрономических изображений.

Предполагается, что может быть введена вероятность формирования измерения при попадании небесного объекта в кадр телескопа. При этом априорные вероятности формирования измерений  $i$ -го объекта определяются только частотой просмотра соответствующего участка неба. В результате можно и удобно считать равновероятными априорные вероятности получения измерений от любых объектов звездного каталога, блеск которых не ниже проникающей телескопа.

При наличии информации только о небесных объектах из звездного ката-

лога нет необходимости предъявлять какие-то требования к вероятности перепутывания измерений между некаталогизированными объектами, информация о которых не содержится в звездном каталоге. Все некаталогизированные объекты можно свести в так называемый нулевой объект. С другой стороны, перепутывание измерений между небесными объектами из звездного каталога приводит к потере точности определения положения исследуемых объектов, например, астероидов. Предполагается, что все небесные объекты звездного каталога одинаково важны, а требования по вероятности перепутывания измерений между любыми двумя небесными объектами звездного каталога должны быть одинаковыми.

Необходимо найти начальное приближение параметров попарного соответствия (паросочетания) между двумя множествами измерений, сформированных на двух кадрах и соответствующих одной и той же области небесной сферы. Одним из значимых для практики случаев отождествления является случай взаимного отождествления кадров серии, сформированных примерно в одно и то же время на одном телескопе одной ПЗС – камерой без изменения угла ее поворота. Положение небесных объектов на кадрах, сформированных таким образом, как правило, отличается только параметрами сдвига (параметры поворота околонулевые, а масштаб является неизменным от кадра к кадру). Параметры сдвига общие для всех измерений двух кадров и характеризуют взаимное расположение кадров относительно друг друга на небесной сфере, являясь искомыми параметрами паросочетания между двумя множествами измерений.

**Суть метода частного предварительного отождествления измерений цифровых кадров одной серии.** При частном предварительном отождествлении измерений цифровых кадров одной серии целесообразно избежать глобального перебора паросочетаний измерений этих кадров. Для этого необходимо учесть неизменность параметров сдвига от пары к паре. При этом можно решить задачу частного предварительного отождествления выдвинув (пере-

брав) гипотезы о принадлежности измерений различных кадров одному и тому же объекту. Каждой такой гипотезе о паросочетании соответствуют оценки сдвига, условные по гипотезе о соответствии одному и тому же объекту пары «измерение-измерение» по одному измерению каждого кадра:

$$\Delta_{xi} = x_{1(i)} - x_{2(i)}; \quad (2.33)$$

$$\Delta_{yi} = y_{1(i)} - y_{2(i)}, \quad (2.34)$$

где  $x_{1(i)}, y_{1(i)}, x_{2(i)}, y_{2(i)}$  – координаты измерений одного и того же  $i$ -го объекта (оценки координат объекта) на первом и втором отождествляемых кадрах в системе координат базового кадра серии.

При этом безусловной оценкой параметров сдвига между измерениями положения одного и того же объекта на различных кадрах можно считать ту условную оценку, которая соответствует гипотезе о сочетании пар измерений разных кадров с наибольшим весом.

В качестве веса указанных гипотез можно использовать количество подтверждений  $N_{ack}$ . Количеством подтверждений является количество круговых областей (стробов) подтверждения, которым принадлежит (поставлено в соответствие) не менее одного измерения другого кадра. Область (стробов) подтверждения имеет наперед заданный радиус  $R_{rej}$  и центр с координатами измерения первого кадра с прибавленными к ним значениями сдвигов (2.33), (2.34).

В общем случае кадры достаточно разряжены и разнообразны в том смысле, что отдельные их части не похожи между собой. В этом предположении можно не проверять все гипотезы о сочетании измерений двух кадров. Достаточно найти первую гипотезу, в которой количество подтверждений будет выше наперед заданного минимально допустимого количества подтверждений  $N_{min\_ack}$  (рис 2.5, 2.6).

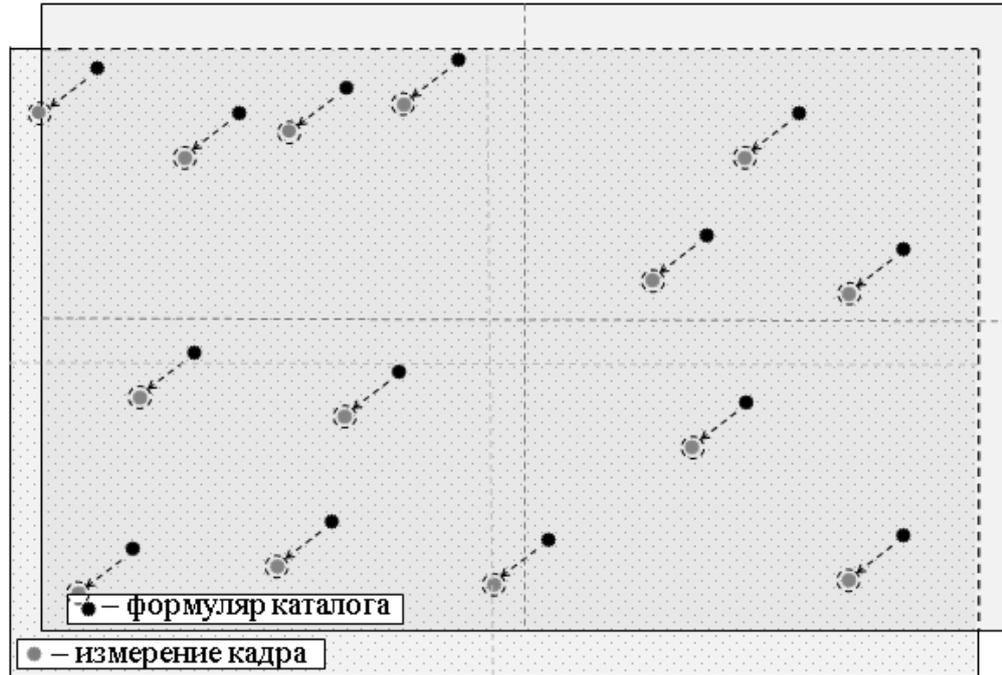


Рисунок 2.5 – Определение параметров сдвига между измерениями кадра и формулярами каталога или другого кадра (правильное отождествление)

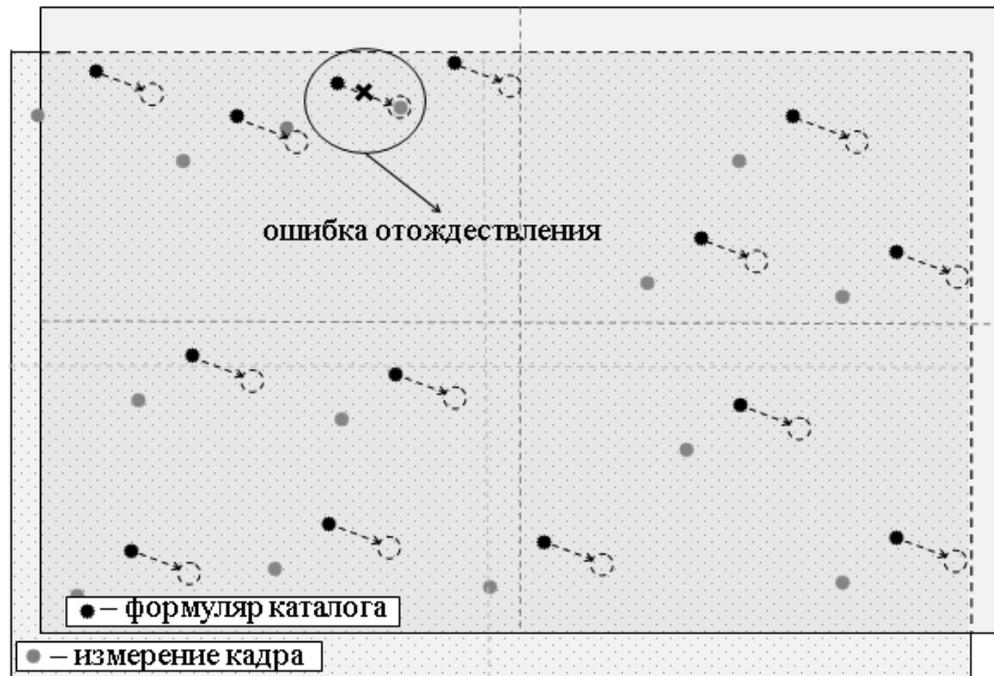


Рисунок 2.6 – Определение параметров сдвига между измерениями кадра и формулярами каталога или другого кадра (неправильное отождествление)

**Учет возможности формирования ложных измерений. При отождеств-**

лении кадров серии используются измерения звезд, которые имеют нулевое видимое движение. Объекты с ненулевым видимым движением (например, объекты Солнечной системы, искусственные спутники Земли) в этой связи считаются ложными. Также ложные измерения могут соответствовать артефактам изображений или выбросам шума изображений и быть сформированы из-за ошибок программы внутрикадровой обработки кадров.

В предположении об отсутствии ложных измерений было бы достаточно проверить только гипотезы о соответствии одного измерения первого кадра одному измерению второго. Однако выбранное для такого исследования измерение кадра может быть ложным. Так как частоту появления ложных измерений пользователи стабилизируют на достаточно низком уровне, то вероятность того, что для проведения частного предварительного отождествления будут последовательно выбраны два и тем более три ложных измерения как первых объектов пар ничтожно мала. При реализации метода для поиска соответствующих измерений второго кадра используются не более трех измерений первого кадра.

**Равномерное распределение измерений, используемых при частном предварительном отождествлении.** Одним из необходимых требований к методу частного предварительного отождествления является его устойчивость к разного рода дестабилизирующим факторам [60, 61]. В первую очередь к таким следует отнести возможное наличие на одном из кадров яркого трека искусственного спутника земли (ИСЗ), эффект перетекания заряда. При попадании в кадр яркого ИСЗ его изображение может засветить кадр, сформировав на нем большое количество ложных измерений (рис. 2.7, 2.8). Те же последствия для частного предварительного отождествления имеют эффект перетекания заряда. Кроме того, изображения самых ярких звезд кадра, как правило, имеют ряд других особенностей, которые приводят к снижению показателей точности оценки их положения, что делает их нежелательными кандидатами в опорные звезды (рис. 2.9, 2.10).

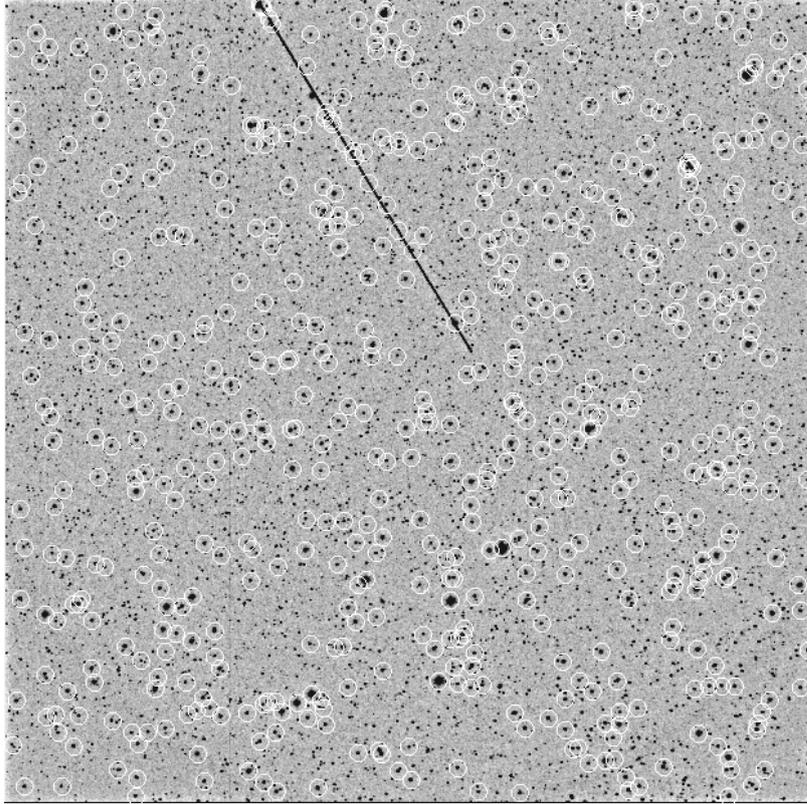


Рисунок 2.7 – Отображение на цифровом кадре самых ярких звезд

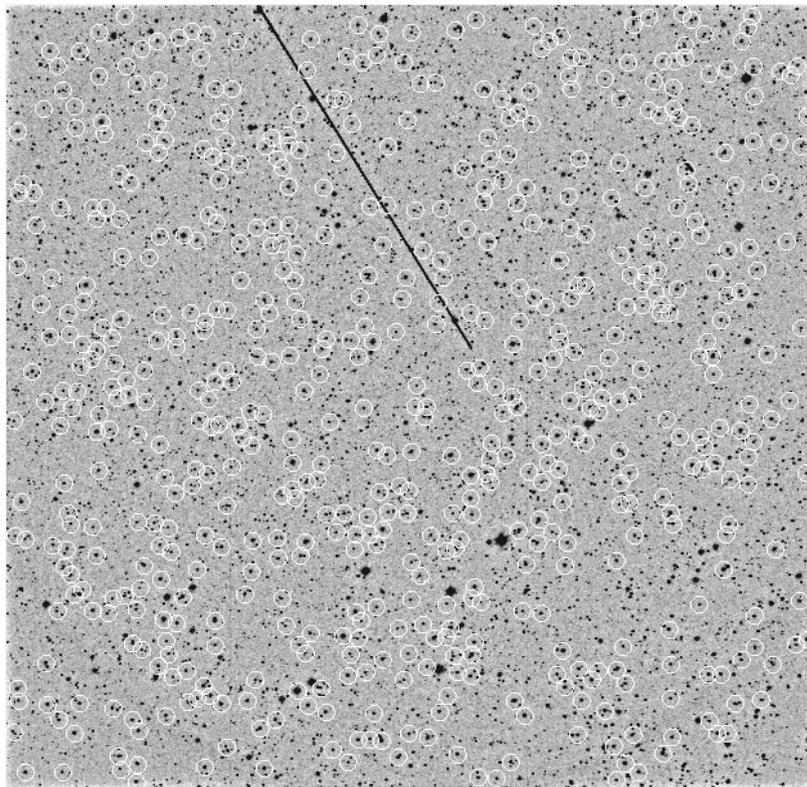


Рисунок 2.8 – Отображение на цифровом кадре самых ярких опорных звезд

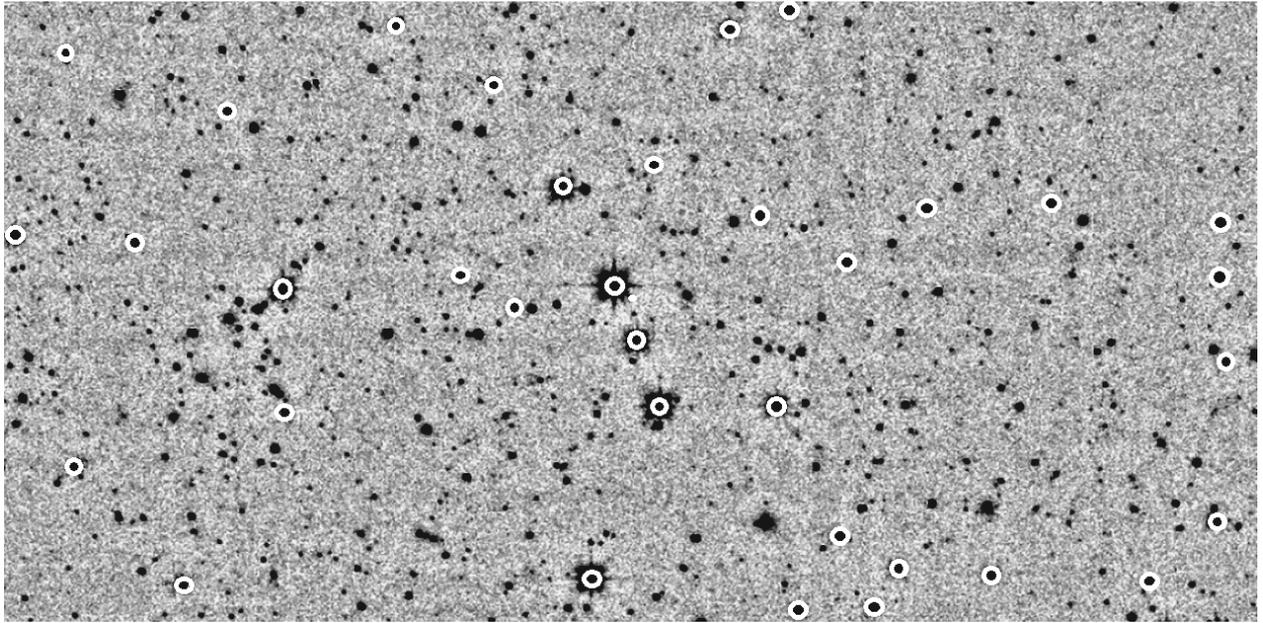


Рисунок 2.9 – Отображение на цифровом кадре самых ярких звезд

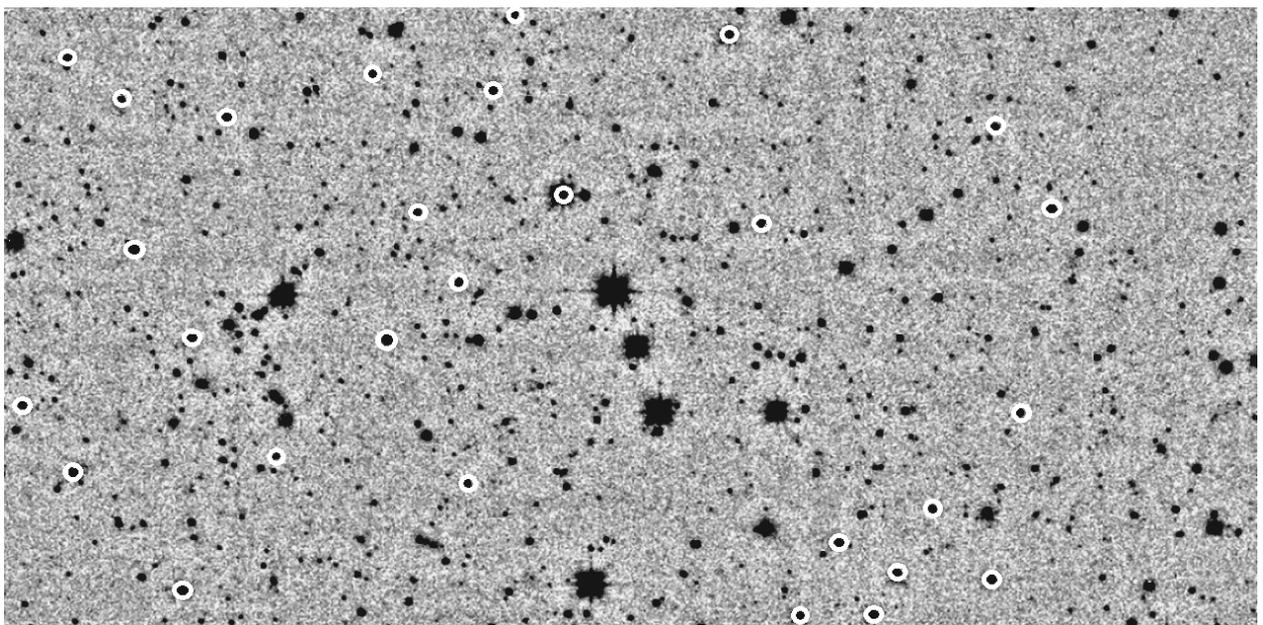


Рисунок 2.10 – Отображение на цифровом кадре самых ярких опорных звезд

С целью обеспечения устойчивости результатов метода частного предварительного отождествления кадр разбивается на наперед заданное количество областей одинакового размера  $M_{reg} \times M_{reg}$ . Из каждой такой области выбирается одинаковое наперед заданное количество самых ярких объектов  $N_{mea\_reg}$ .

Таким образом, выбранные измерения будут равномерно распределены по кадру, что поможет максимально снизить вероятность ошибок частного предварительного отождествления. Такой выбор измерений для частного предварительного отождествления позволит, например, исключить из рассмотрения большое количество ярких ложных измерений, вызванных перетеканием заряда большой звезды или яркого трека ИСЗ.

**Финальная оценка параметров сдвига между кадрами метода частного предварительного отождествления цифровых кадров одной серии.** Так как положения объектов на каждом кадре определяются с ошибками, то параметры сдвига кадров относительно друг друга, можно определить точнее, усреднив параметры сдвигов в каждой отдельной паре изображений объекта на двух кадрах:

$$\bar{\Delta}_x = \sum_{i=1}^{N_{ident}} \Delta_{xi} / N_{ident} ; \quad (2.35)$$

$$\bar{\Delta}_y = \sum_{i=1}^{N_{ident}} \Delta_{yi} / N_{ident} , \quad (2.36)$$

где  $N_{ident}$  – количество пар, используемых при оценивании параметров сдвига кадров относительно друг друга.

**Вычислительный метод частного предварительного отождествления измерений кадров одной серии.** Для формирования предварительной оценки параметров сдвига между измерениями кадров производится следующая последовательность операций.

1. Кадр разбивается на совокупность  $M_{reg} \times M_{reg}$  равных по площади областей (участков). Формируются множества самых ярких измерений кадра. Для этого с каждой области выбирается равное наперед заданное количество  $N_{mea\_reg}$  измерений с самыми высокими оценками яркости соответствующих

им гипотетических объектов.

2. Выбирается очередное измерение из наперед выбранного множества самых ярких измерений первого кадра. Таких измерений выбирается не более трех. Если в процессе функционирования метод в четвертый раз выходит на данный пункт (пытается выбрать четвертое измерение) производится аварийный выход из него с выдачей сообщения о сбое отождествления. Опыт говорит, что обычно это связано с большими ошибками в оценке координат привязки центра отождествляемого кадра.

3. Исследуемому измерению первого кадра ставится в соответствие очередное измерение (организуется цикл по исследуемым измерениям второго кадра) второго кадра из наперед выбранного множества измерений второго кадра. Для этого согласно выражениям (2.33), (2.34) предварительно вычисляется условная по гипотезе о паре оценка параметров сдвига.

4. Для каждой выбранной пары (пункты 2,3) оценивается вес очередной гипотезы о соответствии пар измерений первого и второго кадра (измерения кадра и формуляра каталога) одному и тому же объекту. Для этого каждое измерение первого кадра сравнивается с каждым измерением второго кадра. Предварительно к координатам измерений первого кадра прибавляются параметры сдвига (2.33), (2.34). На основе отклонений между измерениями первого и второго кадров определяется факт попадания измерений второго кадра в области (стробы) подтверждения.

Если достаточное количество измерений второго кадра попало в области (стробы) подтверждения, то считается, что гипотеза о сочетании пар измерений первого и второго кадров считается подтвержденной (переход на пункт 5). Если нет, то гипотеза о параметрах сдвига считается ложной и осуществляется переход (на пункт 3) к следующему измерению второго кадра. При исчерпании наперед выбранного множества измерений второго кадра производится переход к следующему измерению первого кадра (на пункт 2). Если и это множество

исчерпано – выдается сообщение о невозможности отождествления измерений первого и второго кадров.

5. Вычисляется финальная оценка параметров сдвига (2.35) и (2.36).

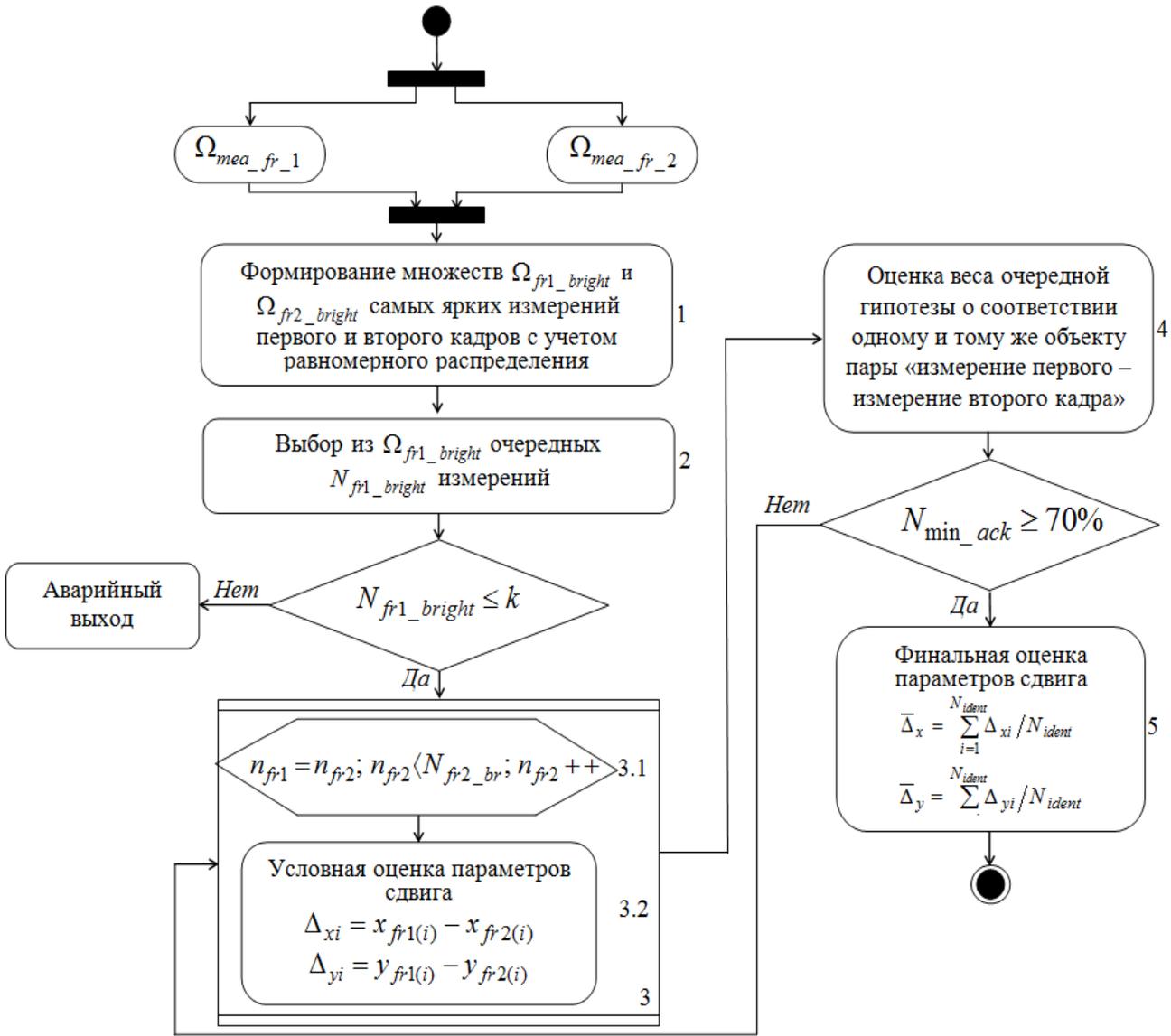


Рисунок 2.11 – UML диаграмма вычислительного метода частного предварительного отождествления

После успешного выполнения выше описанной последовательности операций выполняется переход к решению задачи отождествления измерений двух

исследуемых кадров методом максимального правдоподобия [3, 5, 108, 110].

При проведении исследований предполагались следующие значения параметров разработанного вычислительного метода: радиус областей (стробов) подтверждения  $R_{rej} = 20$  пикселей; минимально допустимое количество подтверждений  $N_{min\_ack} = 70\%$ ; количество областей одинакового размера, на которое делится кадр  $M_{reg} \times M_{reg} = 4 \times 4$ ; количество самых ярких измерений области кадра  $N_{mea\_reg} = N_{mea} / M_{reg}^2 = 3$ .

### 2.3 Разработка метода полного предварительного отождествления цифровых кадров с существенной неопределенностью их параметров

Разработка вычислительных методов автоматической обработки серий астрономических изображений является одной из быстро развивающихся предметных областей компьютерной обработки данных [85, 194, 195]. К основным операциям автоматической обработки данных относятся, в том числе, операции отождествления кадров [24, 130, 131, 151, 152]. Отождествление со звездным каталогом кадров, данные о которых содержат существенную неопределенность, является достаточно сложной задачей.

По некоторой программе телескоп наводится на заданные участки небесной сферы. По результатам наблюдения формируются кадры. По результатам внутрикадровой обработки формируются измерения положения небесных объектов в системе координат сформированных кадров [191, 192]. Для формирования измерений, которые могут быть использованы астрономами, необходимо отождествить измерения кадра с формулярами используемых звездных каталогов.

В большинстве случаев достаточно точно известно положение участка небесной сферы, соответствующее исследуемому кадру. В данных условиях за-

дача отождествления кадров не является сложной. Трудности возникают при существенных ошибках в масштабе (фокусном расстоянии телескопа) и координатах наведения телескопа на заданную точку небесной сферы.

Необходимо найти начальное приближение параметров попарного соответствия (паросочетания) между множествами формуляров используемого каталога и измерений кадра, данные о которых содержат указанную выше существенную неопределенность [29].

**Конечный статистический метод получения линейных постоянных пластинки.** Для частного предварительного отождествления кадра со звездным каталогом достаточно получить 6 параметров линейных постоянных пластинки [33, 39, 64, 66]. В свою очередь для решения этой задачи достаточно иметь три точки (звезды) на кадре и соответствующие им пары в звездном каталоге. Координаты трех точек (звезд) так же составляют 6 параметров. В этой связи, расчет постоянных пластинки по трем точкам является конечным статистическим методом. Он не использует избыточные данные. С помощью конечного статистического метода нельзя исключить или уменьшить ошибки, содержащиеся в оценках положений звезд каталога и кадра.

Однако, конечный метод позволяет получить начальное приближение при минимальных вычислительных затратах.

Исходными данными для получения линейных постоянных пластинки конечным статистическим методом являются, с одной стороны, положения трех звезд на отождествляемом кадре в системе координат (СК) этого ПЗС-кадра (рис.2.12). С другой стороны, идеальные координаты соответствующих звезд каталога. Для получения идеальных координат звезд каталога из их экваториальных координат достаточно иметь в своем распоряжении некое приближение экваториальных координат оптического центра кадра.

На рисунке 2.12 точки, соответствующие трем используемым звездам, и их координаты обозначены как  $A(x_1, y_1)$ ,  $B(x_2, y_2)$ ,  $C(x_3, y_3)$ . Каталогным экваториальным координатам этих звезд соответствуют идеальные координаты

$A(\xi_1, \eta_1)$ ,  $B(\xi_2, \eta_2)$ ,  $C(\xi_3, \eta_3)$  соответственно.

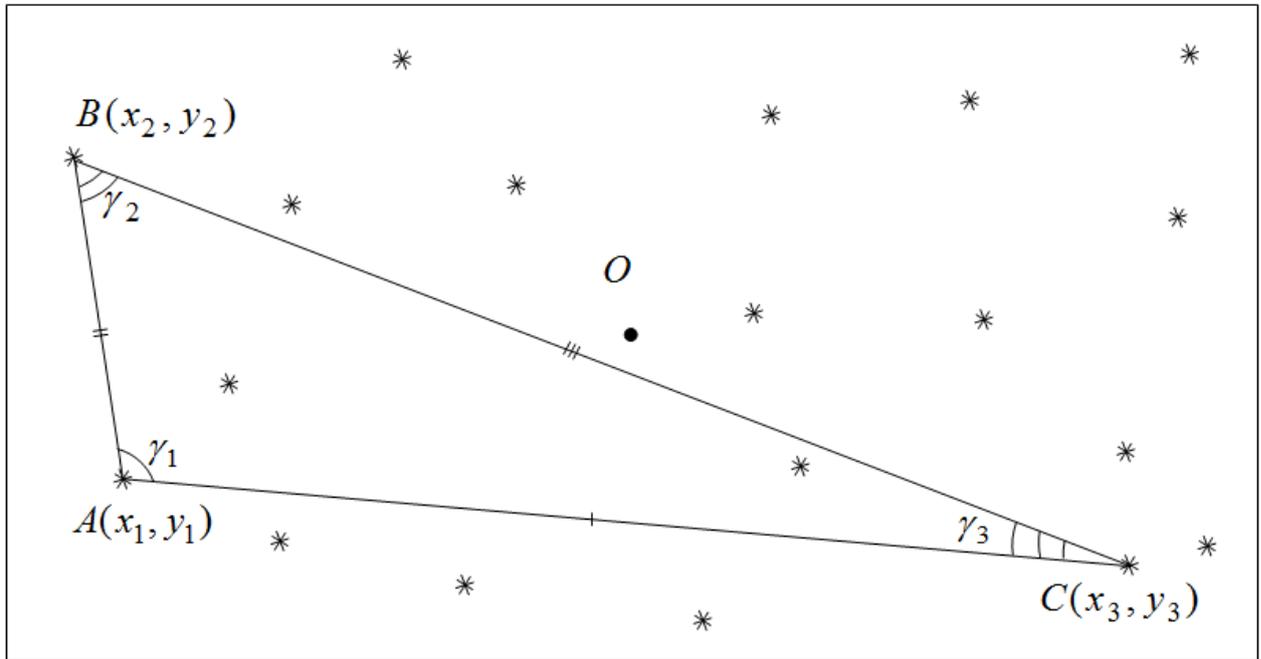


Рисунок 2.12 – Формирование троек первичного отождествления

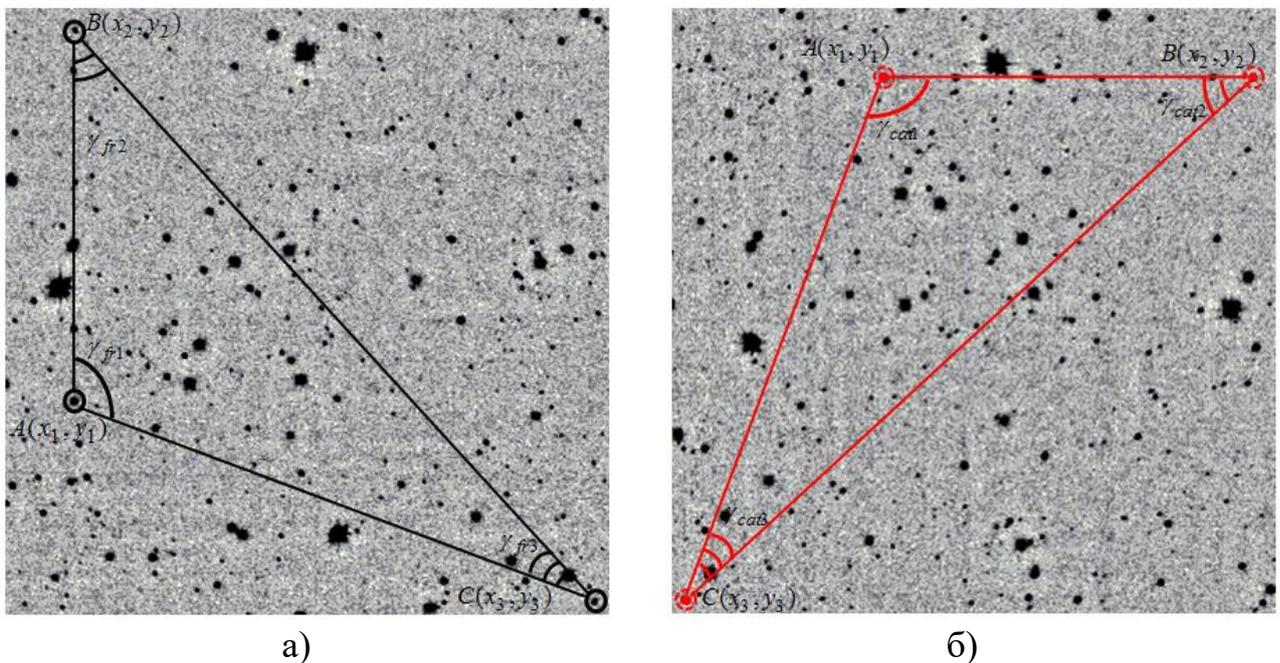


Рисунок 2.13 – Формирование троек первичного отождествления: а) со стороны кадра, б) со стороны звездного каталога

Идеальные координаты объекта с его координатами в СК ПЗС-кадра свя-

зываются уравнением редукции [33, 39]:

$$\begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \xi_3 \end{bmatrix}; \quad (2.37)$$

$$\begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \\ \eta_3 \end{bmatrix}. \quad (2.38)$$

Возможно и обратное уравнение редукции, которое связывает координаты объекта в СК ПЗС-кадра  $x, y$  с его идеальными координатами  $\xi, \eta$  [33, 39]:

$$\begin{bmatrix} a'_0 \\ a'_1 \\ a'_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \xi_1 & \eta_1 \\ 1 & \xi_2 & \eta_2 \\ 1 & \xi_3 & \eta_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}; \quad (2.39)$$

$$\begin{bmatrix} b'_0 \\ b'_1 \\ b'_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \xi_1 & \eta_1 \\ 1 & \xi_2 & \eta_2 \\ 1 & \xi_3 & \eta_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix}. \quad (2.40)$$

**Суть метода полного предварительного отождествления цифровых кадров с существенной неопределенностью их параметров.** Для получения линейных постоянных пластинки необходимо наличие трех звезд на кадре (трех измерений) и соответствующие им пары – звезды в каталоге (формуляры каталога). Данное паросочетание может быть названо тройкой первичного отождествления. Очевидно, что данная тройка не единственна, но ни одна из них изначально неизвестна. Каждой тройке соответствует гипотеза «первичного отождествления» о соответствии троек кадра и каталога. В рамках предлагае-

мого метода искомая тройка (верная гипотеза о соответствии троек кадра и каталога) может быть найдена перебором. Количество вариантов перебора огромно. При верно отобранных представителях каталога и кадра, и их одинаковом количестве равном  $N$  количество вариантов выбора трех представителей кадра будет равно количеству вариантов выбора трех представителей каталога и будет равно количеству сочетаний  $C_N^3$ . В свою очередь количество вариантов выбора троек (по три представителя кадра и каталога) будет равно  $(C_N^3)^2$ . При этом, только  $C_N^3$  вариантов будут верными. При отборе  $N=100$  измерений кадра и звезд каталога количество троек, которые надо будет проверить, будет примерно равно  $10^{11} \div 10^{12}$ , в свою очередь при  $N=1000$  данное число увеличится примерно до  $10^{17} \div 10^{18}$ . Такое количество вариантов отбора измерений кадра и звезд каталога может быть перебрано при современном уровне развития вычислительной техники. Однако такая возможность не означает целесообразности реализации указанной операции.

**Исходные предпосылки для метода перебора троек для получения линейных постоянных пластинки.** Количество вариантов отбора измерений кадра и звезд каталога может быть сокращено при использовании двух следующих предпосылок, вытекающих из изучения закономерностей формирования измерений кадров и формуляров каталогов.

1. Количество пропусков измерений положений звезд на кадре ограничено. При этом, вероятность пропуска измерения зависит от оценки блеска объекта на кадре. Чем выше оценка блеска, тем данная вероятность меньше. Исходя из этой предпосылки для перебора претендентов в члены тройки отбираются самые яркие звезды кадра (измерения с наибольшей оценкой яркости) и каталожные звезды (формуляры каталога с наибольшей оценкой блеска) исследуемого участка звездного неба.

2. Количество ложных измерений и ложных формуляров каталога ограничено, однако не равно 0. Под истинными объектами при отождествлении

подразумеваются звезды – объекты, являющиеся с точки зрения наблюдателя, неподвижными на серии кадров. При этом, ложными считаются измерения, связанные с такими объектами с ненулевым видимым движением, как ИСЗ, астероиды и т.д., а также измерения, связанные с ложными пикселями, другими артефактами изображения. Также к ложным измерениям следует относить измерения с аномально большими отклонениями. Кроме того, с использованием таких измерений достоверную гипотезу о параметрах отождествления все равно построить невозможно.

**Формирование множества измерений кадра как троек первичного отождествления со стороны кадра.** Для использования в качестве точек (элементов) троек первичного отождествления используется множество  $\Omega_{bl50}$  претендентов из  $N_{bl50}$  измерений кадра с наибольшей яркостью. Дополнительно вводится множество  $\Omega_{bl100}$  измерений кадра с наибольшей яркостью, которые используются для подтверждения гипотез первичного отождествления (формирования веса очередной гипотезы о соответствии троек кадра и каталога). Количество элементов данного множества  $N_{bl100}$  в  $k_{blob}$  раз больше количества элементов множества  $\Omega_{bl50}$ :

$$N_{bl100} = k_{blob} \cdot N_{bl50}. \quad (2.41)$$

Для обеспечения устойчивости отождествления к различным стрессовым факторам необходимо равномерное распределение отождествляемых измерений на кадре. К указанным стрессовым факторам в первую очередь следует отнести наличие на кадрах ярких треков искусственных спутников Земли, эффект перетекания заряда или какие-либо другие особенности, которые могут возникнуть при формировании изображения цифрового кадра. Исходя из этого при отборе претендентов множества  $\Omega_{bl100}$  измерений кадра, используемых для подтверждения гипотез первичного отождествления, для минимизации ошибок

отождествления целесообразно измерения распределить равномерно на кадре.

Для обеспечения равномерного распределения используемых измерений на кадре производится фрагментация кадра. Кадр делится на  $M_{reg} \times M_{reg} = M_{reg}^2$  областей. Заданное количество  $N_{bl50}, N_{bl100}$  измерений кадра делится на количество фрагментов кадра, и в каждом таком фрагменте отбираются свои  $N_{bl50}/M_{reg}^2, N_{bl100}/M_{reg}^2$  самых ярких измерений кадра.

Для этого измерения, принадлежащие каждому фрагменту кадра, сортируются по интегральной яркости (используется строб 5x5 пикселей с центром в пикселе, соответствующем положению объекта, согласно оценке его положения) [6]. Самые яркие  $N_{bl50}/M_{reg}^2$  и  $N_{bl100}/M_{reg}^2$  измерения включаются в множества  $\Omega_{bl50}$  и  $\Omega_{bl100}$  соответственно. Использование интегральной яркости в фиксированном стробе позволяет избежать включения ложных измерений в множества  $\Omega_{bl50}$  и  $\Omega_{bl100}$  или минимизировать вероятность такого включения.

Если,  $N_{bl50}$  или  $N_{bl100}$  не делятся без остатка на  $M_{reg}^2$ , то в каждом фрагменте кадра остается количество звезд, соответствующее целой части соответствующей дроби.

**Формирование множества формуляров каталога как троек первичного отождествления со стороны каталога.** Формирование множества звезд астрометрического каталога производится согласно тем же принципам, что и формирование множества измерений кадра. Создается два множества звезд астрометрического каталога. Первое множество  $\Omega_{star100}$  – множество, звезды которого принимают участие в переборе троек первичного отождествления со стороны каталога. Размер множества задается следующим образом:

$$|\Omega_{star100}| = k_{star} \cdot N_{bl50}. \quad (2.42)$$

Второе множество  $\Omega_{star200}$  используются для подтверждения гипотез первичного отождествления (формирования веса очередной гипотезы о соответствии тройки кадра тройке астрометрического каталога). Количество элементов данного множества  $N_{st200}$  в  $k_{star}$  раз больше количества элементов множества  $\Omega_{star100}$ :

$$N_{st200} = k_{star} \cdot N_{st100}. \quad (2.43)$$

Как и при формировании множества измерений кадра исследуемая часть звездного неба (соответствующая отождествляемому кадру) фрагментируется на  $M_{reg} \times M_{reg}$  областей. Отобранные звезды каждого фрагмента сортируются по значению блеска. При этом в множества  $\Omega_{star100}$  и  $\Omega_{star200}$  включаются первые самые яркие  $N_{star100}/M_{reg}^2$  и  $N_{star200}/M_{reg}^2$  звезд исследуемых фрагментов звездного неба.

**Перебор измерений множества  $\Omega_{bl50}$  как элементов троек первичного отождествления со стороны кадра.** Выбор первого измерения любой тройки производится без условий. В качестве такового поочередно используются все элементы множества измерений  $\Omega_{bl50}$ . Для того, чтобы тройка измерений с координатами  $(x_{1(k)}; y_{1(k)})$ ,  $(x_{2(k)}; y_{2(k)})$ ,  $(x_{3(k)}; y_{3(k)})$  в СК ПЗС-кадра образовывала треугольник, покрывающий значительную часть кадра, для двух других элементов тройки вводятся условия, полученные в процессе использования данного метода экспериментальным путем. Вторая точка тройки должна находиться не ближе чем  $k_h$  углового размера  $R_{CCD}$  кадра от первой:

$$r_{(1)(2)} = \sqrt{(y_{2(k)} - y_{1(k)})^2 + (x_{1(k)} - x_{2(k)})^2} \geq 0.5 k_h (R_{CCD(x)} + R_{CCD(y)}). \quad (2.44)$$

Условием для выбора третьей точки тройки является выбор такого измерения на кадре, которому соответствует точка, из которой может быть опущен

перпендикуляр  $r_{trian}$  на прямую, проходящую через первую и вторую точки тройки первичного отождествления.

Выражение для нахождения длины перпендикуляра  $r_{trian}$  выводится на основе определения модуля векторного произведения двух векторов [9, 10]. С помощью свойства векторного произведения двух векторов можно определить перпендикулярен ли вектор, проведённый через третью точку тройки, этим векторам. А модуль векторного произведения двух соответствующих векторов будет равен длине перпендикуляра  $r_{trian}$ :

$$r_{trian} = |x_{1(k)}y_{2(k)} - x_{2(k)}y_{1(k)}|. \quad (2.45)$$

Длина перпендикуляра  $r_{trian}$  может быть найдена с помощью уравнения прямой, проходящей через первую и вторую точки тройки, и уравнения перпендикуляра к этой прямой из третьей точки тройки [9].

Уравнение прямой, проходящей через первую и вторую точки тройки первичного отождествления, имеет вид [9]:

$$\frac{x - x_{1(k)}}{x_{2(k)} - x_{1(k)}} = \frac{y - y_{1(k)}}{y_{2(k)} - y_{1(k)}}. \quad (2.46)$$

или:

$$Ax + By + C = 0, \quad (2.47)$$

где  $A = (y_{2(k)} - y_{1(k)})$ ;

$B = (x_{1(k)} - x_{2(k)})$ ;

$C = y_{1(k)} \cdot x_{2(k)} - x_{1(k)} \cdot y_{2(k)}$ .

Известна формула для нахождения расстояния  $d$  от точки до прямой на

плоскости, что соответствует длине перпендикуляра, опущенного из данной точки на прямую [9]:

$$d = \frac{|Ax + By + C|}{\sqrt{A^2 + B^2}}. \quad (2.48)$$

После подстановки уравнения прямой (2.47) третьей точки тройки  $(x_{3(k)}; y_{3(k)})$  и коэффициентов  $A$  и  $B$  в выражение (2.48) длина перпендикуляра  $r_{trian}$  как расстояния от третьей точки тройки первичного отождествления до прямой, проходящей через первую и вторую точки данной тройки, будет иметь вид [9]:

$$r_{trian} = \frac{|(y_{2(k)} - y_{1(k)}) \cdot x_{3(k)} + (x_{1(k)} - x_{2(k)}) \cdot y_{3(k)} + y_{1(k)} \cdot x_{2(k)} - x_{1(k)} \cdot y_{2(k)}|}{\sqrt{(y_{2(k)} - y_{1(k)})^2 + (x_{1(k)} - x_{2(k)})^2}}. \quad (2.49)$$

Третья точка тройки выбирается так, чтобы длина перпендикуляра  $r_{trian}$  из выражения (2.49) была не меньше наперед заданного параметра:

$$r_{trian} \geq h_{trian}. \quad (2.50)$$

При этом параметр  $h_{trian}$  рассчитывается как  $k_{\Delta 12}$  расстояние между 1-й и 2-й точками «тройки»:

$$h_{trian} = k_{\Delta 12} \sqrt{(x_{2(k)} - x_{1(k)})^2 + (y_{2(k)} - y_{1(k)})^2}. \quad (2.51)$$

Предположение об ограниченности количества ложных измерений (или измерений с аномально большими отклонениями) реализуется следующим образом:

$(i+1)$ -е ( $i = 1, 2$ ) измерение тройки не используется более трех раз при одном и том же  $i$ -ом измерении. Например,  $k$ -е измерение будет использовано в переборе как третье измерение тройки три раза при использовании  $j$ -го измерения в качестве второго измерения тройки. А  $j$ -е измерение будет использовано в переборе (как второе измерение тройки) три раза относительно  $i$ -го, используемого в переборе как первое измерение тройки. Это сделано исходя из предположения, что если отождествление не осуществляется при данной тройке, то значит одно, два или даже три рассматриваемые измерения не соответствуют звезде. Реализация такого подхода повышает и надежность вычислительного метода и снижает вычислительные затраты на реализацию надежного вычислительного метода.

Указанным выше образом формируется тройка измерений кадра. В качестве ее параметров, используемых при отождествлении, используются три угла соответствующего треугольника. Данные углы могут быть вычислены следующим образом.

Для определения угла  $\gamma_1$  с вершиной в точке  $A(x_1, y_1)$  между прямыми  $AB$  и  $AC$  составляются два вектора. Это вектор  $\bar{b}$  из точки  $A(x_1, y_1)$  в точку  $C(x_3, y_3)$  и вектор  $\bar{c}$  из точки  $A(x_1, y_1)$  в точку  $B(x_2, y_2)$ .

Синус угла  $\gamma_1$  может быть определён на основе выражения для модуля векторного произведения  $|\bar{b} \times \bar{c}|$  [7]:

$$|\bar{b} \times \bar{c}| = |\bar{b}| |\bar{c}| \cdot \sin \gamma_1, \quad (2.52)$$

где  $|\bar{b}| = \sqrt{x_{2(k)}^2 + y_{2(k)}^2}$  – длина вектора  $\bar{b}$ ;

$|\bar{c}| = \sqrt{x_{3(k)}^2 + y_{3(k)}^2}$  – длина вектора  $\bar{c}$ .

При чем, значение модуля векторного произведения векторов  $|\bar{b} \times \bar{c}|$  определяется соотношением [9]:

$$|[\bar{b} \times \bar{c}]| = |x_{2(k)}y_{3(k)} - y_{2(k)}x_{3(k)}|. \quad (2.53)$$

Косинус угла  $\gamma_1$  может быть определен из скалярного произведения указанных векторов  $\bar{b}\bar{c}$ , значение которого определяется соотношением [9]:

$$\bar{b}\bar{c} = |\bar{b}| |\bar{c}| \cos \gamma_1, \quad (3.54)$$

где  $\bar{b}\bar{c} = x_{2(k)}x_{3(k)} + y_{2(k)}y_{3(k)}$ .

Таким образом, согласно выражениям (2.52) ÷ (2.54) синус и косинус угла  $\gamma_1$  может быть найден следующим образом:

$$\sin \gamma_1 = \left( \frac{x_{2(k)}y_{3(k)} - y_{2(k)}x_{3(k)}}{\sqrt{x_{2(k)}^2 + y_{2(k)}^2} \cdot \sqrt{x_{3(k)}^2 + y_{3(k)}^2}} \right); \quad (2.55)$$

$$\cos \gamma_1 = \left( \frac{x_{2(k)}x_{3(k)} + y_{2(k)}y_{3(k)}}{\sqrt{x_{2(k)}^2 + y_{2(k)}^2} \cdot \sqrt{x_{3(k)}^2 + y_{3(k)}^2}} \right). \quad (2.56)$$

При известных синусе и косинусе угла однозначное его нахождение тривиально.

Аналогично выражениям (2.55) и (2.56) могут быть найдены и значения синусов и косинусов углов  $\gamma_2$  и  $\gamma_3$  с помощью следующих выражений соответственно:

$$\sin \gamma_2 = \left( \frac{x_{1(k)}y_{3(k)} - y_{1(k)}x_{3(k)}}{\sqrt{x_{1(k)}^2 + y_{1(k)}^2} \cdot \sqrt{x_{3(k)}^2 + y_{3(k)}^2}} \right); \quad (2.57)$$

$$\cos \gamma_2 = \left( \frac{x_{1(k)}x_{3(k)} + y_{1(k)}y_{3(k)}}{\sqrt{x_{1(k)}^2 + y_{1(k)}^2} \cdot \sqrt{x_{3(k)}^2 + y_{3(k)}^2}} \right); \quad (2.58)$$

$$\sin \gamma_3 = \left( \frac{x_{1(k)}y_{2(k)} - y_{1(k)}x_{2(k)}}{\sqrt{x_{1(k)}^2 + y_{1(k)}^2} \cdot \sqrt{x_{2(k)}^2 + y_{2(k)}^2}} \right); \quad (2.59)$$

$$\cos \gamma_3 = \left( \frac{x_{1(k)}x_{2(k)} + y_{1(k)}y_{2(k)}}{\sqrt{x_{1(k)}^2 + y_{1(k)}^2} \cdot \sqrt{x_{2(k)}^2 + y_{2(k)}^2}} \right). \quad (2.60)$$

**Перебор формуляров каталога множества  $\Omega_{star100}$  как элементов троек первичного отождествления со стороны каталога.** Для каждой сформированной тройки первичного отождествления со стороны кадра организовывается перебор троек первичного отождествления со стороны каталога. В качестве формуляров (точек) троек используются элементы ранее введенного множества  $\Omega_{star100}$  формуляров каталога как троек первичного отождествления со стороны каталога. Никаких требований к звездам, входящим в тройки, не предъявляется кроме того, что в тройку должно войти три разные звезды из множества  $\Omega_{star100}$ .

Как и тройка измерений кадра, тройка звезд каталога характеризуется значениями углов соответствующих вершин треугольника. Координаты положения звезд каталога представлены в сферической системе координат, а именно во второй экваториальной системе координат [33, 39].

Согласно [39] СК ПЗС-кадра, параллельна плоскости идеальной астрофотографии. Поэтому можно использовать плоскость идеальной астрофотографии для расчета углов вершин тройки первичного отождествления со стороны каталога. Для этого определяются тангенциальные координаты звезд используемого каталога в плоскости идеальной астрофотографии с заданными экваториальными координатами  $(\alpha_0, \delta_0)$  оптического центра [39], согласно выражениям:

$$\xi_{j(k)} = \frac{\cos \delta_{j(k)} \cdot \sin(\alpha_{j(k)} - \alpha_0)}{\cos \delta_0 \cdot \cos \delta_{j(k)} \cdot \cos(\alpha_{j(k)} - \alpha_0) + \sin \delta_0 \cdot \sin \delta_{j(k)}}; \quad (2.61)$$

$$\eta_{j(k)} = \frac{\cos \delta_0 \cdot \cos(\alpha_{j(k)} - \alpha_0)}{\cos \delta_0 \cdot \cos \delta_{j(k)} \cdot \cos(\alpha_{j(k)} - \alpha_0) + \sin \delta_0 \cdot \sin \delta_{j(k)}}, \quad (2.62)$$

где  $\alpha_{j(k)}, \delta_{j(k)}$  – угловые координаты  $j(k)$ -го объекта, содержащиеся в используемом звездном каталоге.

На основе полученных тангенциальных (идеальных) координат по аналогии с выражениями (2.55) – (2.60) определяются углы очередного треугольника, соответствующего тройке первичного отождествления со стороны каталога.

**Сопоставление троек первичного отождествления со стороны кадра и со стороны каталога.** Прежде всего, две исследуемые тройки первичного отождествления проверяются на идентичность углов (каждый с каждым) соответствующих им треугольников. Звезды двух (кадра и каталога) троек считаются предварительно тождественными, если отклонения в значениях соответствующих углов в этих треугольниках не превышают наперед заданного параметра  $\Delta\gamma$ :

$$|\gamma_{1fr} - \gamma_{1cat}| < \Delta\gamma; \quad (2.63)$$

$$|\gamma_{2fr} - \gamma_{2cat}| < \Delta\gamma; \quad (2.64)$$

$$|\gamma_{3fr} - \gamma_{3cat}| < \Delta\gamma, \quad (2.65)$$

где  $\gamma_{i fr}, \gamma_{i cat}$  – углы треугольников, соответствующих тройке первичного отождествления со стороны кадра и каталога соответственно;

$\Delta\gamma$  – предельно допустимое значение отклонения значений соответствующих углов треугольников (со стороны кадра и каталога) первичного отождествления.

Параметр  $\Delta\gamma$  определяет вычислительные затраты метода полного предварительного отождествления цифровых кадров с существенной неопределенностью их параметров. Чем больше ее значение, тем большее количество троек измерений могут рассматриваться в качестве треугольников первичного отождествления, тем для большего количества наборов значений вычисляются линейные постоянные пластинок и проводятся все остальные операции проверки истинности очередной гипотезы о параметрах отождествления кадра и каталога, соответствующей рассматриваемым тройкам первичного отождествления. Детальные исследования проводились в интересах обсерватории ISON-NM [52]. Обсерватория находится на горе Джой (Мейхилл), Нью-Мексико, США и использует 40-см телескоп САНТЕЛ-400АН и ПЗС-матрицу FLI ML09000-65 (3056×3056 пикселей, размер пикселя 12 мкм). Всего было использовано 19 серий по 4 кадра каждая. Время экспозиции составляло 150 с. Кадры были получены в период с 04.03.2014 по 30.03.14. Для рассмотренной в работе обсерватории ISON-NM разница во времени счета программы, реализующей предложенный в работе метод, при  $\Delta\gamma = 1^0$  и  $\Delta\gamma = 7^0$  составляет в зависимости от рассматриваемого кадра от 10 до 100 раз.

На основании пар троек, признанных предварительно тождественными, производится расчет линейных постоянных пластинок согласно выражений (1), (2) [33, 39]. В дальнейшем, по линейным постоянным пластинок определяются координаты звезд из множества  $\Omega_{star200}$  формуляров каталога в СК ПЗС-кадра.

Следующим шагом с использованием венгерского метода отождествляются [24] элементы множества измерений кадра  $\Omega_{bl100}$  и множества формуляров каталога  $\Omega_{star200}$ . При отождествлении пара считается допустимой, если расстояние между ее элементами в СК ПЗС-кадра не превышает наперед заданного параметра  $\Delta r_{ident}$ .

Гипотеза о параметрах отождествления кадра и каталога, соответствующая рассматриваемым тройкам первичного отождествления (со стороны ката-

лога и кадра) признается истинной, если в процессе отождествления множеств  $\Omega_{bl100}$  и  $\Omega_{star200}$  часть сформированных допустимых пар превышает наперед заданное значение параметра  $v_{min\ ident}$ . Параметр  $v_{min\ ident}$  представляет собой минимальное допустимое отношение количества допустимых пар к размеру множества  $\Omega_{bl100}$ . Опыт практического использования вычислительного метода, говорит о том, что указанное отношение в среднем случае для истинной гипотезы о параметрах отождествления составляет 0.8–0.9.

При нахождении гипотезы о параметрах отождествления кадра и каталога, признанной истинной, дальнейшие переборы приостанавливаются. Параметры отождествления, найденные в рамках гипотезы признанной истинной, считаются искомыми параметрами метода полного предварительного отождествления. В дальнейшем они используются и уточняются.

#### **Вычислительный метод полного предварительного отождествления.**

1. Для множества измерений кадра при формировании троек первичного отождествления производится следующая последовательность операций (рис. 2.13).

1.1. Формирование множества  $\Omega_{bl50}$  самых ярких измерений кадра состоящее из  $N_{bl50}$  претендентов при выборе троек первичного отождествления. С целью обеспечения устойчивости результатов отождествления, кадр делится на  $M_{reg} \times M_{reg}$  ( $M_{reg}^2$ ) частей. Заданное количество измерений кадра  $N_{bl50}$  делится на количество фрагментов кадра, и в каждом таком фрагменте отбираются  $N_{bl50} / M_{reg}^2$ , самых ярких измерений кадра.

1.2. Формирование дополнительного множества  $\Omega_{bl100}$  самых ярких измерений кадра, состоящее из  $N_{bl100}$  элементов, равномерно распределенных на кадре (по аналогии с п. 1.1). Множество измерений  $\Omega_{bl100}$  используется для подтверждения гипотез первичного отождествления (формирования веса очередной гипотезы о соответствии троек кадра и каталога).

2. Для множества формуляров каталога при формировании троек первичного

отождествления производится следующая последовательность операций.

2.1. Формирование множества  $\Omega_{star100}$  формуляров каталога с учетом равномерного распределения формуляров звезд на исследуемом участке звездного неба.

2.2. Формирование дополнительного множества  $\Omega_{star200}$  формуляров каталога состоящее из  $N_{st200}$  элементов (с учетом равномерного распределения используемых формуляров звезд на исследуемом участке звездного неба.), которое используется для подтверждения гипотез первичного отождествления (формирования веса очередной гипотезы о соответствии тройки кадра и каталога).

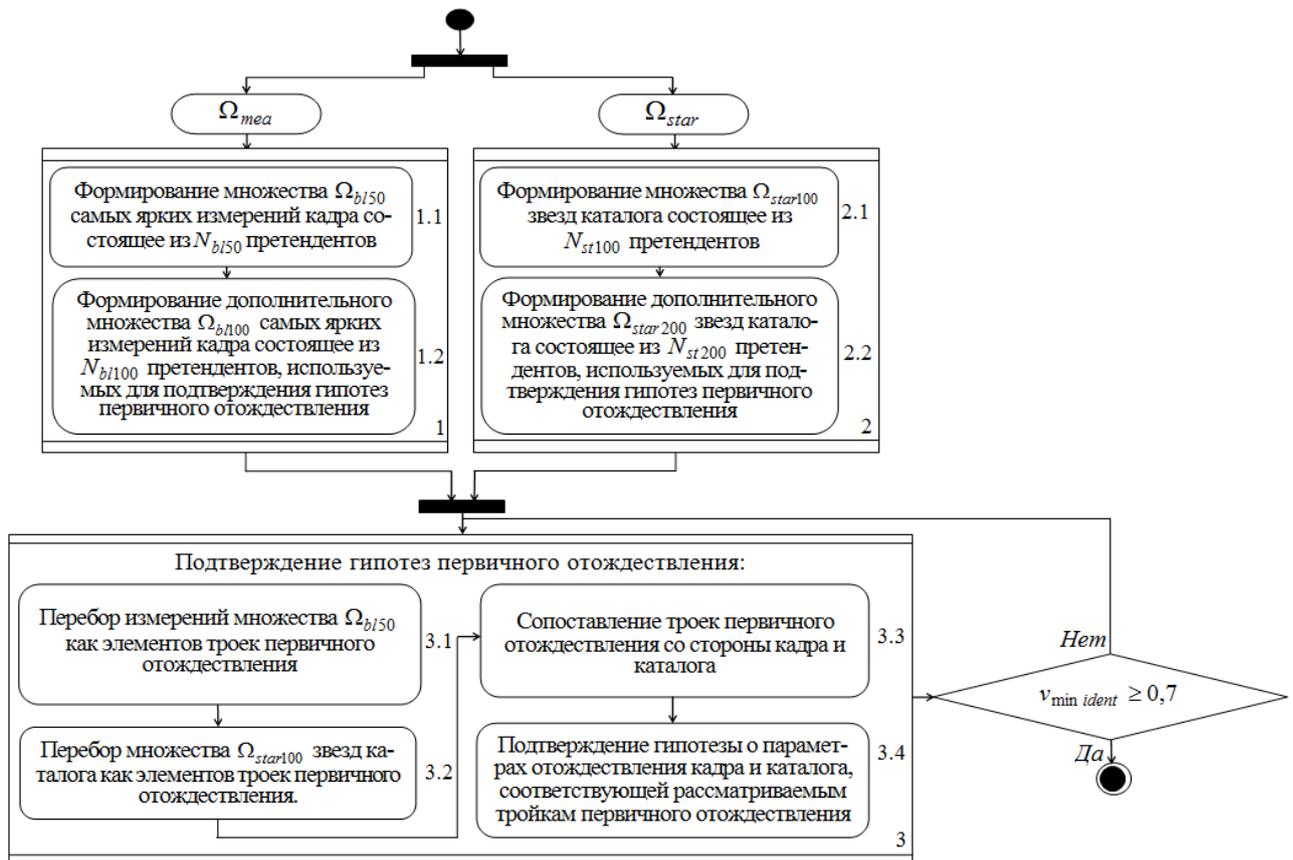


Рисунок 2.13 – UML диаграмма вычислительного метода полного предварительного отождествления

3. Перебор и подтверждение гипотез первичного отождествления.

3.1 Перебор измерений множества  $\Omega_{bl50}$  как элементов троек первичного

отождествления. Измерения, составляющие тройки первичного отождествления должны удовлетворять условиям (2.44), (2.45), (2.50).

3.2 Перебор множества  $\Omega_{star100}$  формуляров каталога как элементов троек первичного отождествления со стороны каталога.

3.3 Сопоставление троек первичного отождествления со стороны измерений кадра и со стороны формуляров каталога на основании соответствующих углов треугольников, значения которых вычислены согласно выражений (2.55)–(2.60).

3.4 Подтверждение гипотезы о параметрах отождествления кадра и каталога, которая соответствует рассматриваемым тройкам первичного отождествления (со стороны каталога и кадра). Гипотеза признается истинной, если в процессе отождествления множеств  $\Omega_{bl100}$  и  $\Omega_{star200}$  часть сформированных допустимых пар превышает наперед заданное значение параметра  $v_{min\ ident}$ . При подтверждении гипотезы отождествления дальнейший перебор прекращается.

**Параметры вычислительного метода.** При проведении исследований предполагались следующие значения параметра вычислительного метода. Количество измерений кадра (претендентов) на роль элементов троек (вершин треугольников) первичного отождествления  $N_{bl50} = 50$ . Количество элементов множества  $\Omega_{bl100}$  измерений кадра, используемых для подтверждения гипотез первичного отождествления  $N_{bl100} = 100$ . Соотношение количества элементов множеств измерений кадра  $\Omega_{bl100}$  и  $\Omega_{bl50}$  предполагалось равным  $k_{blob} = N_{bl100}/N_{bl50} = 2$ . Количество фрагментов, на которое делится кадр  $M_{reg} = 4$ . Количество звезд (претендентов) на роль элементов троек (вершин треугольников) первичного отождествления со стороны астрометрического каталога  $N_{star100} = 100$ . Количество элементов множества звезд  $\Omega_{star200}$ , используемых для подтверждения гипотез первичного отождествления  $N_{star200} = 200$  со стороны астрометрического каталога. Соотношение количества элементов множеств  $\Omega_{star200}$  и  $\Omega_{star100}$  предполагалось равным  $k_{star} = N_{star200}/N_{star100} = 2$ .

Предельно допустимое минимальное расстояние между второй и первой точками тройки первичного отождествления, выраженное в угловых размерах кадра  $k_h = 0.1$ . При условии прямоугольного (не квадратного) кадра для определения минимального расстояния между второй и первой точками тройки значение  $k_h$  умножается на среднее значение размера кадра по обоим координатам. Минимальная длина  $k_{\Delta 12} = 0.3$  перпендикуляра, опущенного от третьей точки тройки первичного отождествления на сторону, проходящую через первую и вторую точки указанной тройки, выраженная в расстояниях между 1-й и 2-й точками тройки.

Предельно допустимое отклонение значений соответствующих углов треугольников (со стороны кадра и каталога) первичного отождествления  $\Delta\gamma = 60'$ . Предельное максимальное значение расстояния между элементами отождествляемой пары, при которой отождествляемая пара считается допустимой  $\Delta r_{ident} = 10$  пикселей. Предельное минимальное отношение количества допустимых пар к размеру множества  $\Omega_{bl100}$  составляет  $v_{\min ident} = 0.7$

**Определение предельно допустимого отклонения значений соответствующих углов треугольников (со стороны кадра и каталога) первичного отождествления  $\Delta\gamma$  методом статистического моделирования.**

Ошибки определения значений углов треугольников первичного отождествления определяются ошибками оценки координат положения звезд, используемых в качестве точек-вершин данных треугольников.

Значение среднеквадратических отклонений (СКО) позиционных измерений как правило известны для заданной совокупности условий наблюдения и используемых оборудования и программного обеспечения. Так, например, для метода оценки положения объекта на ПЗС кадре, изложенного в работе [8], указанное СКО составляет  $\frac{1}{4}$  пикселя.

Два указанных утверждения позволяют использовать метод статистического моделирования [19, 47, 55, 56, 148, 149] для определения такого параметра вычислительного метода как предельно допустимое отклонение  $\Delta\gamma$  значений

соответствующих углов треугольников (со стороны кадра и каталога) первичного отождествления.

При использовании метода статистического моделирования моделируются переменные исследуемой функции (координаты вершин треугольника первичного отождествления) согласно заданным законам распределения (используется нормальное распределение ошибок с нулевым средним и заданной СКО), а значения функции (углы треугольника) вычисляются согласно её определению. Далее вычисляются необходимые статистические характеристики значений функции [41, 105, 106, 182].

В работе для проведения статистического моделирования [119, 120] при моделировании измерений, используемых как вершины треугольников первичного отождествления, применялись метод нормальной аппроксимации [41, 122] и метод Ziggurat [126, 159], генерирующие случайные величины  $N_x(0, 1)$ , распределенные по нормальному закону с нулевым средним и единичной дисперсией. Для моделирования случайной величины, распределенной по нормальному закону  $N_x(m, \sigma^2)$  с математическим ожиданием  $m$  и среднеквадратическим отклонением  $\sigma$ , указанный выше результат моделирования случайной величины умножается на значение среднеквадратического отклонения  $\sigma$ , а затем к нему прибавляется значение математического ожидания  $m$ :

$$N_x(m, \sigma^2) = \sigma \cdot N_x(0, 1) + m. \quad (2.66)$$

После моделирования координат вершин треугольников первичного отождествления определяются значения их углов, согласно выражений (2.55)–(2.60). В качестве предельно допустимого отклонения значений соответствующих углов треугольников (со стороны кадра и каталога) первичного отождествления использовался квантиль на уровне 0.99 модуля ошибки определения значения угла. Выбор такой статистической характеристики случайной величины

[80, 111] значения угла треугольника первичного отождествления в качестве предельно допустимого отклонения его значений обосновано предположением, что в качестве точек треугольников первичного отождествления не могут быть использованы измерения с аномально большими отклонениями.

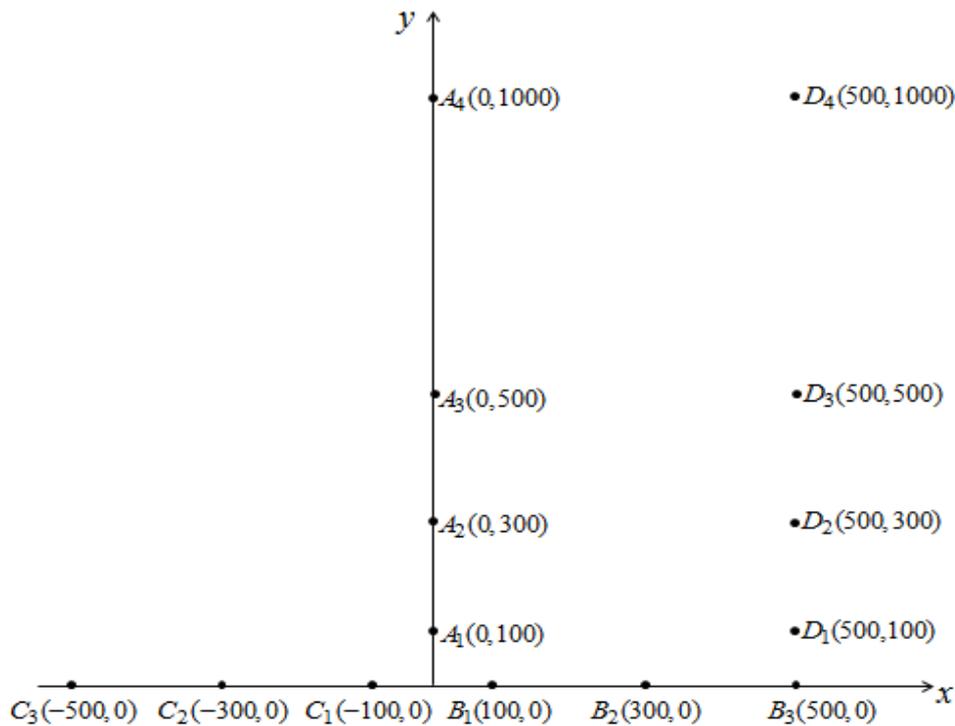


Рисунок 2.14 – Модельные треугольники первичного отождествления

Для моделирования использовались несколько модельных треугольников, все вершины которых отображены на рисунке 2.14. В качестве основания всегда использовались точки, лежащие на оси абсцисс. При этом длина основания составляла 200, 600 и 1000 пикселей. Возможной третьей вершине треугольника соответствуют точки, лежащие на рис. 2 вне оси абсцисс. Возможная длина высоты, соответствующей третьей вершине соответствовала значению 100, 300, 500, 1000 пикселей. Таким образом, основаниями исследуемых треугольников являлись отрезки:  $C_1B_1$ ,  $C_2B_2$ ,  $C_3B_3$ . В качестве третьих точек (вершин) треугольников использовались точки  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ ,  $A_4$ ,  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$ ,  $D_4$ . Всего в исследовании были использованы 24 треугольника:  $C_1A_1B_1$ ,  $C_1A_2B_1$ ,  $C_1A_3B_1$ ,

$C_1A_4B_1, C_1D_1B_1, C_1D_2B_1, C_1D_3B_1, C_1D_4B_1, C_2A_1B_2, C_2A_2B_2, C_2A_3B_2,$   
 $C_2A_4B_2, C_2D_1B_2, C_2D_2B_2, C_2D_3B_2, C_2D_4B_2, C_3A_1B_3, C_3A_2B_3, C_3A_3B_3,$   
 $C_3A_4B_3, C_3D_1B_3, C_3D_2B_3, C_3D_3B_3, C_3D_4B_3.$

Таблица 2.1 – Значения квантилей на уровне 0.99 модуля ошибки определения значения угла

№	Треуголь- ник	Длина основания, пиксели	Длина высоты, пиксели	Квантили ошибок опре- деления углов треуголь- ника, угловые минуты		
				$\Delta\gamma_1$	$\Delta\gamma_2$	$\Delta\gamma_3$
1.	$C_1A_1B_1$	200	100	35.04	34.74	31.62
2.	$C_1A_2B_1$	200	300	25.50	35.16	23.88
3.	$C_1A_3B_1$	200	500	24.30	34.74	23.40
4.	$C_1A_4B_1$	200	1000	23.76	35.34	23.16
5.	$C_1D_1B_1$	200	100	23.64	34.68	24.18
6.	$C_1D_2B_1$	200	300	23.70	34.98	23.82
7.	$C_1D_3B_1$	200	500	23.58	34.98	23.70
8.	$C_1D_4B_1$	200	1000	23.64	34.92	23.28
9.	$C_2A_1B_2$	600	100	25.56	11.64	23.94
10.	$C_2A_2B_2$	600	300	11.58	11.70	10.56
11.	$C_2A_3B_2$	600	500	9.48	11.70	8.76
12.	$C_2A_4B_2$	600	1000	8.34	11.64	7.98
13.	$C_2D_1B_2$	600	100	8.70	11.64	9.42
14.	$C_2D_2B_2$	600	300	8.64	11.64	8.94
15.	$C_2D_3B_2$	600	500	8.52	11.70	8.46
16.	$C_2D_4B_2$	600	1000	8.16	11.64	8.04
17.	$C_3A_1B_3$	1000	100	24.35	7.02	23.52
18.	$C_3A_2B_3$	1000	300	9.54	6.96	8.76
19.	$C_3A_3B_3$	1000	500	7.02	6.96	6.36
20.	$C_3A_4B_3$	1000	1000	5.46	6.96	5.04
21.	$C_3D_1B_3$	1000	100	6.30	6.96	6.78
22.	$C_3D_2B_3$	1000	300	5.94	6.96	6.18
23.	$C_3D_3B_3$	1000	500	5.70	7.02	5.70
24.	$C_3D_4B_3$	1000	1000	5.22	7.02	5.04

Значения квантилей на уровне 0.99 модуля ошибки определения значения угла, полученные в результате статистического моделирования, приведены в таблице 2.1. Анализ указанных данных свидетельствует об обоснованности выбранного параметра вычислительного метода  $\Delta\gamma = 60'$ .

## Выводы по разделу 2

1. Уточнены выражения для аналитического расчета отклонений различных оценок положения звездного объекта в экваториальной системе координат, минимум суммы которых является критерием совершенного паросочетания в задаче отождествления астрономического ПЗС-кадра со звездным каталогом. Использование традиционных выражений, как показал приведенный в работе анализ, не всегда оправдано, а также неприемлем при наблюдении небесных объектов в полярных областях, что особенно важно для астрономов-наблюдателей при проведении современных исследований.

2. Разработан вычислительный метод частного предварительного отождествления измерений кадров одной серии. Разработанный метод используется для получения начального приближения задачи отождествления, то есть для нахождения начального приближения параметров попарного соответствия между двумя множествами измерений, сформированными на двух кадрах.

3. Разработан вычислительный метод полного предварительного отождествления цифровых кадров с существенной неопределенностью их параметров. Разработанный вычислительный метод предназначен для определения начального приближения параметров при отождествлении измерений кадра со звездами каталога с существенной неопределенностью их параметров. Данная неопределенность связана с большими ошибками в задании масштаба изображения (фокусного расстояния используемого телескопа) и координат наведения телескопа.

Материалы раздела опубликованы в работах [7, 24-32, 174, 187, 190, 191].

### РАЗДЕЛ 3

## РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МЕТОДОВ АВТОМАТИЧЕСКОГО ВЫБОРА ОПОРНЫХ ЗВЕЗД НА ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ

### 3.1 Вычислительный метод автоматического выбора опорных звезд на цифровых изображениях

Метод выбора опорных звезд наравне с методами определения углового положения объектов в пространстве по данным изображениям определяет точность указанных астрометрических наблюдений звезд [147, 184].

Методы частного предварительного (подраздел 2.2) или полного предварительного (подраздел 2.3) отождествления позволяют получить линейные постоянные пластинки  $(a_{pl1}; b_{pl1}; c_{pl1}, b_{pl1}, c_{pl1})$  и  $(a_{pl2}; b_{pl2}; c_{pl2}, b_{pl2}, c_{pl2})$ , определяющие связь между тангенциальной (идеальной) системой координат и системой координат цифрового кадра [26, 29, 32]:

$$\begin{cases} \xi = a_{pl1} \cdot x + b_{pl1} \cdot y + c_{pl1}; \\ \eta = a_{pl2} \cdot x + b_{pl2} \cdot y + c_{pl2}, \end{cases} \quad (3.1)$$

где  $\xi$  и  $\eta$  – идеальные (тангенциальные) координаты опорных звезд;

$x, y$  – измеренные координаты опорных звезд в системе координат цифрового кадра.

Наличие линейных постоянных пластинок позволяет получить оценки экваториальных координат объектов кадра, в соответствии с выражением [33, 35]:

$$\begin{cases} \alpha = \alpha_{00} + \operatorname{arctg}\left(\frac{-\xi}{\cos \delta_{00} - \eta \sin \delta_{00}}\right); \\ \delta = \operatorname{arcsin} \frac{\eta \cos \delta_{00} + \sin \delta_{00}}{\sqrt{1 + \xi^2 + \eta^2}}, \end{cases} \quad (3.2)$$

где  $\alpha_{00}$ ,  $\delta_{00}$  – экваториальные координаты оптического центра ПЗС-матрицы.

Линейных постоянных пластинок недостаточно для отождествления формуляров каталога и измерений кадра при больших размерах поля зрения. С их использованием, как правило, отождествляются только звезды, соответствующие изображениям в центральной части кадра. Чаще всего [66] при итоговом пересчете координат СК цифрового кадра, в экваториальные координаты используется кубическая модель постоянных пластинки [33, 39, 66], обеспечивающая надежное отождествление и измерение положение на всем кадре. В свою очередь для надежного получения кубических постоянных пластинки необходимо больше пар формуляр каталога – измерение кадра. Однако необходимое для этого количество пар нельзя отождествить с использованием линейных постоянных пластинок (подраздел 1.3).

Таким образом, имеет место противоречие между необходимостью использовать кубической (не менее) модели постоянных пластинки и малым количеством отождествленных пар «измерение – формуляр» на предварительных этапах частного предварительного или полного предварительного отождествления измерений кадра и формуляров каталога.

**Суть метода отбора опорных звезд на цифровых кадрах.** Выходом из сложившегося противоречия является многоэтапное усложнение параметров постоянных пластинки (увеличение порядка постоянных пластинки [66] с уточнением их параметров) с одновременным увеличением количества используемых для их расчета пар.

Отождествление на каждом этапе производится в СК цифрового кадра.

Для этого с использованием постоянных пластинки экваториальные координаты звезд пересчитываются в данную СК. При этом вес гипотез о параметрах отождествления кадра и каталога (весами гипотез являются отклонения между угловыми положениями объектов в измерениях кадров и формулярах каталога) считается в экваториальных координатах. Связано это с тем, что обратный пересчет экваториальных координат в координаты СК цифрового кадра обладает большими ошибками. Для пересчета измерений в экваториальные координаты используются линейные, а в последующем – кубические постоянные пластинки.

В действующей версии метода отбора опорных звезд используется три этапа. На первом отбирается  $N_{mia}$  измерений кадра и  $N_{st}$  звезд каталога. На каждом следующем шаге количество измерений увеличивается на  $\Delta N_{mia}$  измерений и  $\Delta N_{st}$  звезд.

Для отбора звезд каталога на этапах метода выбора опорных звезд их множество упорядочивается по блеску. Множество измерений кадра упорядочивается по значению яркости изображения объектов.

**Равномерное распределение кандидатов в опорные звезды на цифровом кадре.** Для обеспечения практически равной точности измерений координат объектов на всем кадре целесообразно опорные звезды распределить равномерно на кадре. Равномерное распределение отождествленных пар на всем кадре обеспечит практически равную точность определения экваториальных координат объектов на всем кадре. Очевидно, что концентрация опорных звезд в каком-то участке кадра (например, в центре) повышает точность измерений этого участка кадра за счет ее снижения в других областях кадра (рис. 3.1).

Иными словами, количество опорных звезд в той или иной области кадра можно считать ее весом, значимостью в сумме квадратов отклонений, используемых при расчете постоянных пластинок.

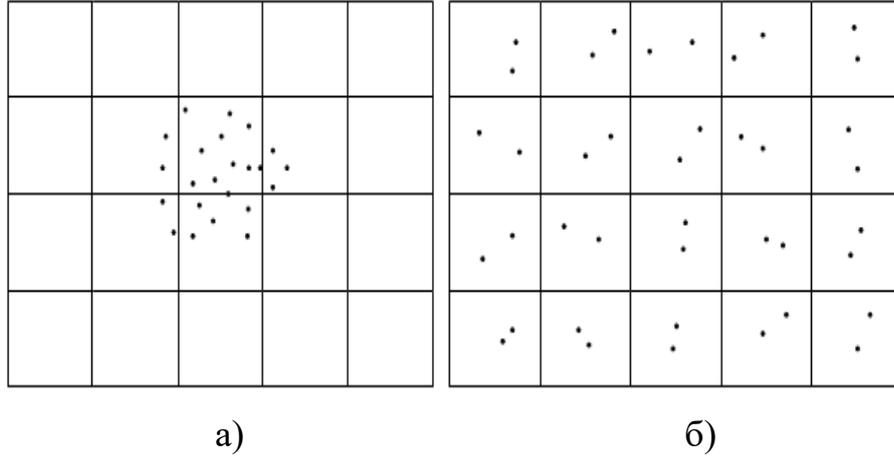


Рисунок 3.1 – а) Положение самый ярких измерений на кадре, б) Равномерное распределение опорных звезд на кадре

Кроме того, равномерное распределение отождествленных пар на кадре помогает избежать случаев, соответствующих наличию в одной области кадра большого количества «ярких» измерений/звезд. Примером такого случая является пролет яркого ИСЗ (рис. 3.3, 3.4). Если указанные случаи не исключаются из рассмотрения, то достаточно часто возникают сбои при идентификации/поиске известных объектов и отождествление целых кадров становится ненадежным.

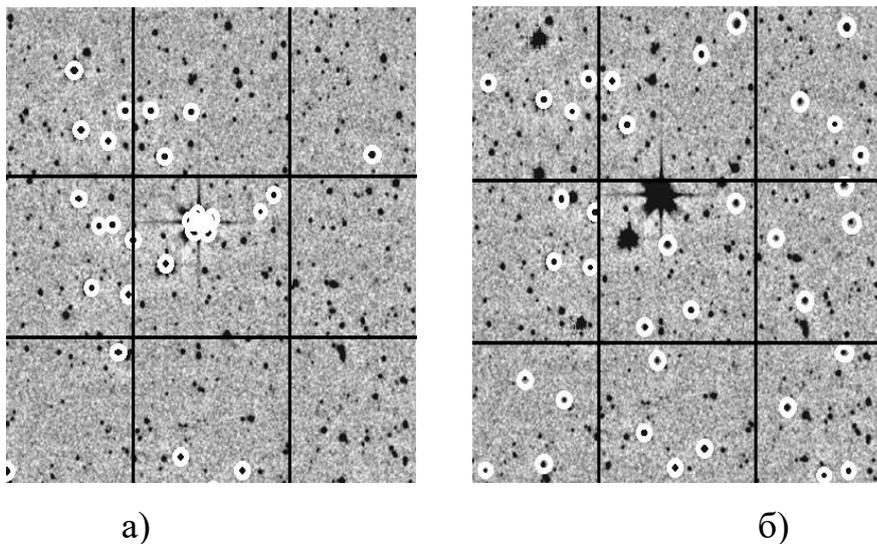


Рисунок 3.2 – а) Положение самый ярких измерений на кадре, б) Равномерное распределение опорных звезд на кадре

В предлагаемом в работе методе для равномерного распределения отождествленных пар на кадре при выборе звезд для формирования постоянных пластинок (при выборе кандидатов в опорные звезды) проводится фрагментация кадра. В каждом фрагменте кадра в качестве кандидатов в опорные звезды отбирается одинаковое количество звезд. Иными словами, кадр делится на  $M_{reg} \times M_{reg}$  ( $M_{reg}^2$ ) частей. Заданное количество измерений кадра  $N_{mia}$  и звезд (формуляров каталога)  $N_{st}$  делится на количество фрагментов кадра, и в каждом таком фрагменте отбираются  $N_{mia}/M_{reg}^2$ ,  $N_{st}/M_{reg}^2$  самых ярких измерений/звезд кадра/каталога.

Таблица 3.1 – Пример распределения опорных звезд на кадре ( $M_{reg} = 9$ )

9	9	8	13	6	10	10	8	8
7	7	9	11	9	8	8	17	9
7	12	8	12	11	8	10	7	9
10	10	7	10	11	10	11	11	8
11	8	6	6	5	9	9	6	5
10	8	7	11	11	13	3	11	12
7	11	17	9	10	12	10	14	13
7	10	7	9	10	10	10	10	11
13	6	13	13	12	9	5	9	10
0	3	0	0	0	0	0	0	0

В свою очередь, на втором и третьем этапе метода в каждом фрагменте кадра дополнительно отбираются очередные  $\Delta N_{mia}/M_{reg}^2$  и  $\Delta N_{st}/M_{reg}^2$  самых ярких измерений кадра и формуляров каталога соответственно.

К сожалению, при действующей реализации предлагаемого метода отбора опорных звезд, равномерно отбираются только кандидаты в опорные звезды.

При отборе опорных звезд из множества кандидатов, контроль равномерности не производится (табл. 3.1).

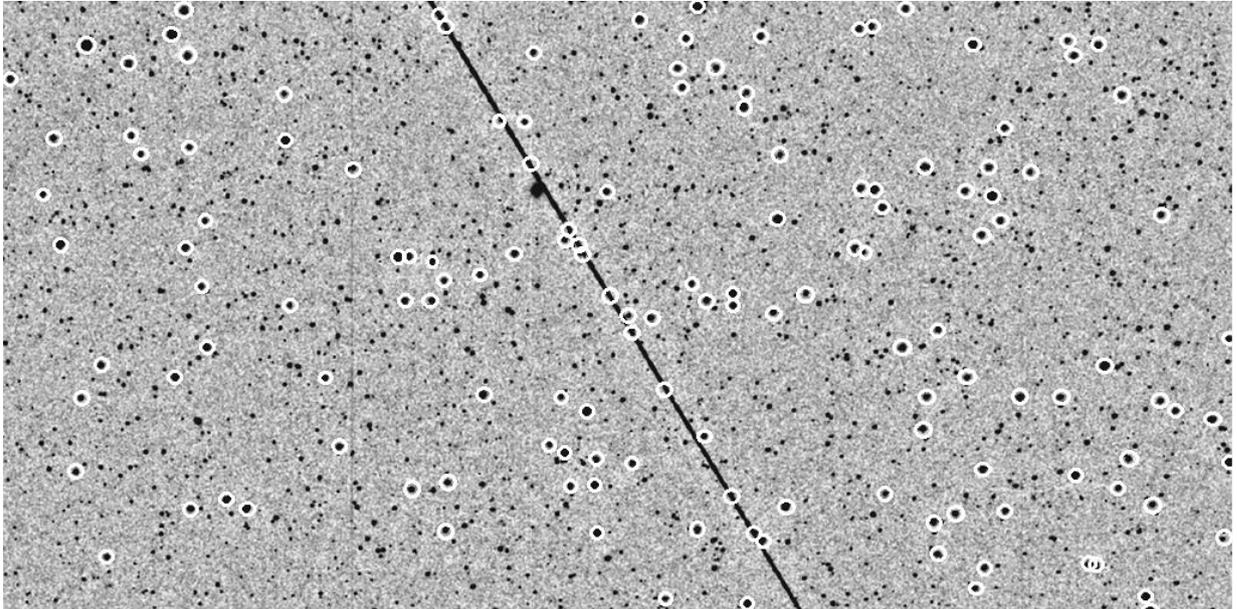


Рисунок 3.3 – Отображение на цифровом кадре самых ярких звезд

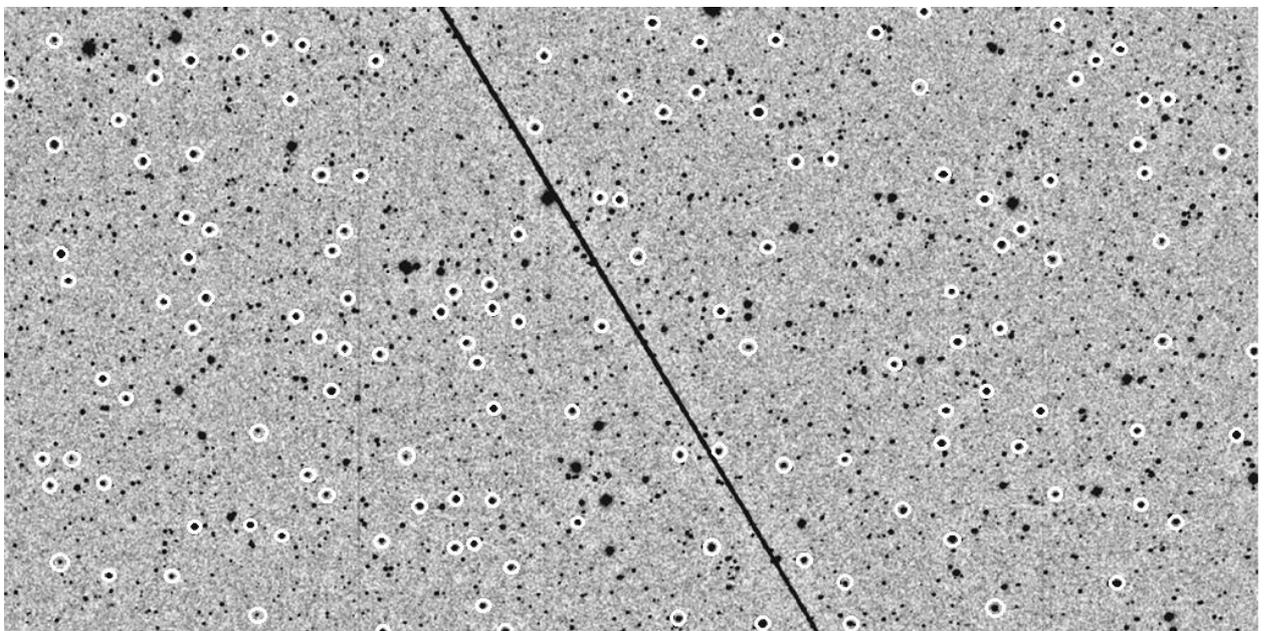


Рисунок 3.4 – Отображение на цифровом кадре самых ярких опорных звезд

**Отбраковка кандидатов в опорные звезды.** На каждом этапе метода отбора опорных звезд из множества кандидатов исключаются измерения близ-

ких объектов (расстояние между которыми не превышает наперед заданную величину  $r_{mea\_group}$ ). Иными словами,  $i$ -е и  $m$ -е измерения кадра исключаются из кандидатов в опорные звезды, если выполняется условие:

$$\sqrt{(x_{meainfr} - x_{meamnfr})^2 + (y_{meainfr} - y_{meamnfr})^2} \leq r_{mea\_group}, \quad (3.3)$$

где  $x_{meamnfr}$ ,  $y_{meamnfr}$  – координаты объектов, содержащиеся в измерениях близких объектов в СК ПЗС-кадра.

Также пара исключается из рассмотрения, если ей соответствует объект каталога с находящимся в его окрестности еще одним объектом каталога с измеримым или большим блеском. Иными словами, бракуются звезды используемого каталога при их принадлежности сгусткам/ кластерам/ компактным группам звезд, согласно данным используемого каталога. Критерием такой принадлежности является наличие рядом с отобранной звездой любой другой звезды на расстоянии меньше чем наперед заданное значение  $r_{star\_group}$ :

$$\sqrt{(\alpha_{catj} - \alpha_{catl})^2 + (\delta_{catj} - \delta_{catl})^2} \leq r_{star\_group}. \quad (3.4)$$

Так же исключаются измерения объектов, изображения которых не имеют пиков. Критерием отсутствия пика является приблизительное равенство яркости пика и яркости пикселей  $A_{ik}$  из области  $\Omega_{peak}$  размера  $C_{peak} \times C_{peak}$  пикселей с центром в пике. Приблизительным равенством считается отличие яркости пикселей области от яркости пика не более чем на  $N_{Apeak}$  единицы яркости:

$$(A_{peak} - A_{ik}) \leq N_{Apeak} \text{ для } \forall i, k \in \Omega_{peak}. \quad (3.5)$$

Затем производится решение задачи отождествления [24] с разбиением данной задачи на частные [32], предварительной селекцией гипотез об отождествлении измерений кадра и формуляров каталога, использованием венгерского метода для внутригруппового отождествления [24].

Для улучшения показателей точности [6, 7, 51] оценок постоянных пластинок после решения задачи отождествления производится отбраковка значительного количества отождествленных пар. Решающей статистикой для отбраковки пар служит суммарное отклонение  $\Delta_{\alpha\delta jk}$  между оценками экваториальных координат в отождествленной паре «измерение-формуляр»:

$$\Delta_{\alpha\delta jk} = \sqrt{(\alpha_{catj(k)} - \alpha_{meainfr(k)})^2 + (\delta_{catj(k)} - \delta_{meainfr(k)})^2}. \quad (3.6)$$

Пара отбраковывается, если значение  $\Delta_{\alpha\delta jk}$  превышает критическое значение:

$$\Delta_{\alpha\delta jk} > K_{rej} \hat{\Delta}_{\alpha\delta}, \quad (3.7)$$

$$\text{где } \hat{\Delta}_{\alpha\delta} = \sqrt{\frac{1}{N_{cou}} \left( \left( \sum_{k=1}^{N_{cou}} \alpha_{catj(k)} - \alpha_{meainfr(k)} \right)^2 + (\delta_{catj(k)} + \delta_{meainfr(k)})^2 \right)} \quad (3.8)$$

– средний, на множестве выбранных отождествленных пар, модуль отклонения отождествленной пары в экваториальных координатах;

$N_{cou}$  – количество отождествленных пар «измерение-формуляр», используемых для расчета постоянных пластины;

$\alpha_{catj(k)}$ ,  $\delta_{catj(k)}$  – оценки прямого восхождения и склонения объекта из  $j$ -го формуляра каталога;

$\alpha_{meainfr(k)}$ ,  $\delta_{meainfr(k)}$  – оценки прямого восхождения и склонения  $i$ -го

измерения  $n_{fr}$ -го кадра;

$k$  – номер отождествленной пары «измерение-формуляр»;

$K_{rej}$  – коэффициент правила отбраковки пар «измерение-формуляр» из множества опорных звезд.

При  $K_{rej} = 1$  для расчета постоянных пластинки (для отбора в опорные звезды) отбираются только пары, модуль отклонения которых меньше среднего значения модуля отклонения отождествленной пары в экваториальных координатах в выбранной совокупности отождествленных пар.

Финальный расчет постоянных пластинок [33, 39, 66] производится по сформированным и не отбракованным парам измерение кадра – формуляр каталога по окончанию третьего этапа метода отбора опорных звезд (рис. 3.7).

В результате использования указанного выше цензурирования претендентов в опорные звезды на исследуемом кадре не всегда опорными становятся самые яркие звезды кадра, не смотря на изначально кажущуюся очевидность такого утверждения (рис. 3.5, 3.6).

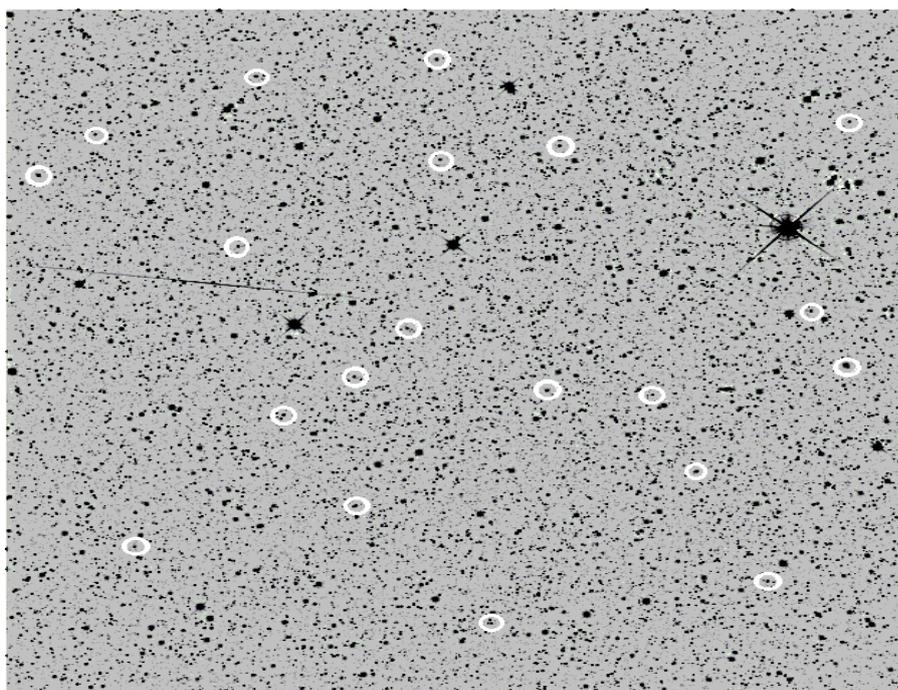


Рисунок 3.5 – Отображение на цифровом кадре 20 самых ярких опорных звезд

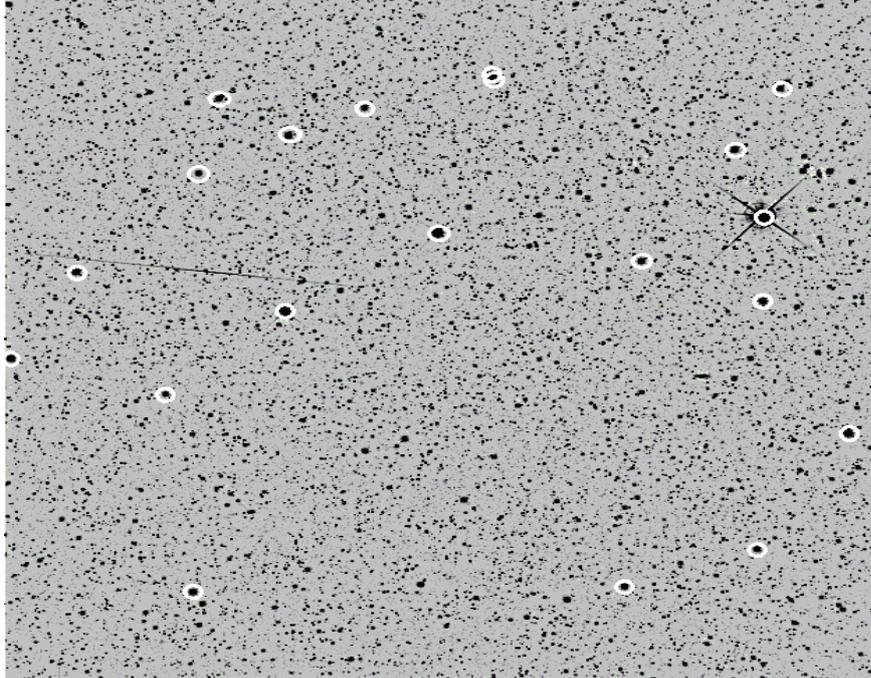


Рисунок 3.6 – Отображение на цифровом кадре 20 самых ярких звезд

Рисунок 3.7 – UML диаграмма вычислительного метода автоматического выбора опорных звезд на цифровых изображениях

### **Вычислительный метод автоматического выбора опорных звезд**

1. Фрагментация кадра для равномерного распределения кандидатов в опорные звезды на кадре.

2. На каждом последующем этапе метода выполняется такая последовательность операций.

2.1 Отбор измерений кадра и формуляров каталога для их взаимного отождествления.

2.1.1. На первом этапе метода в каждом фрагменте кадра отбираются  $N_{mia}/M_{reg}^2$  самых ярких измерений кадра и  $N_{st}/M_{reg}^2$  самых ярких звезд каталога исследуемого участка небесной сферы.

2.1.2. На втором и третьем этапе метода в каждом фрагменте кадра дополнительно отбираются очередные  $\Delta N_{mia}/M_{reg}^2$  и  $\Delta N_{st}/M_{reg}^2$  самых ярких измерений кадра и формуляров каталога соответственно.

2.2. Отбраковка кандидатов в опорные звезды.

2.2.1 Отбраковка из выбранных кандидатов в опорные звезды измерений близких объектов (3.3).

2.2.2. Отбраковка звезд каталога при их принадлежности кластерам/звезд, согласно (3.4).

2.2.3. Отбраковка измерений объектов, изображения которых не имеют пиков (3.5).

2.3. Отождествление выбранных измерений кадра и формуляров каталога с формированием отождествленных пар (подразделы 2.2 и 2.3).

2.4 Расчет постоянных пластинки (на каждом следующем шаге с моделью большей степени).

2.5. Отбраковка отождествленных пар по суммарному отклонению  $\Delta_{\alpha\delta jk}$  между оценками экваториальных координат в отождествленной паре «измерение-формуляр» (3.7), (3.8).

3. Финальный расчет постоянных пластинок.

### **3.2 Метод исследования показателей точности оценок углового положения опорных звезд в пространстве по данным изображений**

Требования к точности астрономических наблюдений продолжают расти. Особенно их рост заметен в области астероидных наблюдений [87, 110, 117].

Исследование показателей точности оценок угловых положений опорных звезд на ПЗС-кадрах может быть весьма полезно для модернизации используемого обсерваториями программного обеспечения (ПО) и повышения за счет этого точности наблюдений небесных объектов.

Актуальным является разработка методов анализа показателей точности измерений угловых положений опорных звезд с расширенным множеством формируемых показателей точности. А также создание научно-исследовательского программного инструмента, который проводит детальный

анализ показателей точности измерений угловых положений опорных звезд на расширенном множестве анализируемых подвыборок измерений и кадров.

Подраздел посвящен исследованиям показателей точности оценок углового положения опорных звезд на заданной совокупности ПЗС.

Изучение небесных объектов в основном проводится с использованием средств пассивного оптического наблюдения – телескопов, оснащенных ПЗС матрицей. Получаемые ПЗС-кадры обрабатываются специальными программами, которые формируют совокупность измерений. Данные измерения содержат погрешности, которые получаются вследствие неблагоприятных погодных условий, сбоя в работе аппаратуры, несовершенства инструментов наблюдений и программных средств обработки ПЗС-кадров.

**Источники эталонных данных.** Для расчета отклонений измерений необходимо получить эталонные значения координат используемых опорных звезд. В качестве эталонных значений угловых положений опорных звезд, использовались данные из астрометрического каталога UCAC 4.0 [208, 209]. Его средняя плотность составляет более 2000 звезд на квадратный градус. Каталог содержит данные о более чем 113 миллионов звезд и покрывает небо по блеску до 16 зв. вел. Ошибка положения любого объект не превышает 20 угловых миллисекунд. Ошибка собственного движения объекта составляет от 2 до 8 угловых миллисекунд в год.

В качестве эталонных значений блеска объекта использовались данные фотометрического каталога USNO B1.0 [101]. Каталог содержит оценки угловых положений и блеска более одного миллиарда объектов, которые были сформированы на основе 3,6 миллиардов отдельных измерений [101].

**Показатели точности оценок углового положения и блеска опорных звезд кадра.** Исследовались такие показатели точности измерений опорных звезд: оценки среднего отклонения оценок экваториальных координат между каталожными и измеренными значениями  $\bar{\Delta}_\alpha$ ,  $\bar{\Delta}_\delta$ ; среднеквадратического отклонения (СКО)  $\sigma_\alpha$ ,  $\sigma_\delta$ ,  $\sigma_m$  и оценка среднего отклонения оценки блеска меж-

ду каталожным и измеренным значениями  $\bar{\Delta}_m$ . Также определялись оценки коэффициентов асимметрии и эксцесса измерений экваториальных координат используемых опорных звезд.

Отклонения между измерениями и каталожными значениями оценок экваториальных координат (прямого восхождения и склонения) и блеска используемых опорных звезд представляются соответственно выражениям:

$$\Delta_{\alpha i} = (\alpha_{j_1(i)} - \alpha_{j_2(i)}) * \cos \delta_{j_1(i)}; \quad (3.9)$$

$$\Delta_{\delta i} = \delta_{j_1(i)} - \delta_{j_2(i)}; \quad (3.10)$$

$$\Delta_{mi} = m_{j_1(i)} - m_{j_2(i)}, \quad (3.11)$$

где  $i$  – номер рассматриваемой пары измерение кадра – формуляр каталога;

$\alpha_{j_1(i)}$ ,  $\alpha_{j_2(i)}$ ,  $\delta_{j_1(i)}$ ,  $\delta_{j_2(i)}$  – прямое восхождение и склонение  $j_1$ -го измерения кадра и  $j_2$ -го формуляра каталога, составляющих в  $i$ -ю отождествленную пару;

$m_{j_1(i)}$ ,  $m_{j_2(i)}$ ,  $m_{j_{NF}(i)}$  – оценка значения блеска  $j_1$ -го измерения кадра и  $j_2$ -го формуляра каталога, входящих в  $i$ -ю отождествленную пару;

$j_1$  – номер измерения, сформированного на исследуемом кадре во внутренней нумерации измерений на кадре;

$j_2$  – номер формуляра используемого каталога во внутренней нумерации формуляров каталога.

Отклонения между измерениями и каталожными значениями оценок  $X$  и  $Y$  координат используемых опорных звезд в системе координат ПЗС-кадра (прямоугольная система координат ПЗС-кадра с центром в левом верхнем углу ПЗС-кадра) вычисляются согласно формулам:

$$\Delta_{Xi} = X_{j_1(i)} - X_{j_2(i)}; \quad (3.12)$$

$$\Delta_{Yi} = Y_{j_1(i)} - Y_{j_2(i)}, \quad (3.13)$$

где  $X_{j_1(i)}$ ,  $X_{j_2(i)}$ ,  $Y_{j_1(i)}$ ,  $Y_{j_2(i)}$  – координаты X и Y  $j_1$ -го измерения кадра и  $j_2$ -го формуляра каталога, составляющих в  $i$ -ю отождествленную пару.

Оценка среднего отклонения (математического ожидания отклонений) оценок экваториальных координат и блеска используемых опорных звезд определялось согласно выражениям [14, 15, 16]:

$$\hat{\Delta}_\alpha = \sum_{i=1}^{N_{\text{meas}}} \Delta_{\alpha i} / N_{\text{meas}}; \quad (3.14)$$

$$\hat{\Delta}_\delta = \sum_{i=1}^{N_{\text{meas}}} \Delta_{\delta i} / N_{\text{meas}}; \quad (3.15)$$

$$\hat{\Delta}_m = \sum_{i=1}^{N_{\text{meas}}} \Delta_{mi} / N_{\text{meas}}, \quad (3.16)$$

где  $N_{\text{meas}}$  – количество измерений, используемых для анализа точности оценок углового положения объектов.

Оценка среднего отклонения (математического ожидания отклонений) оценок углового положения объекта по координатам X и Y используемых опорных звезд определялось по следующим формулам [14, 15, 16]:

$$\hat{\Delta}_X = \sum_{i=1}^{N_{\text{meas}}} \Delta_{Xi} / N_{\text{meas}}; \quad (3.17)$$

$$\hat{\Delta}_Y = \sum_{i=1}^{N_{\text{meas}}} \Delta_{Yi} / N_{\text{meas}}. \quad (3.18)$$

Оценка среднеквадратичного отклонения отклонений оценок координат

по прямому восхождению и склонению а также блеску используемых опорных звезд вычислялось следующим образом [14, 15, 16]:

$$\hat{\sigma}_\alpha = \sqrt{\sum_{i=1}^{N_{\text{meas}}} (\Delta_{\alpha i} - \hat{\Delta}_\alpha)^2 / (N_{\text{meas}} - 1)}; \quad (3.19)$$

$$\hat{\sigma}_\delta = \sqrt{\sum_{i=1}^{N_{\text{meas}}} (\Delta_{\delta i} - \hat{\Delta}_\delta)^2 / (N_{\text{meas}} - 1)}; \quad (3.20)$$

$$\hat{\sigma}_m = \sqrt{\sum_{i=1}^{N_{\text{meas}}} (\Delta_{mi} - \hat{\Delta}_m)^2 / (N_{\text{meas}} - 1)}. \quad (3.21)$$

Оценка среднеквадратичного отклонения отклонений оценок координат X и Y используемых опорных звезд вычислялось аналогично [14, 15, 16]:

$$\hat{\sigma}_X = \sqrt{\sum_{i=1}^{N_{\text{meas}}} (\Delta_{Xi} - \hat{\Delta}_X)^2 / (N_{\text{meas}} - 1)}; \quad (3.22)$$

$$\hat{\sigma}_Y = \sqrt{\sum_{i=1}^{N_{\text{meas}}} (\Delta_{Yi} - \hat{\Delta}_Y)^2 / (N_{\text{meas}} - 1)}. \quad (3.23)$$

При исследовании показателей точности оценок углового положения объектов рассчитывались оценки коэффициентов асимметрии  $\hat{\gamma}_1$  экваториальных координат используемых опорных звезд [14, 15, 16]:

$$\hat{\gamma}_{\alpha 1} = \frac{\sqrt{N_{\text{meas}} (N_{\text{meas}} - 1)} \sum_{i=1}^{N_{\text{meas}}} (\Delta_{\alpha i} - \hat{\Delta}_\alpha)^3}{N_{\text{meas}} - 2 \left( \sum_{i=1}^{N_{\text{meas}}} (\Delta_{\alpha i} - \hat{\Delta}_\alpha)^2 \right)^{3/2}}; \quad (3.24)$$

$$\hat{\gamma}_{\delta 1} = \frac{\sqrt{N_{\text{meas}}(N_{\text{meas}} - 1)}}{N_{\text{meas}} - 2} \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{meas}}} (\Delta_{\delta i} - \hat{\Delta}_{\delta})^3}{\left( \sum_{i=1}^{N_{\text{meas}}} (\Delta_{\delta i} - \hat{\Delta}_{\delta})^2 \right)^{3/2}}. \quad (3.25)$$

Выражения для оценок коэффициентов эксцесса  $\hat{\gamma}_2$  [14, 15, 16] по прямому восхождению и склонению оценок координат опорных звезд имеют вид:

$$\hat{\gamma}_{\alpha 2} = \frac{N_{\text{meas}}^2 - 1}{(N_{\text{meas}} - 2)(N_{\text{meas}} - 3)} \left( \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{meas}}} (\Delta_{\alpha i} - \hat{\Delta}_{\alpha})^4}{\left( \sum_{i=1}^{N_{\text{meas}}} (\Delta_{\alpha i} - \hat{\Delta}_{\alpha})^2 \right)^2} - 3 + \frac{6}{N_{\text{meas}} + 1} \right); \quad (3.26)$$

$$\hat{\gamma}_{\delta 2} = \frac{N_{\text{meas}}^2 - 1}{(N_{\text{meas}} - 2)(N_{\text{meas}} - 3)} \left( \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{meas}}} (\Delta_{\delta i} - \hat{\Delta}_{\delta})^4}{\left( \sum_{i=1}^{N_{\text{meas}}} (\Delta_{\delta i} - \hat{\Delta}_{\delta})^2 \right)^2} - 3 + \frac{6}{N_{\text{meas}} + 1} \right). \quad (3.27)$$

Среднеквадратическое отклонение оценки коэффициентов асимметрии и эксцесса оценок экваториальных координат используемых опорных звезд вычислялись согласно выражениям [41]:

$$\sigma_{\gamma_1} = \sqrt{\frac{6(N_{\text{meas}} - 2)}{(N_{\text{meas}} + 1)(N_{\text{meas}} + 3)}}; \quad (3.28)$$

$$\sigma_{\gamma_2} = \sqrt{\frac{24N_{\text{meas}}(N_{\text{meas}} - 2)(N_{\text{meas}} - 3)}{(N_{\text{meas}} + 1)^2(N_{\text{meas}} + 3)(N_{\text{meas}} + 5)}}. \quad (3.29)$$

В работе также исследовались свойства оценок экваториальных координат (прямого восхождения и склонения) как системы случайных величин [24,

27]. Исследованию подлежали главные дисперсии, оценки ковариации и коэффициента корреляции отклонений оценок экваториальных координат используемых опорных звезд а также угол между главной осью эллипса рассеивания и осью абсцисс.

Оценка ковариации отклонений оценок экваториальных координат объекта вычислялась следующим образом [14, 15, 16]:

$$\hat{K}_{\alpha\delta} = \left[ \sum_{i=1}^N (\Delta_{\alpha i} \Delta_{\delta i}) / N_{\text{meas}} - \hat{\Delta}_{\alpha} \hat{\Delta}_{\delta} \right] \frac{N_{\text{meas}}}{N_{\text{meas}} - 1}. \quad (3.30)$$

Оценка коэффициента корреляции отклонений оценок экваториальных координат используемых опорных звезд определялась выражением [14, 15]:

$$\hat{r}_{\alpha\delta} = \hat{K}_{\alpha\delta} / \sqrt{\hat{\sigma}_{\alpha} \hat{\sigma}_{\delta}}. \quad (3.31)$$

Угол между главной осью эллипса рассеивания и осью абсцисс экваториальной СК, определяется выражением [14, 15, 16]:

$$\text{tg } 2\hat{\psi} = 2\hat{r}_{\alpha\delta} \hat{\sigma}_{\alpha} \hat{\sigma}_{\delta} / (\hat{\sigma}_{\alpha}^2 - \hat{\sigma}_{\delta}^2). \quad (3.32)$$

Главные дисперсии отклонений оценок координат по прямому восхождению и склонению используемых опорных звезд [14, 15, 16] определялись следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} (\hat{D}'_{\alpha})^2 &= \hat{\sigma}_{\alpha}^2 \cos^2 \hat{\psi} + \hat{r}_{\alpha\delta} \hat{\sigma}_{\alpha} \hat{\sigma}_{\delta} \sin 2\hat{\psi} + \hat{\sigma}_{\delta}^2 \sin^2 \hat{\psi} \\ (\hat{D}'_{\delta})^2 &= \hat{\sigma}_{\alpha}^2 \cos^2 \hat{\psi} - \hat{r}_{\alpha\delta} \hat{\sigma}_{\alpha} \hat{\sigma}_{\delta} \sin 2\hat{\psi} + \hat{\sigma}_{\delta}^2 \sin^2 \hat{\psi} \end{aligned} \right\}. \quad (3.33)$$

**Использование подвыборок измерений по различным значениям параметров.** В разных областях кадра измерения углового положения объектов

могут иметь различные показатели точности. Это может быть вызвано ошибками астрометрии, неточностями изготовления оптической системы или особенностями конкретного кадра (например, возможны виньетирование, засветка или затемнения по краям кадра). В таких случаях, для исследований можно использовать подвыборки измерений по различным значениям параметров. Включение измерений в выбранную исследователем подвыборку может производиться по таким параметрам как расстояние центра изображения объектов от центра кадра и значение видимого блеска.

При включении измерений в исследуемую подвыборку по значению видимого блеска используемых опорных звезд указывается диапазон видимого блеска объекта от минимального до максимального. Из всех измерений выбираются те, которые соответствуют заданному диапазону.

**Метод исследования точности оценок углового положения опорных звезд. Исходные данные для исследования показателей точности оценок углового положения опорных звезд.** В качестве исходных данных для исследования выступает совокупность измеренных положений (оценки положений) опорных звезд, полученных в ходе обработки группы кадров (при использовании ПО CoLiTec измеренные координаты опорных звезд находятся в файлах «UsedAstro1\_Under\_1.txt»). Файлы находятся в каталоге tmp обработанной зоны. По каждому кадру формируется один файл данного типа).

Измеренные угловые положения (оценки угловых положений) выбранных опорных звезд идентифицируются с каталожными (из выбранного астрометрического каталога, например, UCAC 4.0 [206, 207]) значениями угловых положений соответствующих звезд (звезд каталога, отождествленных с опорными).

**Метод автоматического формирования показателей точности оценок углового положения опорных звезд ПЗС-кадров.** При исследовании показателей точности оценок углового положения опорных звезд используются такие переменные (при использовании ПО CoLiTec данные переменные извлекаются из выше указанного файла):

- оценки  $X$  и  $Y$  углового положения опорной звезды на кадре (формируются при внутрикадровой обработке);
- эталонные координаты углового положения опорной звезды на кадре  $X$  и  $Y$  (из каталога UCAC 4.0);
- оценки экваториальных координат (RA, DE) опорной звезды (полученные, например, с помощью ПО CoLiTec);
- эталонные координаты опорной звезды (из каталога UCAC 4.0);
- значение блеска опорной звезды (из каталога UCAC 4.0);
- оценка яркости опорной звезды (получена при оценке параметров опорной звезды при внутрикадровой обработке);
- сумма яркостей пикселей изображения опорной звезды с вычитенной подложкой.

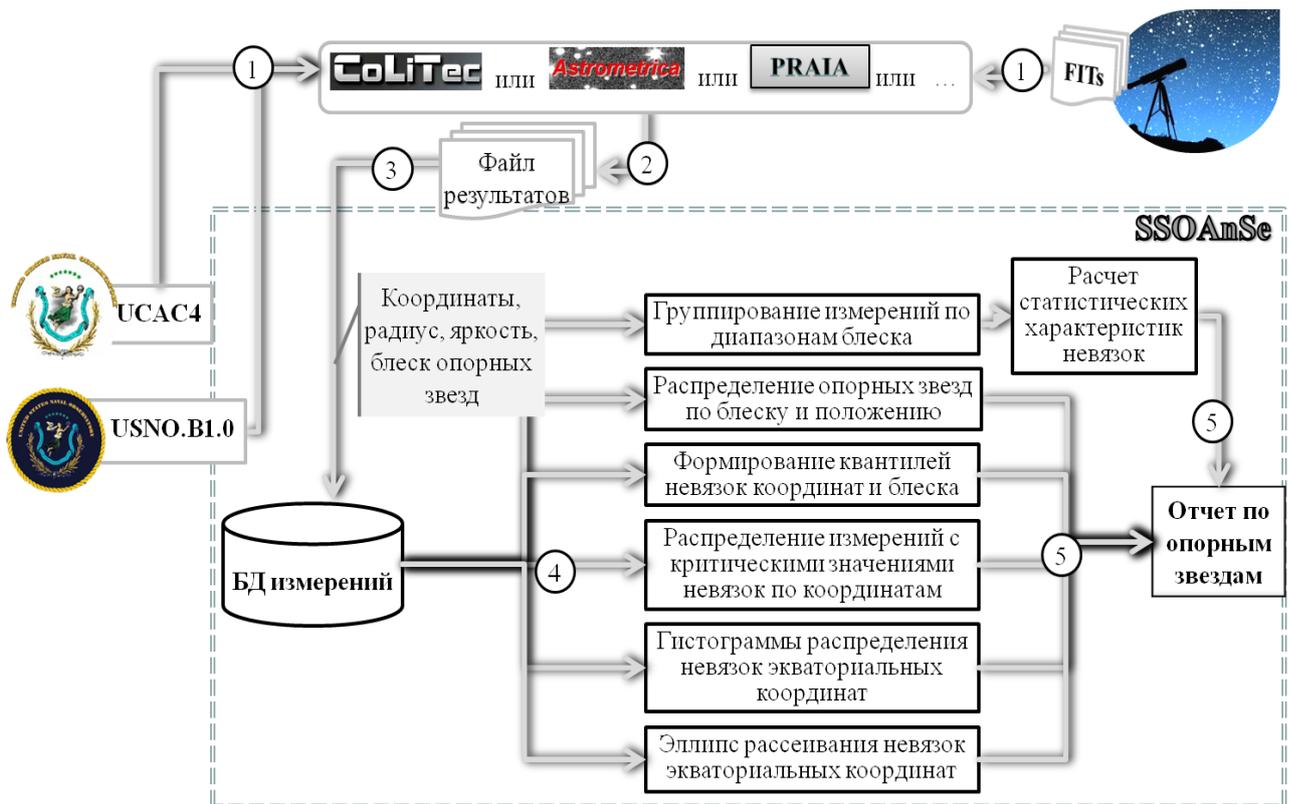


Рисунок 3.8 – Поток данных при исследовании показателей точности оценок углового положения опорных звезд

С учетом описанных выше особенностей метод исследований представ-

ляет собой следующую последовательность действий (рис. 3.8).

1. Построение гистограмм распределений опорных звезд по значениям их блеска и координат  $X$  и  $Y$ .

2. Группирование измерений по диапазонам значений видимого блеска и определение показателей точности оценок для каждого диапазона и всей совокупности измерений угловых положений опорных звезд в целом. Свойства оценок для указанных диапазонов и в целом исследуются без отбраковки значений, с отбраковкой по модулю вектора отклонений 5 %, и 10% измерений. Для каждой группы измерений производятся следующие операции (блоки 2.1–2.4).

2.1. Определение отклонений между измеренными и каталожными значениями оценок экваториальных координат ( $RA$  и  $DE$ ) опорных звезд согласно выражений (3.9), (3.10) и значениями оценок ( $X$  и  $Y$ ) координат опорных звезд в прямоугольной СК ПЗС-кадра согласно выражений (3.12), (3.13).

2.2. Определение для полученных отклонений оценки среднего смещения (математического ожидания отклонений) оценок углового положения опорных звезд по координатам  $RA$  и  $DE$  согласно выражений (3.14), (3.15), а так же  $X$  и  $Y$  опорных звезд согласно выражений (3.17), (3.18).

2.3. Определение оценок среднеквадратических отклонений невязок оценок координат по  $RA$  и  $DE$  согласно выражений (3.19), (3.20),  $X$  и  $Y$  согласно выражений (3.22), (3.23).

2.4. Определение оценок коэффициентов асимметрии согласно выражений (3.24), (3.25) и эксцесса согласно выражений (3.26), (3.27) экваториальных координат опорных звезд.

3. Формирование квантилей отклонений оценок координат  $RA$ ,  $DE$  и блеска опорных звезд.

4. Определение количества отклонений, превысивших критические значения, и процента этих отклонений от общего количества опорных звезд.

5. Построение гистограмм распределения отклонений экваториальных координат опорных звезд от блеска и координат объектов в прямоугольной СК

ПЗС -кадра (рис. 3.9).

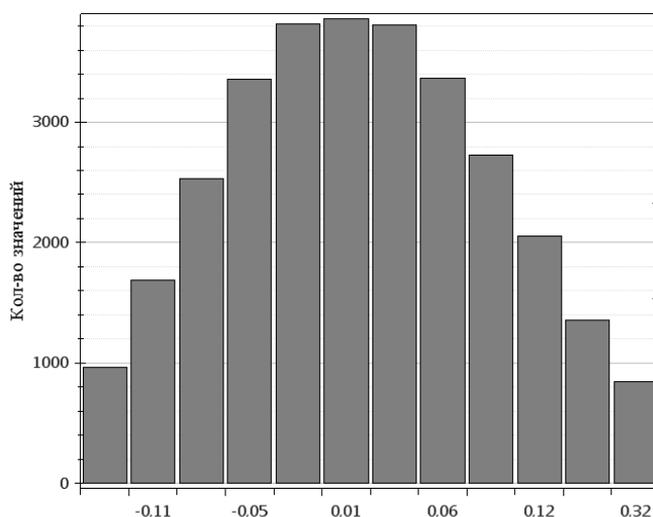


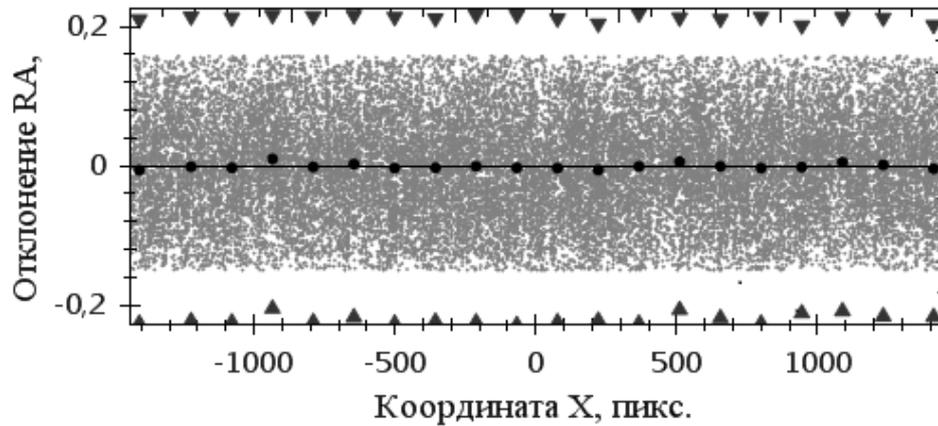
Рисунок 3.9 – Пример гистограммы распределения отклонений прямого восхождения измерений опорных звезд

7. Построение зависимости отклонений экваториальных координат от положения опорных звезд на кадре; а также построение зависимости отклонений экваториальных координат от оценки блеска объектов (табл. 3.2, рис. 3.10).

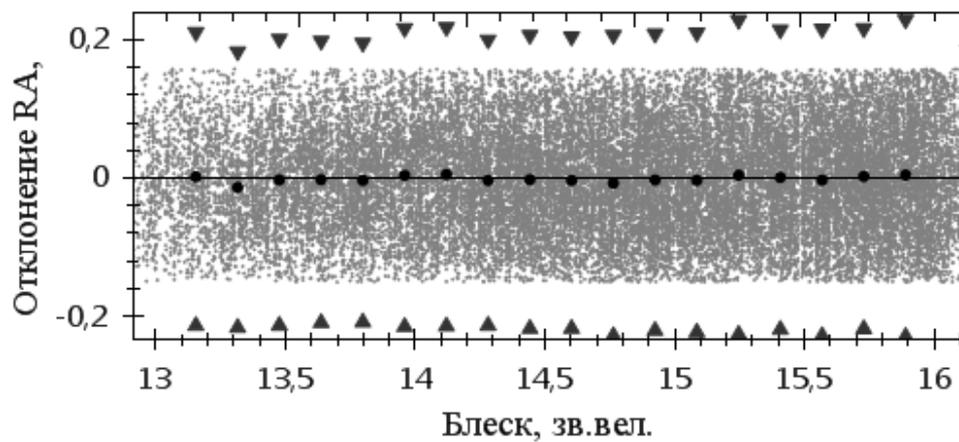
8. Построение графика эллипса рассеивания отклонений экваториальных координат (RA и DE) опорных звезд по всем измерениям.

9. Составление отчета с результатами исследований точности оценок положения опорных звезд.

Блок схема вычислительного метода исследования точности оценок углового положения опорных звезд представлена на рисунке 3.11.



а)



б)

Рисунок 3.10 – Зависимость отклонений оценок прямого восхождения а) от положения опорных звезд на кадре б) от блеска объектов

Таблица 3.2 – Основные параметры отклонений угловых положений опорных звезд в пространстве по данным изображений

Все измерения			
Обработано измерений	30391	28872	27352
Процент отбраковки худших измерений	0%	5%	10%
Среднее отклонений RA, угл. сек.	0,00	0,00	0,00
Среднее отклонений DE, угл. сек.	0,00	0,00	0,00
Среднее измерений полуширины, угл.сек.	3,18	3,18	3,17
Среднее отклонений блеск, зв.вел.	0,03	0,03	0,03
Макс. модуль отклонения RA, угл. сек.	0,32	0,15	0,13
Макс. модуль отклонения DE, угл. сек.	0,33	0,14	0,12
Мин. модуль отклонения блеска, зв.вел.	0,00	0,00	0,00
Макс. модуль отклонения блеска, зв.вел.	3,51	0,51	0,36
СКО отклонений по RA, угл. сек.	0,08	0,08	0,07

СКО отклонений по DE, угл. сек.	0,07	0,07	0,06
СКО отклонений по блеску, зв.вел.	0,38	0,38	0,37
СКО полуширины, угл.сек.	0,27	0,26	0,26

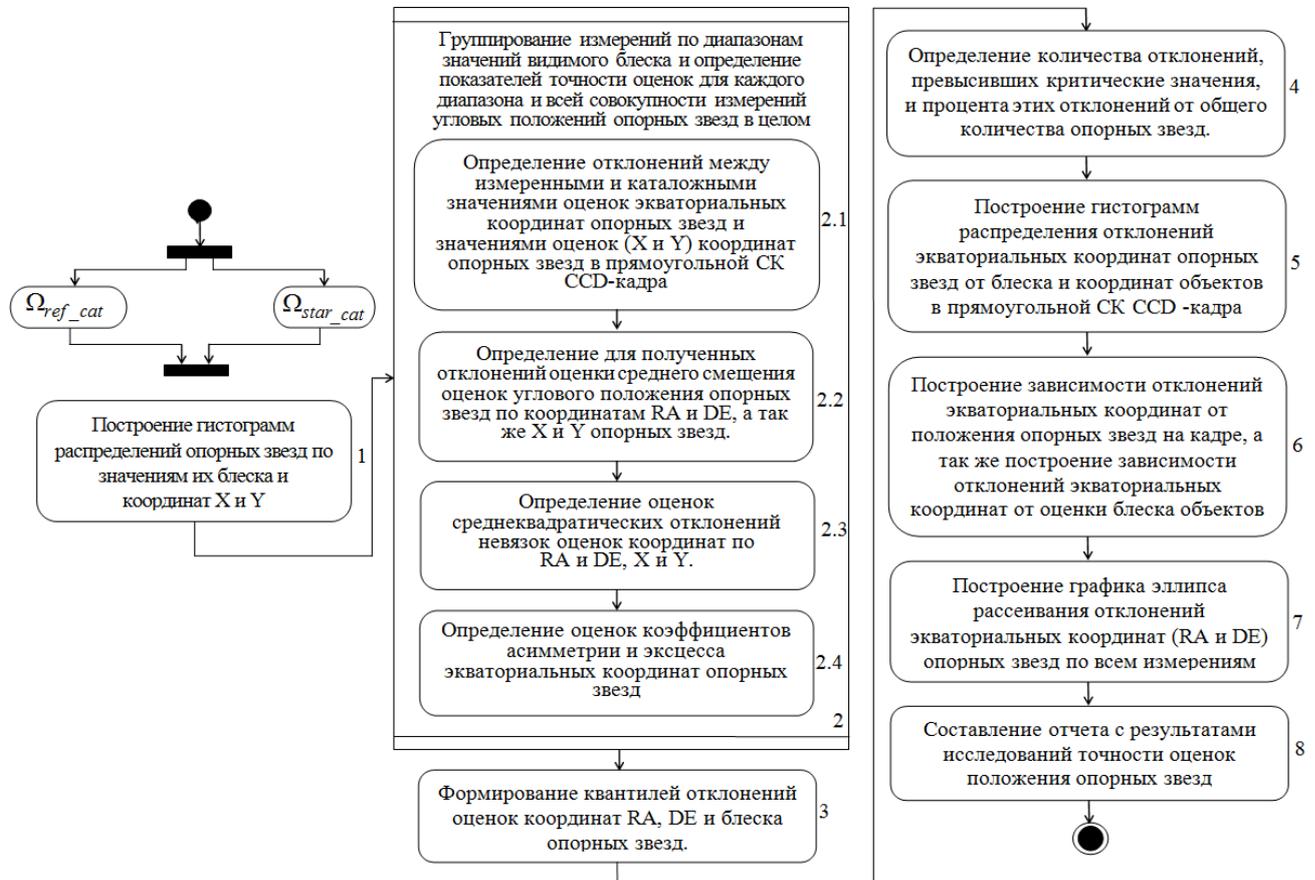


Рисунок 3.11 – UML диаграмма метода автоматического формирования показателей точности оценок углового положения опорных звезд ПЗС-кадров

Проведенный в диссертационной работе анализ показателей точности оценок углового положения объектов в пространстве по данным изображений а также исследование и оптимизация параметров вычислительного метода автоматического выбора опорных звезд, проводился с помощью программного обеспечения для исследования статистических характеристик ПЗС-измерений положения и блеска объектов Солнечной системы SSOAnSe (рис. 3.12).

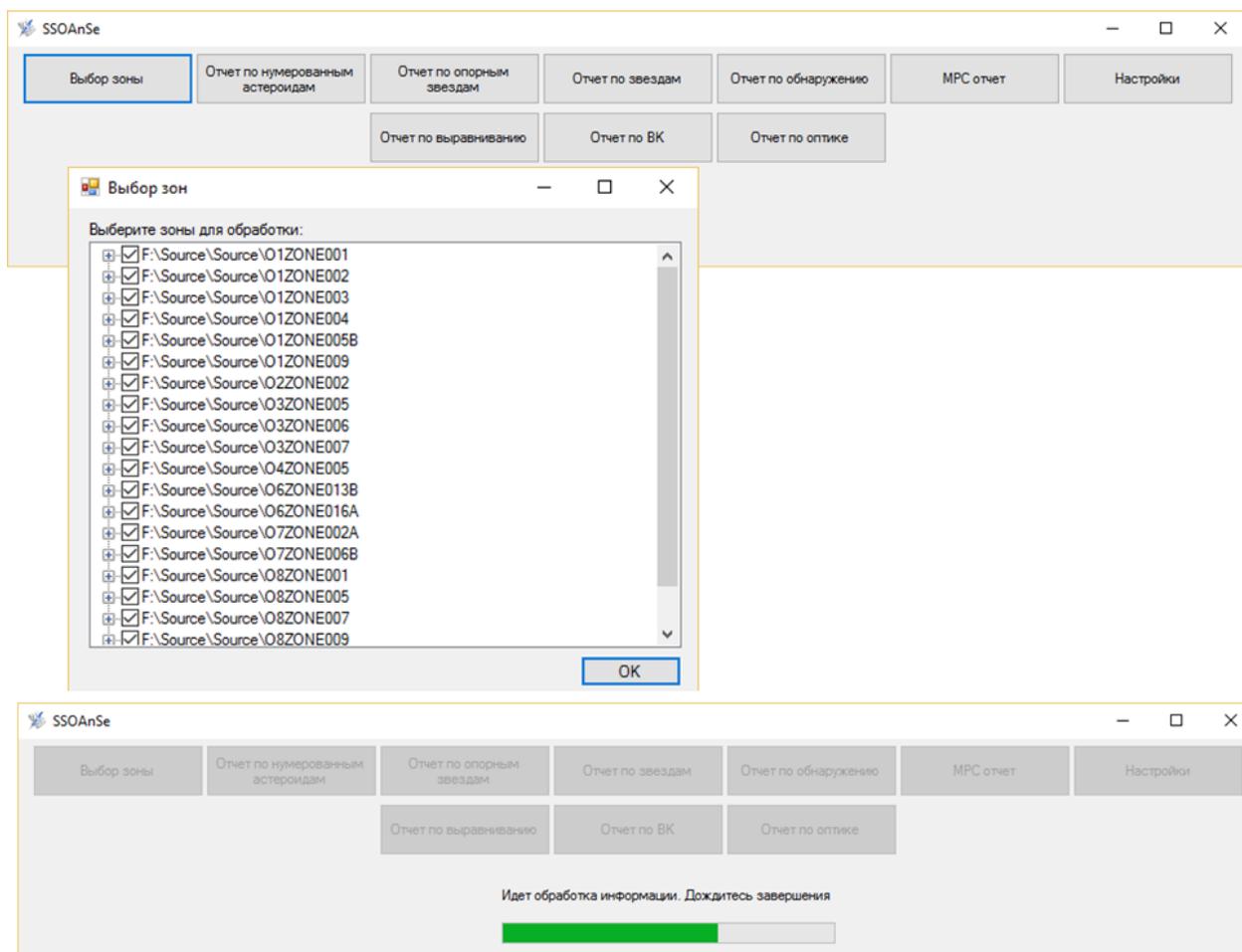


Рисунок 3.12 – Интерфейс ПО SSOAnSe.

В качестве измеренных значений SSOAnSe может принимать серии кадров, обработанных с помощью программ обработки кадров астероидных обзоров а также различных сервисов. SSOAnSe позволяет проводить анализ расширенного множества показателей точности измерения и качества обнаружения астероидов на расширенном множестве анализируемых подвыборок измерений и кадров.

Основными функциями приложения SSOAnSe являются:

- исследование точности оценок положения и блеска нумерованных астероидов, хранящихся в архиве MPC или содержащихся в измерениях, соответствующих исследуемым кадрам [141];
- исследование показателей точности оценок положения опорных звезд;
- исследование показателей качества обнаружения ССО;

– исследование показателей точности оценок положения звезд, выбранных для астроредукции кадра;

– исследование показателей точности оценок положения звезд, отождествленных с существующими звездными каталогами.

В настоящее время ПО SSOAnSe используется для оценки характеристик работы ПО CoLiTec.

### **3.3 Реализация вычислительного метода автоматического выбора опорных звезд на цифровых изображениях в программном комплексе автоматизированного обнаружения астероидов и комет CoLiTec**

Разработанные в диссертационной работе вычислительные методы: частного предварительного отождествления измерений цифровых кадров; полного предварительного отождествления измерений цифровых кадров с существенной неопределенностью параметров отождествления; автоматического выбора опорных звезд на цифровых изображениях; анализа показателей точности оценок углового положения опорных звезд в пространстве по данным изображений, внедрены и используются в программном обеспечении автоматического поиска астероидов и комет на серии ПЗС-кадров CoLiTec [70, 191, 192]. Результаты ПО CoLiTec [70, 191, 192] подтверждают эффективность и надежность разработанных в рамках диссертационной работы методов.

CoLiTec – единственная программа в открытом доступе с автоматическим выделением объектов с ненулевым видимым движением (рис 3.13). Единственное в мире программное обеспечение, надежно работающее на широких полях.

Серии	Состояние	Действие	Прогресс	Кадров	Обработана	Время	POCLT	VKCLT	VOCLT	Траекторий	Сообщения
F:\Source_1\Source\O1ZONE004	Успешно	Повторить	100%	4	2016.08.04 11:51:04	00:10:25	4/4	+	+	64	Сообщения
F:\Source_1\Source\O1ZONE005B	Успешно	Повторить	100%	4	2016.08.04 12:01:25	00:07:46	4/4	+	+	35	Сообщения
F:\Source_1\Source\O1ZONE009	Успешно	Повторить	100%	4	2016.08.04 12:01:55	00:09:01	4/4	+	+	63	Сообщения
F:\Source_1\Source\O2ZONE002	Успешно	Повторить	100%	4	2016.08.04 12:02:55	00:09:40	4/4	+	+	89	Сообщения
F:\Source_1\Source\O3ZONE005	Успешно	Повторить	100%	4	2016.08.04 12:04:25	00:09:58	4/4	+	+	239	Сообщения
F:\Source_1\Source\O3ZONE006	Обрабатыва...	Стоп	28%	4	2016.08.04 15:13:28		1/4			-	Сообщения
F:\Source_1\Source\O3ZONE007	Обрабатыва...	Стоп	28%	4	2016.08.04 15:13:30		1/4			-	Сообщения
F:\Source_1\Source\O4ZONE005	Обрабатыва...	Стоп	25%	4	2016.08.04 15:13:32		1/4			-	Сообщения
F:\Source_1\Source\O6ZONE013B	Обрабатыва...	Стоп	35%	4	2016.08.04 15:13:37		2/4			-	Сообщения
F:\Source_1\Source\O6ZONE016A	В очереди	Отменить	0%	4						-	Сообщения
F:\Source_1\Source\O7ZONE002A	В очереди	Отменить	0%	4						-	Сообщения
F:\Source_1\Source\O7ZONE006B	Новая	Запуск		4						-	Сообщения

Рисунок 3.13 – Интерфейс ПО CoLiTec

На данный момент ПО CoLiTec является достойным конкурентом другим программным средствам обработки цифровых ПЗС-кадров, например, достаточно известному ПО Astrometrica [71, 129], основным недостатком, которого являются очень слабые поисковые возможности в автоматическом режиме (подраздел 1.3).

ПО CoLiTec лишено данного недостатка. К основным функциям ПО CoLiTec относятся: внутрикадровая обработка; межкадровая обработка; астрометрическая и фотометрическая редукция кадров; отождествление кадров; OnLine Data Analysis System (OLDAS); вьювер LookSky.

Внутрикадровая обработка позволяет проводить: яркостное выравнивание кадров любого размера (медианный фильтр и Фурье-анализ); автокалибровку и косметическую коррекцию (автоматическое удаление битых и горячих пикселей); программный перенос заряда (ППЗ) – разновидность сложения кадров, используемая для повышения ОСШ изображений объектов с неизвестной скоростью видимого движения; адаптивное формирование значений порогов формирования отметок на кадрах; оценку координат небесных объектов (фитинг).

Межкадровая обработка включает в себя: исключение из межкадровой

обработки отметок от объектов внутреннего каталога с нулевым видимым движением; обнаружение астероидов на основе метода, который позволяет накапливать статистики изображений объектов вдоль траекторий с неизвестными параметрами движения, за счет использования многозначного преобразования; вычислительные затраты метода стабилизируются на приемлемом уровне за счет иерархической реализации используемого преобразования (автоматическое обнаружение слабых движущихся объектов ( $\text{SNR} > 2.5$ )); ручную отбраковку автоматически обнаруженных астероидов; формирование рапорта MPC и его отправка e-почтой, в том числе на NEOCP.

Астрометрическая и фотометрическая редукция кадров – это полностью автоматизированный и надёжный алгоритм астрометрической редукции; работа с очень широким полем зрения (до 10 градусов); использование электронных звездных каталогов USNO B1.0, UCAC 4 и XPM и автоматическое исключение аномальных наблюдений.

В блоке «Отождествление кадров» производится: формирование внутреннего каталога объектов, неподвижных на серии наблюдений; автоматическое отождествление со звездным каталогом как совокупности отметок кадра, так и внутреннего каталога серии наблюдений; автоматическое отождествление обнаруженных программой и известных MPC объектов.

Система OLDAS (OnLine Data Analysis System) позволяет оперативно обрабатывать данные и назначать подтверждение наиболее интересных обнаруженных объектов в ночь их предварительного открытия. OLDAS включает в себя: многопоточную поддержку многопроцессорных систем и локальной сети; контроль результатов астрономических наблюдений в течение ночи и не позднее чем через 30 минут после их окончания; работу с онлайн-каталогами с помощью Vizier; просмотр обнаруженных объектов с помощью веб-сервиса контроля результатов обработки данных.

Так же CoLiTec оснащено хорошим вывером результатов с дружествен-

ным интерфейсом. Вьювер LookSky [74] работает отдельно от основной программы и им можно независимо просматривать результаты CoLiTec в то время, как основная программа продолжает обработку данных (рис. 3.13).

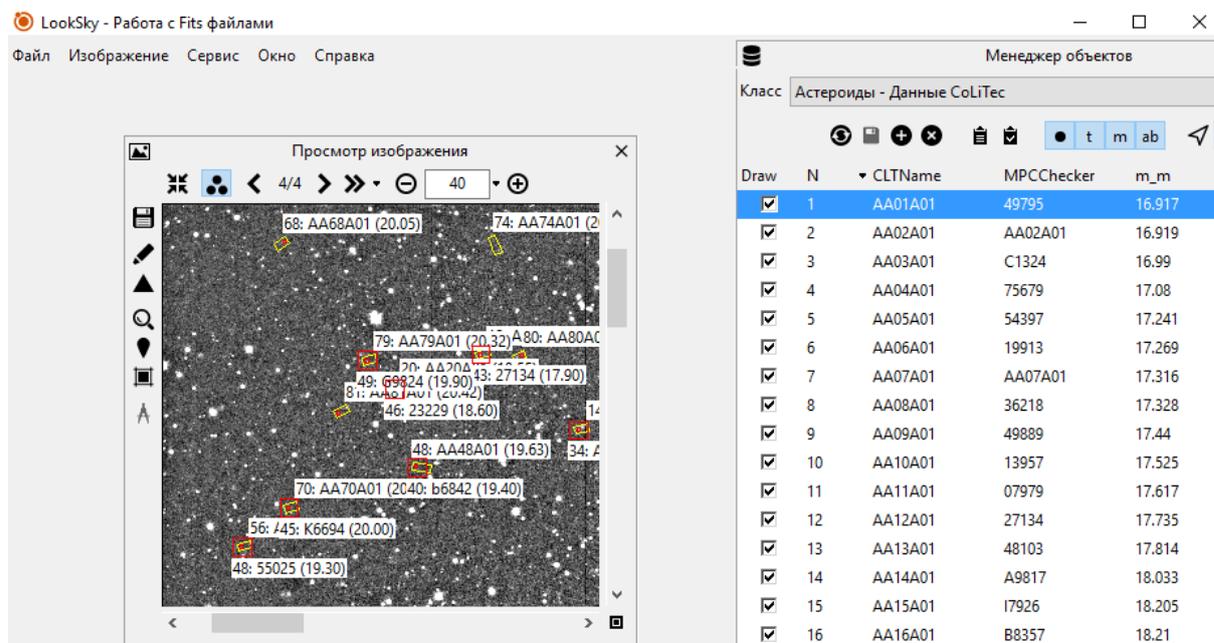


Рисунок 3.14 – Интерфейс вьювера LookSky

Кроме того, ПО CoLiTec, в отличие, от ПО Astrometrica, еще реализует такие возможности как: поддержка локального каталога Tycho2; поддержка онлайн каталогов (NOMAD, SDSS v8); возможность отдельного применения опорных каталогов для астрометрической и фотометрической редукций; идентификация объектов нулевым видимым движением с базами данных переменных звезд (VSX) и галактик (HyperLeda).

Особенности реализации CoLiTec (рис. 3.14) позволяют рассчитывать на возможности его эффективного применения во многих обсерваториях мира [74, 191, 192].

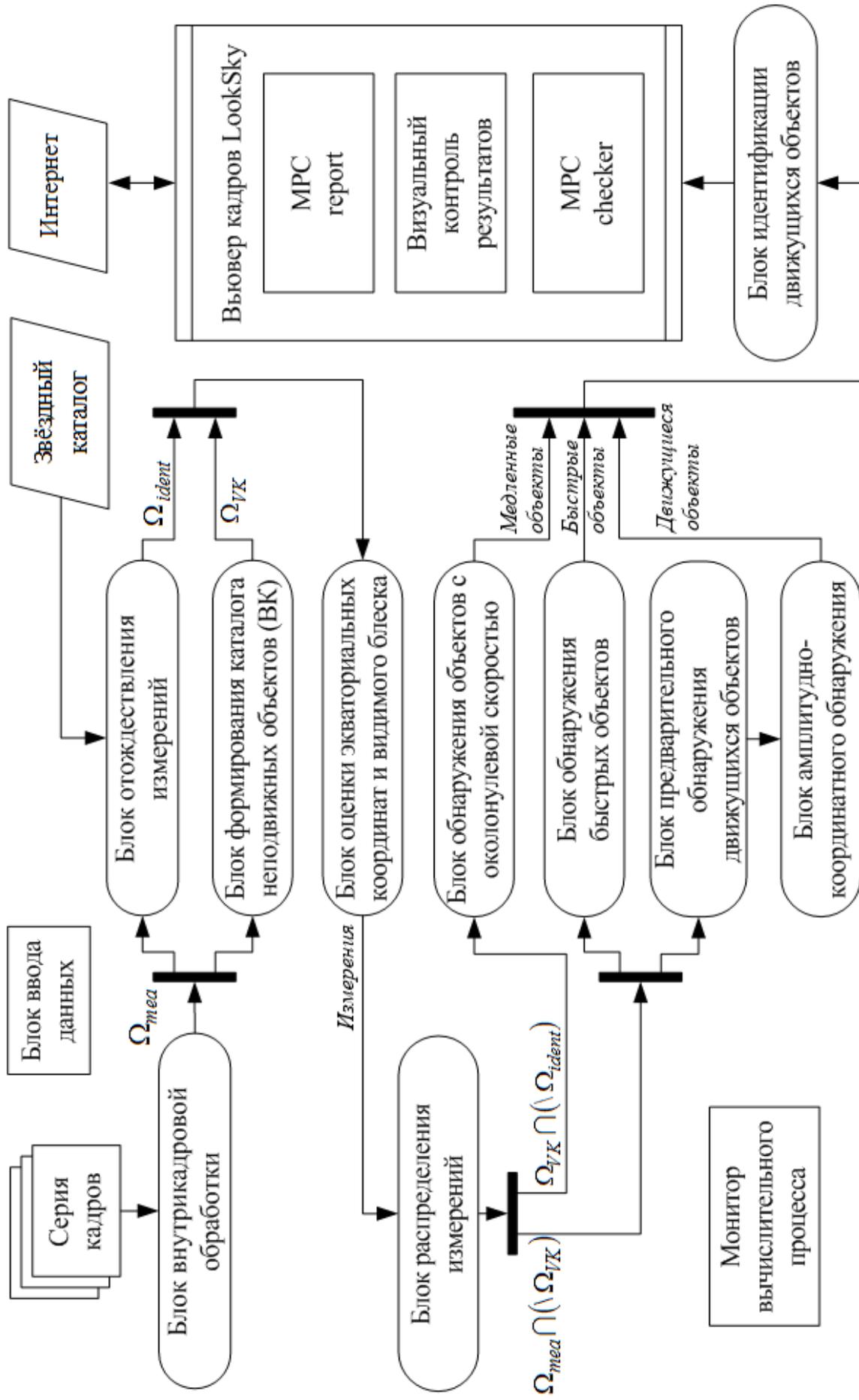


Рисунок 3.15 – Функциональная схема программы автоматического поиска астероидов и комет на серии ПЗС-кадров CoLiTeс

На протяжении 4 лет, с 2011 по 2014 год пользователи CoLiТес входили в ТОП-30 наиболее продуктивных обсерваторий мира по измерениям астероидов. За 2011 и 2012 годы в СНГ и Балтии с использованием CoLiТес сделано не менее 80% наблюдений и 75 % предварительных открытий астероидов [191, 192]. По суммарным результатам 2011 и 2012 годов обсерватория ISON-NM, заняла 7 место в мире, как по количеству наблюдений астероидов, так и по количеству их предварительных открытий [191, 192].

Программное обеспечение CoLiТес рекомендовано для членов сети Gaia-FUN-SSO в качестве программного инструмента для выявления слабых объектов на кадрах [118].

С использованием CoLiТес было открыто 4 кометы (C/2011 X1 (Elenin) (MPEC 2010-X101) [162], P/2011 NO1(Elenin) (MPEC 2011-O10) [163], C/2012 S1 (MPEC 2012-S63) [164], P/2013 V3 (Nevski) (MPEC 2013-V45) [165]) из 7, открытых в СНГ и Балтии более чем за 20 последних лет. Всего при помощи программы CoLiТес открыто более 1550 астероидов. Среди них 4 объекта сближающихся с Землей из 16 открытых за всю историю советской и постсоветской астрономии СНГ и Балтии, 21 троянский астероид Юпитера и 1 кентавр из двух, открытых в СНГ и Балтии. Еще 3 астероидам были посвящены отдельные электронные циркуляры MPC [166-168].

### **3.4 Исследование показателей точности разработанных вычислительных методов автоматического выбора опорных звезд на цифровых изображениях**

В диссертационной работе в качестве параметров вычислительного метода автоматического выбора опорных звезд на цифровых изображениях были взяты следующие значения: количество самых ярких измерений кадра и формуляров каталога, которые участвуют при отборе кандидатов в опорные звезды

$N_{mia} = 400, N_{st} = 600$ ; предельно допустимое расстояние между соседними объектами (звездами) группы близких объектов  $r_{star\_group} = 5$ ; количество фрагментов, на которое делится кадр по каждой координате при отборе опорных звезд  $M_{reg} = 4$ ; количество измерений, на которое увеличивается количество претендентов в опорные звезды на каждом следующем шаге  $\Delta N_{mia} = 300$  измерений кадра и  $\Delta N_{st} = 500$  звезд каталога; критерием отсутствия пика является отклонение не более чем на  $N_{Apeak} = 4$  значений яркостей пикселей от яркости пикселя пика в области  $C_{peak} \times C_{peak}$  ( $C_{peak} = 5$ ) пикселей с центром в пике; предельно допустимое расстояние между соседними объектами (измерениями) группы близких объектов  $r_{mea\_group} = 20$  пикселей; коэффициент правила отбраковки пар «измерение-формуляр» из множества опорных звезд  $K_{rej} = 1$ .

В качестве показателей точности определения углового положения объектов в пространстве по данным изображений при исследовании были выбраны следующие значения (подраздел 1.4):

- значения квантилей отклонений оценок экваториальных координат по прямому восхождению  $\alpha_q$  и склонению  $\delta_q$ ;
- значения среднеквадратического отклонения (СКО) оценок экваториальных координат  $\hat{\sigma}_\alpha$  и  $\hat{\sigma}_\delta$  используемых опорных звезд;
- значения СКО оценок экваториальных координат  $\hat{\sigma}_\alpha$  и  $\hat{\sigma}_\delta$  общего количества звезд на кадре;
- значения среднего отклонения оценок экваториальных координат  $\hat{\Delta}_\alpha$  и  $\hat{\Delta}_\delta$  общего количества звезд на кадре.

Все исследования в диссертационной работе проводились на ПЗС-кадрах, сформированных в разное время года, на разных телескопах и ПЗС-камерах. Ниже приведен список указанных обсерваторий и некоторые технические ха-

рактеристики используемых ими телескопов и ПЗС-камер.

Обсерватория ISON-NM (код MPC H15) находится на горе Джой (город Мейхилл, Нью-Мексико, США). Данная обсерватория в качестве инструмента наблюдения использует 40-см телескоп САНТЕЛ-400АН с фокусным расстоянием  $f = 1197.37$  мм. и ПЗС-матрицу FLI ML09000-65 (3056×3056 пикселей, размер пикселя 12 мкм). Время экспозиции исследуемых кадров составляло 150 с.

Обсерватория ISON-Kislovodsk (код MPC D00) расположена в 20 км. от города Кисловодск (плато Шаджатмаз), РФ. Данная обсерватория, в качестве инструмента наблюдения использует 19,2-см широкопольный телескоп GENON (VT-78) с фокусным расстоянием  $f = 294.76$  мм. и ПЗС-матрицу FLI ML09000-65 (4008×2672 пикселей, размер пикселя 9 мкм). Время экспозиции исследуемых кадров составляло 180 с.

Обсерватория Серро-Тололо (код MPC 807) расположена в 80 км. от города Ла-Серена (Чили) и в 100 км. от обсерватории Ла-Силья. Обсерватория Ла-Силья использует 46-см телескоп PROMPT-8 с фокусным расстоянием –  $f = 4201.035$  мм. и ПЗС-матрицу E2V (2048×2048 пикселей, размер пикселя 13.5 мкм). Время экспозиции исследуемых кадров составляло – 10 с.

Обсерватория «Vihorlat Observatory in Humenné» расположена в удалённом филиале Астрономической обсерватории на Колоницком седле между горными массивами Вигорлат и Буковске Врхи, в 38 км. от города Гуменне, (Словакия). Обсерватория использует Вигорлатский национальный телескоп (VNT) – телескоп Кассегрена, диаметром главного зеркала 1 м. с фокусным расстоянием –  $f = 8958.50$  мм. и ПЗС-матрицу FLI PL1001E (512 x 512 пикселей, размер пикселя 4,8 мкм). Время экспозиции исследуемых кадров составляло – 60 с.

**Исследование показателей точности оценок положения опорных звезд и других объектов кадра.** В подразделе 3.2 разработан метод оценки показателей точности измерений углового положения опорных звезд в пространстве по данным изображений. В соответствии с данным методом для

подтверждения эффективности и надежности разработанного в диссертационной работе вычислительного метода автоматического выбора опорных звезд на цифровых изображениях проведено исследование показателей точности определения углового положения объектов в пространстве по данным изображений.

Также дополнительно в качестве показателей точности определения углового положения объектов в пространстве по данным изображений с использованием выбранных опорных звезд могут служить флюктуации оценок положения объектов на серии кадров. Соответствующий метод автоматического анализа показателей точности разработан в работе [27]. В исследовании флюктуации оценок положения объектов на серии кадров организационно используется внутренний каталог объектов, неподвижных на серии кадров. Данный каталог разработан группой CoLitec [59] в связи с существенной неполнотой звездных каталогов для тусклых объектов (от объектов с блесков 18 звездная величина). Его основное предназначение заключается в снижении ложных обнаружений движущихся объектов (астероидов) при существенном снижении вычислительных затрат на их обнаружение.

Внутренний каталог объектов, неподвижных на серии кадров, формируется в системе координат (СК) базового кадра, а координаты всех измерений всех кадров пересчитываются в эту СК при помощи соответствующих постоянных пластинок [33, 57, 188].

Первоначально в работе было проведено исследование показателей точности оценок углового положения объектов в пространстве по данным изображений, с использованием указанных выше параметров вычислительного метода автоматического выбора опорных звезд на цифровых изображениях. Исследования проводились на кадрах, полученных на обсерваториях ISON-Kislovodsk (D00), ISON-NM (H15) и Серро-Тололо (807). Результаты указанных выше исследований приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Основные параметры отклонений угловых положений опорных звезд в пространстве по данным изображений

<b>Обсерватория</b>	<b>D00</b>	<b>H15</b>	<b>807</b>
Количество кадров	24	28	6
<b>Опорные звезды</b>	<b>14082</b>	<b>14462</b>	<b>2020</b>
Распределение измерений с критическими значениями отклонений по RA (< 0.25 угл. сек.)	95,4%	100,0%	100%
СКО по RA, угл. сек.	0,13	0,06	0,05
СКО по DE, угл. сек.	0,13	0,05	0,09
Квантиль 0.9 модуля отклонений по RA, угл. сек.	0,205	0,100	0,083
Квантиль 0.9 модуля отклонений по DE, угл. сек.	0,206	0,086	0,140
Квантиль 0.99 модуля отклонений по RA, угл. сек.	0,283	0,135	0,105
Квантиль 0.99 модуля отклонений по DE, угл. сек.	0,285	0,122	0,212
<b>Все звезды</b>	<b>41485</b>	<b>40111</b>	<b>5788</b>
Распределение измерений с критическими значениями отклонений по RA (< 1 угл. сек.)	97,2%	93,7 %	87,9%
Среднее отклонение по RA, угл. сек.	0,01	0,01	0,01
Среднее отклонение по DE, угл. сек.	-0,02	-0,01	0,00
СКО по RA, угл. сек.	0,39	0,55	0,18
СКО по DE, угл. сек.	0,42	0,41	0,16
Квантиль 0.9 модуля отклонений по RA, угл. сек.	0,497	0,486	1,051
Квантиль 0.9 модуля отклонений по DE, угл. сек.	0,518	0,331	0,450
Квантиль 0.99 модуля отклонений по RA, угл. сек.	1,184	2,189	1,958
Квантиль 0.99 модуля отклонений по DE, угл. сек.	1,368	1,444	0,871
<b>Звезды ВК</b>	<b>349054</b>	<b>322057</b>	<b>13646</b>
Распределение измерений с критическими значениями отклонений по RA (< 1 угл. сек.)	87,8%	90,6%	88,7%
СКО по RA, угл. сек.	0,66	0,55	0,25
СКО по DE, угл. сек.	0,64	0,47	0,25
Квантиль 0.9 модуля отклонений по RA, угл. сек.	1,073	0,932	1,019
Квантиль 0.9 модуля отклонений по DE, угл. сек.	1,012	0,768	0,411
Квантиль 0.99 модуля отклонений по RA, угл. сек.	2,038	1,652	1,678
Квантиль 0.99 модуля отклонений по DE, угл. сек.	1,947	1,424	0,733

На рисунке 3.15 представлены гистограммы распределений отклонений экваториальных координат по прямому восхождению  $\alpha$  и склонению  $\delta$  опорных звезд.

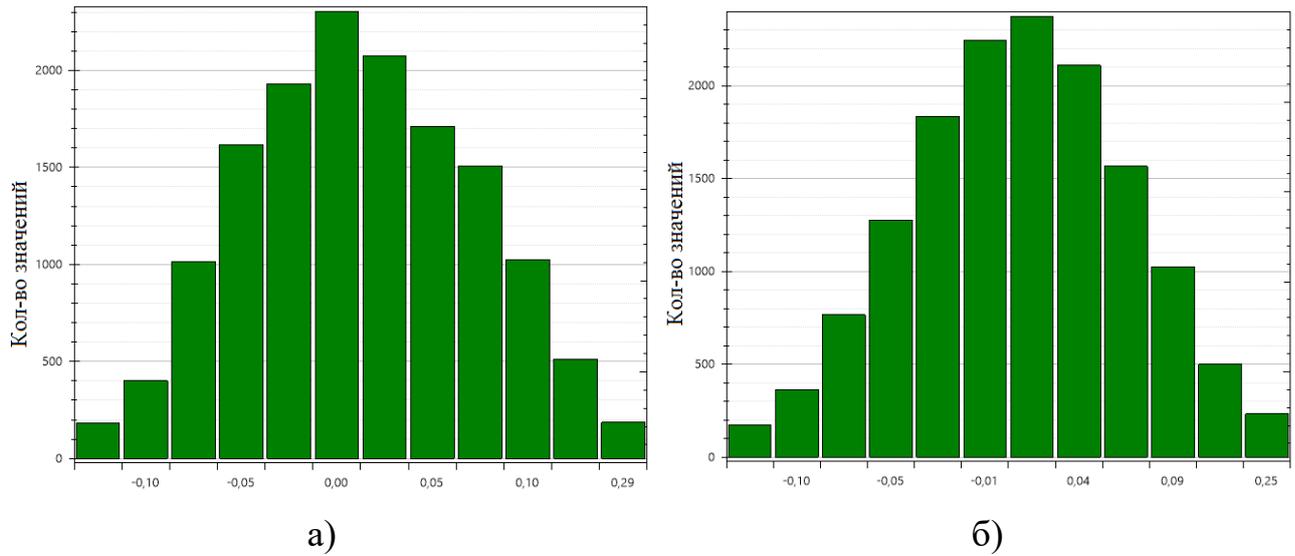


Рисунок 3.16 – Гистограмма распределения отклонений: а) прямого восхождения и б) склонения измерений опорных звезд

На рисунках 3.17 - 3.20 представлены графики зависимостей отклонений экваториальных координат по прямому восхождению  $\alpha$  и склонению  $\delta$  опорных звезд от их блеска, положения на кадре, а так же по отношению сигнал-шум (ОСШ).

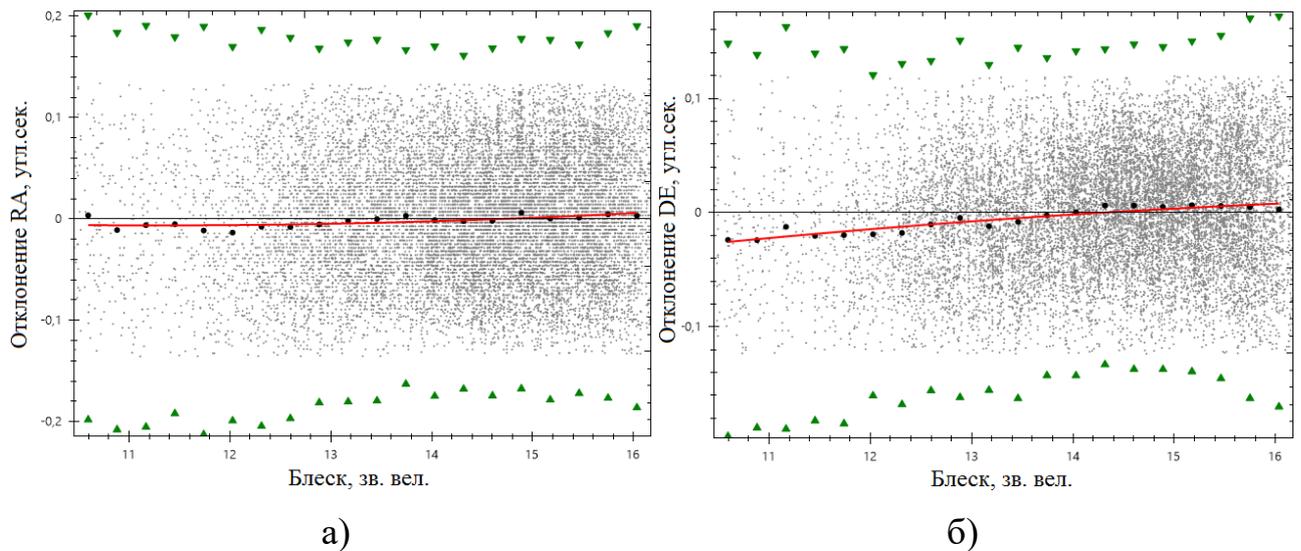


Рисунок 3.17 – Зависимость отклонений оценок: а) прямого восхождения; б) склонения от блеска объектов на кадре

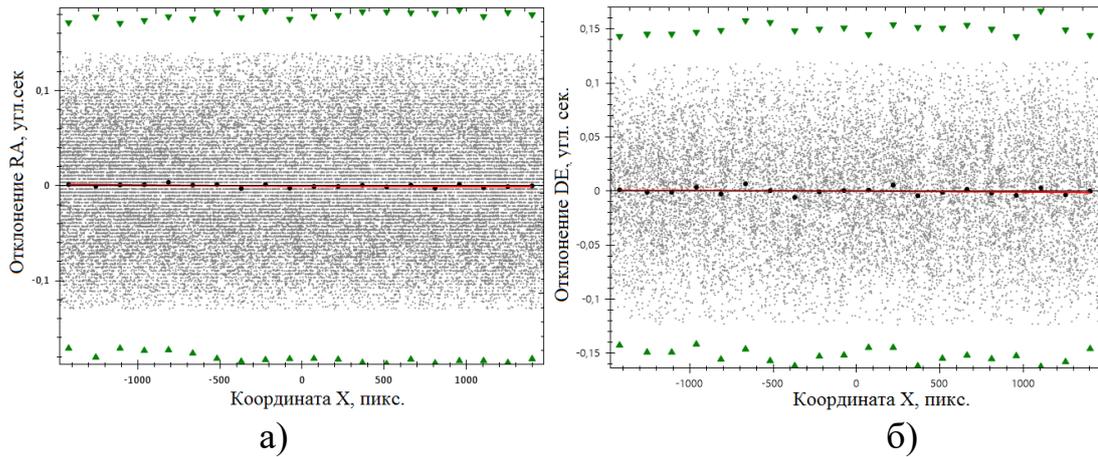


Рисунок 3.18 – Зависимость отклонений оценок по: а) прямому восхождению и б) склонению от положения опорных звезд на кадре (по X)

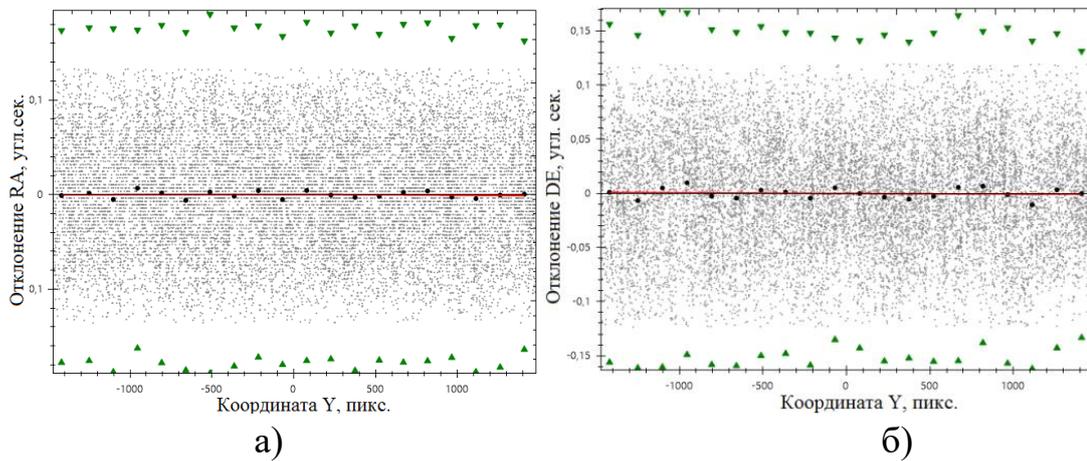


Рисунок 3.19 – Зависимость отклонений оценок по: а) прямому восхождению и б) склонению от положения опорных звезд на кадре (по Y)

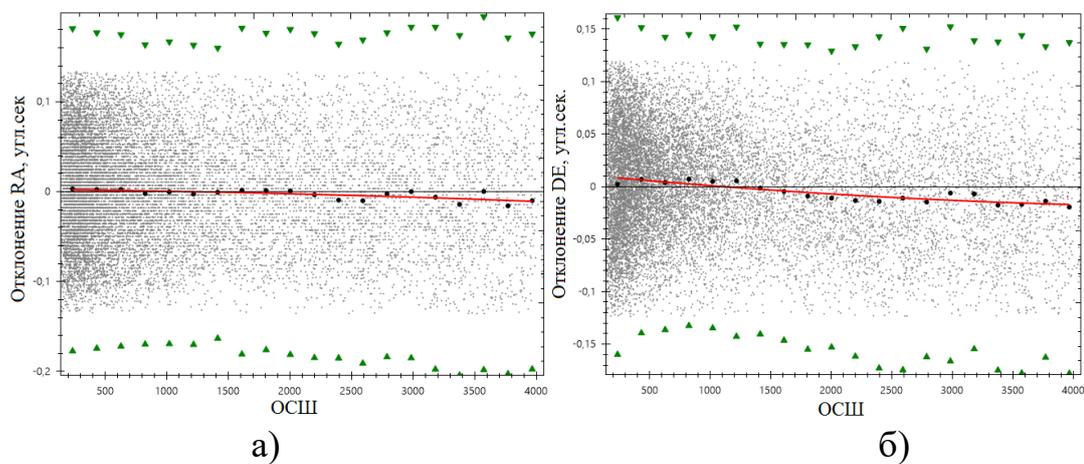


Рисунок 3.20 – Зависимость отклонений оценок по: а) прямому восхождению и б) склонению по ОСШ

В качестве значения ОСШ используется отношение яркости пика изображения объекта на кадре (за вычетом фона) к СКО фона (рис. 3.20). На графиках (рис. 3.17-3.20) серыми точками отмечены единичные ПЗС-измерения; круглым маркерам соответствуют средние значения отклонений на участке анализа; треугольные маркеры ограничивают доверительный интервал, соответствующий трем сигмам (СКО).

Анализ показателей точности оценок углового положения экваториальных координат по прямому восхождению  $\alpha$  и склонению  $\delta$  опорных звезд от их блеска, координат на кадре и по отношению сигнал-шум (ОСШ) (рис. 3.16 - 3.20), свидетельствуют об отсутствии влияния данных параметров на показатели точности измерений определения углового положения объектов в пространстве по данным изображений.

Так же, в таблице 3.4 представлены значения распределений измерений с критическими значениями, полученные в ходе исследования показателей точности определения углового положения объектов в пространстве по данным изображений.

Таблица 3.4 – Распределение измерений опорных звезд с критическими значениями отклонений по экваториальным координатам по прямому восхождению  $\alpha$  и склонению  $\delta$

Отклонение экваториальных координат:	Общее количество	Отклонения < 0.25"	Отклонения < 0.5"	Отклонение < 0.75"	Отклонение < 1"
RA (%)	100	100,0	0,0	0,0	0,0
Кол-во измерений	14462	14457	5	0	0
DE (%)	100	100,0	0,0	0,0	0,0
Кол-во измерений	14462	14461	1	0	0

Данные с таблицы 3.4, прежде всего, свидетельствуют о том, что практически все измерения опорных звезд по экваториальным координатам по прямому восхождению  $\alpha$  и склонению  $\delta$  не превышают критического значения от-

клонения равного 0.25 угл.сек.

Результаты исследований, приведенные в таблице 3.3, подтверждают эффективность разработанного метода автоматического выбора опорных звезд на цифровых изображениях, в свою очередь, высокие показатели точности определения углового положения объектов в пространстве по данным изображений, полностью выполняют поставленную в подразделе 1.4 задачу.

**Выбор наилучших параметров вычислительного метода автоматического выбора опорных звезд на цифровых изображениях.** Для получения наилучших показателей точности определения углового положения объектов в пространстве по данным изображений в рамках диссертационной работы было проведено исследование влияния на показатели точности определения углового положения опорных звезд и других объектов кадра в пространстве, таких параметров вычислительного метода автоматического выбора опорных звезд на цифровых изображениях как: предельно допустимое расстояние между соседними объектами (звездами) группы близких объектов  $r_{star\_group}$ ; количество фрагментов, на которое делится кадр по каждой координате при отборе опорных звезд  $M_{reg}$ ; предельно допустимое расстояние между соседними объектами (измерениями) группы близких объектов  $r_{mea\_group}$  пикселей (табл. 3.5).

На 80 исследуемых кадрах обсерватории ISON-NM (H15) было проанализировано 27 различных вариантов значений указанных выше параметров вычислительного метода автоматического выбора опорных звезд на цифровых изображениях. В результате предварительного разведочного анализа количество параметров разработанного вычислительного метода автоматического выбора опорных звезд на цифровых изображениях, используемых для максимизации показателей точности определения углового положения объектов в пространстве по данным изображений, было существенно сокращено, а область их допустимых значений была существенно сужена.

Таблица 3.5 – Зависимость показателей точности оценок положения опорных звезд и других объектов кадра от параметров вычислительного метода автоматического выбора опорных звезд на цифровых изображениях

Вариант	(1)	(2)	(3)	(4)
Предельно допустимое расстояние между соседними измерениями группы близких объектов $r_{mea\_group}$	20	1	1	40
Предельно допустимое расстояние между соседними звездами группы близких объектов $r_{star\_group}$	5	5	1	5
Количество фрагментов, на которое делится кадр по каждой координате при отборе опорных звезд $M_{reg}$	2	4	2	4
<b>Опорные звезды</b>	42064	43505	44999	38993
Распределение измерений с критическими значениями отклонений по RA (< 0.25 угл. сек.)	100%	99,8%	99,8%	100%
СКО по RA, угл. сек.	0,06	0,07	0,07	0,07
СКО по DE, угл. сек.	0,05	0,05	0,05	0,06
Квантиль 0.9 отклонений по RA, угл.сек.	0,101	0,100	0,102	0,106
Квантиль 0.9 отклонений по DE, угл.сек.	0,088	0,086	0,087	0,091
<b>Все звезды</b>	106484	105673	105602	106590
Распределение измерений с критическими значениями отклонений по RA (< 1 угл. сек.)	99,4%	99,4%	99,4%	99,5%
Среднее отклонение по RA, угл. сек.	0,01	0,02	0,02	0,01
Среднее отклонение по DE, угл. сек.	0,00	-0,01	-0,01	0,00
СКО по RA, угл. сек.	0,22	0,22	0,22	0,21
СКО по DE, угл. сек.	0,18	0,18	0,18	0,17
Квантиль 0.9 отклонений по RA, угл.сек.	0,310	0,310	0,313	0,306
Квантиль 0.9 отклонений по DE, угл.сек.	0,225	0,222	0,222	0,222
<b>Звезды ВК</b>	1054557	1049677	1049264	1054787
Распределение измерений с критическими значениями отклонений по RA (< 1 угл. сек.)	81,6%	81,5%	81,5%	81,7%
СКО по RA, угл. сек.	0,75	0,75	0,75	0,75
СКО по DE, угл. сек.	0,68	0,68	0,68	0,68
Квантиль 0.9 отклонений по RA, угл сек	1,336	1,339	1,339	1,328
Квантиль 0.9 отклонений по DE, угл.сек.	1,187	1,192	1,93	1,188

Продолжение таблицы 3.5

Вариант	(5)	(6)	(7)	(8)
Предельно допустимое расстояние между соседними измерениями группы близких объектов $r_{mea\_group}$	20	20	20	1
Предельно допустимое расстояние между соседними звездами группы близких объектов $r_{star\_group}$	5	1	5	10
Количество фрагментов, на которое делится кадр по каждой координате при отборе опорных звезд $M_{reg}$	4	6	6	2
<b>Опорные звезды</b>	43284	42064	42064	42714
Распределение измерений с критическими значениями отклонений по RA (< 0.25 угл. сек.)	100%	100%	100%	99,8%
СКО по RA, угл. сек.	0,06	0,06	0,06	0,07
СКО по DE, угл. сек.	0,05	0,05	0,05	0,05
Квантиль 0.9 отклонений по RA, угл.сек.	0,101	0,101	0,100	0,103
Квантиль 0.9 отклонений по DE, угл.сек.	0,088	0,088	0,086	0,088
<b>Все звезды</b>	105987	106619	106619	99629
Распределение измерений с критическими значениями отклонений по RA (< 1 угл. сек.)	99,5%	99,60%	99,6%	99,4%
Среднее отклонение по RA, угл. сек.	0,01	0,02	0,02	0,02
Среднее отклонение по DE, угл. сек.	0,00	0,00	0,00	-0,01
СКО по RA, угл. сек.	0,21	0,21	0,22	0,22
СКО по DE, угл. сек.	0,18	0,17	0,18	0,18
Квантиль 0.9 отклонений по RA, угл.сек.	0,310	0,306	0,306	0,313
Квантиль 0.9 отклонений по DE, угл.сек.	0,223	0,222	0,222	0,224
<b>Звезды ВК</b>	1051723	1054708	1054708	984687
Распределение измерений с критическими значениями отклонений по RA (< 1 угл.сек)	81,6%	81,8%	81,8%	81,1%
СКО по RA, угл. сек.	0,75	0,74	0,74	0,76
СКО по DE, угл. сек.	0,68	0,68	0,68	0,69
Квантиль 0.9 отклонений по RA, угл.сек.	1,332	1,328	1,328	1,350
Квантиль 0.9 отклонений по DE, угл. сек.	1,189	1,187	1,187	1,200

Для предельно допустимого расстояния между соседними объектами (из-

мерениями) группы близких объектов  $r_{mea\_group}$ , были выбраны значения:  $r_{mea\_group}=1, 20, 40$ . В качестве значений предельно допустимого расстояния между соседними объектами (звездами) группы близких объектов  $r_{star\_group}$ , были выбраны:  $r_{star\_group}=1, 5, 10$ . При этом для количества фрагментов, на которое делится кадр по каждой координате при отборе опорных звезд  $M_{reg}$ , были заданы значения:  $M_{reg}=2, 4, 6$ .

Результаты исследования влияния на показатели точности определения углового положения объектов в пространстве по данным изображений приведенных выше параметров вычислительного метода автоматического выбора опорных звезд были следующими. Было определено, что значение предельно допустимого расстояния между соседними объектами (звездами) группы близких объектов  $r_{star\_group}$  существенно не влияет на показатели точности определения углового положения объектов в пространстве по данным изображений таких как: значения квантилей отклонений оценок экваториальных координат по прямому восхождению  $\alpha_q$  и склонению  $\delta_q$ ; значения СКО оценок экваториальных координат  $\hat{\sigma}_\alpha$  и  $\hat{\sigma}_\delta$  используемых опорных звезд; значения СКО оценок экваториальных координат  $\hat{\sigma}_\alpha$  и  $\hat{\sigma}_\delta$  общего количества звезд на кадре; значения среднего отклонения оценок экваториальных координат  $\hat{\Delta}_\alpha$  и  $\hat{\Delta}_\delta$  общего количества звезд на кадре. Однако чтобы исключить даже минимальную вероятность ошибки перепутывания измерений со стороны объектов звездного каталога, в качестве параметра вычислительного метода автоматического выбора опорных звезд на цифровых изображениях было взято значение предельно допустимого расстояния между соседними объектами (звездами) группы близких объектов  $r_{star\_group}=5$ .

В свою очередь, значение предельно допустимого расстояния между соседними объектами (измерениями) группы близких объектов  $r_{mea\_group}$  и коли-

чество фрагментов, на которое делится кадр по каждой координате при отборе опорных звезд  $M_{reg}$ , оказывают большое влияние на показатели точности определения углового положения объектов в пространстве по данным изображений.

Результаты исследования влияния на показатели точности измерений значения предельно допустимого расстояния между соседними объектами (измерениями) группы близких объектов  $r_{mea\_group}$ , прежде всего, подтверждают необходимость отбраковки «близких» измерений из рассмотрения. При значении  $r_{mea\_group}=1$  (табл.3.5, вариант 2) показатели точности определения углового положения объектов в пространстве по данным изображений имеют наихудшие результаты в отличии от остальных выбранных значений указанного параметра, а именно: значения квантилей 0.9 модуля отклонений оценок экваториальных координат по прямому восхождению  $\alpha_q = 0,100$  угл. сек. и склонению  $\delta_q = 0,086$  угл. сек.; значения СКО оценок экваториальных координат по  $\hat{\sigma}_\alpha = 0,07$  угл. сек. и  $\hat{\sigma}_\delta = 0,05$  угл. сек. используемых опорных звезд; значения СКО оценок экваториальных координат по  $\hat{\sigma}_\alpha = 0,22$  угл. сек. и  $\hat{\sigma}_\delta = 0,18$  угл. сек. общего количества звезд на кадре; значения среднего отклонения оценок экваториальных координат по  $\hat{\Delta}_\alpha = 0,02$  угл. сек. и  $\hat{\Delta}_\delta = -0,01$  угл. сек. общего количества звезд на кадре.

В свою очередь, при использовании предельно допустимого расстояния между соседними объектами (измерениями) группы близких объектов  $r_{mea\_group}=20$  (табл. 3.5, вариант 5), значения указанный выше показателей точности следующие: значения квантилей 0.9 модуля отклонений  $\alpha_q = 0,101$  угл. сек. и  $\delta_q = 0,108$  угл. сек.; СКО по  $\hat{\sigma}_\alpha = 0,06$  угл. сек. и  $\hat{\sigma}_\delta = 0,05$  угл. сек. используемых опорных звезд; СКО по  $\hat{\sigma}_\alpha = 0,21$  угл. сек. и  $\hat{\sigma}_\delta = 0,18$  угл. сек. общего количества звезд на кадре; среднее отклонение по  $\hat{\Delta}_\alpha = 0,01$  угл. сек. и  $\hat{\Delta}_\delta = 0,00$  угл. сек. общего количества звезд на кадре.

При использовании предельно допустимого расстояния между соседними объектами (измерениями) группы близких объектов  $r_{mea\_group}=40$  (табл. 3.5, вариант 4), значения указанных выше показателей точности следующие: значения квантилей 0.9 модуля отклонений по  $\alpha_q = 0,106$  угл. сек. и  $\delta_q = 0,109$  угл. сек.; СКО по  $\hat{\sigma}_\alpha = 0,06$  угл. сек. и  $\hat{\sigma}_\delta = 0,07$  угл. сек. используемых опорных звезд; СКО по  $\hat{\sigma}_\alpha = 0,21$  угл. сек. и  $\hat{\sigma}_\delta = 0,18$  угл. сек., общего количества звезд на кадре; среднее отклонение по  $\hat{\Delta}_\alpha = 0,01$  угл. сек. и  $\hat{\Delta}_\delta = 0,00$  угл. сек. общего количества звезд на кадре.

Исходя из полученных результатов, был сделан вывод о том, что при отбраковке измерений «близких» объектов со стороны кадра, целесообразно использовать значение  $r_{mea\_group}=20$ .

При исследовании влияния на показатели точности определения углового положения объектов в пространстве по данным изображений количества фрагментов, на которое делится кадр по каждой координате при отборе опорных звезд  $M_{reg}$ , были получены следующие результаты.

При количестве фрагментов, на которое делится кадр по каждой координате при отборе опорных звезд  $M_{reg}=2$ , (табл. 3.5, вариант 1), значения показателей точности следующие: значения квантилей 0.9 модуля отклонений по  $\alpha_q = 0,101$  угл. сек. и  $\delta_q = 0,088$  угл. сек.; СКО по  $\hat{\sigma}_\alpha = 0,06$  угл. сек. и  $\hat{\sigma}_\delta = 0,05$  угл. сек. используемых опорных звезд; СКО по  $\hat{\sigma}_\alpha = 0,22$  угл. сек. и  $\hat{\sigma}_\delta = 0,18$  угл. сек., общего количества звезд на кадре; среднее отклонение по  $\hat{\Delta}_\alpha = 0,01$  угл. сек. и  $\hat{\Delta}_\delta = 0,00$  угл. сек. общего количества звезд на кадре.

При количестве фрагментов, на которое делится кадр по каждой координате при отборе опорных звезд  $M_{reg}=4$ , значения показателей точности определения углового положения объектов в пространстве по данным изображений, уже приведены для предельно допустимого расстояния между соседними объектами

(измерениями) группы близких объектов  $r_{mea\_group} = 20$  (табл. 3.5, вариант 5).

При количестве фрагментов, на которое делится кадр по каждой координате при отборе опорных звезд  $M_{reg} = 6$ , (табл. 3.5, вариант 7), значения показателей точности следующие: значения квантилей 0.9 модуля отклонений по  $\alpha_q = 0,100$  угл. сек. и  $\delta_q = 0,088$  угл. сек.; СКО по  $\hat{\sigma}_\alpha = 0,06$  угл. сек. и  $\hat{\sigma}_\delta = 0,05$  угл. сек. используемых опорных звезд; СКО по  $\hat{\sigma}_\alpha = 0,22$  угл. сек. и  $\hat{\sigma}_\delta = 0,18$  угл. сек. общего количества звезд на кадре; среднее отклонение по  $\hat{\Delta}_\alpha = 0,02$  угл. сек. и  $\hat{\Delta}_\delta = 0,00$  угл. сек. общего количества звезд на кадре.

Результаты исследований, по влиянию количества фрагментов, на которое делится кадр по каждой координате при отборе опорных звезд  $M_{reg}$ , показали, что наилучшие значения показателей точности определения углового положения объектов в пространстве по данным изображений, при  $M_{reg} = 4$ .

Как и было предположено ранее (подраздел 1.4), фрагментация кадра оказывает большое влияние на показатели точности определения углового положения объектов в пространстве по данным изображений. Прежде всего, фрагментация кадра и равномерное распределение кандидатов в опорные звезды используются для обеспечения наилучших показателей точности определения углового положения объектов в пространстве по данным изображений, на всем кадре, а не в каком-то конкретном его участке, что является важным требованием при обработке данных обзорных наблюдений. Поэтому, для обеспечения наилучших показателей точности на всем кадре, необходимо чтобы дисперсия ошибок определения углового положения объектов любого фрагмента кадра существенно не превышала дисперсии ошибок определения углового положения объектов на всем кадре (подраздел 1.4).

Как упоминалось ранее, исследования зависимости показателей точности оценок положения опорных звезд и других объектов кадра от параметров вычислительного метода автоматического выбора опорных звезд на цифровых

изображениях, были проведены с использованием кадров, полученных с обсерватории ISON-NM (H15). Также аналогичные исследования проводились и на кадрах, полученных с обсерваторий ISON-Kislovodsk (D00), Сепро-Тололо (807) и Vihorlat Observatory in Humenné. Результаты данных исследований, были аналогичными с результатами, полученными на кадрах обсерватории ISON-NM (H15), поэтому данные по ним в работе не приведены ввиду ограниченности ее объема.

Также на кадрах обсерваторий ISON-NM (H15) и Vihorlat Observatory in Humenné было проведено исследование по влиянию значения коэффициента правила отбраковки пар «измерение-формуляр»  $K_{rej}$  на показатели точности определения углового положения объектов в пространстве по данным изображений (таблица 3.6, 3.7).

В качестве значений параметра  $K_{rej}$  были выбраны следующие значения для коэффициента:  $K_{rej}=1, 1.5, 2, 2.5, 3$ .

Таблица 3.6 – Исследование показателей точности оценок положения опорных звезд при использовании различных значений коэффициента отбраковки пар при использовании кадров, полученных на Vihorlat Observatory in Humenné

Параметр сравнения	$K_{rej}=1$	$K_{rej}=1.5$	$K_{rej}=2$	$K_{rej}=2.5$	$K_{rej}=3$
Количество кадров	4				
Выбрано опорных звезд	153	220	252	265	272
Отклонение $> 0.25$ угл. сек.	100%	99.5%	93.7%	90.2%	86%
СКО по RA, угл. сек.	0.04	0.08	0.12	0.14	0.18
СКО по DE, угл. сек.	0.05	0.09	0.11	0.15	0.16
Квантиль 0.9 модуля отклонений по RA, угл. сек.	0.082	0.131	0.216	0.247	0.284
Квантиль 0.9 модуля отклонений по DE, угл. сек.	0.082	0.142	0.170	0.229	0.243
Квантиль 0.99 модуля отклонений по RA, угл. сек.	0.094	0.190	0.301	0.352	0.533
Квантиль 0.99 модуля отклонений по DE, угл. сек.	0.125	0.212	0.305	0.487	0.506
Всего звезд UCAC4 на кадрах	339	342	342	342	342

Продолжение таблицы 3.6

Среднее отклонение по RA, угл. сек.	0.00	-0.01	-0.02	-0.03	-0.03
Среднее отклонение по DE, угл. сек.	-0.03	-0.01	-0.01	-0.01	-0.02
СКО по RA, угл. сек.	0.28	0.26	0.26	0.26	0.26
СКО по DE, угл. сек.	0.26	0.24	0.24	0.24	0.23
Квантиль 0.9 модуля отклонений по RA, угл. сек.	0.468	0.457	0.428	0.450	0.436
Квантиль 0.9 модуля отклонений по DE, угл. сек.	0.333	0.282	0.280	0.299	0.297
Квантиль 0.99 модуля отклонений по RA, угл. сек.	1.105	0.986	0.986	0.965	0.904
Квантиль 0.99 модуля отклонений по DE, угл. сек.	0.786	0.680	0.709	0.701	0.571

Таблица 3.7 – Исследование показателей точности оценок положения опорных звезд при использовании различных значений коэффициента отбраковки пар при использовании кадров, полученных на обсерватории ISON-NM (H15)

Параметр сравнения	$K_{rej}=1$	$K_{rej}=1.5$	$K_{rej}=2$	$K_{rej}=2.5$	$K_{rej}=3$
Количество кадров	122				
Выбрано опорных звезд	41252	58299	64386	66770	67733
Отклонение > 0.25 угл. сек.	100,0	99,1	95,1	92,4	91,3
СКО по RA, угл. сек.	0,06	0,10	0,12	0,14	0,15
СКО по DE, угл. сек.	0,05	0,08	0,09	0,10	0,10
Квантиль 0.9 модуля отклонений по RA, угл. сек.	0,101	0,159	0,197	0,218	0,229
Квантиль 0.9 модуля отклонений по DE, угл. сек.	0,088	0,121	0,138	0,147	0,152
Квантиль 0.99 модуля отклонений по RA, угл. сек.	0,136	0,226	0,302	0,363	0,401
Квантиль 0.99 модуля отклонений по DE, угл. сек.	0,123	0,184	0,231	0,264	0,282
Всего звезд на кадрах	108739	108743	108739	108739	108739
Распределение измерений с критическими значениями отклонений по RA (< 1 угл. сек.)	98,8	98,8	98,8	98,8	98,8
Среднее отклонение по RA, угл. сек.	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01
Среднее отклонение по DE, угл. сек.	-0,01	-0,01	-0,01	0,00	0,00

Продолжение таблицы 3.7

СКО по RA, угл. сек.	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
СКО по DE, угл. сек.	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29
Квантиль 0.9 модуля отклонений по RA, угл. сек.	0,324	0,324	0,320	0,317	0,317
Квантиль 0.9 модуля отклонений по DE, угл. сек.	0,239	0,238	0,237	0,237	0,237
Квантиль 0.99 модуля отклонений по RA, угл. сек.	0,745	0,745	0,742	0,742	0,742
Квантиль 0.99 модуля отклонений по DE, угл. сек.	0,676	0,676	0,677	0,675	0,675
Всего звезд ВК	1076086	1076183	1076187	1076204	1076171
Распределение измерений с критическими значениями отклонений по RA (< 1 угл. сек.)	80,3	80,3	80,3	80,3	80,3
Среднее отклонение по RA, угл. сек.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Среднее отклонение по DE, угл. сек.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
СКО по RA, угл. сек.	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79
СКО по DE, угл. сек.	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73
Квантиль 0.9 модуля отклонений по RA, угл. сек.	1,411	1,411	1,411	1,411	1,411
Квантиль 0.9 модуля отклонений по DE, угл. сек.	1,271	1,271	1,271	1,271	1,271
Квантиль 0.99 модуля отклонений по RA, угл. сек.	2,117	2,120	2,120	2,120	2,120
Квантиль 0.99 модуля отклонений по DE, угл. сек.	1,999	2,000	2,001	2,000	2,000

Исследования показателей точности определения углового положения объектов в пространстве при различных значениях коэффициента правила отбраковки пар «измерение-формуляр» из множества опорных звезд  $K_{rej}$  показали, что наилучшие показатели точности были получены при использовании коэффициента отбраковки пар равном единице, независимо от используемого инструмента и количества кадров (табл. 3.6 и 3.7).

Хотелось бы отметить, что при  $K_{rej} = 1$  отбираются только пары «изме-

рение-звезда», модуль отклонения которых меньше среднего значения модуля отклонения отождествленной пары в экваториальных координатах в выбранной совокупности отождествленных пар (подраздел 3.1).

**Исследование показателей точности оценок положения опорных звезд и других объектов кадра по данным изображений телескопа ОМТ-800 Одесской астрономической обсерватории.** Дополнительно к исследованиям на телескопах трех ранее указанных обсерваторий проводились исследования и на Одесской наблюдательной станции Маяки НИИ «Астрономическая обсерватория» ОНУ им. И. И. Мечникова (табл. 3.8).

Таблица 3.8 – Основные параметры отклонений угловых положений объектов внутреннего каталога объектов, неподвижных на серии кадров, в пространстве по данным изображений

<b>Телескоп</b>	<b>M29</b>
Количество кадров	112
Коэффициент от браковки пар	$K_{rej} = 1$
<b>Опорные звезды</b>	<b>58589</b>
Распределение измерений с критическими значениями отклонений по RA (< 0.25 угл.сек)	100,0
СКО по RA, угл. сек.	0,04
СКО по DE, угл. сек.	0,06
Квантиль 0.9 модуля отклонений по RA, угл. сек.	0,071
Квантиль 0.9 модуля отклонений по DE, угл. сек.	0,093
Квантиль 0.99 модуля отклонений по RA, угл. сек.	0,092
Квантиль 0.99 модуля отклонений по DE, угл. сек.	0,126
<b>Всего звезд на кадрах</b>	<b>132330</b>
Распределение измерений с критическими значениями отклонений по RA (< 1 угл. сек.)	97,4
Среднее отклонение по RA, угл. сек.	0,00
Среднее отклонение по DE, угл. сек.	0,01
СКО по RA, угл. сек.	0,16
СКО по DE, угл. сек.	0,17
Квантиль 0.9 модуля отклонений по RA, угл. сек.	0,281
Квантиль 0.9 модуля отклонений по DE, угл. сек.	0,195
Квантиль 0.99 модуля отклонений по RA, угл. сек.	0,803
Квантиль 0.99 модуля отклонений по DE, угл. сек.	0,534

Продолжение таблицы 3.8

<b>Звезды ВК</b>	
Всего звезд на кадрах	<b>3344210</b>
Распределение измерений с критическими значениями отклонений по RA (< 1 угл. сек.)	96,7
СКО по RA, угл. сек.	0,25
СКО по DE, угл. сек.	0,25
Квантиль 0.9 модуля отклонений по RA, угл. сек.	0,580
Квантиль 0.9 модуля отклонений по DE, угл. сек.	0,379
Квантиль 0.99 модуля отклонений по RA, угл. сек.	1,166
Квантиль 0.99 модуля отклонений по DE, угл. сек.	0,774

Наблюдательная станция Маяки НИИ «Астрономическая обсерватория» ОНУ им. И. И. Мечникова (код MPC 583) расположена в населенном пункте Маяки (Одесская область, Украина). Обсерватория использует 80-см телескоп ОМТ-800 с фокусным расстоянием –  $f = 2398.2$  мм. и ПЗС-матрицу FLI 9000 (3056 x 3056 пикселей, размер пикселя 12 мкм). Время экспозиции исследуемых кадров составляло – 30 с.

Исследования проводились на 112 отобранных кадрах. В таблице 3.8 представлены параметры отклонений угловых положений объектов в пространстве по данным изображений, в том числе и для ВК объектов, неподвижных на серии кадров.

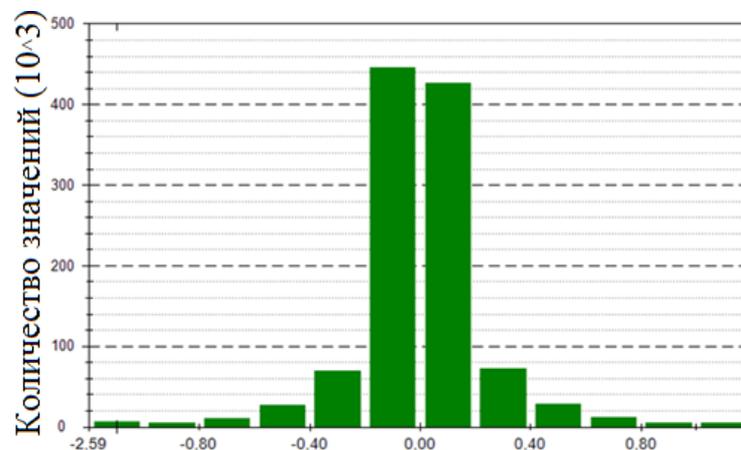


Рисунок 3.21 – Гистограмма распределения отклонений прямого восхождения измерений опорных звезд

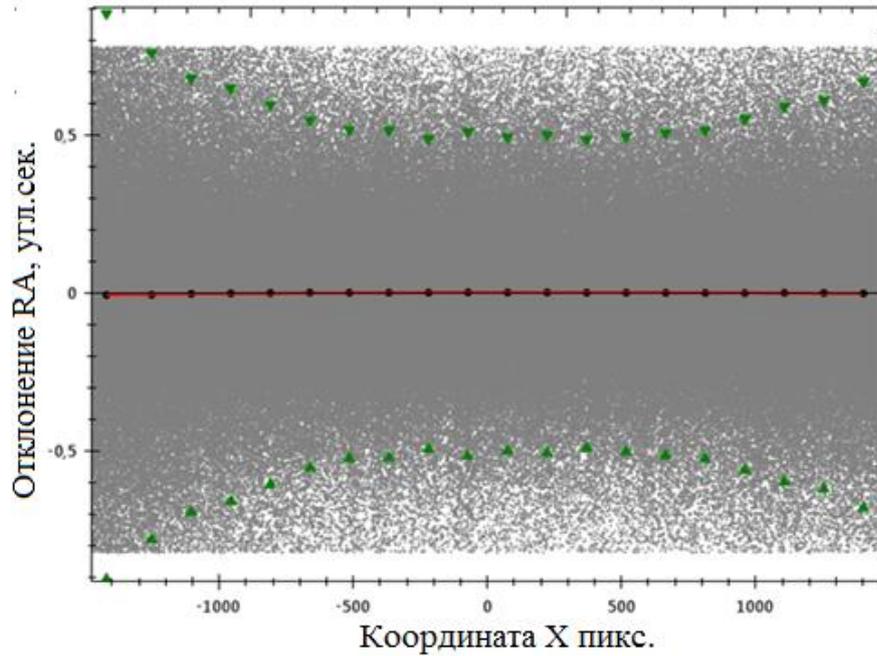


Рисунок 3.22 – Зависимость отклонений оценок прямого восхождения от положения ВК объектов, неподвижных на серии кадров

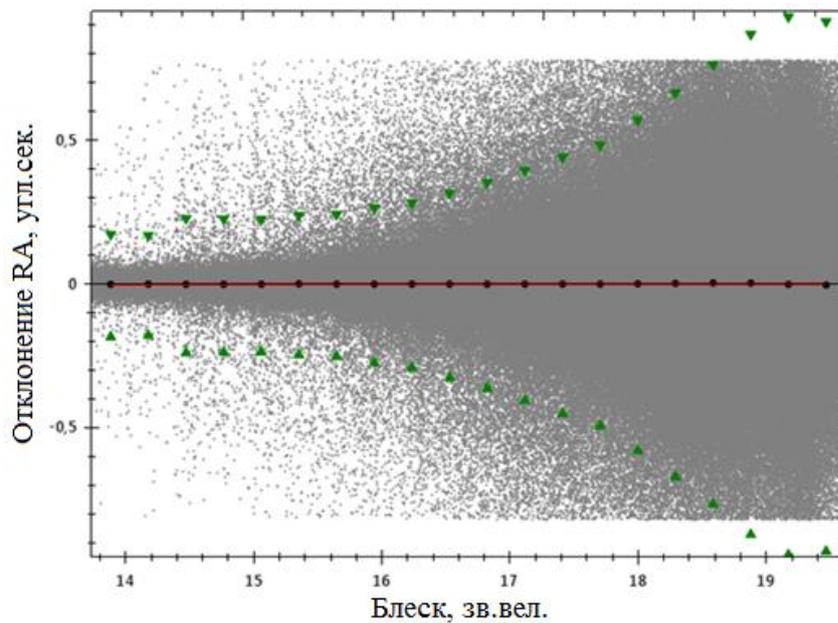


Рисунок 3.23 – Зависимость отклонений оценок прямого восхождения ВК объектов, неподвижных на серии кадров от их блеска

Анализ показателей точности оценок углового положения ВК объектов, неподвижных на серии кадров, показал следующие результаты (рис. 3.21 -

3.24). На рисунке 3.21 изображена гистограмма распределений отклонений представителей ВК объектов, неподвижных на серии кадров по значениям оценок их экваториальных координат.

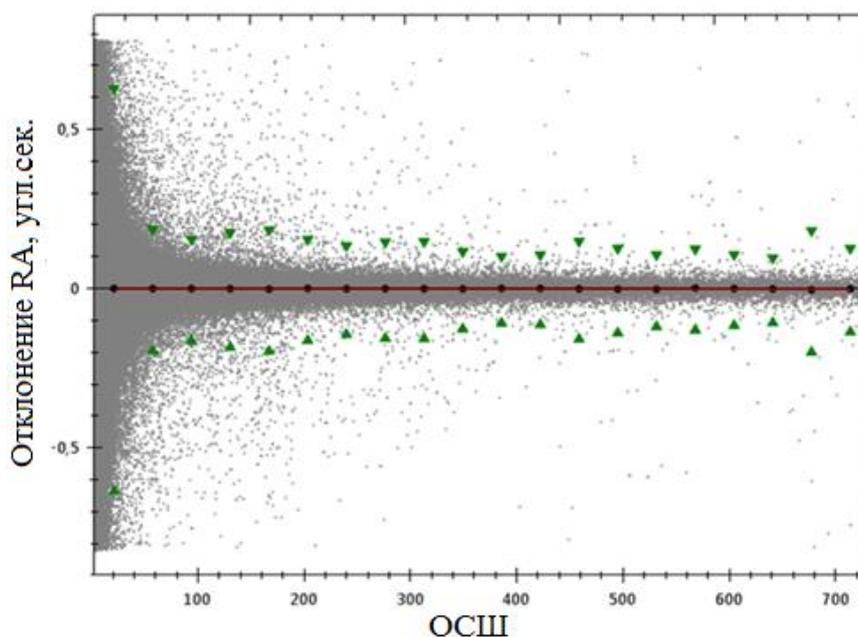


Рисунок 3.24 – Зависимость отклонений оценок прямого восхождения от положения ВК объектов, неподвижных на серии кадров по ОСШ

Представленные на рисунках 3.22 -3.24 результаты проведенного анализа свидетельствуют об отсутствии влияния параметров блеска, координат на кадре и по ОСШ на точность измерений ВК объектов, неподвижных на серии кадров.

**Сравнительный анализ показателей точности оценок углового положения опорных звезд в пространстве по данным изображений.** Прежде всего, подтверждением надежности вычислительного метода автоматического выбора опорных звезд на цифровых изображениях являются высокие показатели точности позиционных измерений астероидов, выполненных с привлечением указанного метода.

Позиционные измерения астероидов, выполненные в ПО CoLiTec (с использованием разработанных в диссертации вычислительных методов) имеют показатели точности, которые соответствуют высоким международным требо-

ваниям. Об этом свидетельствует выполненная MPC независимая оценка показателей точности позиционных наблюдений обсерваторий, являющихся пользователями CoLiTec. Анализ данных показателей был проведен в статье [191], напечатанной в MNRAS, одном из самых авторитетных астрономических журналов Европы. Данный анализ посвящен обсерваториям, вошедшим в ТОП-30 ведущих обсерваторий мира по количеству астероидных наблюдений и целиком основан на расчетах показателей точности позиционных наблюдений, выполненных в MPC (табл. 3.9, 3.10).

Таблица 3.9 – Наиболее продуктивные обсерватории мира по наблюдению астероидов за 2011 год

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)		(8)	(9)	(10)
						RA( $\bar{\Delta}_\alpha \pm \sigma_\alpha$ )	DE( $\bar{\Delta}_\delta \pm \sigma_\delta$ )			
1	G96	2106367 (382737)	21770	1,5	1,0	-0,01 + / - 0,32 -0,04 + / - 0,28		0,3	0,3	0,041
2	704	1956368 (279129)	495	1,0	2,2	0,25 + / - 0,66 0,43 + / - 0,64		0,65	0,29	0,497
3	F51	1557902 (351923)	13628	1,8	0,3	0,05 + / - 0,16 0,06 + / - 0,17		0,165	0,55	0,078
4	703	1512387 (259412)	2995	0,68	2,6	-0,21 + / - 0,67 0,17 + / - 0,68		0,675	0,25	0,270
5	691	811571 (154495)	8356	0,9	1,0	-0,16 + / - 0,33 0,10 + / - 0,30		0,315	0,315	0,189
6	E12	219903 (52808)	327	0,5	1,8	-0,04 + / - 0,49 0,32 + / - 0,48		0,485	0,26	0,322
7	645	208656 (45961)	7	2,5	0,4					
8	D29	185303 (43414)	318	1,04	1,7					
9	C51	162900 (15412)	23	0,4	2,75	0,06 + / - 0,57 -0,03 + / - 0,65		0,61	0,22	0,067
10	H15 (CoLiTec)	154970 (37495)	768	0,45	2	-0,03 + / - 0,49 0,06 + / - 0,54		0,515	0,25	0,067
11	106	75340 (18093)	73	0,6	2	0,04 + / - 0,36 -0,11 + / - 0,35		0,355	0,17	0,117

Продолжение таблицы 3.9

12	291	70355 (19028)	646	1,8	0,6	-0,13 +/- 0,36 0,15 +/- 0,27	0,315	0,52	0,191
13	J75	48469 (13209)	561	0,45	1,47	-0,04 +/- 0,42 -0,14 +/- 0,40	0,41	0,28	0,146
14	644	34164 (6255)	954	1,2	1				
15	A50 (CoLiTec)	33386 (9755)	72	0,6	2,06	-0,03 +/- 0,51 0,05 +/- 0,51	0,51	0,24	0,058
16	926	28578 (8460)	171	0,81 0,41	0,87	0,15 +/- 0,38 0,27 +/- 0,39	0,385	0,44	0,309
17	461	28038 (6281)	782	0,60 1,02	1,1	-0,03 +/- 0,27 0,14 +/- 0,27	0,27	0,24	0,143
18	A14	24354 (6448)	115	0,5	0,62	0,08 +/- 0,41 -0,06 +/- 0,36	0,385		0,1
19	J04	23322 (6460)	188	1,0	0,62	0,16 +/- 0,29 0,24 +/- 0,30	0,295	0,47	0,288
20	A77	21677 (5423)	318	0,5		0,27 +/- 0,63 0,22 +/- 0,50	0,565		0,348
21	114	18352 (3203)	174	0,3		0,03 +/- 0,42 -0,12 +/- 0,35	0,385		0,124
22	689	18013 (1287)	0	1,3		0,00 +/- 0,15 -0,02 +/- 0,14	0,145		0,02
23	G92	17515 (4934)	12	0,64		0,08 +/- 0,62 0,05 +/- 0,58	0,6		0,094
24	H21	16639 (3505)	143	0,61, 0,81	0,8	0,06 +/- 0,40 0,01 +/- 0,42	0,41	0,51	0,061
25	J43	12837 (3246)	116	0,5	1,2	0,12 +/- 0,53 0,24 +/- 0,47	0,5	0,416	0,268
26	A24	10547 (1489)	0	0,36	1,4	0,16 +/- 0,46 0,19 +/- 0,42	0,44	0,31	0,248
27	621	10201 (2379)	233	0,6	1,2	0,08 +/- 0,34 -0,02 +/- 0,33	0,335	0,27	0,082
28	807	10144 (2406)	4	0,41		0,05 +/- 0,83 0,12 +/- 0,63	1,73		0,13
29	I40	8633 (134)	3	0,6	0,64	0,02 +/- 0,15 -0,01 +/- 0,17	0,16	0,2	0,022
30	141	7393 (717)	37	1,2	1,01	0,03 +/- 0,22 0,04 +/- 0,22	0,22	0,22	0,05

Таблица 3.10 – Наиболее продуктивные обсерватории мира по наблюдению астероидов за 2012 год

(1) N	(2) Код Обсерват.	(3) Измерения, Объекты	(4) Открытия	(5) D,m	(6) S"/pix	(7)		(8) $\sigma''$	(9) $\sigma_{\text{pix}}$	(10) СМО
						RA( $\bar{\Delta}_\alpha$ +/- $\sigma_\alpha$ )	DE( $\bar{\Delta}_\delta$ +/- $\sigma_\delta$ )			
1	G96	2080033 (384204)	2080033	1,5	1	0,02 +/- 0,33 0,02 +/- 0,28		0,305	0,305	0,028
2	F51	1948353 (467091)	1948353	1,8	0,3	0,07 +/- 0,15 0,04 +/- 0,17		0,16	0,53	0,081
3	703	1723293 (282864)	1723293	0,68	2,6	-0,22 +/- 0,65 0,07 +/- 0,62		0,635	0,24	0,231
4	704	1681504 (262209)	1681504	1	2,2	0,26 +/- 0,67 0,43 +/- 0,64		0,655	0,29	0,502
5	691	896972 (163714)	896972	0,9	1	-0,16 +/- 0,32 0,10 +/- 0,29		0,305	0,27	0,189
6	E12	259295 (62621)	259295	0,5	1,8	-0,01 +/- 0,51 0,29 +/- 0,50		0,505	0,28	0,29
7	J43	102641 (22682)	102641	0,5	1,2	0,19 +/- 0,48 0,05 +/- 0,40		0,44	0,36	0,196
8	926	100161 (29986)	100161	0,81	0,87	0,02 +/- 0,37 0,05 +/- 0,35		0,36	0,41	0,54
9	H15 (CoLiTec)	97878 (24170)	97878	0,45	2	-0,06 +/- 0,50 -0,01 +/- 0,53		0,515	0,25	0,061
10	106	72192 (17451)	72192	0,6	2	0,04 +/- 0,36 -0,12 +/- 0,34		0,35	0,17	0,126
11	A14	57243 (16239)	57243	0,5		0,06 +/- 0,37 -0,02 +/- 0,32		0,345		0,063
12	J04	43209 (10708)	43209	1	0,62	0,21 +/- 0,28 0,20 +/- 0,27		0,275	0,44	0,29
13	D00 (CoLiTec)	31494 (7403)	31494	0,4	2,06	0,00 +/- 0,57 -0,06 +/- 0,41		0,49	0,23	0,06
14	291	24272 (6224)	24272	1,8	0,6	0,07 +/- 0,33 0,13 +/- 0,28		0,305	0,5	0,148
15	461	23847 (5615)	23847	0,6	1,1	0,00 +/- 0,27 0,15 +/- 0,27		0,27	0,24	0,15
16	644	22714 (4486)	22714	1,2	1					
17	H21	22672 (3870)	22672	0,61	0,8	0,03 +/- 0,34 0,01 +/- 0,36		0,35	0,43	0,032

Продолжение таблицы 3.10

18	I41	21245 (2392)	21245	1,2	1,01	0,11 + / - 0,23 -0,03 + / - 0,23	0,23	0,22	0,114
19	A24	18940 (2412)	18940	0,36	1,4	0,14 + / - 0,37 0,24 + / - 0,33	0,35	0,25	0,278
20	645	18369 (5650)	18369	2,5	0,396				
21	807	12702 (2383)	12702	0,41		0,04 + / - 0,29 -0,01 + / - 0,24	0,265		0,041
22	A50 (CoLiTec)	11559 (3725)	11559	0,6	2,07	0,25 + / - 0,50 -0,04 + / - 0,46	0,48	0,23	0,253
23	716	10669 (491)	10669	0,35	2,5	0,06 + / - 0,33 -0,01 + / - 0,23	0,28	0,1	0,061
24	D29	9918 (2927)	9918	1,04	1,705	0,09 + / - 0,43 -0,01 + / - 0,44	0,435	0,25	0,091
25	C41	8904 (3188)	8904	0,4	1,8	-0,16 + / - 0,85 0,09 + / - 0,72	0,785	0,43	0,184
26	621	6782 (1692)	6782	0,6	1,2	0,10 + / - 0,35 -0,01 + / - 0,35	0,35	0,29	0,101
27	H45	6414 (368)	6414	0,51		0,04 + / - 0,33 -0,05 + / - 0,31	0,32		0,064
28	D03	5489 (1396)	5489	0,4	1,2	-0,06 + / - 0,64 -0,05 + / - 0,45	0,545	0,45	0,078
29	950	5477 (800)	5477	2,5		0,09 + / - 0,28 0,11 + / - 0,24	0,26		0,142
30	71	5427 (329)	5427	0,5		0,01 + / - 0,63 0,12 + / - 0,43	0,53		0,12

На основе данных Центра малых планет Гарвардского университета [79, 70, 191, 192] по результатам сравнительного анализа, обсерватории, использующие ПО CoLiTec, являются одними из лучших в списке ТОП-30 обсерваторий мира и лучшими среди обсерваторий, использующих телескопы с малой апертурой (табл. 3.9, 3.10). Это было обеспечено, в том числе, и за счет использования разработанного во время диссертационных исследований метода автоматического выбора опорных звезд.

В таблицах 3.9, 3.10 общее количество измерений и объектов (колонка 3, табл. 3.9, 3.10), а также количество открытий астероидов (колонка 4, табл. 3.9, 3.10) представлены согласно циркулярам MPC 2011 и 2012 года [79, 191, 192]. Для каждой обсерватории в таблицах 3.9 и 3.10 указаны следующие параметры: диаметр  $D$  главного зеркала телескопа, метры (колонка 5, табл. 3.9, 3.10); масштаб  $S_{pix}$  пикселей ПЗС-матрицы, угловые секунды (колонка 6, табл. 3.9, 3.10); среднее отклонение по прямому восхождению (RA)  $\bar{\Delta}_\alpha$  и склонению (DE)  $\bar{\Delta}_\delta$ , а также среднеквадратические отклонения (СКО)  $\hat{\sigma}_\alpha$  и  $\hat{\sigma}_\delta$  отклонений прямого восхождения (RA) и склонения (DE) соответственно (колонка 7, табл. 3.9, 3.10), значения которых приведены согласно MPC. Для расчета СКО  $\sigma_{\alpha\delta}$  позиционных ПЗС-измерений, в угловых секундах (колонка 8, табл. 3.9, 3.10); СКО  $\sigma_{pix}$  позиционных ПЗС-измерений, в пикселях (колонка 9, табл. 3.9, 3.10); среднее отклонение  $\hat{\Delta}_{\alpha\delta}$  ПЗС-измерений положения объекта (колонка 10, табл. 3.9, 3.10) использовались выражения:

$$\sigma_{\alpha\delta} = 0,5(\sigma_\alpha + \sigma_\delta); \quad (3.34)$$

$$\sigma_{pix} = \frac{\sigma_{\alpha\delta}}{S_{pix}}; \quad (3.35)$$

$$\hat{\Delta}_{\alpha\delta} = \sqrt{(\bar{\Delta}_\alpha)^2 + (\bar{\Delta}_\delta)^2}. \quad (3.36)$$

По данным Minor Planet Center (MPC) [140], средние ошибки позиционных ПЗС-измерений ПО CoLiTec и СКО позиционных ПЗС-измерений, выраженные в пикселях, одни из наименьших среди TOP-30 обсерваторий по количеству позиционных ПЗС-измерений астероидов в 2011 и 2012 году и наименьшие среди обсерваторий, использующих телескопы с малой апертурой (табл. 3.9, 3.10) [79, 191, 192].

Из таблиц 3.9, 3.10 видно, что достаточно высокие показатели имеет СКО позиционных ПЗС-измерений  $\sigma_{pix}$ , выраженное в пикселях (колонка 9, табл.

3.9, 3.10). [79, 191, 192], в отличие от СКО позиционных ПЗС-измерений  $\sigma_{\alpha\delta}$ , выраженное в угловых секундах (колонка 8, 3.9, 3.10). Однако это связано, прежде всего, с используемым масштабом пикселя и данный показатель в большей степени характеризует систему телескоп–ПЗС-камера–используемое ПО [79].

На рисунках 3.25, 3.26 представлены показатели точности ведущих астероидных обзоров мира по данным за 2011 и 2012 годы [70, 191, 192], на которых: а) модуль средних отклонений измерений объектов; б) СКО оценок углового положения объектов, пиксели; в) СКО оценок прямого восхождения объектов, угловые секунды; г) СКО оценок склонения объектов, угловые секунды.

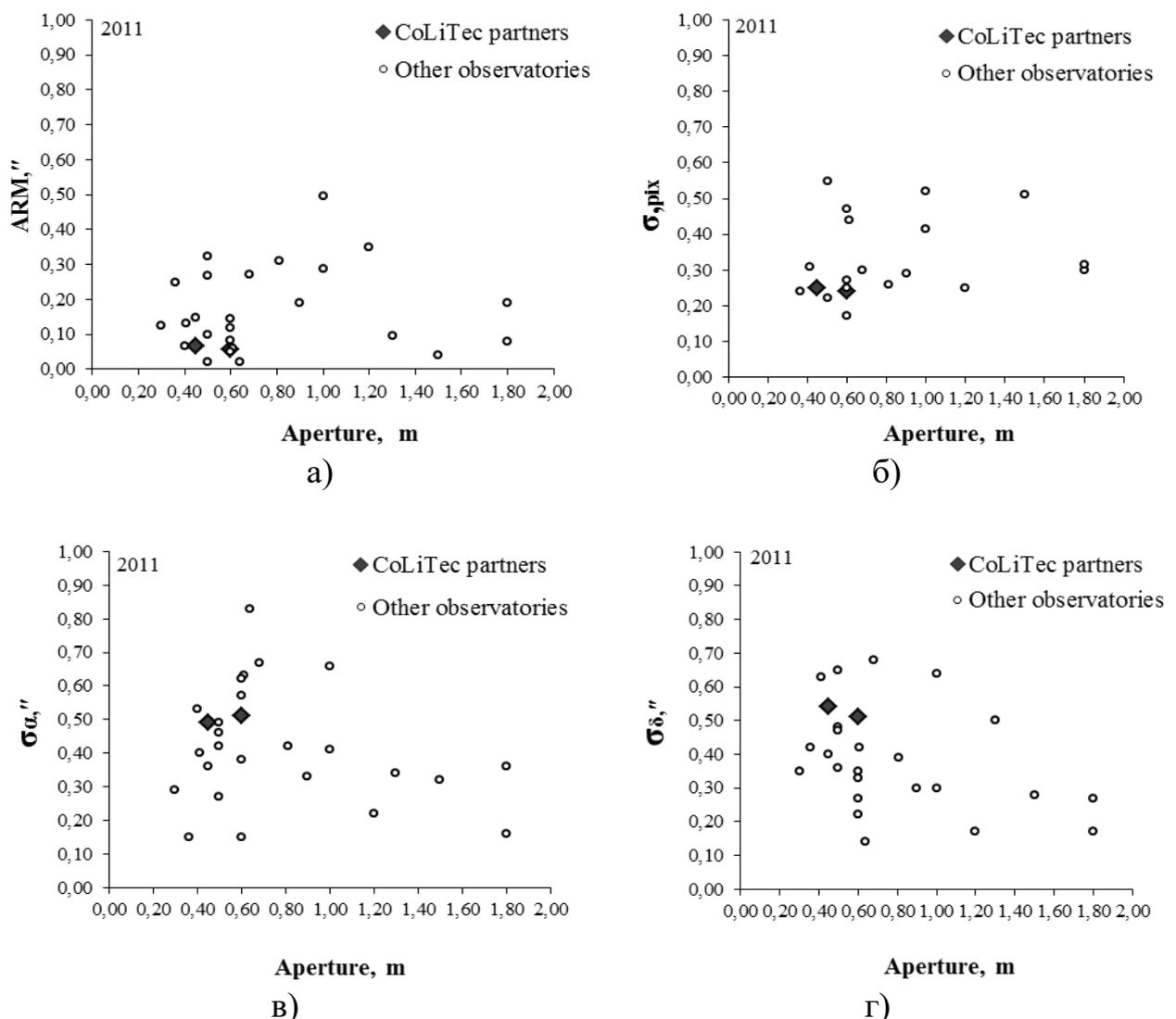


Рисунок 3.25 – Ведущие астероидные обзоры мира по данным за 2011 год

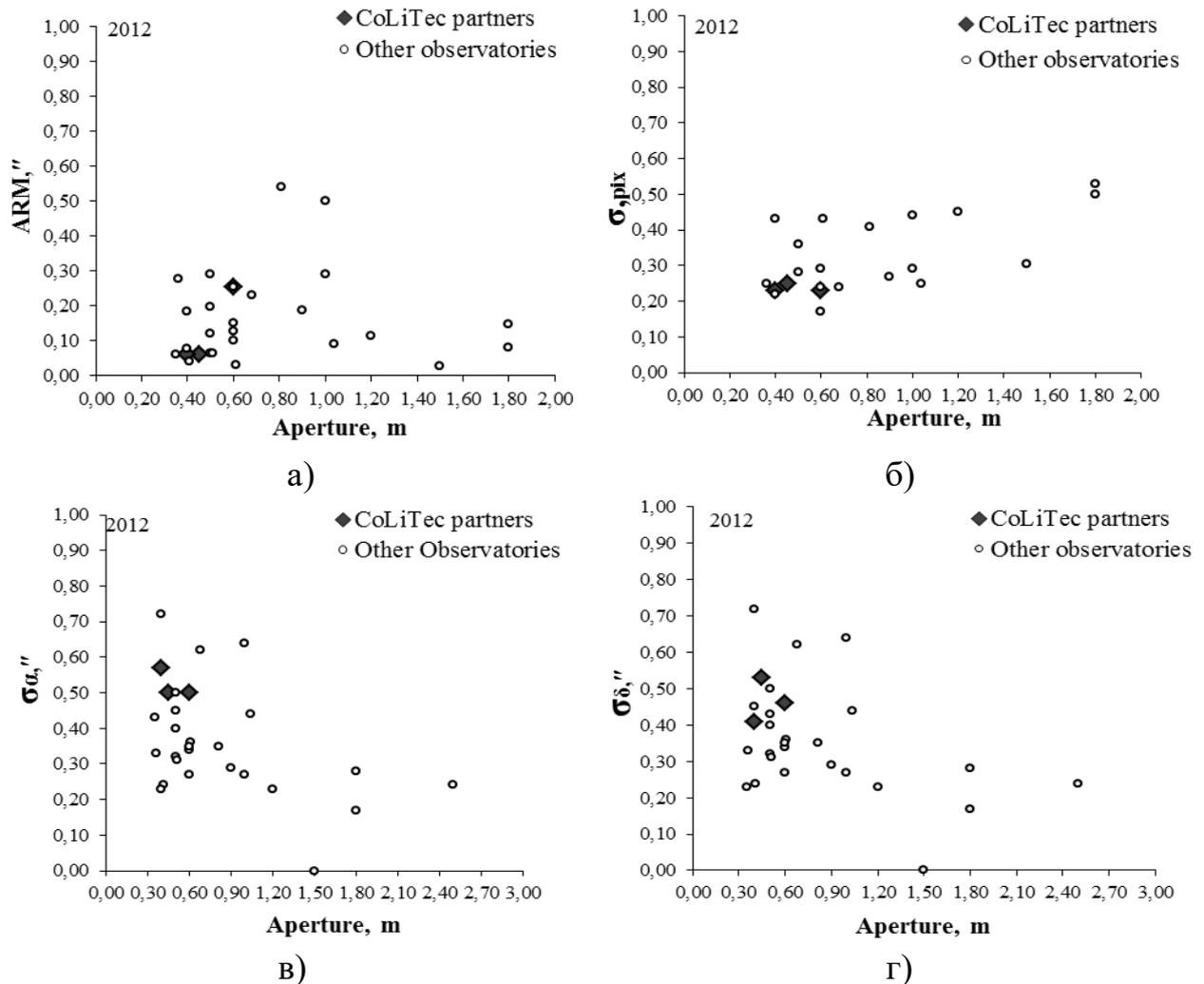


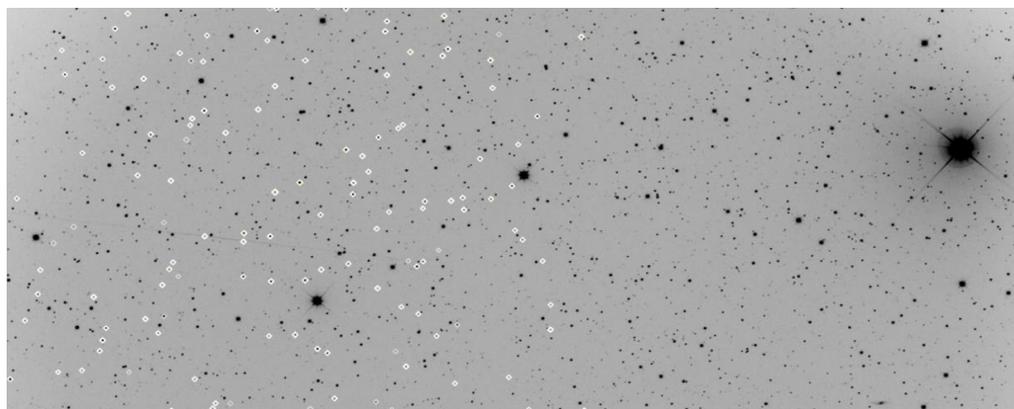
Рисунок 3.26 – Ведущие астероидные обзоры мира по данным за 2012 год.

**Сравнительный анализ показателей точности оценок углового положения опорных звезд в пространстве по данным изображений программными обеспечениями CoLiTec и Astrometrica.** Подтверждением эффективности и надежности разработанного вычислительного метода автоматического выбора опорных звезд на цифровых изображениях также является результат сравнения показателей точности оценок углового положения опорных звезд в пространстве по данным изображений ПО CoLiTec и Astrometrica [192].

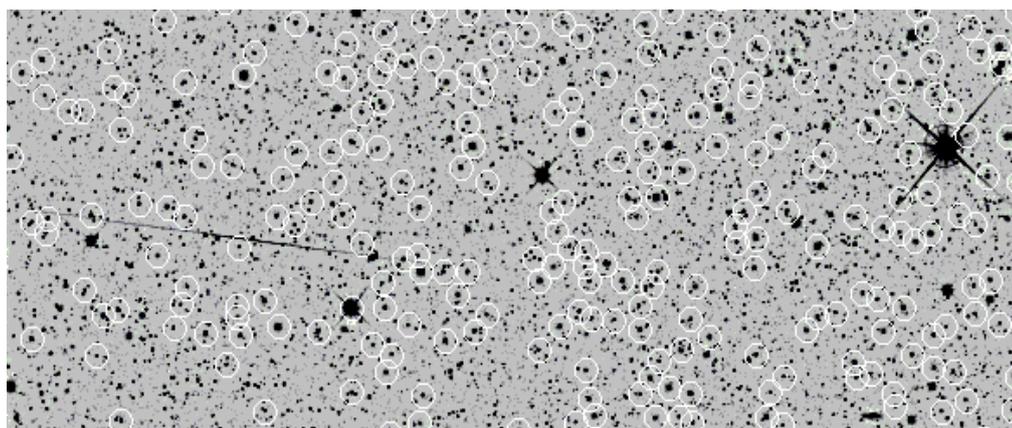
ПО Astrometrica – достаточно известное ПО для обработки позиционных ПЗС изображений. Данная программа акцентирует внимание на измерении малых тел Солнечной системы (астероидов, комет).

При проведении сравнительного анализа показателей точности измерений

по результатам обработки одних и тех же тестовых кадров ПО Astrometrica и CoLiTec, каталог UCAC-4 [206, 207] использовался в качестве опорного. Кадры были получены в обсерватории ISON-NM (H15). Всего в исследовании было



а)



б)

Рисунок 3.27 – Отображение на цифровом кадре:

а) опорных звезд ПО Astrometrica; б) опорных звезд ПО CoLiTec

использовано 19 серий по 4 кадра каждая. В предварительном анализе было использовано 36 серий. Однако кадры остальных серий не получили надежного отождествления с использованием Astrometrica, то есть на каждой серии из четырех кадров был хотя бы один кадр, не отождествленный с используемым звездным каталогом. Некоторые кадры были отброшены из-за того, что все опорные звезды Astrometrica находились в одной половине кадра, при равномерном распределении опорных звезд на кадре при использовании CoLiTec (рис 3.27). Также были исключены кадры с существенными сбоями в суточном

ведении и полученные при сильном ветре.

Сравнительный анализ точности оценки положения опорных звезд показал практически полное совпадение их показателей точности для CoLiTec и Astrometrica при условии, что кадры были надежно отождествлены в Astrometrica. Всего было проанализировано 30 391 измерение опорных звезд на указанных выше 19 сериях по 4 кадра.

Таким образом, проведенный анализ показал, что частота критических ошибок расчета постоянных пластинок и выбора опорных звезд в ПО CoLiTec ниже, чем у ПО Astrometrica [70, 191, 192], прежде всего, это говорит о том, что в ПО CoLiTec качественно организован выбор опорных звезд [192].

Таким образом, проведенный анализ показал, что частота критических ошибок расчета постоянных пластинок и выбора опорных звезд в ПО CoLiTec ниже, чем у ПО Astrometrica [70, 191, 192], прежде всего, это говорит о том, что в ПО CoLiTec качественно организован выбор опорных звезд [192].

При использовании CoLiTec и Astrometrica при надежном отождествлении кадров последней СКО составляет по прямому восхождению 0.08, а по склонению 0.07 угловых секунд независимо от используемого ПО (таблица 3.10).

Таблица 3.11 – Распределение отклонений по прямому восхождению измерений опорных звезд

<b>Все измерения</b>			
<b>Обработано измерений</b>	<b>30391</b>	<b>28872</b>	<b>27352</b>
Процент отбраковки худших измерений, по модулю вектора отклонений	0%	5%	10%
Среднее отклонений RA, угл. сек.	0,00	0,00	0,00
Среднее отклонений DE, угл. сек.	0,00	0,00	0,00
Макс. модуль отклонения RA, угл. сек.	0,32	0,15	0,13
Макс. модуль отклонения DE, угл. сек.	0,33	0,14	0,12
СКО отклонения по RA, угл. сек.	0,08	0,08	0,07
СКО отклонения по DE, угл. сек.	0,07	0,07	0,06

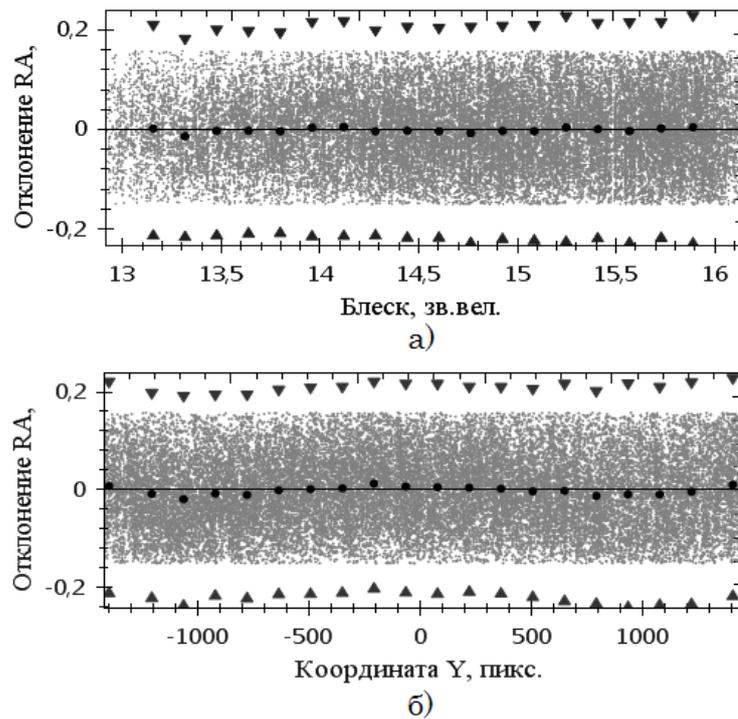


Рисунок 3.28 – Зависимость отклонений прямого восхождения: а) от каталожной оценки блеска опорных звезд; б) от положения опорных звезд на кадре

Таблица 3.12 – Распределение отклонений позиционных ПЗС-измерений опорных звезд по диапазонам видимого блеска

Диапазон блеска		Количество ПЗС-измерений в диапазоне	СКО отклонений по RA, угл. сек.	СКО отклонений по DE, угл. сек.
min	max			
11,5	12,0	11	0,10	0,05
12,0	13,0	823	0,08	0,07
13,0	14,0	5989	0,08	0,07
14,0	15,0	10347	0,08	0,07
15,0	15,5	5361	0,08	0,07
15,5	16,0	6245	0,08	0,08
16,0	16,5	1604	0,09	0,08
16,5	17,0	11	0,10	0,07
Всего		30391	0,08	0,07

При исследованиях было установлено, что при малых ОСШ измерения Astrometrica имеют СКО на 30÷50% больше, чем CoLiTec [79, 192]. Таким образом, сравнение статистических характеристик измерений ПО CoLiTec и Astrometrica по одному и тому же набору тестовых кадров свидетельствует, что

пределы достоверных измерений ПО CoLiTec шире, чем у ПО Astrometrica, а расширение соответствует области предельно малых ОСШ, в результате чего находятся объекты, которые не замечает глаз. При ОСШ, превышающем 6, результаты примерно одинаковы [192].

Итак, исследования, посвященные сравнительному анализу показателей точности оценок углового положения опорных звезд в пространстве по данным изображений программными обеспечениями CoLiTec и Astrometrica подтвердили как высокую точность позиционных ПЗС-измерений ПО автоматического поиска астероидов и комет на серии ПЗС-кадров CoLiTec, так и эффективность разработанных в работе вычислительных методов: частного предварительного отождествления измерений цифровых кадров; полного предварительного отождествления измерений цифровых кадров с существенной неопределенностью параметров отождествления; автоматического выбора опорных звезд на цифровых изображениях.

### **Выводы по разделу 3**

1. Разработан многоэтапный вычислительный метод автоматического выбора опорных звезд на цифровых изображениях, который используется для высокоточного определения углового положения объектов в пространстве по данным изображений. Разработанный метод учитывает основные особенности процесса формирования астрономических измерений по данным цифровых кадров. Для обеспечения высоких показателей точности определения углового положения объектов в пространстве по данным изображений в методе реализовано равномерное распределение опорных звезд на кадре. Также разработанный метод устойчив к различным видам артефактов и ошибок, возникающих при формировании цифрового изображения. Например, значимыми предпосылками ошибок может быть наличие на кадре яркого трека ИСЗ, пересекающихся изображений близких объектов или объектов, не имеющих пика.

2. Разработан метод автоматического формирования показателей точности оценок углового положения опорных звезд в пространстве по данным изображений. В качестве источников данных в методе используются ПЗС-измерения угловых положений опорных звезд, а также астрометрический каталог UCAC 4.0 [206, 207] и фотометрический каталог USNO B1.0 [86, 101]. Разработанный метод позволяет проводить анализ расширенного множества показателей точности оценок углового положения опорных звезд на расширенном множестве анализируемых подвыборок измерений и кадров.

В качестве измеренных значений может использоваться серия кадров, обработанная с помощью ПО CoLiTec [17] или других программных продуктов обработки ПЗС-кадров астероидных обзоров.

3. Разработанные в диссертационной работе вычислительные методы позволили значительно повысить показатели точности оценки угловых положений объектов, подтверждением чего являются результаты обработки ПЗС-кадров. По результатам проведенных исследований при масштабе пикселя  $2.8''$  среднеквадратическое отклонение экваториальных координат опорных звезд по прямому восхождению составляло  $0.08''$ , а по склонению –  $0.09''$ . Указанные значения СКО обеспечивают выполнение требований Центра малых планет к точности оценки угловых положений астероидов на цифровых изображениях.

4. В диссертационной работе так же было проведено сравнение статистических характеристик измерений ПО CoLiTec и ПО Astrometrica, в результате которого анализ статистических характеристик позиционных ПЗС-измерений ПО CoLiTec и Astrometrica по одному и тому же набору тестовых кадров показал, что частота критических ошибок в ПО CoLiTec ниже, чем у ПО Astrometrica. Прежде всего, это связано с тем, что не все кадры получили надежное отождествления с использованием ПО Astrometrica. На каждой серии из четырех кадров был хотя бы один кадр, не отождествленный с используемым звездным каталогом. Всего было проанализировано 30 391 измерение опорных звезд на 19 сериях по 4 кадра. Некоторые кадры были отброшены из-

за того, что все опорные звезды *Astrometrica* находились в одной половине кадра, при равномерном распределении опорных звезд на кадре при использовании *CoLiTec*. Кроме того, за счет использования разработанного в диссертации метода автоматического выбора опорных звезд в области предельно малых ОСШ измерения ПО *CoLiTec* имеют СКО на 30–50% меньше, чем ПО *Astrometrica*.

Материалы раздела опубликованы в работах [7, 51, 58, 59, 63, 69, 71, 75, 76, 83, 145, 146, 174, 191, 192].

## ВЫВОДЫ

Для высокоточного определения углового положения объектов в пространстве по данным изображений решена актуальная **научно-техническая задача** разработки и анализа вычислительных методов автоматического выбора опорных звезд для оценки угловых положений объектов в пространстве по данным изображений.

В результате исследований были получены следующие новые научные результаты.

1. Разработан вычислительный метод частного предварительного отождествления измерений кадров одной серии. Использование разработанного метода позволяет получить начальное приближение параметров попарного соответствия (паросочетания) между двумя множествами измерений, сформированных на двух кадрах и соответствующих одной и той же области небесной сферы. В частном предварительном отождествлении выдвигаются гипотезы о сочетании измерений разных кадров, принадлежащих одному объекту. Каждой такой гипотезе о паросочетании соответствуют условные оценки параметров сдвига. Безусловной оценкой параметров сдвига между кадрами считается условная оценка, соответствующая гипотезе с наибольшим весом. В качестве веса указанных гипотез используется количество подтверждений, то есть количество круговых областей подтверждения, которым соответствует не менее одного измерения другого кадра. Поиск параметров сдвига продолжается до нахождения первой гипотезы, в которой количество подтверждений будет больше наперед заданного минимально допустимого количества.

2. Разработан вычислительный метод полного предварительного отождествления цифровых изображений с существенной неопределенностью их параметров. Метод полного предварительного отождествления используется для нахождения начального приближения при отождествлении измерений кадров со звездами каталога в условиях значительной неопределенности параметров отожд-

дествления. При неопределенности относительно всех 6 параметров отождествления, а именно относительно параметров сдвига кадра, угла поворота камеры и масштабов пикселя в качестве начального приближения необходимо получить 6 параметров линейных постоянных пластинки.

Для этого достаточно иметь три точки, звезды на кадре, которые составляют треугольник первичного отождествления.

Исходя из этого, перебираются звезды как вершины треугольников отождествления на кадре и в каталоге. Каждой такой паре треугольников соответствует гипотеза «первичного отождествления», в рамках которой определяются условные оценки параметров отождествления.

3. Разработан вычислительный метод автоматического выбора опорных звезд на цифровых изображениях. Суть метода выбора опорных звезд определяется противоречием между необходимостью использования не менее как кубической модели редукции (постоянных пластинки), определяющей связь между идеальной (тангенциальной) и экваториальной системой координат и малым количеством отождествленных пар «измерение-звезда» на этапах полного предварительного или предварительного отождествления измерений кадра и формуляров каталога. Данное противоречие преодолевается многоэтапным увеличением порядка модели редукции (постоянных пластинки) с одновременным увеличением количества используемых для их расчета пар. Разработанный метод устойчив к различным видам артефактов и ошибок, возникающих при формировании цифрового изображения.

4. Разработан метод исследования показателей точности оценок угловых положений опорных звезд в пространстве по данным изображений. Метод позволяет проводить анализ расширенного множества показателей точности оценок угловых положений измеряемых объектов на расширенном множестве анализируемых подвыборок измерений и кадров. Разработанные в диссертационной работе вычислительные методы позволили значительно повысить показатели точности оценки угловых положений объектов в пространстве по данным изображений,

подтверждением чего являются результаты обработки ПЗС-кадров. По результатам проведенных исследований при масштабе пикселя  $2.8''$  среднеквадратическое отклонение экваториальных координат опорных звезд по прямому восхождению составляло  $0.08''$ , а по склонению –  $0.09''$ . Указанные значения СКО обеспечивают выполнение требований Центра малых планет к точности оценки угловых положений астероидов на цифровых изображениях.

5. Сравнительный анализ точности оценки углового положения опорных звезд с помощью ПО Astrometrica и CoLiTec показал практически полное совпадение их показателей точности при условии, что кадры были надежно отождествлены в Astrometrica. Всего было проанализировано 30 391 измерение опорных звезд на 19 сериях по 4 кадра. Однако не все кадры серий получили надежное отождествления с использованием Astrometrica, то есть на каждой серии из четырех кадров был хотя бы один кадр, не отождествленный с используемым звездным каталогом. Некоторые кадры были отброшены из-за того, что все опорные звезды Astrometrica находились в одной половине кадра, при равномерном распределении опорных звезд на кадре при использовании CoLiTec.

Анализ показателей точности оценок углового положения опорных звезд по прямому восхождению от их блеска и координат на кадре свидетельствуют об отсутствии влияния этих параметров на точность измерений опорных звезд, что свидетельствует об эффективности разработанного метода выбора опорных звезд.

6. Разработанные в диссертационной работе методы были внедрены в программное обеспечение автоматического поиска астероидов и комет на серии ПЗС-кадров CoLiTec. На данный момент ПО CoLiTec используется в Одесской астрономической обсерватории – Odessa-Mayaki и в лаборатории космических исследований ДВНЗ «Ужгородський національний університет». Так же разработанные методы используются в рамках научно-исследовательской работы № 307 «Динамический интеллектуальный анализ последовательностей нечеткой информации в условиях существенной

неопределенности на основе гибридных систем вычислительного интеллекта» (№ГР 0116U002539) на базе Харьковского национального университета радиоэлектроники и внедрены в рамках учебного процесса.

7. Разработанные вычислительные методы могут быть использованы в различных программных комплексах обработки цифровых изображений для высокоточного определения угловых положений объектов, например, в программах автоматизированного обнаружения малых тел Солнечной системы на серии цифровых кадров. Кроме того, предложенные методы могут быть использованы для определения угловых положений объектов любой природы при распознавании этих объектов.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Айвазян С.А. Прикладная статистика: Исследование зависимостей / С.А. Айвазян, В.М. Бухштабер, И.С. Енюков, Л.Д. Мешалкин. – М.: Финансы и статистика, 1985. – 488 с.
2. Айвазян С.А. Прикладная статистика: Классификация и снижение размерности / С.А. Айвазян, В.М. Бухштабер, И.С. Енюков, Л.Д. Мешалкин. – М.: Финансы и статистика, 1989. – 607 с.
3. Андреева М.И., Горелик Р.Е., Чесноков О.К., Случайные величины и законы их распределения. / М.И.Андреева, Р.Е. Горелик, О.К. Чесноков, ВолгГТУ.: – Волгоград, 2010. – 116 с.
4. Астрономічний енциклопедичний словник / За загальною редакцією Ш.А. Климишина та А. О. Корсунь. – Львів, 2003. – 548 с.
5. Бахвалов Н.С. Численные методы / Н.С. Бахвалов, Н.П. Жидков, Г.М. Кобельков– М.: Лаборатория базовых знаний, 2003. – 632 с.
6. Безкровный М. М. Методы исследования статистических характеристик CCD-измерений положений и блеска объектов солнечной системы / М. М. Безкровный, А. Н. Дашкова, Н.С. Соковикова, В.Е. Саваневич, А. Б. Брюховецкий // Восточно-Европейского журнал передовых технологий. – 2015. – Т. 2/2(22). – С. 26 – 37.
7. Безкровный М.М. Исследование точности оценки местоположения небесных объектов на ПЗС-кадрах / М.М. Безкровный, В.Е. Саваневич, Н.С. Соковикова, Я.С. Мовсесян, А.В. Погорелов, А.Н. Дашкова, Н.Ю. Дихтярь, А.Б. Брюховецкий, Л.О. Михайлова // Восточно-Европейского журнал передовых технологий. – 2014. – Т. 4/2(70). – С. 16 – 22.
8. Безкровный М.М. Оценка местоположения объекта на ПЗС-кадре при среднем времени экспозиции / М.М. Безкровный, А.М. Кожухов, В.Е. Саваневич, А.Б. Анненков, Н.С. Соковикова // Системи обробки інформації: Зб. наук. пр. – Харків: ХУПС, 2012. – Вип. 7(105). – С. 44 – 50.

9. Бортакoвский А.С., Пантелеев, А.В. Аналитическая геометрия в примерах и задачах. М.: Высш. школа, 2005. – 496 с.
10. Брандт З. Анализ данных: Статистические и вычислительные методы для научных работников и инженеров / З. Брандт; пер. с англ. – М.: Мир, АСТ, 2003. – 686 с.
11. Брюховецкий, А. Б. Вычислительные методы обработки данных для обнаружения объектов с локально неизменными параметрами видимого движения / А. Б. Брюховецкий // Радиоэлектроника и информатика: науч.-техн. журн. – Х. : Изд-во ХНУРЭ, 2012. – Вып. 2. – С. 15-22.
12. Вавилова И. Б., Пакуляк Л. К., Шляпников А. А., и др. Астроинформационный ресурс Украинской виртуальной обсерватории (УкрВО): объединенный архив данных наблюдений, научные задачи и программное обеспечение // Кинематика и физика небесных тел. – 2012. – Т.28. – №2. – С. 59–80.
13. Вагис Г.А., Гупал А.М., Сергиенко И.В. Эффективность байесовской процедуры распознавания. Дискретный случай // Кибернетика и системный анализ. – 2001. – № 4. – С. 3 – 13.
14. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Высшая школа, 2001. – 831 с.
15. Вентцель Е.С. Теория вероятности и ее инженерные приложения. / Е.С. Вентцель Л.А. Овчаров – 2-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2000. – 480с.
16. Вероятность и математическая статистика: Энциклопедия / Под ред. Ю.В.Прохорова. – М.: Большая российская энциклопедия – 2003 г. – 912 с.
17. Виноградов И.М., Аналитическая геометрия / И.М. Виноградов – М.: Наука, Гл. Ред.. физ.-мат. лит, 1986. – 176 с.
18. Волков, И.К. Исследование операций / И.К. Волков, Е. А. Загоруйко – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 436 с.
19. Воробьев, С. Н. Статистическое моделирование информационных систем / С. Н. Воробьев, Н. В. Гирина, И. В. Лазарев, Л. А. Осипов – ГУАП, 2010 – 151 с.
20. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес,

Р. Вудс; пер. с англ. – М: Техносфера, 2005. – 1072 с.

21. Горбанев Ю.М. Методика и статистика телевизионных наблюдений телескопических метеоров / Ю.М. Горбанев, А. В. Голубаев, В.В. Жуков, Е.Ф. Князькова, С.Р. Кимаковский, И.И. Кимаковская, С.В. Подлесняк, Л.А. Сарест, И.А. Стогнеева, В.А. Шестопапов // *Астрономический вестник* – 2006. – №5 (40) – С. 449 – 464.

22. Губанов В.С. Оценка точности позиционных наблюдений с использованием ПЗС-матриц / В.С. Губанов, И.И. Куликова, Е.И. Малахов // *Кинематика и физика небесных тел.* – 1990. – Т. 6. – № 2. – С. 83 – 90.

23. Деденок В.П., Саваневич В.Е. Ієрархічний метод виявлення мало-розмірного рухомого об'єкта // *Системи озброєння та військова техніка.* – 2005. – № 1. – С. 40 – 45.

24. Дихтяр Н. Ю. Метод отождествления астрономических измерений CCD-кадра с формулярами звездного каталога / Н.Ю. Дихтяр, Я.С. Мовсесян, В.Е. Саваневич, А.Б. Брюховецкий. // *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т».* – Вып. 67. – Х., 2015. – С. 197-215.

25. Дихтяр Н.Ю. Аналитические выражения отклонений между оценками положений небесных объектов в задаче отождествления CCD-кадра / Н.Ю. Дихтяр, Я.С. Мовсесян, С.В. Хламов, В.Е. Саваневич // *Збірник наукових праць. Вісник НТУ «ХП»*, Серія «Нові рішення в сучасних технологіях» – 2015. – №14 (1123) – С. 21 – 28.

26. Дихтяр Н.Ю. Метод аварийного отождествления цифровых кадров с существенной неопределенностью их параметров / Н.Ю. Дихтяр, Я.С. Мовсесян, В.Е. Саваневич, С.В. Хламов // *Збірник наукових праць. Вісник НТУ «ХП»*, Серія «Нові рішення в сучасних технологіях» – 2016. – №18 (1190) – С. 128 – 139.

27. Дихтяр Н.Ю. Метод автоматического исследования статистических характеристик оценок параметров объектов, неподвижных на серии кадров

цифровых кадров одной серии / Н.Ю. Дихтяр, Я.С. Мовсесян, С.В. Хламов, А.В. Погорелов, В.Е. Саваневич // Всеукраинский межведомственный научно-технический сборник «Радиотехника» – 2016. – №184 – С. 37 – 44.

28. Дихтяр Н.Ю. Метод иерархического отождествления измерений кадра астрономического телескопа с формулярами звездного каталога / Н.Ю. Дихтяр, В.Е. Саваневич, Я.С. Мовсесян // Вісник НТУ «ХП» – 2015 – Т. 46 (1155) – С. 90 – 97.

29. Дихтяр Н.Ю. Метод предварительного отождествления измерений цифровых кадров одной серии / Н.Ю. Дихтяр, Я.С. Мовсесян, В.Е. Саваневич // Збірник наукових праць. Вісник НТУ «ХП», Серія «Нові рішення в сучасних технологіях» – 2015. – №62 (1171) – С. 58 – 63.

30. Дихтяр Н.Ю. Оценка параметров положения и видимого движения объектов по измерениям на серии кадров / Н.Ю. Дихтяр, Я.С. Мовсесян, В.Е. Саваневич // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна – 2015. – №28 – С. 18 – 32.

31. Дихтяр Н.Ю. Статистическая модель множества позиционных измерений на серии кадров участка небесной сферы / Н.Ю. Дихтяр, Я.С. Мовсесян, В.Е. Саваневич // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна – 2015. – №27 – С. 65 – 77.

32. Дихтяр Н. Ю. Декомпозиция общей задачи отождествления астрономических кадров со звездными каталогами на совокупность частных задач / Н.Ю. Дихтяр, Я.С. Мовсесян, В.Е. Саваневич, Е.Н. Диков // Системи обробки інформації. – 2015. – Вип. 9(134). – С. 24 – 29.

33. Дума Д. П. Загальна астрометрія. Навчальний посібник / Д.П. Дума – Київ: Наукова думка, 2007. – 600 с.

34. Ермаков С.М. Математическая теория оптимального эксперимента / С.М. Ермаков, А.А. Жиглявский. – М.: Наука, 1987. – 320 с.

35. Жураковский Ю.П., Полторак В.П. Теорія інформації та кодування. – К.: Вища школа, 2001. – 256 с.

36. Зализняк В.Е. Основы научных вычислений. Введение в численные методы для физиков. / В.Е. Зализняк – М.: Едиториал УРСС, 2002. – 296 с.
37. Зыков А.А. Основы теории графов // М.: Вузовская книга – 2004. – 664 с.
38. Катастрофические воздействия космических тел / под ред. В.В. Адушкина, И.В. Немчинова. Институт динамики геосфер РАН. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2005. – 310 с.
39. Киселев А.А. Теоретические основания фотографической астрометрии / А.А. Киселев – М.: Наука, Гл. ред. физ-мат. лит, 1989. – 264 с.
40. Кнут Д. Искусство программирования. Сортировка и поиск. 2-е издание – М.: Вильямс, 2013. – 824 с.
41. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. / А.И. Кобзарь – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 816 с.
42. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн; пер. с англ. – СПб.: Лань, 2003. – 831 с.
43. Костюкова, Н. Курс «Графы и их применение», Лекция 15: Паросочетания и свадьбы: «Теорема Холла о свадьбах» [электронный ресурс] – режим доступа: \www/ URL: <http://www.intuit.ru/studies/courses/58/58/lecture/895?page=1> – 25.07.2006г. – Название с экрана.
44. Кузьмин С.З. Цифровая радиолокация. Введение в теорию / С.З. Кузьмин – К.: Издательство КвиЦ, 2000. – 428 с.
45. Левин Б.Р., Тегина Н.В., Юдицкий А.И. Алгоритм различения траекторий движущихся объектов и оценки их координат // Радиотехника и радиоэлектроника. – 1982. – Т.27. – №10. – С. 1942-1948.
46. Левин Б.Р., Тегина Н.В., Юдицкий А.И. Различение траекторий движущихся объектов и оценивание их параметров // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Общие вопросы радиоэлектроники. – 1983. – Вып. 14.– С. 78 – 86.
47. Лемешко, Б.Ю. Статистический анализ данных, моделирование и исследование вероятностных закономерностей. Компьютерный подход: моно-

графия / Б.Ю. Лемешко, С.Б. Лемешко, С.Н. Постовалов, Е.В. Чимитова // Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – 888 с.

48. Милосердов И. В., Рябов А. В. Оптимальное оценивание координат попеременно наблюдаемых элементов групповой, пространственно-распределенной цели // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 2004. – №9. – С. 47 – 53.

49. Миронов А. В. Основы астрофотометрии. Практические основы высокоточной фотометрии и астрофотометрии звезд / А.В. Миронов – М: Физматлит, 2008. – 260 с.

50. Мовсесян Я.С. Отождествление измерений объектов на ПЗС-кадрах с объектами каталога / Я. С. Мовсесян, Н. Ю. Дихтяр // 18 Международный форум «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке». Сб. Материалов форума. Т.3. – Харьков: ХНУРЭ. 2014. – 261 – 262.

51. Мовсесян, Я.С. Метод исследования показателей точности оценок положения опорных звезд CCD-кадров / Я.С. Мовсесян, А.Н. Дашкова, В.Е. Саваневич, Н.Ю. Дихтяр, А.В. Погорелов // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т». – Вып. 69. – Х., 2015. – С. 189 – 199.

52. Молотов И.Е.,. Научная сеть оптических инструментов для астрометрических и фотометрических наблюдений. / И.Е. Молотов, В.М. Агапов, В.В. Куприянов и др. // Известия Главной астрономической обсерватории в Пулкове, 2009, № 219, вып. 1, с. 233 – 248.

53. Никулин Е. А. Компьютерная геометрия и алгоритмы машинной графики – СПб.: БХВ-Петербург, 2003 – 560 с.

54. Никулин Е. А. Компьютерная геометрия и алгоритмы машинной графики – СПб.: БХВ-Петербург, 2003 – 560 с.

55. Орлов А.И. Теория принятия решений. – М.: Издательство «Март», 2004. – 656 с.

56. Плахотников К.Э. Математическое моделирование и вычислительный эксперимент: Методология и практика. – М.: МЦНМО, 2003. – 280 с.

57. Погорелов А. В. Оценка экваториальных координат объектов на цифровом кадре для длиннофокусных и короткофокусных телескопов / А. В. Погорелов, В. Е. Саваневич // Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ" : зб. наук. пр. Темат. вип.: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків : НТУ "ХПІ" , 2016. – № 25 (1197). – С. 147 – 157.

58. Саваневич В. Е. Вычислительный метод выбора опорных звезд на цифровых изображениях / В. Е. Саваневич, Я. С. Мовсесян, Н. Ю. Дихтяр // Системи обробки інформації – 2016. – № 9(146). – С. 62 – 68.

59. Саваневич В. Е. Метод формирования внутреннего каталога объектов, неподвижных на серии кадров / В. Е. Саваневич, Я. С. Мовсесян, Н. Ю. Дихтяр // Системи обробки інформації – 2016. – № 8(145). – С. 44 – 49.

60. Саваневич В. Е., Брюховецкий А. Б., Кожухов А. М., и др. Оценка координат астероида на дискретном изображении // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2010. Вып. 162. – С. 78 – 86.

61. Саваневич В. Е., Кожухов А. М., Брюховецкий А. Б., и др. Метод сложения ПЗС-кадров с накоплением сигнала от астероида со слабым блеском и ненулевым видимым движением на серии ПЗС-кадров // Системи озброєння та військова техніка. – Харків: ХУПС, 2010. – Вип. 3(23). – С. 154 – 159.

62. Саваневич В.Е. Байесовская проверка многоальтернативных гипотез с их предварительной иерархической селекцией // Системи обробки інформації: Зб. наук. пр. – Харків: НАНУ, ПАНМ, ХВУ, 2004. – Вип. 8 (36). С. 165 – 169.

63. Саваневич В.Е. Виртуальные обсерватории и автоматизированное открытие астероидов и комет CoLiTec: исследования и разработки. / В. Е. Саваневич, А. Б. Брюховецкий, Власенко В.П., Н.С. Соковикова, С. В. Хламов, А.В. Погорелов, Я. С. Мовсесян, Н.Ю. Дихтяр //Всеукраїнська науково-практична конференція молодих вчених «Теоретичні та прикладні аспекти застосування інформаційних технологій в галузі природничих наук» – 2016. – С. 20 – 22.

64. Саваневич В.Е. Информационный подход к синтезу статистических алгоритмов с минимальной сложностью // Системи обробки інформації. Збірник наукових праць. – Х.: НАНУ, ПАНМ, ХВУ. – 2000. – С. 123 – 128.

65. Саваневич В.Е. Определение координат статистически зависимых объектов на дискретном изображении // Радиоэлектроника и информатика. – 1999. – № 1. – С. 4 – 8.

66. Саваневич В.Е. Оценка экваториальных координат астероида по оценкам его координат на ПЗС-кадре / В.Е. Саваневич, А.Б. Брюховецкий, А.М. Кожухов, Е.Н. Диков // Системи обробки інформації – 2010 – Вип. 6(87). – С. 172 – 179.

67. Саваневич В.Е. Постановка задачи синтеза алгоритмов минимальной сложности // Системи обробки інформації. Збірник наукових праць. – Х.: НАНУ, ПАНМ, ХВУ. – 2002. - Вип. 4 (20). – С. 67– 69.

68. Саваневич В.Е. Программа CoLiTec автоматизированного обнаружения небесных тел со слабым блеском / В. Е. Саваневич, А. Б. Брюховецкий, А. М. Кожухов, Е. Н. Диков, В. П. Власенко // Космічна наука і технологія. – 2012. – т.18. – №1. – С. 39 – 46.

70. Саваневич В.Е. Программа для автоматизированного открытия астероидов и комет CoLiTec: исследования и разработки / В. Є. Саваневич, А. Б. Брюховецкий, Н.С. Соковикова, С. В. Хламов, А.В. Погорелов, Я. С. Мовсесян, Н.Ю. Дихтяр // Міжнародний науковий семінар пам'яті Б.Л. Кащеєва до 96-річчя з дня народження «РАДІОМЕТЕОРИ, МЕТЕОРИ І МІЖПЛАНЕТНА СКЛАДОВА: ПОБЛИЗУ ТА НА ВІДСТАНІ», 15 березня 2016 р.: зб. матер. конф. – Харків, 2016. – С. 36 – 37.

71. Саваневич В.Е. Сравнительный анализ показателей точности ПЗС-измерений малых тел Солнечной системы программными обеспечениями CoLiTec и Astrometrica / В. Є. Саваневич, А. Б. Брюховецкий, Ю.Н. Иващенко, И.Б. Вавилова, М. М. Безкровный, Е.Н. Диков, В.П. Власенко, Н.С. Соковикова, Я. С. Мовсесян, А.В. Погорелов, С. В. Хламов // «15-та українська конференція з

космічних досліджень», 24–28 серпня 2015 р.: сб. матер. конф. – Одеса, 2015. – С. 167.

72. Саваневич В.Е., Брюховецкий А. Б., Кожухов А. М., и др. Програма CoLiTec автоматизированного обнаружения небесных тел со слабым блеском // Космічна наука і технологія. – 2012. – Т.18. – №1. – С. 39 – 46

73. Саваневич В.Е., Ветлугин Е.В. Введение и оптимизация параметров иерархической формы представления функции правдоподобия при классификации локационной информации // Системи обробки інформації: Зб. наук. пр. – Харків: НАНУ, ПАНМ, ХВУ, 2002. – Вип. 1 (17). – С. 27 – 33.

74. Свід. про реєстр. авт. права № 47290. Україна. Комп'ютерна програма «Програма автоматизованого відкриття астероїдів та комет на серії ПЗС-кадрів CoLiTec» / В. Є. Саваневич, О. Б. Брюховецький, О.М. Кожухов, Є.М. Діков, В.П. Власенко, Л.В. Єленін, М.М. Безкровний, О.Б. Анненков, О.В. Герасименко – прийнято 21. 01. 13.

75. Свід. про реєстр. авт. права № 54900. Україна. Комп'ютерна програма «Програма обробки та відображення астрономічних кадрів LookSky-CoLiTec» / Є.М. Діков, О. Б. Брюховецький, С.В. Хламов, В. Є. Саваневич, В.П. Власенко, Л.В. Єленін, О.В. Герасименко, М.М. Безкровний, Н.С. Соковікова, Я.С. Мовсесян, А.В. Погорелов – прийнято 20. 05. 14.

76. Свід. про реєстр. авт. права № 60021. Україна. Комп'ютерна програма «Програмне забезпечення для дослідження статистичних характеристик CCD-вимірювань положення і блиску об'єктів Сонячної системи SSOAnSe» / М.М. Безкровний, А.М. Дашкова, В. Є. Саваневич, О. Б. Брюховецький, С.В. Хламов, А.В. Погорелов, Н.С. Соковікова, Я.С. Мовсесян – прийнято 04. 06. 15.

77. Сергиенко И.В., Шило В.П. Задачи дискретной оптимизации: Проблемы, методы, решения, исследования. - К.: Наукова думка, 2003. – 261 с.

78. Симонова О.Г. МНК–оценка параметров зависимых линейных траекторий по классифицированной выборке // Системи обробки інформації: Зб. наук. пр. – Харків: НАНУ, ПАНМ, ХВУ, 2004. Вип. 9 (37). – С. 164 – 169.

79. Соковікова Н. С. Обчислювальні методи обробки цифрових зображень

для виявлення та оцінки параметрів об'єктів, що змазані власним рухом: дис. канд. техн. наук : 01.05.02 / Соковікова Наталія Сергіївна – Харків, 2016. – 165 с.

80. Соломенчук, В. Г. С60 Железо ПК 2011 / В. Г. Соломенчук, П. В. Соломенчук. – СПб.: БХВ-Петербург, 2011. – 384 с.

81. Таха, Хемди А. Введение в исследование операций, 7-е издание // Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2005. – 912 с.

82. Тимофеев Ю.М. Теоретические основы атмосферной оптики / Ю.М. Тимофеев, А.В. Васильев. – СПб.: Наука, 2003. – 474 с.

83. Хламов С. В. Software for asteroids survey processing. Current status and prospects / С. В. Хламов, В. Є. Саваневич, Я. С. Мовсеян, В. М. Ткачов, Є. М. Діков, О. Б. Брюховецький, А. М. Дашкова // "14-та українська конференція з космічних досліджень", 8–12 вересня 2014 р.: сб. матер. конф. – Ужгород, 2014. – С. 119.

84. Шустов Б. М. концепция системы противодействия космическим угрозам: астрономические аспекты / Б. М. Шустов, Л. В. Рыхлова, Ю. П. Кулешов и др. // Астрономический вестник – 2013 – Т. 47– № 4, С. 327 – 340.

85. Angryk, R. A. Special Section: Management, Search and Analysis of Solar Astronomy Big Data / R. A. Angryk, A. Csillaghy, P. C. Martens // Astronomy and Computing – 2015. – Vol. 13, P. 85 – 95.

86. Barron, J. T. Cleaning the USNO-B Catalog through automatic detection of optical artifacts / J. T. Barron, C. Stumm, D. W. Hogg, D. Lang // The Astronomical Journal – 2008. – Vol. 135, P. 414 – 422.

87. Bar-Shalom Y. Kalman Filter Versus IMM Estimator: When Do We Need / Y. Bar-Shalom // IEEE Trans. on AES. – 2003. – Vol. 39, № 4. – P. 1452 – 1456.

88. Bauer J. M. Photometry of Small Outer Solar System Bodies with the NEAT database / J. M. Bauer , K. J. Lawrence, B. J. Buratti et al. // Asteroids, Comets, Meteors (2008), pp. 8086 - 8093.

89. Björck A. Numerical Methods for Least Squares Problems / Björck A – Society for Industrial and Applied Mathematics, 1996. – P. 408.

90. Boattini A. The Campo Imperatore Near Earth Object Survey (CINEOS) / A. Boattini, G. B. D'Abramo, A. Valsecchi et al. // *Earth Moon Planet*, Vol. 100, I. 3 – 2007. – pp. 259 – 271.
91. Bondy A., Murty U.S.R. *Graph Theory (Graduate Texts in Mathematics)* // Springer – 2008 – P. 655.
92. PinPoint Astrometric Engine [Электронный ресурс] – Режим доступа к ресурсу: <http://pinpoint.dc3.com/> – Название с экрана.
93. Brualdi R. A. *Combinatorial Matrix Classes (Encyclopedia of Mathematics and its Applications)* // Cambridge University Press – 2006 – P. 554.
94. Bühlmann P. *Statistics for High-Dimensional Data (Springer Series in Statistics)* – Springer; 2011 edition (April 11, 2013) – P. 558.
95. Burkard R. E. *Assignment Problems, Revised Reprint* / R. E. Burkard, M. Dell'Amico, S. Martello – Society for Industrial and Applied Mathematics – 2012. – P.393.
96. Burkard, R. E. Dell'Amico M., Martello S. *Assignment Problems* // Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM, 3600 Market Street, Floor 6, Philadelphia, PA 19104), 2009 – P. 382.
97. Burnham, K. P. Anderson D. R. *Model Selection and Multimodel Inference: A Practical Information-Theoretic Approach*. Springer New York, 2010 – P. 488.
98. Carpin, M. Error statistics of asteroid optical astrometric observations / M. Carpin; A. Milani; S. R. Chesley // *Icarus* – 2003. – Vol. 166 (2) – P. 248 – 270.
99. Cohen, R. Havlin S. *Complex Networks: Structure, Robustness and Function* // Cambridge University Press, 2010 – P. 243
100. Cope, J. S. Remagnino P. Utilizing the hungarian algorithm for improved classification of high-dimension probability density functions in an image recognition problem / J. S. Cope, P. Remagnino // *ACIVS'12 Proceedings of the 14th international conference on Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems* Springer-Verlag Berlin, Heidelberg – 2012 – P. 268 – 277

101. D. Monet, The USNO-B1.0 Catalog / D. Monet, S. Levine, B. Canzian // [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <http://tdc-www.harvard.edu/catalogs/ub1.html> – Название с экрана.
102. David, A. Freedman. Statistical Models Theory and Practice. 2nd Edition // Cambridge University Press, – 2005 – P. 414.
103. David, J. C. MacKay Information Theory, Inference, and Learning Algorithms // Cambridge University Press – 2003 –P. 640
104. David, P. S. Defending Against Asteroids and Comets / P. S. David Dearborn, Paul L. Miller // Springer International Publishing. Handbook of Cosmic Hazards and Planetary Defense – 2014. – P. 1 – 18.
105. DeGroot, M. H. Optimal Statistical Decisions // Wiley-Interscience; WCL Edition edition – 2004. – P. 512.
106. Deitel H. M. Computers and Data Processing: International Edition / H. M. Deitel, B. Deitel // Academic Press – 2014 – P. 662.
107. Diestel, R. Graph Theory // Springer-Verlag, Heidelberg – 2010. – P.451.
108. Einicke, G.A. Iterative Smoother-Based Variance Estimation / G.A. Einicke, G. Falco, M.T. Dunn, D.C. Reid // Signal Processing Letters, IEEE – 2012– Vol.19(2) – P. 275-278.
109. Elliot, J. L. The Deep Ecliptic Survey: A Search for Kuiper Belt Objects and Centaurs. II. Dynamical Classification, the Kuiper Belt Plane, and the Core Population / J. L. Elliot; S. D. Kern; K. B. Clancy // The Astronomical Journal – 2005 – Vol. 129(2) – P. 1117-1162.
110. Ericson, J. Asteroids, comets, and meteorites. Cosmic Invaders of the Earth // New York: Checkmarks Books – 2003 – P. 273.
111. Ethem, A. Introduction to Machine Learning, second edition // MIT Press, 2010 – P. 537.
112. Evans, J. B. Detection and Discovery of Near-Earth Asteroids by the LINEAR Program / J. B. Evans, C. F. Shelly, G. H. Stokes // Lincoln laboratory jour-

nal – 2003 – Vol. 14(2) – P. 199 – 220.

113. Fedorov, P. N. The XPM catalogue as a realization of the ICRS in optical and near-infrared ranges of wavelengths / P. N. Fedorov, V. S. Akhmetov, V. V. Bobylev, G. A. Gontcharov // MNRAS – 2011. – V. 415(1). – P. 665– 672.

114. Fedorov P. N., Myznikov A. A., Akhmetov V. S. The XPM Catalogue: absolute proper motions of 280 million stars // MNRAS. – 2009. – V. 393. – P. 133 – 138.

115. Fedorov P.N. An investigation of the absolute proper motions of the XPM Catalogue:/ P. N. Fedorov, V. S. Akhmetov, V. V. Bobylev, A. T. Bajkova. // MNRAS – 2010. – V. 4063. – P. 1734 – 1744

116. Frederick, Chromey R. To measure the sky: an introduction to observational astronomy (1. publ. ed.) / Chromey R. Frederick // Cambridge: Cambridge University Press. – 2010 – P. 140.

117. Kerekes, G. Cross identification of stars with unknown proper motions / G. Kerekes, T. Budavári, I. Csabai et al // The Astrophysical Journal – 2010 – Vol 719(1) – P. 59 – 66

118. Gaia Follow-Up Network for Solar System Objects [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://gaiafunso.imcce.fr/> – Название с экрана.

119. Gentle, J.E. Computational statistics // New York: Springer. – 2009 pp.315–316.

120. Genz, A., Bretz, F. Computation of Multivariate Normal and t Probabilities (Lecture Notes in Statistics) Springer – 2009 – P.483

121. George, E. Smith The invention and early history of the CCD / E. Smith George // Rev. Mod. Phys. – 2010. – V. 3, № 82. – P. 2307–2312.

122. Granino D., Korn A., Theresa M. Korn. Mathematical Handbook for Scientists and Engineers: Definitions, Theorems, and Formulas for Reference and Review. – General Publishing Company. – 2000. –P. 1151

123. Günter D.R. Compendium of Practical Astronomy: Volume 1: Instrumentation and Reduction Techniques – Springer Science & Business Media –

2012. – P 540.

124. Har-Peled, S. Constraint Classification: A New Approach to Multiclass Classification and Ranking / S. Har-Peled, D. Roth, D. Zimak // In Proceedings of the 16th Annual Conference on Neural Information Processing Systems, NIPS-02– 2003.

125. Harvey, C. New algorithms for automated astrometry / University of Toronto – 2004 – P.43

126. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. The Elements of Statistical Learning Springer-Verlag New York – 2009 – P.745

127. Hazewinkel M. Encyclopaedia of Mathematics. / Hazewinkel M. – Springer Netherlands – 2001 – P. 732

128. Helin E. F. Palomar Planet-Crossing Asteroid Survey (PCAS) / E. F. Helin // NASA, 1991, p. 59-60

129. Herbert R. Astrometrica: Astrometric data reduction of CCD images / R. Herbert // Astrophysics Source Code Library, record ascl:1203.012 – 2012.

130. Hogg D. W., Automated Astrometry / D. W. Hogg, M. Blanton, D. Lang et al. // Astronomical Data Analysis Software and Systems XVII, R. W. Argyle, P. S. Bunclark, and J. R. Lewis, eds., ASP Conference Series 394, – 2008 p. 27–34

131. Hogg D.W. Astronomical imaging: The theory of everything / D.W. Hogg, D. Lang // AIP Conference Proceedings 1082 – 2008 – P 331 – 338. <http://arxiv.org/pdf/0810.3851v1.pdf> – Название с экрана.

132. Hogg, D. W., Blanton, M., Lang, D., Mierle, K., & Roweis, S., 2008, Automated Astrometry, Astronomical Data Analysis Software and Systems XVII, R. W. Argyle, P. S. Bunclark, and J. R. Lewis, eds., ASP Conference Series 394, 27–34.

133. Hudkova, L. A. CCD observations of minor planets in Mykolaiv in 2002 – 2003 / L. A. Hudkova, G. K. Gorel, A. V. Ivantsov // Kinematics and Physics of Celestial Bodies – 2005. –Vol. 5 – P. 431-433

134. Hungary-Slovakia-Romania-Ukraine ENPI Cross-border Cooperation Programme. [Электронный ресурс] – Режим доступа к ресурсу:

<http://www.huskroua-cbc.net>. – Название с экрана.

135. Hog, E. Construction and verification of the Tycho-2 Catalogue / E. Hog, C. Fabricius, V.V. Makarov et al // *Astron. Astrophys* – 2000 – Vol. 357– P. 367–386

136. Hog, E. The Tycho-2 catalogue of the 2.5 million brightest stars / E.Hog, C. Fabricius, V.V. Makarov // *Astronomy and Astrophysics*, – 2000. – V. 355. P. 27-30.

137. IAU Minor Planet Center. [Электронный ресурс] – Режим доступа к ресурсу: <http://www.minorplanetcenter.net>. – Название с экрана.

138. Izmailov I. S. Astrometric CCD observations of visual double stars at the Pulkovo Observatory / I. S. Izmailov, M. L. Khovricheva, M. Yu. Khovrichev et al. // *Astronomy Letters*. – 2010. –5(36). – P. 349 – 354.

139. Irwin I. Shapiro, Faith Vilas, Michael A’hearn et al. *Defending Planet Earth: Near-Earth-Object Surveys and Hazard Mitigation Strategies* // National Academies Press – 2010 – P.152.

140. Janesick J. R. *Scientific Charge-Coupled Devices* (SPIE Press Monograph Vol. PM83) // SPIE Publications – 2001. – P. 920

141. Jet Propulsion Laboratory California state of Technology, HORIZONS Web-Interface [Электронный ресурс] – режим доступа [www/URL: http://ssd.jpl.nasa.gov/horizons.cgi/](http://www/URL: http://ssd.jpl.nasa.gov/horizons.cgi/) – Название с экрана.

142. Kannan, D., Lakshmikanth V. *Handbook of Stochastic Analysis and Applications* // CRC Press, New York – 2001. – P. 808.

143. Karttunen, H. *Fundamental Astronomy* / H. Karttunen, P. Kroger, H. Oja, M. Poutanen, K. J. Donner // Berlin: Springer, 4th ed – 2003 – P. 507

144. Kelley. C. T *Solving Nonlinear Equations with Newton's Method* / C. T. Kelley – SIAM, 2003, – P. 543.

145. Khlamov S. CoLiTec-multifunction software for the CCD image processing [Электронный ресурс] / V. Savanevych, O. Bryukhovetskiy, S. Khlamov, N. Sokovikova, A. Pohorelov, Ia. Movsesian , M. Bezkrivniy, A. Dahskova // &quot;

IAA Planetary Defense Conference 2015", 13 – 17 апреля 2015 г.: сб. матер. конф. – Frascati, Italy, 2015. – Режим доступа к публ.: <https://www.wuala.com/-IAADrive/IAADrive/PDC2015/1-7/> – Название с экрана.

146. Khlamov S. Precision of astrometry measurements made using CoLiTec software for asteroids survey [Электронный ресурс] / S. Khlamov, A. Ivantsov, V. Savanevich, A. Bryukhovetskiy, L. Elenin, M. Bezkrivniy, N. Sokovikova, Ia. Movsesian. // "Gaia-FUN-SSO-3 International Workshop 2014", 24 – 26 ноября 2014 г.: сб. матер. конф. – Париж, Франция, 2014. – Режим доступа к публ.: [http://www.imcce.fr/hosted\\_sites/gaiafun2014/com/Khlamov.pdf](http://www.imcce.fr/hosted_sites/gaiafun2014/com/Khlamov.pdf) – Название с экрана.

147. Kortencamp S. Asteroids, Comets, and Meteoroids. Mankato, MN: Capstone Press – 2012.

148. Kosorok, Michael R. Introduction to Empirical Processes and Semiparametric Inference// Springer Series in Statistics, New York – 2008, – P.483

149. Kroese D.P. Statistical Modeling and Computation / D.P. Kroese, J.C.C. Chan // Springer – 2014 – P.400.

150. Kuhn H.W. The Hungarian Method for the Assignment Problem / H.W. Kuhn // 50 Years of Integer Programming 1958 – 2008 – P. 29-47

151. Lang D., Hogg D. W., Jester S. et. al. Measuring the undetectable: Proper motions and parallaxes of very faint sources // The Astronomical Journal, Volume 137, Issue 5, 2009 – P. 4400-4411.

152. Lang D., Hogg D.W., Mierle K. et. al. Astrometry.net: Blind astrometric calibration of arbitrary astronomical images // Astron.J.139:1782 – 2010 – P. 1782 - 1800.

153. Lasker, A. The Second-Generation Guide Star Catalog: Description and Properties/ A. Lasker // Astronomical Journal – 2008 – Vol. 136 (2) – P. 735–766.

154. Levenberg K. A method for the solution of certain problems in least squares / K. Levenberg. // Quart. Appl. Math. – 1944. – №2. – P. 164 – 168.

155. Li W.D., Filippenko A.V. et. al. The Lick Observatory Supernova

Search[Электронный ресурс] – Режим доступа [www/URL: http://arxiv.org/pdf/astro-ph/9912336.pdf](http://www/URL: http://arxiv.org/pdf/astro-ph/9912336.pdf) – Название с экрана.

156. Liese, F., Miescke, Klaus-J. Statistical Decision Theory: Estimation, Testing, and Selection // Springer-Verlag New York Inc. – 2010 – P.698.

157. Mahabal, A. A. Discovery, classification, and scientific exploration of transient events from the Catalina Real-time Transient Survey / A.A. Mahabal, S. G. Djorgovski, A. J. Drake, et al. // Bull. Astr. – 2011. – Soc.39 – P. 387–408.

158. Marquardt D. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters / D. Marquardt. // SIAM J. Appl. Math. – 1963. – №11. – P. 431 – 441.

159. Marsaglia G. Ziggurat Method for Generating Random Variables / G. Marsaglia, W. W. Tsang // Journal of Statistical Software – 2000. – Т. 5 (8). – P. 1–7.

160. Meric H., Piquer J., Lacan J. Quasi-optimal grouping for broadcast systems with hierarchical modulation [Электронный ресурс] – Режим доступа [www/URL: http://arxiv.org/pdf/1406.4491v1.pdf](http://www/URL: http://arxiv.org/pdf/1406.4491v1.pdf) – Название с экрана.

161. Mills, P. Efficient statistical classification of satellite measurements / P. Mills // International Journal of Remote Sensing – 2011 – P. 1 – 37

162. Minor Planet Center, Bisei Spaceguard Center–BATTeRS [Электронный ресурс] – режим доступа [www/URL: http://www.minorplanetcenter.net/mpec/K11/K11P16.html](http://www/URL: http://www.minorplanetcenter.net/mpec/K11/K11P16.html) – Название с экрана.

163. Minor Planet Center, Bisei Spaceguard Center–BATTeRS. [Электронный ресурс] – Режим доступа : [www/URL: http://minorplanetcenter.org/mpec/K01/K01X10.html](http://www/URL: http://minorplanetcenter.org/mpec/K01/K01X10.html) – Название с экрана.

164. Minor Planet Center, Bisei Spaceguard Center–BATTeRS. [Электронный ресурс] – Режим доступа : [www/URL: http://www.minorplanetcenter.net/mpec/K01/K01W53.html](http://www/URL: http://www.minorplanetcenter.net/mpec/K01/K01W53.html) – Название с экрана.

165. Minor Planet Center, MPChecker: Minor Planet Checker [Электронный ресурс] – режим доступа [www/URL: http://www.minorplanetcenter.net/cgi-bin/checkmp.cgi](http://www/URL: http://www.minorplanetcenter.net/cgi-bin/checkmp.cgi) – Название с экрана.

166. Minor Planet Center, New Object Ephemeris Generator [Электронный ресурс] – режим доступа [www/URL: http://www.minorplanetcenter.net/iau/MPEph/NewObjEphems.html](http://www.minorplanetcenter.net/iau/MPEph/NewObjEphems.html) – Название с экрана.

167. Minor Planet Center, The MPC Orbit (MPCORB) Database [Электронный ресурс] – режим доступа [www/URL: http://www.minorplanetcenter.net/iau/MPCORB.html](http://www.minorplanetcenter.net/iau/MPCORB.html) – Название с экрана.

168. Minor Planet Center, The NEO Confirmation Page (RA Ordered)[Электронный ресурс] – режим доступа [www/URL: http://www.minorplanetcenter.net/iau/NEO/ToConfirmRA.html](http://www.minorplanetcenter.net/iau/NEO/ToConfirmRA.html) – Название с экрана.

169. Minor Planet Center, What is the Minor Planet Center? [Электронный ресурс] – режим доступа [www/URL: http://www.minorplanetcenter.net/](http://www.minorplanetcenter.net/) – Название с экрана.

170. Morgan J. S. The Pan-STARRS Project in 2014 / J. S. Morgan, W. Burgett, P. Onaka // Proc. SPIE 9145, Ground-based and Airborne Telescopes V, 91450Y – 2014 – P. 1–4.

171. Moskowitz C. United Nations to adopt asteroid defense plan // Scientific American blog. – 2013. P. 17–20.

172. Movsesian Ia. Methods for identification of the digital frames and selection of reference stars on them [Электронный ресурс] / Ia. Movsesian, V. Savanevych, O. Briukhovetskyi, M. Dikhtyar // «International meeting on variable stars research KOLOS 2015», 3 – 5 декабря 2015 г.: сб. матер. конф. – Стакчин, Словакия, 2015. – Режим доступа к публ.: [http://www.astrokolonica.sk/joomla15-/files/kolos2015/kolos2015\\_abstractbook.pdf](http://www.astrokolonica.sk/joomla15-/files/kolos2015/kolos2015_abstractbook.pdf). – Название с экрана.

173. Movsesian Ia. The computational method of selecting the reference stars on the digital image [Электронный ресурс] / Ia. Movsesian // 16-th Odessa International Astronomical Gamow Conference-School «Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology and Gravitation, Cosmomicrophysics, Radio-astronomy and Astrobiology» (Ukraine, Odessa, Chernomorka, 14-20 August, 2016): сб. матер. конф. – Одесса, Украина, 2016. – с.43-44 – Режим доступа к публ.: <http://gamow.odessa.ua/wpsc>

[ntent/uploads/2016/08/Gamow\\_Abstracts\\_2016.pdf](#).

174. National Aeronautics and space administration NEAR-EARTH ASTEROID TRACKING (NEAT) [Электронный ресурс] – режим доступа: [www/URL: http://neo.jpl.nasa.gov/programs/neat.html](http://neo.jpl.nasa.gov/programs/neat.html) – Название с экрана..

175. National Aeronautics and space administration NEAT/PALOMAR INSTRUMENT DESCRIPTION [Электронный ресурс] – режим доступа: [www/URL: http://neat.jpl.nasa.gov/neatoschincam.htm](http://neat.jpl.nasa.gov/neatoschincam.htm) – Название с экрана.

176. National Aeronautics and space administration, JPL Small-Body Database Browser [Электронный ресурс] – режим доступа [www/URL: http://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi](http://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi) – Название с экрана.

177. Okumura, S. SPACEGUARD ACTIVITY IN JAPAN: PAST AND FUTURE IN BISEI SPACEGUARD CENTER / S. Okumura, N. Takahashi, S. Nakano et al // Asteroids, Comets, Meteors –2012.

178. Oliver, M. Astronomy on the Personal Computer / M. Oliver, P. Thomas // Springer-Verlag Berlin Heidelberg., – 2000 – P. 35-37.

179. Ory, M. THE MOROCCO OUKAIMEDEN SKY SURVEY, THE MOSS TELESCOPE / M. Ory, A. Daassou, F. Colas, et.al. // Asteroids, Comets, Meteors – 2012.

180. Palomar Observatory [Электронный ресурс] – Режим доступа: [www/URL: http://www.shvoong.com/exact-sciences/417519-palomar-observatory/](http://www.shvoong.com/exact-sciences/417519-palomar-observatory/) – 16.10.2006г. – Название с экрана.

181. Punanova, A. F. CCD VRI photometry of the old open cluster NGC 7142 / A. F. Punanova, A. V. Loktin, V. V. Krushinsky, et al // Advances in Astronomy and Space Physics – 2012. – P.11–14 .

182. Richard J. Larsen, Morris L. Marx. Introduction to Mathematical Statistics and Its Applications. 5th Edition // Prentice Hall – 2012, – P.768.

183. Rivkin, A.S. Asteroids, Comets And Dwarf Planets // Greenwood Press. – 2009 – P.425.

184. Robert V. Hogg, Joseph W. McKean, Allen Thornton Craig. Introduc-

tion to Mathematical Statistics. 7th Edition // Prentice Hall PTR – 2012, – P.694. (

185. Roeser S. The PPMXL catalog of positions and proper motions on the ICRS. Combining USNO-B1.0 and 2MASS / S. Roeser, M. Demleitner, E. Schilbach // *Astrophysics of Galaxies* – 2010 –P. 1 – 10.

186. S. R. Majewski. Coordinate systems (2011) // [Электронный ресурс] – Режим доступа к ресурсу: <http://www.astro.virginia.edu/class/majewski-astr551/lectures/COORDS/coords.html> – Название с экрана.

187. Savanevych V. Observation of small Solar System bodies at the review programs observatory ISON-NM and ISON-Kislovodsk / V. Savanevych, A. Bryukhovetskiy, L. Elenin, V. Nevski, I. Molotov, M. Bezkrivniy, N. Sokovikova, Ia. Movsesian, S. Khlamov, M. Dikhtyar // *Abstracts of 40th COSPAR Scientific Assembly, 2 - 10 August 2014.:* сб. матер. конф – Moscow, Russia, 2014, B0.4-0061-14.

188. Sasian M.J. Introduction to aberrations in optical imaging systems/ Sasian M.J. – Cambridge University Press – 2013. – P.261.

189. Savanevych V. Automated software for CCD-image processing and detection of small Solar System bodies / V. Savanevych, A. Bryukhovetskiy, N. Sokovikova, M. Bezkrivniy, S.Khlamov, L. Elenin, I. Movsesian, M. Dihtyar // "Asteroids, Comets, Meteors 2014" 12-я международная конференция, 30 июня – 4 июля 2014 г.: сб. матер. конф. – Хельсинки – 2014. – С. 491.

190. Savanevych V. CoLiTec – multifunction software for the CCD image processing [Электронный ресурс] / V. Savanevych, O. Bryukhovetskiy, N. Sokovikova, I. Movsesian, M. Dihtyar, A. Pogorelov // "International scientific and methodological conference KOLOS 2014", 4 – 6 декабря 2014 г.: сб. матер. конф. – Стакчин, Словакия, 2014. – Режим доступа к публ.: [http://www.astrokolonica.sk/joomla15/files/kolos2014/kolos2014\\_abstractbook.pdf](http://www.astrokolonica.sk/joomla15/files/kolos2014/kolos2014_abstractbook.pdf).

191. Savanevych, V. E A new method based on the subpixel Gaussian model for accurate estimation of asteroid coordinates / V. E. Savanevych, O. B. Briukhovetskiy, N. S. Sokovikova, M. M. Bezkrivny, I. B. Vavilova, Yu. M. Ivash-

chenko, L. V. Elenin, S. V. Khlamov, Ia. S. Movsesian, A. M. Dashkova, A. V. Pogorelov // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2015. – Т. 451 (3). – P. 3287-3298.

192. Savanevych, V. E. Comparative analysis of the positional accuracy of CCD measurements of small bodies in the solar system software CoLiTec and Astrometrica / V. E. Savanevych, A. B. Briukhovetskyi, Yu. N. Ivashchenko, I. B. Vavilova, M. M. Bezkrovniy, E. N. Dikov, V. P. Vlasenko, N. S. Sokovikova, Ia. S. Movsesian, N. Yu. Dikhtyar, L. V. Elenin, A. V. Pohorelov, S. V. Khlamov // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies* – 2015. – Т. 31 (6). – P. 302-313.

193. Shustov, B. M. A concept of a space hazard counteraction system: Astronomical aspects / B. M. Shustov, L. V. Rykhlova, Yu. P. Kuleshov, Yu. N. Dubov, K. S. Elkin, S. S. Veniaminov, G. K. Borovin, I. E. Molotov, S. A. Naroenkov and 6 more // *Springer, Solar System Research* – 2013. – Т. 47 (4). – P. 302-314

194. Singh, N. Parallel astronomical data processing with Python: Recipes for multicore machines / N. Singh, L. Browne, R. Butler // *Astronomy and Computing* – 2013. – Vol. 2, p. 1-10. Vol. 2, P. 1–10.

195. Sokolova, M.G. Asteroid and comet hazard: Identification problem of observed space objects with the parental bodies/ M.G. Sokolova , Y.A. Nefedyev, N.Y. Varaksina // *Advances in Space Research* – 2014. – Т. 54 (11). – P. 2415-2418

196. Spacewatch Project Telescopes on Kitt Peak [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://spacewatch.lpl.arizona.edu/> – Название с экрана.

197. The Large Synoptic Survey Telescope [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.lsst.org/> – Название с экрана.

198. The Spaceguard Foundation home page. [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <https://www.cfa.harvard.edu/~marsden/SGF/> – Название с экрана.

199. Thomas H. C., Charles E. L., Ronald L. R. et al. Introduction to Algorithms. Second Edition / McGraw-Hill Science – 2011 – P.1056

200. Tutte W. T. Graph Theory Cambridge Mathematical Library – January

29 – 2001 – P. 333

201. Vaduvescu, O. observed NEA sandnew 2–4 m survey statistics within the EURONEAR network / O.Vaduvescu, M. Birlan, A.Tudorica et al // Planetary and Space Science – 2013.

202. VAN HOUTEN C. J. The Second Palomar-Leiden Trojan Survey / C.J. Van Houten, I. VAN HOUTEN-GROENEVELD, M. Wisse-Schouten, C. Bardwell, W. E. GREEN // Icarus –1991 – P. 326-333.

203. Van Houten C.J. The Palomar-Leiden survey of faint minor planets / C.J. Van Houten, P. Herget, B.G. Marsden // Icarus, Volume 59, Issue 1, July 1984, P. 1-19

204. Vavilova I.B., Pakuliak L. K., Protsyuk Yu. I., et al.UkrVO Joint Digitized Archive and Scientific Prospects // Baltic Astronomy. – 2012. – V. 21, P. 356–365

205. Waszczak, A. Main-belt comets in the Palomar Transient Factory survey: I. The search for extendedness / A. Waszczak, E. O. Ofek, O. Aharonson, et.al. // Mon. Not. R. Astron. – 2013. – Soc. 000 – P. 1–19.

206. Zacharias N. The fourth U.S. Naval Observatory CCD Astrograph Catalog (UCAC4) // Norbert Zacharias for the UCAC team, USNO, Washington DC. – July 2012 // [Электронный ресурс] – Режим доступа к ресурсу:[http://ad.usno.navy.mil/ucac/readme\\_u4v5](http://ad.usno.navy.mil/ucac/readme_u4v5) – Название с экрана.

207. Zacharias N. The Third US Naval Observatory CCD Astrograph Catalog (UCAC3) / N. Zacharias, C. Finch, T. Girard, et al. // Instrumentation and Methods for Astrophysics – 2010 – P. 1– 24.

208. Zacharias, N. The Fourth US Naval Observatory CCD Astrograph Catalog (UCAC4) / N. Zacharias, C. T. Finchet // The Astronomical Journal – 2013 – 145(2) – Vol. 145 – P. 44

209. Zhao, H. B. Survey and Risk Assessment of Near Earth Asteroids / H. B. Zhao // Acta Astronomica Sinica. – 2010. – T. 51(3). – P. 324-325.

**ПРИЛОЖЕНИЕ А**  
**АКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ И ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ**  
**ДИССЕРТАЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**



**АКТ**

про впровадження результатів кандидатської дисертаційної роботи  
 аспірантки кафедри електронних обчислювальних машин

**Мовсеян Яни Самвелівни**

**«Обчислювальні методи відбору опорних зірок на цифрових зображеннях» у науково-дослідну роботу № 307 Харківського національного університету радіоелектроніки**

Комісія у складі голови – д.т.н., проф. Бодяньського С. В., наукового керівника НДР №307, наукового керівника ПНДЛ АСУ ХНУРЕ, професора кафедри штучного інтелекту; та членів – к.т.н., с.н.с. Плісс І. П., відповідального виконавця НДР №307, провідного наукового співробітника ПНДЛ АСУ ХНУРЕ; Хоменко Н. Ю., начальника наукового інформаційно-аналітичного відділу ХНУРЕ, складала цей акт про те, що результати дисертаційної роботи **Мовсеян Я. С.** використовуються у Харківському національному університеті радіоелектроніки при виконанні держбюджетної науково-дослідної роботи № 307 «Динамічний інтелектуальний аналіз послідовностей нечіткої інформації за умов суттєвої невизначеності на основі гібридних систем обчислювального інтелекту» № ДР 0116U002539, згідно з тематичним планом НДДКР ХНУРЕ затвердженим Міністерством освіти і науки України.

Розроблені методи відбору опорних зірок на послідовностях цифрових зображень базуються на відносному методі, який включає в себе ототожнення об'єктів на цифровому зображенні та вибір з ототожнених об'єктів реперів (опорних об'єктів). За допомогою розроблених Мовсеян Я. С. обчислювальних методів здійснюється високоякісне визначення положення об'єктів на цифрових зображеннях.

Результати будуть використані в науково-технічному звіті по НДР №307.

Голова комісії:

Є. В. Бодяньський

Члени комісії:

І. П. Плісс

Н. Ю. Хоменко

Згідно з оригіналом

Секретар вченої ради Д 64.052.02

Підпис

Печатка

Л.В. Колесник

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової роботи  
Одеського національного  
університету імені І.І. Мечникова

В.О. Іваниця

« 10 » 2016 р.



АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи  
на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук  
Мовсесян Яни Самвелівни

Комісія у складі директора НДІ "Астрономічна обсерваторія" ОНУ імені І.І. Мечникова, доктора фіз.-мат. наук Андрієвського Сергія Михайловича і заступника директора з науки НДІ "Астрономічна обсерваторія" ОНУ імені І.І. Мечникова, кандидата фіз.-мат. наук Кошкіна Миколи Івановича склали даний акт у тому, що розроблені аспірантом кафедри Електронних обчислювальних машин Харківського національного університету радіоелектроніки Мовсесян Яною Самвелівною обчислювальні методи найкращого відбору опорних зір на цифрових зображеннях були інтегровані у блок внутрішньокадрової обробки програмного забезпечення автоматизованого пошуку астероїдів та комет на ПЗЗ-кадрах CoLiTec та впроваджені в НДІ "Астрономічна обсерваторія" ОНУ імені І.І. Мечникова – Odessa-Mayaki (с. Маяки, Одеська обл., Україна, МРС код - 583).

Розроблені Мовсесян Я.С. методи дозволили значно підвищити показники точності оцінки положення об'єктів на цифрових зображеннях, що проводить НДІ АО ОНУ на 0,8 м телескопі ОМТ-800 з матрицею FLI ML9000 3056 x 3056.

Запропоновані методи найкращого відбору опорних зір на цифрових зображеннях мінімізують помилки визначення положення об'єктів на цифровому зображенні. В розроблених обчислювальних методах для забезпечення високих показників точності визначення положення об'єктів на всьому зображенні реалізовано рівномірний розподіл опорних зір на цифровому зображенні. Крім того, розроблені методи стійкі до різних видів артефактів цифрового зображення. Наприклад, розроблені методи стійкі до наявності на зображенні яскравого треку ШСЗ, до наявності зображень близьких об'єктів чи об'єктів, що не мають гострого піку.

Акт складений для подання у спеціалізовану вчену раду з захисту дисертацій і не є підставою для фінансових розрахунків.

Директор НДІ АО ОНУ,  
Зав. Відділом малих тіл Сонячної системи

 М. Андрієвський

Заст. директора НДІ АО ОНУ,  
Зав. Відділом космічних досліджень



М.І. Кошкін

Згідно з оригіналом

Секретар вченої ради Д 64.052.02

Підпис

Л.В. Колесник

Печатка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор

Харківського національного  
університету радіоелектроніки

І.І. Ключник

2016р.



## АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи  
Мовсесян Яни Самвелівни

Комісія у складі начальника навчального відділу к.т.н., доцента Свид І.В., завідувача кафедри електронних обчислювальних машин д.т.н., професора Рубана І.В., д.т.н., професора кафедри електронних обчислювальних машин Міхаля О.Ф., підтверджує, що результати дисертаційної роботи Мовсесян Яни Самвелівни «Обчислювальні методи відбору опорних зірок на цифрових зображеннях» впроваджені у навчальний процес на кафедрі електронних обчислювальних машин в курсах «Комп'ютерні методи обробки зображень» та «Програмні методи обробки зображень» а також у дипломному проектуванні.

Начальник НВ

І. В. Свид

Завідувач кафедри ЕОМ

І. В. Рубан

Професор кафедри ЕОМ

О.Ф. Міхаль

Згідно з оригіналом

Секретар вченої ради Д 64.052.02

Підпис

Л.В. Колесник

Печатка



## АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи  
 на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

**Мовсесян Яни Самвелівни**

Комісія у складі: голова – наук. керівник ЛКД ДВНЗ «УжНУ» ст.н.сп. Єпішев В.П., члени – ст.н.сп. Мотрунич І.І., н.сп. Кудак В.І. та м.н.сп. Періг В.М., склала даний акт у тому, що розроблений аспірантом кафедри Електронних обчислювальних машин Харківського національного університету радіоелектроніки Мовсесян Яною Самвелівною метод відбору опорних зірок на цифрових зображеннях, що впроваджено у програмному забезпеченні автоматичного пошуку астероїдів та комет на серії ПЗЗ-кадрів CoLiTec, використовується в Лабораторії космічних досліджень фізичного факультету ДВНЗ «Ужгородський національний університет» для обробки астрономічних ПЗЗ-кадрів астероїдних оглядів та в рамках наукових досліджень пов'язаних з обробкою та аналізом результатів спостережень геосинхронних супутників.

Розроблений Мовсесян Я.С. багатоетапний обчислювальний метод вибору опорних зірок враховує основні особливості процесу формування астрономічних вимірів за даними цифрових кадрів. Використання даного методу забезпечує високі показники точності. Це підтверджується результатами обробки ПЗЗ-кадрів. Так з використанням цього методу, при масштабі пікселя 2.8", середньоквадратичне відхилення (СКВ) екваторіальних координат опорних зірок по прямому піднесенню (RA) складало 0.08", а по схиленню (DE) – 0.09". Вказані значення СКВ забезпечують виконання вимог Центру малих Планет до точності оцінки положення об'єктів на цифрових зображеннях при оглядових спостереженнях астероїдів. Дослідження показників точності оцінок положення опорних зірок на цифрових зображеннях показало, що частота критичних помилок в ПЗ CoLiTec нижче, ніж в існуючих його аналогах.

Результати досліджень ПЗ CoLiTec підтверджують ефективність та надійність методу, розробленого Мовсесян Я.С. в рамках дисертаційної роботи.

Акт складений для подання у спеціалізовану Вчену раду з захисту дисертацій і не є підставою для фінансових розрахунків.

Голова комісії: Єпішев В.П.

Члени комісії: Мотрунич І.І.  
Кудак В.І.  
Періг В.М.

Згідно з оригіналом

Секретар вченої ради Д 64.052.02

Підпис

Л.В. Колесник

Печатка

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

$A_{i\text{infr}}$  – яркость изображения объекта, соответствующего  $i$ -му измерению  $n_{fr}$ -го кадра;

$a_0, a_1, a_2$  – линейные постоянные пластинки, определяющие связь между тангенциальной (идеальной) системой координат (по  $\xi$ ) и системой координат ПЗС-кадра;

$b_0, b_1, b_2$  – линейные постоянные пластинки, определяющие связь между тангенциальной (идеальной) системой координат (по  $\eta$ ) и системой координат ПЗС-кадра;

$D_{(ink)}$  – дисперсия ошибок определения углового положения  $i$ -го измерения  $n_k$ -го фрагмента кадра;

$h_{\text{trian}}$  – параметр вычислительного метода, который рассчитывается как расстояние между 1-й и 2-й точками «тройки»;

$i$  – номер измерения на кадре,  $j$  – номер объекта (номер формуляра в звездном каталоге);

$i(k)$  и  $j(k)$  – внутренние номера формуляра каталога и измерения кадра, составляющих  $k$ -ю отождествленную пару;

$K_{rej}$  – коэффициент правила отбраковки звезд пар «измерение-формуляр» из множества опорных звезд;

$k$  – номер итерации метода получения оценки параметров движения (положения) близких объектов;

$k_{blob}$  – соотношение количества элементов множеств  $\Omega_{bl100}$  и  $\Omega_{bl50}$ ;

$k_h$  – минимальное расстояние между второй и первой точками тройки первичного отождествления, выраженное в угловых размерах кадра;

$k_{star}$  – соотношение количества элементов множеств  $\Omega_{star200}$  и  $\Omega_{star100}$ ;

$k_{\Delta 12}$  – длина перпендикуляра, опущенного от третьей точки тройки первичного отождествления на сторону, проходящую через первую и вторую точки указанной тройки, выраженная в расстоянии между 1-й и 2-й точками тройки;

$M_{reg}$  – количество фрагментов, на которое делится кадр при отборе опорных звезд;

$m_{i(k)}, m_{j(k)}$  – оценка значения блеска  $i$ -го измерения и  $j$ -го формуляра каталога, входящих в  $k$ -ю отождествленную пару;

$N_{cou}$  – количество отождествленных пар «измерение-формуляр», используемых для отбора опорных звезд (расчета постоянных пластинки);

$N_{ident}$  – количество пар, используемых при оценивании параметров сдвига кадров относительно друг друга;

$N_{mea}, N_{st}$  – количество самых ярких измерений кадра и формуляров каталога, соответственно, которые участвуют при отборе кандидатов в опорные звезды;

$N_{CCD(x)}$  – количество пикселей ПЗС-матрицы по координате  $x$ ;

$N_{CCD(y)}$  – количество пикселей ПЗС-матрицы по координате  $y$ ;

$N_{fN}$  – количество параметров видимого движения;

$N_{frame} = N_{fr}$  – количество кадров;

$N_{ref}$  – количество опорных звезд;

$N_{\hat{\Theta}_{\mu i(k)}}(\hat{\Theta}_{\mu j(k)}, \sigma_{\mu_{jnci nfr}})$  – распределение невязок между  $\mu$ -й координатой

из  $i$ -го измерения  $n_{fr}$ -го кадра и  $j$ -го формуляра  $n_c$ -го каталога составляющих  $k$ -ю отождествленную пару;

$n_c$  – номер каталога;

$n_{fr}$  – номер кадра;

$n_k$  – фрагмент кадра;

$J_1$  – матрица Якоби;

$Q_{cn}$  – количество объектов исследуемой части небесной сферы, содержащихся в  $n_c$ -ом звездном каталоге;

$Q_{fr} = Q_{nframe}$  – количество измерений, сформированных на  $n_{fr}$ -ом кадре;

$Q_{sky}$  – количество небесных объектов, соответствующих исследуемому участку небесной сферы;

$p$  – количество используемых коэффициентов постоянных пластинки;

$R_x, R_y$  – угловой размер кадра по координатам  $x$  и  $y$  соответственно;

$R_{CCD(x)} = N_{CCD(x)} \cdot \Delta_{CCD}$  – угловой размер ПЗС-кадра по координате  $x$ ;

$R_{CCD(y)} = N_{CCD(y)} \cdot \Delta_{CCD}$  – угловой размер ПЗС-кадра по координате  $y$ ;

$\bar{r}_{ident}$  – средний риск (безусловное математическое ожидание потерь), который равен сумме условных математических ожиданий потерь с учетом априорных вероятностей формирования измерений от объектов;

$R_{iknear}$  – расстояние между  $i$ -ым объектом и  $k$ -й группой близких объектов;

$r_{mea\_group}$  – величина, которая обозначает предельно допустимое расстояние между соседними объектами (измерениями) группы близких объектов;

$r_{star\_group}$  – величина, которая обозначает предельно допустимое расстояние между соседними объектами (звездами) группы близких объектов;

$R_{static}$  – радиус неподвижности по которому любые два измерения (по одному с кадра) отличаются друг от друга;

$r_{trian}$  – расстояние третьей точки первичного отождествления до стороны, проходящей через первую и вторую точки;

$V_{min\ ident}$  – минимальное допустимое отношение количества допустимых пар к размеру множества  $\Omega_{bl100}$ ;

$W(\Omega_{catn})$  – закон распределения параметров  $n_c$ -го звездного каталога;

$\omega_k$  – область ПИ, в которой принимается решение о принадлежности измерения  $k$ -му небесному объекту;

$x_{jn}, y_{jn}, z_{jn}$  – декартовы координаты точки (начало системы координат находится в центре небесной сферы);

$x_{1(i)}, y_{1(i)}, x_{2(i)}, y_{2(i)}$  – координаты измерений одного и того же  $i$ -го объекта (оценки координат объекта) на первом и втором отождествляемых кадрах;

$x_{jknear}, y_{jknear}$  – координаты  $j$ -го объекта  $k$ -ой группы близких объектов;

$x_{i\tau nfr}(\Theta_\tau), y_{i\tau nfr}(\Theta_\tau)$  – координаты  $i$ -го объекта на момент привязки базового кадра  $\tau_{nfr}$  (как правило, половина времени экспозиции базового кадра);

$x_{j\tau}(\Theta_j), y_{j\tau}(\Theta_j)$  – координаты  $i$ -го объекта на момент времени  $\tau$ ;

$x_{infr}, y_{infr}$  – координаты  $i$ -го измерения  $n_{fr}$ -го кадра;

$Y_{infr} = \{A_{infr}; \chi_{infr}\}$  – оценки параметров объекта, содержащиеся в  $i$ -ом измерении  $n_{fr}$ -го кадра;  $\chi_{infr} = \{x_{infr}; y_{infr}\}$  – координаты  $i$ -го измерения  $n_{fr}$ -го кадра;

$\alpha_0, \delta_0$  – экваториальные координаты оптического центра ПЗС-матрицы;

$\alpha_q, \delta_q$  – квантили отклонений оценок экваториальных координат по прямому восхождению  $\alpha$  и склонению  $\delta$ ;

$\alpha_{ij(k)}, \delta_{ij(k)}$  – прямое восхождение и склонение  $i$ -го измерения кадра и  $j$ -го формуляра каталога, составляющих  $k$ -ю отождествленную пару;

$\alpha_{catj}, \delta_{catj}$  – оценки прямого восхождения и склонения объекта из  $j$ -го формуляра каталога;

$\alpha_{meai}, \delta_{meai}$  – оценки прямого восхождения и склонения  $i$ -го измерения;

$\Delta_{CCD}$  – масштаб (угловой размер) пикселя ПЗС-матрицы;

$\Delta_x, \Delta_y$  – параметры сдвига кадров относительно друг друга по координа-

там  $x$  и  $y$  соответственно;

$\Delta r_{ident}$  – предельно допустимое значение расстояния между элементами отождествляемой пары;

$\Delta \gamma$  – предельно допустимое значение отклонения значений соответствующих углов треугольников (со стороны кадра и каталога) первичного отождествления;

$\hat{\Delta}_{\alpha\delta}$  – среднее отклонение на множестве выбранных отождествленных пар модуля отклонения отождествленной пары в экваториальных координатах;

$\hat{\Delta}_{\alpha}$ ,  $\hat{\Delta}_{\delta}$  – среднее отклонение оценок экваториальных координат общего количества звезд;

$\Delta_{\alpha\delta ij(k)}$  – суммарная невязка между оценками экваториальных координат в отождествленной паре «измерение-формуляр», которая необходима для отбраковки пар «измерение - формуляр»;

$\Delta \alpha$  – значение отклонения по прямому восхождению (значение угла между плоскостью меридиана и вектором  $\overline{OS}$ );

$\Delta \delta$  – значение отклонения по склонению;

$\phi$  – вектор коэффициентов постоянных пластинки;

$\hat{\phi}$  – оценка вектора коэффициентов постоянных пластинки  $\phi$ ;

$\hat{\theta}_{catjnc}$  – совокупность оценок параметров видимого движения небесного объекта, соответствующего  $j$ -му формуляру  $n_c$ -го каталога;

$\hat{\theta}_{j\mu}$  – оценка  $\mu$ -го параметра видимого движения  $j$ -го небесного объекта;

$\theta_{\min \mu}$ ,  $\theta_{\max \mu}$  – минимально и максимально допустимые значения  $\mu$ -го параметра видимого движения;

$\mu$  – номер параметра измерения (формуляра каталога), используемого при отождествлении;

$\xi$  и  $\eta$  – идеальные (тангенциальные) координаты небесных объектов;

$\Sigma_{catjn}$  – каталожная корреляционная матрица ошибок оценок параметров видимого движения  $j$ -го небесного объекта, содержащихся в  $n_c$ -ом звездном каталоге;

$\Sigma_{frameinfr} = \Sigma_{frin}$  – корреляционная матрица ошибок оценок параметров видимого движения объекта, содержащихся в  $i$ -ом измерении  $n_{fr}$ -го кадра;

$\Sigma_{infrjn(k)} = \Sigma_{catjn} + \Sigma_{frameinfr}$  – суммарная корреляционная матрица ошибок параметров  $i$ -го измерения  $n_{fr}$ -го кадра и  $j$ -го формуляра  $n_c$ -го каталога, составляющих  $m$ -ю отождествленную пару;

$\sigma_{\alpha\delta}$  – СКО позиционных ПЗС-измерений экваториальных координат, в угловых секундах;

$\sigma_{pix}$  – СКО позиционных ПЗС-измерений экваториальных координат, в пикселях;

$\hat{\sigma}_{\alpha}$ ,  $\hat{\sigma}_{\delta}$  – СКО оценки экваториальных координат используемых опорных звезд  $N_{ref}$ ;

$\hat{\sigma}_{\alpha}$ ,  $\hat{\sigma}_{\delta}$  – СКО оценки экваториальных координат общего количества звезд  $N_{mea}$ ;

$\sigma_{j\mu infr} = \sigma_{jni\mu}$  – СКО ошибки оценки  $\mu$ -ой координаты  $j$ -го объекта, содержащейся в  $i$ -ом измерении  $n_{fr}$ -го кадра;

$\sigma_{\mu jnc}$  – СКО ошибки оценки  $\mu$ -ой координаты объекта, содержащейся в  $j$ -ом формуляре  $n_c$ -го звездного каталога;

$$\sigma_{j\mu infrnc} = \sigma_{j\mu infr} + \sigma_{\mu jnc};$$

$\tau_{nfr}$  – время привязки  $n_{fr}$ -го кадра;

$\tau$  – время привязки кадра;

$\tau_{nfr i}$  – время формирования  $i$ -го измерения на  $n_{fr}$ -го кадре;

$\chi_{infr} = \{x_{infr}; y_{infr}\}$  – координаты  $i$ -го измерения  $n_{fr}$ -го кадра;

$\alpha_{infrjnc}$  – вес отождествления пары, состоящей из  $i$ -го измерения  $n_{fr}$ -го кадра  $\Omega_{cat1}$  и  $j$ -го формуляра  $n_c$ -го каталога  $\Omega_{cat2}$ ;

$\Omega_{set}$  – Множество измерений серии кадров, которое состоит из множеств измерений кадров  $\Omega_{nfr}$  рассматриваемой серии;

$\Omega_{catnc}$  –  $n_c$ -ый звездный каталог;

$\Omega_{frame}, \Omega_{cat}$  – множество измерений исследуемого кадра и звездный каталог соответственно;

$\Omega_{sky}$  – множество небесных объектов.

**ПРИЛОЖЕНИЕ В**  
**ДИПЛОМ ЗА ПЕРВОЕ МЕСТО В КОНКУРСЕ ИННОВАЦИОННЫХ**  
**ПРОЕКТОВ «IT-KHARKIV»»**



# ДИПЛОМ

## НАГОРОДЖУЄТЬСЯ

**Саваневич Вадим Євгенович**

професор кафедри електронних обчислюваних машин  
Харківського національного університету радіоелектроніки  
Брюховецький Олександр Борисович, Діков Євген Миколайович,  
Власенко Володимир Петрович, Герасименко Олег Вікторович,  
Безкровний Михайло Михайлович, Соковікова Наталія Сергіївна,  
Хламов Сергій Васильович, Ткачов Віталій Миколайович,  
Погорелов Артем Віталійович, Мовсесян Яна Самвелівна

## ЗА ПЕРЕМОГУ У НОМІНАЦІЇ

Кращий проект в області розпізнавання, обробки,  
відтворення тексто-графічних і аудіо-візуальних даних

## ПРОЕКТ

Програма автоматизованого відкриття астероїдів та комет  
на серії ПЗЗ-кадрів CoLiTec

*Голова організаційного комітету  
конкурсу інноваційних проектів  
«IT-KHARKIV»*

*A.V. Morozov*

**it-kharkiv.com.ua**

**28 листопада 2013 р.**

Згідно з оригіналом

Секретар вченої ради Д 64.052.02

*Підпис*

Л.В. Колесник

*Печатка*