

На правах рукописи



Буткевич Алексей Геннадьевич

**НОВЫЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА ДАННЫХ МИЛЛИСЕКУНДНОЙ
ОПТИЧЕСКОЙ КОСМИЧЕСКОЙ АСТРОМЕТРИИ**

Специальность 1.3.1 —Физика космоса, астрономия
(физико-математические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория Российской академии наук (ГАО РАН)

Официальные оппоненты:

ЖАРОВ Владимир Евгеньевич,

доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», заведующий кафедрой небесной механики, астрометрии и гравиметрии отделения астрономии физического факультета; заведующий лабораторией гравиметрии Государственного астрономического института имени П. К. Штернберга.

НЕФЕДЬЕВ Юрий Анатольевич,

доктор физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет» (ФГАОУ ВО КФУ), профессор кафедры астрономии и космической геодезии Института физики.

ЧЕРНЕТЕНКО Юлия Андреевна,

доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт прикладной астрономии Российской академии наук, ведущий научный сотрудник.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» (ФГБОУ ВО СПбГУ).

Защита диссертации состоится 7 ноября 2025 г. в 11 часов 15 минут на заседании диссертационного совета 24.1.021.01 на базе Главной (Пулковской) астрономической обсерватории Российской академии наук по адресу: 196140, Санкт-Петербург, Пулковское шоссе, д. 65/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ГАО РАН (https://www.gaoran.ru/wp-content/uploads/2025/06/Dissertation_Butkevich.pdf).

Автореферат разослан 25 сентября 2025 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета 24.1.021.01

кандидат физико-математических наук

Осипова А. А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Высокий уровень развития технологий, достигнутый в последнее время, позволил использовать специализированные космические аппараты для проведения астрометрических наблюдений. Наблюдения из космоса имеют ряд существенных преимуществ перед наблюдениями наземными. Можно отметить три наиболее существенных положительных момента (Цветков, 2021). Во-первых, наблюдения из космоса свободны от искажений, вносимых рефракцией и атмосферной турбулентностью. Во-вторых, это одновременный обзор всей небесной сферы, что позволяет создавать каталоги в единой системе для звёзд как северного, так и южного полушарий. В-третьих, достигается высокая временная плотность наблюдений, что позволяет выполнять массовые наблюдательные программы в короткие сроки.

Первым полностью реализованным космическим астрометрическим экспериментом был проект Hipparcos (High Precision PARallax Collecting Satellite), выполненный рядом европейских астрономических учреждений под эгидой Европейского космического агентства (ESA – European Space Agency). В результате обработки данных, собранных в течение 37 месяцев работы космического аппарата, получены два астрометрических каталога: Hipparcos и Tycho (ESA, 1997). Основной каталог Hipparcos содержит 118 тысяч звёзд и представляет собой каталог миллисекундной точности. Дополнительный (обзорный) каталог Tycho содержит около 1 млн. звёзд с точностью положений, собственных движений и параллаксов не хуже 20 мсд.

В 2000 году был выпущен каталог Tycho-2 (Høg et al., 2000), содержащий положения и собственные движения, а также двухцветные фотометрические данные для 2.5 миллионов самых ярких звёзд на небесной сфере. В 2005 были опубликованы результаты новой обработки наблюдательных данных, что позволило улучшить точность каталога (van Leeuwen, 2005). В 2012 году была составлена расширенная компилятивная версия каталога Hipparcos (Андерсон, Фрэнсис, 2012), содержащая большой объём дополнительной информации.

Основные результаты, полученные с помощью наблюдений космического аппарата Hipparcos, изложены в книге (Perryman, 2009).

Успешное выполнение проекта Hipparcos вызвало всплеск интереса к космической астрометрии. Среди предлагаемых проектов имелись как сканирующие спутники, предназначенные для выполнения массовых наблюдательных программ, это проекты Diva (Röser, 1999), Gaia (Lindgren, Perryman, 1997), FAME (Horner, 2000) и “Струве” (Буткевич, 2002; Девяткин, 2011; Ершов и др., 1995; Il'in et al., 1997), так и аппараты, работающие в режиме наведения и служащие для высокоточных наблюдений избранных объектов, это проекты SIM (Shao, Baron, 1999), “Ломоносов” (ГАИШ, 1992) и “Зодиак” (Боярчук и др., 1999). Рассматриваемые проекты различались и по способу выполнения наблюдений. Если в аппаратах FAME, “Ломоносов” и “Струве” предполагалось использовать обычные телескопы, то спутники Diva, Gaia, SIM и “Зодиак” разрабатывались как оптические интерферометры, при этом DIVA рассматривается как тестовый проект для миссии Gaia.

По тем или иным причинам осуществлённым оказался только проект Gaia, при этом его концепция претерпела значительные изменения. Первоначально космический аппарат задумывался как оптический интерферометр. В дальнейшем, однако, от этих планов отказались в пользу обычного телескопа.

Хотя в настоящей работе речь идёт исключительно о космической астрометрии в оптическом диапазоне, нельзя не отметить достижения радиоастрометрии. Так, в ходе выполнения проекта “Радиоастрон”, представляющего собой космический радиоинтерферометр со сверхдлинной базой (Кардашев и др., 2013), была достигнута очень высокая точность единичного наблюдения в 7 мксд на базе длиной 26.9 земного диаметра или 342 тыс. км (Baan et al., 2022).

Космический телескоп Gaia основан на тех же принципах, которые хорошо зарекомендовали себя при выполнении проекта Hipparcos. Космический аппарат вращается вокруг своей оси с постоянной угловой скоростью. Бортовой телескоп обладает двумя полями зрения, линии визирования которых лежат в плоскости, перпендикулярной к оси вращения, поэтому за один оборот, который занимает 6

часов, осуществляется сканирование одного большого круга. Для обеспечения сканирования всей небесной сферы ось вращения непрерывно смещается, находясь в прецессионном движении вокруг мгновенного направления на Солнце. Период прецессии составляет 63 дня, а наклонение оси вращения к направлению на Солнце равно 45° . Этот угол поддерживается постоянным для равномерного нагрева космического аппарата солнечным излучением (Gaia Collaboration, 2016a).

Космический телескоп Gaia был запущен с космодрома Куру с помощью ракеты-носителя “Союз” и разгонного блока “Фрегат” 19 декабря 2013 года. Выполнение наблюдательной программы началось спустя семь месяцев после старта. 15 января 2025 года космический телескоп прекратил свою работу, что обусловлено исчерпанием топлива, необходимого для выполнения сканирования небесной сферы. Таким образом, наблюдения непрерывно велись на протяжении десяти с половиной лет.

К настоящему времени осуществлено три выпуска данных. Первый выпуск (Gaia DR1), опубликованный в сентябре 2016 года, был основан на наблюдениях, собранных за первые 14 месяцев работы (Gaia Collaboration, 2016b). Во втором выпуске (Gaia DR2), осуществлённом в апреле 2018 года, использовались данные, полученные за 22 месяца (Gaia Collaboration, 2018). Третий выпуск, опирающийся на наблюдения, собранные за первые 34 месяца работы космического аппарата с 25 июля 2014 года по 28 мая 2017 года, состоял из двух частей: так называемого раннего релиза Gaia EDR3, опубликованного в декабре 2020 года (Gaia Collaboration, 2021), и собственно Gaia DR3, опубликованного в июне 2022 года (Gaia Collaboration, 2023). Согласно информации, опубликованной Европейским космическим агентством, планируется осуществить ещё два выпуска. Четвёртый выпуск (Gaia DR4) ожидается к середине 2026 года, а последний пятый выпуск (Gaia DR5) будет закончен не ранее 2030 года.

Основные результаты, полученные с помощью данных Gaia DR2, изложены в обзоре (Brown, 2021). Весьма информативное изложение научных результатов, основанных на использовании Gaia DR3, приводится в статье (Понятов, 2022).

Основные статистическо-кинематические свойства каталога Gaia EDR3 обсуждаются в работе (Цветков, 2022). Среди большого количества публикаций, посвящённых Gaia DR3, можно выделить такую интересную работу, как определение орбит для 150 тысяч астероидов (Tanga et al., 2023). Наличие подобных данных, без сомнения, послужит для уточнения масс планет и малых тел Солнечной системы, что необходимо для улучшения теории их движения (Абалакин, 1979).

Проект Hipparcos потребовал многих уточнений в анализе астрометрических наблюдений. Эффекты, которые ранее игнорировались при построении звездных каталогов, такие как гравитационное отклонение света телами в Солнечной системе и релятивистская звездная абберация, должны были систематически учитываться для того, чтобы достичь точности в миллисекунду дуги (мсд), которая стала возможной благодаря наблюдениям из космоса. Процедура редукции, использованная в проекте Hipparcos, была основана на подходе, разработанном в монографии (Маррей, 1986). Миссия Gaia, нацеленная на достижение точности на уровне 10 микросекунд дуги (мксд), требует дальнейшего усложнения моделирования данных для учета слабых физических эффектов, которые вступают в игру при этой точности. Практическая модель для релятивистской редукции астрометрических наблюдений с точностью до 1~мксд была сформулирована в работе (Klioner, 2003) и является основой для астрометрической обработки данных Gaia (Lindegren et al., 2012).

Появление массовых астрометрических каталогов потребовало разработки новых методов анализа и сравнения астрометрических данных. Наиболее мощными из них являются методы, основанные на использовании векторных сферических функций (Витязев, 1999, 2017; Малкин, 2024). Эти методы были успешно применены для сравнения каталогов PPMXL, UCAC4 и XPM (Vityazev, Tsvetkov, 2014) и других задач.

Наблюдательная астрометрия совершила качественный скачок в своем развитии за последние десятилетия. Особенно хорошо это видно на примере оптической космической астрометрии, где за 25 лет, прошедшие от каталога Hipparcos до последней версии каталога Gaia, точность уже улучшилась на два

порядка от миллисекунд до десятков микросекунд дуги. При этом, в будущих выпусках данных Gaia ожидается дальнейшее повышение точности, сопряжённое со значительным увеличением объёма наблюдательных данных. Необходимость разработки новых аналитических методов обусловлена по меньшей мере тремя причинами. Во-первых, при переходе на новый уровень точности становятся значимыми эффекты, которыми ранее можно было пренебречь ввиду их малости. Во-вторых, колоссальный объём наблюдательных данных приводит к появлению качественно новых статистических эффектов. В-третьих, непредвиденные обстоятельства, открывшиеся в ходе проведения эксперимента, привели к необходимости пересмотра модели наблюдений.

Перечисленные факторы позволяют сделать вывод об актуальности задач, результаты исследования которых представлены в настоящей диссертации.

Цели и задачи

Целью работы является как усовершенствование имеющихся, так и разработка новых методов анализа данных для миллисекундной оптической космической астрометрии.

Для достижения поставленных целей были решены следующие задачи:

- исследовано влияние механической нестабильности сканирующего космического аппарата на появление систематических ошибок в параллаксах;
- создана методика, позволяющая использовать дополнительную информацию в процессе построения астрометрического каталога при недостаточном объёме наблюдательных данных;
- выполнено обобщение стандартной астрометрической модели, основанной на предположении о равномерном прямолинейном движении звезды относительно барицентра Солнечной системы, с учётом конечности скорости света;
- разработана строгая процедура преобразования астрометрической и звёздно-кинематической информации от одной эпохи к другой;
- изучено влияние орбитального движения Земли на обнаружение экзопланет средствами астрометрии;
- решена задача о влиянии систематических ошибок параллаксов на

результаты тестирования постньютоновской гравитации с использованием сканирующего астрометрического спутника.

Научная новизна работы

Научная новизна работы состоит в следующем:

- выполнен анализ систематических ошибок параллаксов, обусловленных нестабильностью базового угла между полями зрения сканирующего астрометрического спутника; показано, что периодические колебания базового угла вследствие неравномерного нагрева космического аппарата солнечным излучением приводят к возникновению глобального сдвига параллаксов;
- разработана методика построения астрометрического каталога с использованием априорной информации, когда имеющихся наблюдательных данных недостаточно для полномасштабного решения с пятью параметрами; применение байесовского подхода в таких случаях позволяет надёжно определить положения, формальные неопределённости которых правильно характеризуют фактические ошибки;
- получено строгое решение задачи о модификации стандартной астрометрической модели, основанной на постулируемом равномерном барицентрическом движении звёзд, с учётом конечности скорости света; наличие эффектов запаздывания требует проводить различие между истинными и наблюдаемыми величинами; выведено и решено уравнение равномерного движения в терминах наблюдаемых величин;
- на основании полученного решения разработана процедура преобразования астрометрической и звёздно-кинематической информации от одной эпохи к другой как с учётом конечности скорости света, так и без него; выведены строгие формулы, описывающие зависимость вектора астрометрических параметров от времени, также выведены формулы для преобразования ошибок и корреляций между соответствующими величинами;
- исследованы эффекты орбитального движения Земли на астрометрическое обнаружение экзопланет; с помощью разработанного математического аппарата продемонстрировано, что существенная корреляция между

движением Земли и экзопланеты приводит к смещенным оценкам параллаксов для таких систем;

- установлены ограничения на тестирование постньютоновской гравитации с использованием сканирующего астрометрического спутника, в частности, показано, что наличие глобального сдвига параллаксов приводит к смещённым оценкам параметра γ .

Научная и практическая значимость работы

Результаты, изложенные в диссертации, с успехом применялись как при выполнении редукции наблюдений в проекте Gaia, так и при составлении астрометрических каталогов во всех трёх осуществленных к настоящему моменту выпусках данных Gaia. Они также будут использованы и в ходе создания двух последующих выпусков, запланированных на 2026 и 2030 годы.

Полученные в диссертации результаты найдут своё применение при редукции данных в будущих космических проектах, основанных на тех же принципах, которые были воплощены в проектах Hipparcos и Gaia, т.е. когда наблюдения производятся с борта сканирующего телескопа с двумя полями зрения.

Разработанная методика использования априорной информации при недостаточном объёме наблюдательных данных имеет общий характер и открывает новые перспективы для построения астрометрических каталогов вне зависимости от способа выполнения наблюдений.

Найденное в диссертационной работе обобщение стандартной астрометрической модели с учётом эффектов запаздывания является отправной точкой для новых подходов в работе с астрометрической и звёздно-кинематической информацией на микросекундном уровне точности.

Разработанные в диссертационной работе методы могут быть использованы для оптимизации поиска экзопланет астрометрическими методами с целью устранения эффектов, связанных с орбитальным движением Земли, а также для повышения надежности тестирования общей теории относительности с помощью сканирующего астрометрического спутника.

Методология и методы исследования

Методология исследования основана на разработке математических моделей с использованием аппарата векторной астрометрии (Маррей, 1986) и их последующей верификации посредством численных экспериментов. Применяемые теории и методы: байесовская оценка решения (Пугачев, 2002), теория распространения света в барицентрической системе координат (Klioner, 2003), сингулярное разложение (Golub, van Loan, 2012), метод наименьших квадратов (Брандт, 2003). Влияние орбитального движения Земли на астрометрическое обнаружение экзопланет (Perryman, 2018) исследовалось методом корреляционных функций. Численное моделирование наблюдений с борта сканирующего космического аппарата выполнялось согласно процедуре, разработанной в рамках подготовки проекта “Струве” (Буткевич, 2002). Построение астрометрического решения основывалось на методике (Lindegren et al., 2012), используемой в проекте Gaia. Вычисления проводились с помощью программного обеспечения на языках Фортран и Java, разработанного как самим автором, так и соавторами.

Апробация работы.

Основные результаты диссертации докладывались на семинарах ГАО РАН, на семинарах кафедры астрономии СПбГУ, на семинарах Лормановской обсерватории Дрезденского технического университета, на семинарах Лундской и Туринской обсерваторий, а также на ряде всероссийских и международных конференций:

- IAU Symposium 248. A Giant Step: From Milli- to Micro-Arcsecond Astrometry. Shanghai, China, October 2007;
- The Twelfth Marcel Grossmann Meeting: On Recent Developments in Theoretical and Experimental General Relativity, Astrophysics and Relativistic Field Theories. Paris, France, July 2009;
- IAU Symposium 261. Relativity in Fundamental Astronomy: Dynamics, Reference Frames, and Data Analysis. Virginia Beach, USA, October 2009.
- The Eleventh Meeting on Gaia Relativistic Models and Tests. Madrid, Spain, September 2011;
- IAU XXVIIIth General Assembly. Beijing, China, August, 2012.

- The Twelfth Meeting on Gaia Relativistic Models and Tests. Paris, France, July 2013;
- Meeting on Gaia Astrometric Global Iterative Solution. Dresden, Germany, May 2014;
- Gaia CU3 Plenary Meeting. Edinburgh, Great Britain, June 2015;
- IAU XXIXth General Assembly. Honolulu, USA, August, 2015.
- Всероссийская астрономическая конференция (БАК-2017) «Астрономия: познание без границ». Ялта, Россия, сентябрь 2017 г.

Результаты, полученные в работе, входили в списки «Важнейших достижений в области астрономии» Научного совета по астрономии ОФН РАН.

Личный вклад автора

По теме диссертации опубликовано 15 работ. Из них 14 статей в журналах, включенных в международные базы данных научного цитирования Scopus/Web of Science. Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Все представленные в диссертации результаты получены лично автором.

В работах, выполненных с соавторами, личный вклад автора заключается в следующем: [1] – участие в разработке математического аппарата, интерпретация полученных результатов; [2] – постановка задачи, создание математического аппарата, решение полученных уравнений; [3] – участие в разработке математического аппарата, интерпретация полученных результатов; [4–6] – участие в подготовке космического эксперимента, обработка измерений, интерпретация результатов; [7] – постановка задачи, создание математического аппарата, разработка программного обеспечения, выполнение численных экспериментов; [8] – создание программного обеспечения, обработка наблюдений и их интерпретация; [11, 12] – интерпретация результатов наблюдений и редукции данных; [13,15] – постановка задачи, создание математического аппарата, разработка программного обеспечения, выполнение численных экспериментов; [14] – участие в постановке задачи, вывод математических формул, разработка программного обеспечения, выполнение численных экспериментов.

ПОЛОЖЕНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Доказано аналитически и подтверждено численными экспериментами, что определяемые сканирующим астрометрическим спутником параллаксы подвержены глобальному сдвигу вследствие периодических изменений базового угла, вызванных нагревом спутника солнечным излучением.
2. Показана высокая эффективность разработанной и опробованной на реальных наблюдениях Gaia методики построения астрометрического каталога с использованием априорной информации для звёзд с малым объёмом наблюдательных данных.
3. Получено строгое решение задачи о равномерном движении звезды относительно барицентра Солнечной системы с учётом конечности скорости света и найдена удобная параметризация эффектов запаздывания, на основании чего построена общая процедура преобразования астрометрической и звёздно-кинематической информации от одной эпохи к другой.
4. Доказано посредством разработанного математического аппарата, что движение родительской звезды, вызванное наличием экзопланеты с орбитальным периодом около одного года, может быть полностью или частично поглощено эффектом параллакса, что ведёт как к понижению вероятности астрометрического обнаружения подобных систем, так и к смещённым оценкам их параллаксов.
5. Установлены ограничения на тестирование постньютоновской гравитации с использованием сканирующего астрометрического спутника на основе анализа корреляции между нуль-пунктом параллаксов и параметром γ , входящим в параметризованный постньютоновский формализм.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения и списка цитируемой литературы (152 наименования). Диссертация содержит 248 страниц, 23 рисунка, 6 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности проблемы, сформулированы цели и практическая значимость исследований, приведены положения, выносимые на защиту, список публикаций и данные об апробации работы, описана структура диссертации.

В первой главе представлена так называемая стандартная астрометрическая модель, базирующаяся на положении о равномерном прямолинейном движении одиночных звёзд относительно барицентра Солнечной системы. Эта модель является фундаментальной в нескольких отношениях. Во-первых, она описывает движение звезды с помощью всего шести легко каталогизируемых параметров. Во-вторых, она позволяет непосредственно экстраполировать положение объектов между различными эпохами. В-третьих, она является базовой моделью, или нулевой гипотезой, при определении нелинейного движения, вызванного присутствием невидимого компаньона.

Математическое описание стандартной модели даётся выражением

$$\mathbf{R}(t) = \mathbf{R}_0 + \mathbf{v}t, \quad (1)$$

где $\mathbf{R}_0$ – барицентрическое положение звезды в начальную эпоху, $\mathbf{v}$ – постоянная скорость, $\mathbf{R}(t)$ – барицентрическое положение звезды на эпоху t ; начальной эпохе отвечает $t = 0$.

В рамках этой модели в разделе 1.1 вводятся шесть астрометрических параметров: прямое восхождение α , склонение δ , тригонометрический параллакс ϖ , компоненты собственного движения по прямому восхождению и склонению $\mu_{\alpha*} \equiv \mu_{\alpha} \cos \delta$ и μ_{δ} , а также радиальное собственное движение, представляющее собой лучевую скорость, делённую на расстояние, $\mu_r = v_r/R$. В качестве связи между параллаксом и расстоянием целесообразно принять математически простейшее соотношение $\varpi = A/R$, где A обозначает астрономическую единицу (Жаров, 2006; Klioner, 2003). Набор из шести величин $(\alpha, \delta, \varpi, \mu_{\alpha*}, \mu_{\delta}, \mu_r)$ полностью описывает мгновенное кинематическое состояние звезды, отнесённое к барицентру Солнечной системы.

В разделе 1.2 изложена математически строгая процедура преобразования астрометрических параметров между различными эпохами, разработанная в рамках стандартной модели. Вследствие движения звезды в пространстве все шесть параметров являются функциями времени. Выведены соотношения, которые описывают преобразование шести астрометрических параметров, отнесённых к начальной эпохе, в соответствующий набор параметров, отнесённый к произвольной эпохе t . Следует отметить, что полученное преобразование является строго обратимым: последующее преобразование от t к начальной эпохе приводит к исходным значениям параметров.

Кроме самих астрометрических параметров, от времени также зависят неопределённости параметров и корреляции между ними. Информация о стандартных ошибках и корреляциях содержится в ковариационных матрицах размером 6×6 . Преобразованию ковариационных матриц между различными эпохами посвящён раздел 1.3. Построенное преобразование также является полностью обратимым.

В разделе 1.4 в качестве иллюстрации приведён пример упрощённого преобразования астрометрических данных. В частности, показано, что вся информация о начальных корреляциях между экваториальными координатами (α, δ) и остальными четырьмя астрометрическими параметрами становится менее значимой по мере увеличения разницы эпох и окончательно забывается в долгосрочной перспективе.

В разделе 1.5 установлены пределы применимости модели равномерного барицентрического движения. Равномерное движение подразумевает отсутствие ускорения. На практике, однако, ускоренное движение можно считать равномерным, если наблюдаемые эффекты, вызванные ускорением, малы по сравнению с требуемой астрометрической точностью. Рассматривая ускорение, вызванное крупномасштабным гравитационным полем Галактики, найдено, что на микросекундном уровне точности движение можно считать равномерным на интервалах времени не превышающих 50 лет. Для звёзд, движущихся параллельно галактической плоскости, ограничение является менее строгим, и модель остаётся справедливой вплоть до 100 лет.

Вторая глава посвящена исследованию влияния колебаний базового угла на глобальный сдвиг тригонометрических параллаксов, полученных из наблюдений сканирующего астрометрического спутника с двумя полями зрения. Абсолютная астрометрия в проекте Gaia основана на принципе самокалибровки, когда одни и те же наблюдения используются как для определения астрометрических параметров, так и для калибровки инструмента. Для достижения заявленной точности требуется стабильность базового угла между полями зрения на микросекундном уровне. На практике, к сожалению, этого достичь не удалось. В космическом аппарате Gaia присутствуют колебания базового угла с амплитудой около одной миллисекунды дуги, что может привести к значительному глобальному сдвигу параллаксов. Ситуация усугубилась тем обстоятельством, что в литературе существовали две различные формулы для сдвига. Поэтому возникла задача устранить это противоречие, что и было сделано. Вопрос был исследован как аналитически, так и численно.

Раздел 2.1 содержит аналитический подход, основанный на рассмотрении того, как малые возмущения различных параметров изменяют наблюдаемые величины. Сначала демонстрируется, что в первом порядке по малым углам произвольные изменения наблюдаемых величин эквивалентны определенным изменениям базового угла и ориентации. Затем находятся изменения наблюдаемых величин из-за общего сдвига всех параллаксов. Объединяя эти результаты, выводятся такие изменения базового угла и ориентации, наблюдательные проявления которых неотличимы от эффекта глобального сдвига параллаксов. Показано, что колебания мерного угла Γ вида

$$\delta\Gamma = a \cos \Omega \quad (2)$$

ведут к глобальному сдвигу параллаксов

$$\Delta\varpi = \frac{1}{\sin(\Gamma/2)} \frac{a}{2 \sin \xi} \left(\frac{R}{A}\right)^{-1}. \quad (3)$$

Здесь Ω – угловое расстояние между направлением на Солнце и биссектрисой угла между линиями визирования бортовых телескопов, отсчитываемое вдоль мгновенного большого круга сканирования в направлении вращения

космического аппарата. При номинальном законе сканирования небесной сферы угол Ω линейно растёт со временем. ξ – наклонение оси вращения к направлению на Солнце, R – барицентрическое расстояние спутника, A – астрономическая единица. Для параметров, относящихся к аппарату Gaia, т.е. $\Gamma = 106.5^\circ$, $\xi = 45^\circ$ и $R = 1.01A$, величина сдвига параллаксов составляет $\Delta\varpi = 0.87a$.

В разделе 2.2 представлены результаты численных экспериментов, проведённых для проверки аналитических выводов. Для изучения различных аспектов проблемы использовались два взаимодополняющих подхода: прямое решение, где обращение нормальной матрицы даёт полную ковариационную матрицу, и блочно-итеративное решение, аналогичное тому, которое используется при обработке данных Gaia (Lindgren et al., 2012). Хотя прямое решение может обрабатывать только относительно небольшое количество звёзд и, следовательно, имеет ограниченное практическое применение, оно позволяет исследовать важные математические свойства проблемы. Напротив, итеративное решение не может предоставить такого рода информацию, но является более реалистичным с точки зрения количества звёзд и успешно применялось при обработке реальных данных Gaia.

При выполнении прямого решения вырожденность задачи была исследована с помощью сингулярного разложения. Было показано, что полное вырождение наступает только при одновременном определении всех трёх групп параметров: астрометрии, базового угла и ориентации. Это позволяет по-новому взглянуть на применимость принципа самокалибровки. Если бы ориентация не определялась из наблюдений, то есть, если бы самокалибровка не использовалась для ориентации, то сдвига параллаксов вследствие колебаний базового угла не происходило бы. Это обстоятельство обязательно должно быть принято во внимание при планировании будущих проектов в области космической астрометрии. При использовании итеративного численного решения была исследована зависимость смещения параллаксов от величины базового угла при фиксированной величине амплитуды колебаний последнего. Приведённый на Рисунок 1 график свидетельствует о том, что полученная зависимость находится в полном согласии с формулой (2).

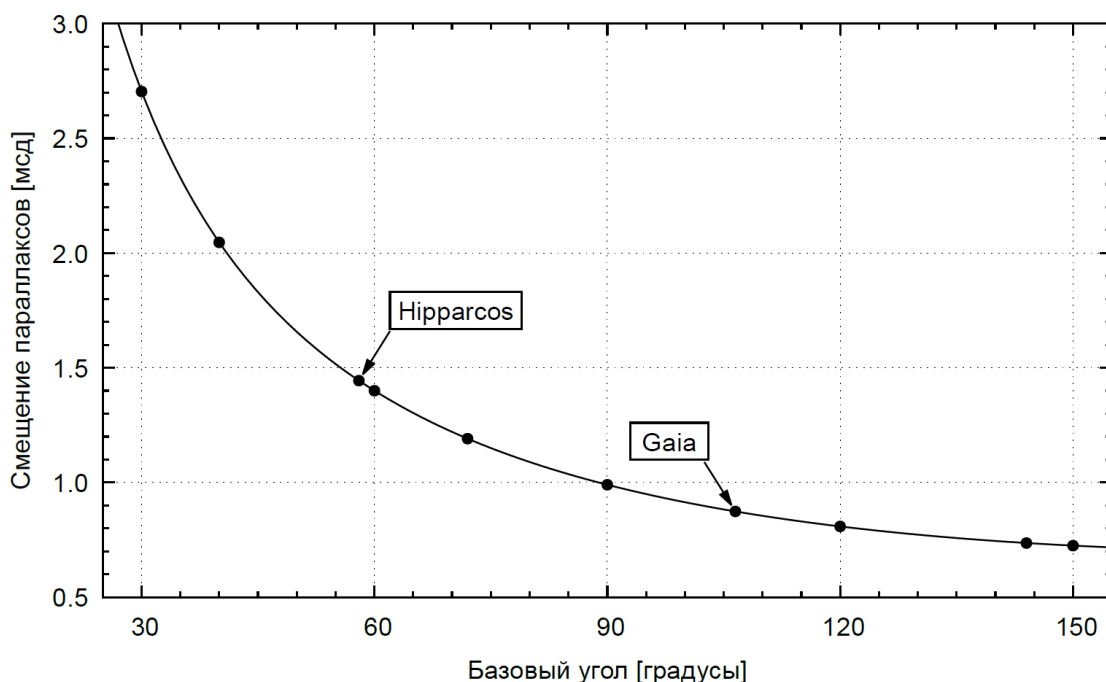


Рисунок 1. – Глобальный сдвиг параллаксов вследствие колебаний базового угла вида $\cos \Omega$ с амплитудой 1 мсд. Точками показаны результаты численных экспериментов для различных величин базового угла, включая значения, принятые в космических аппаратах Hipparcos и Gaia. Сплошная линия отвечает теоретическому значению, описываемому уравнением ().

В разделе 2.3 обсуждаются различные практические последствия полученных результатов. Указано, что существуют три различных эффекта, способствующих снятию вырождения: конечный размер полей зрения, временная зависимость R из-за эксцентриситета земной орбиты и различие между барицентрическим и гелиоцентрическим расстоянием. К сожалению, все эти эффекты проявляются на уровне нескольких процентов, что делает результат очень чувствительным к небольшим ошибкам в модели калибровки. Это обстоятельство значительно ограничивает шансы на снятие вырождения исключительно из самих наблюдений.

Полученные во второй главе результаты составили основу для устранения эффектов, вызванных имеющимися колебаниями базового угла, в редукции данных в проекте Gaia.

В третьей главе разработана методика использования априорной информации для построения астрометрического каталога при недостаточном объёме наблюдательных данных, когда из наблюдений какого-либо объекта не удаётся надёжно определить все пять астрометрических параметров. Первоначально полагалось, что такая ситуация будет иметь место только для первого выпуска данных Gaia из-за короткого ряда наблюдений. Впоследствии, однако оказалось, что эта методика имеет гораздо более широкое применение. Она используется, например, для объектов переменной яркости и для слабых звёзд, близких к порогу чувствительности инструмента.

В разделе 3.1 дано теоретическое обоснование. Сначала описывается процедура оценки астрометрических параметров как классическая задача наименьших квадратов, которая согласуется с используемым в проекте Gaia астрометрическим решением (Lindgren et al., 2012). Затем показано, как можно ввести гауссовское априорное распределение с помощью правила Байеса. Наконец, обсуждается приемлемость гауссовых априорных и апостериорных плотностей вероятности и их интерпретация в контексте астрометрического решения. С математической точки зрения добавление априорной информации сводится к методу наименьших квадратов с модифицированной нормальной матрицей $(N_0 + N_p)$, где N_0 – обычная основанная на данных нормальная матрица, а матрица N_p отвечает опытными данным о распределении параллаксов и собственных движений $N_p = \text{diag}(0, 0, \sigma_{\varpi, p}^{-2}, \sigma_{\mu, p}^{-2}, \sigma_{\mu, p}^{-2})$.

В разделе 3.2 изложена практическая процедура построения астрометрического решения с использованием априорной информации. Было проанализировано влияние различных априорных данных на астрометрические решения, основанные на численных экспериментах с реалистичными распределениями звездных параметров из модели Gaia Universe Model Snapshot (GUMS). Для оптимизации априорной информации было наложено требование, чтобы 90% фактических ошибок положения были заключены внутри 90%-го доверительного эллипса, вычисленного на основании гауссовой апостериорной плотности вероятности, т. е. с использованием формальной ковариационной матрицы. Этот подход проиллюстрирован на Рисунке 2.

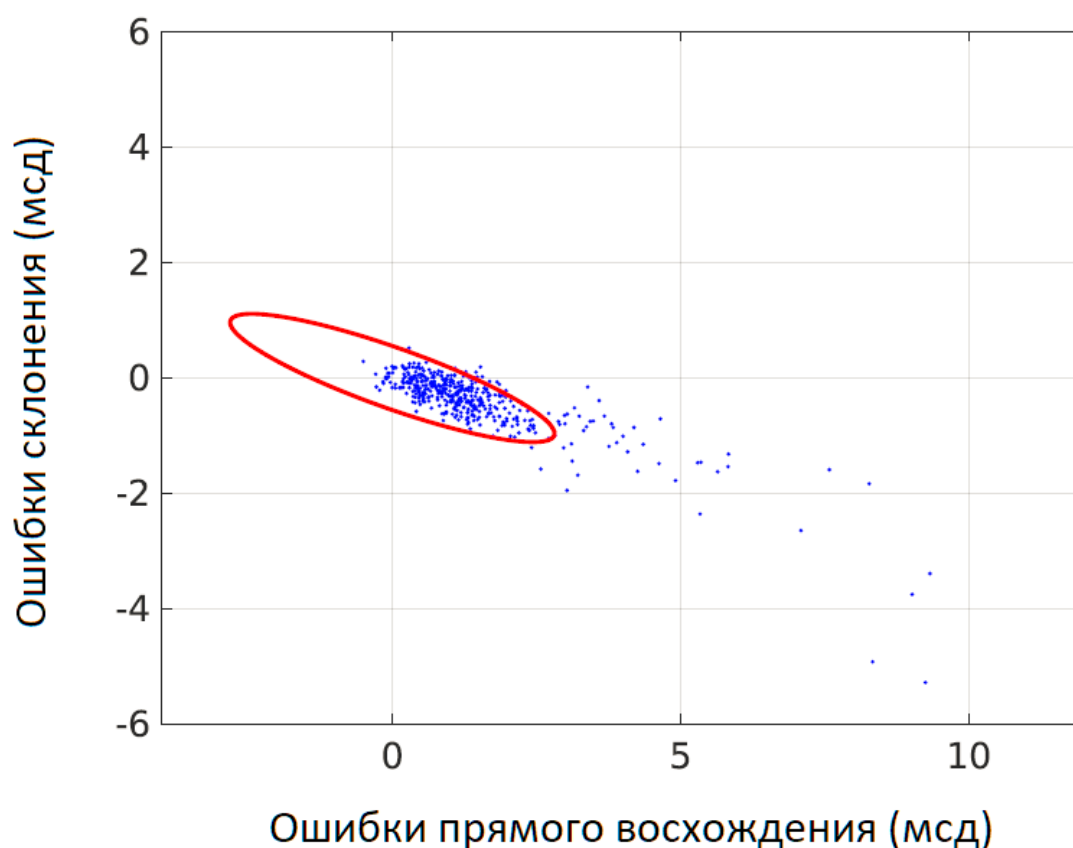


Рисунок 2. – Распределение ошибок положения в решении, полученном с использованием априорной информации. Синие точки показывают ошибки отдельных звёзд. Красная кривая отвечает 90%-ному доверительному эллипсу.

Соответствующая априорная дисперсия параллаксов обозначается как $\sigma_{\varpi, F90}$. Было установлено, что хорошие астрометрические решения для координат получаются с априорной дисперсией собственных движений равной $\sigma_{\mu, p} = \sigma_{\varpi, F90} \times 10 \text{ год}^{-1}$. Также была найдена зависимость $\sigma_{\varpi, F90}$ от яркости и направления.

Следует отметить, что разработанная методика позволяет получить только надёжные оценки положений. Что же касается параллаксов и собственных движений, то, хотя они и являются частью решения, они настолько сильно смещены априорной информацией, что становятся физически бессмысленными, и поэтому их нельзя использовать.

Раздел 3.3 содержит аналитическую иллюстрацию использования априорной информации на примере упрощённого случая, когда решение включает только одну из координат (например, δ) и параллакс. Выведенные формулы хорошо согласуются с численными экспериментами.

В разделе 3.4 описаны численные эксперименты, выполненные для того чтобы продемонстрировать практическую осуществимость разработанной методики. Полученные результаты показывают, что астрометрическое решение, содержащее только координаты, приводит к сильно смещённым оценкам неизвестных. Напротив, использование оптимального априорного значения $\sigma_{\omega, F90}$ значительно уменьшает фактические ошибки координат и даёт разумные оценки неопределённостей, которые находятся в хорошем согласии с фактическими ошибками, т.е. внесение априорной информации позволяет получить не только надёжные оценки положения, но и их формальные ошибки, которые правильно характеризуют ошибки фактические.

Раздел 3.5 приводит сведения об использовании априорной информации при создании каталогов Gaia. Разработанная методика была применена при создании всех трёх астрометрических каталогов Gaia, имеющих в настоящий момент. Согласно терминологии, принятой в проекте Gaia, такие решения именуются двухпараметрическими. Приведённые в Таблице 1 данные показывают, как доля таких объектов изменяется в различных выпусках данных. Решения с априорной информацией с успехом применялись во всех трёх выпусках данных Gaia и, без сомнения, будут использоваться в дальнейшем.

Таблица 1. – Использование априорной информации при построении астрометрических каталогов Gaia.

Выпуск данных	Продолжительность наблюдений (в месяцах)	Общее количество объектов (в миллионах)	Доля звёзд с двухпараметрическим решением
DR1	14	1143	99.8%
DR2	22	1693	21%
DR3	34	1811	19%

Четвёртая глава посвящена исследованию вопроса о влиянии эффектов запаздывания, обусловленных конечностью скорости света, на преобразование эпохи для астрометрических каталогов. В современной высокоточной астрометрии все эффекты такого рода должным образом учитываются при обработке наблюдений (Копейкин, 1989, 1990, 2007; Klioner, 2003). Опорный каталог, основанный на редукции длительных рядов наблюдений, содержит информацию о положении и скорости объектов, наблюдаемых (фиктивным наблюдателем) из барицентра Солнечной системы в определённую эпоху. Ввиду конечности скорости света наблюдаемые величины отличаются от величин истинных, поскольку изменения состояния звезды становятся известны наблюдателю по истечении срока, за который свет от звезды достигнет наблюдателя, причём время распространения света непрерывно меняется вследствие движения звезды относительно барицентра. Рисунок 3 иллюстрирует различие между истинным и наблюдаемым положением.

Возникает вопрос о том, как наблюдаемые барицентрические величины изменяются со временем в рамках стандартной астрометрической модели. Эта задача рассматривалась рядом авторов, (Schwarzschild, 1894; Eisner, 1967; Stumpff, 1985), в результате чего было найдено несколько приближённых решений. В ходе проведённого исследования удалось найти полные аналитические решения для всех физических эффектов.

В разделе 4.1 обсуждаются эффекты запаздывания и получено уравнение движения звезды в терминах наблюдаемых величин.

$$\mathbf{R}(t) = \mathbf{R}_0 + \mathbf{v}_0(1 - v_{r0}/c)^{-1}(t - (R(t) - R_0)/c). \quad (4)$$

Эта формула представляет собой обобщение стандартной астрометрической модели с учётом конечности скорости света. Здесь стоит наблюдаемая скорость на начальную эпоху. Связь между наблюдаемой и истинной скоростью $\mathbf{v}^{\text{true}}$ определяется посредством доплеровского множителя:

$$\mathbf{v} = \frac{\mathbf{v}^{\text{true}}}{1 + v_r^{\text{true}}/c} \quad / (\quad)$$

Следует отметить, что в отличие от истинной скорости, наблюдаемая скорость зависит от времени. Это объясняется тем фактом, что стоящая в знаменателе

истинная радиальная скорость непрерывно изменяется вследствие изменения угла между вектором скорости и лучом зрения. Нетрудно видеть, что наблюдаемая скорость будет постоянной только в случае чисто радиального движения. Полученное уравнение движения неявным образом определяет наблюдаемое положение в произвольный момент времени по известным начальным значениям наблюдаемых координат и скоростей.

В разделе 4.2 получено строгое решение выведенного уравнения:

$$\mathbf{R}(t) = \mathbf{R}_0 + \mathbf{v}_0 t f_T. \quad (5)$$

Стоящая здесь величина f_T сложным образом зависит от начальных значений $\mathbf{R}_0$ и $\mathbf{v}_0$. Если пренебречь эффектами запаздывания, чему формально соответствует $c \rightarrow \infty$, $f_T = 1$, а выражения (4) и (5) переходят в обычное уравнение равномерного прямолинейного движения (1).

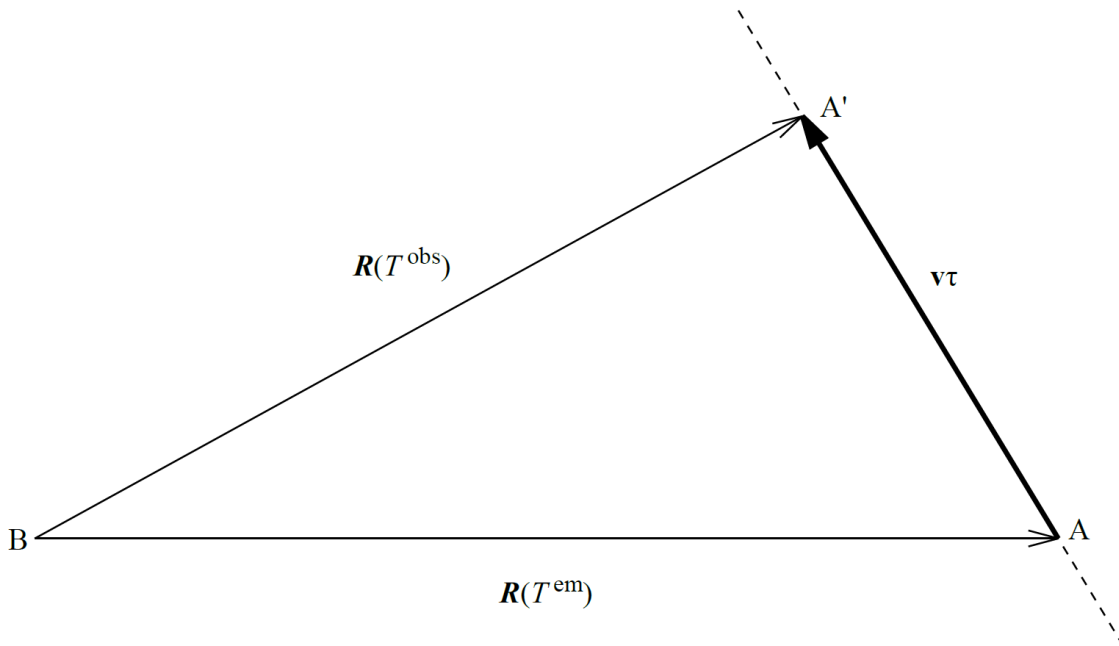


Рисунок 3. – Эффект запаздывания для наблюдений равномерно движущейся звезды с точки зрения наблюдателя в барицентре Солнечной системы В. Наблюдаемое положение звезды А в момент T^{obs} даётся вектором $\mathbf{R}(T^{\text{em}})$, который отвечает положению звезды в момент испускания световой сингала $T^{\text{em}} = T^{\text{obs}} - \tau$. В течение времени τ , за которое свет пройдёт путь от точки А до точки В, звезда переместится в точку А'

Используя решение (5), были найдены явные выражения для зависимости астрометрических параметров от времени с учётом эффектов запаздывания, а также получены строгие и полностью обратимые формулы для преобразования астрометрических параметров от одной эпохи к другой. Примечательно, что все эффекты запаздывания удобно параметризуются двумя множителями, которые равны единице, когда игнорируется конечность скорости света.

В разделе 4.3 обсуждаются различные аспекты полученного решения. В частности, приведены условия, когда можно пренебречь эффектами запаздывания и, наоборот, когда ими пренебречь необходимо. Затем вычислены эффекты запаздывания для избранных звёзд и определены относительные величины эффектов запаздывания и галактического ускорения. Также проведено сопоставление выполненного исследования с предыдущими работами.

Раздел 4.4 содержит вычисление всех элементов якобиана, используемого для преобразования стандартных ошибок и корреляций. Найдены все 36 частных производных преобразованных астрометрических параметров по астрометрическим параметрам на начальную эпоху. Выведенные формулы являются обобщением выражений, полученных в разделе 1.3. В предельном случае $c \rightarrow \infty$ они переходят в соответствующие формулы, полученные ранее.

В разделе 4.5 дан вывод приближённых формул для эффектов запаздывания. Полученные соотношения позволяют сделать важные заключения о влиянии эффектов запаздывания на астрометрические параметры. Изменения в положении и параллаксе являются квадратичными функциями времени, тогда как вариации собственных движений и скорость растут линейно со временем. Все эффекты пропорциональны кубу пространственной скорости, тогда как зависимость от расстояния различна: для скоростей она имеет вид R^{-1} , для положений и собственных движений – R^{-2} и для параллаксов – R^{-3} .

Таким образом, в результате проведённого исследования выведен полный набор формул для строгого и полностью обратимого преобразования астрометрических и звёздно-кинематических данных между различными эпохами с учётом конечности скорости света.

В пятой главе изучено влияние орбитального движения Земли на астрометрическое обнаружение экзопланетных систем. Было продемонстрировано, что в некоторых случаях движение родительской звезды, обусловленное присутствием планеты, может быть полностью или частично поглощено эффектом параллакса. Это снижает вероятность обнаружения такой системы и, кроме того, приводит к смещённой оценке параллакса. Статистический анализ невязок, описывающих отклонение от стандартной астрометрической модели, позволил найти смещение параллакса в общем случае и ввести удобную количественную меру, характеризующую возможность детектирования подобных систем. Это величина, названная эффективной астрометрической сигнатурой, учитывает орбитальное движение Земли и влияние поглощения параллакса на астрометрические невязки. Подобная задача рассматривалась впервые.

В разделах 5.1 и 5.2 выполнен статистический анализ астрометрического детектирования экзопланет. Рассмотрение статистики соответствия χ^2 для оценки параллакса позволило вывести формулу для эффективную астрометрическую сигнатуру, которая учитывает орбитальное движение Земли и влияние поглощения параллакса на астрометрические невязки:

$$v_{\text{eff}} = v(1 - \rho)^{1/2} \equiv vk$$

Здесь k – астрометрическая эффективность, а v – обычная астрометрическая сигнатура, определяемая как

$$v = 3 \text{ } \mu\text{as} \times \left(\frac{M_p}{M_{\text{Earth}}} \right) \left(\frac{M_*}{M_{\text{Sun}}} \right)^{-1} \left(\frac{a_p}{1 \text{ AU}} \right) \left(\frac{d}{1 \text{ pc}} \right)^{-1}$$

Примечательно, что эффекты орбитального движения Земли удобно параметризуются одним параметром: корреляционной функцией ρ положений Земли и экзопланеты.

Для круговой орбиты получено общее выражение для корреляционной функции в терминах параметров орбиты и продолжительности наблюдений. Таким образом, получен полный набор формул для расчета астрометрических эффектов, обусловленных взаимодействием между орбитальным движением Земли и орбитальным движением родительской звезды для произвольных

круговых орбит. Корреляционная функция также вычислена для эллиптических орбит, плоскость которых параллельна плоскости эклиптики.

Анализ полученных результатов показывает, что эффекты, связанные с поглощением параллакса, значительны для орбит с малым эксцентриситетом ($e \leq 0.5$) и периодом в интервале от 0.8 до 1.2 года. В этом диапазоне периодов эти эффекты в решающей степени зависят от наклона плоскости орбиты по отношению к эклиптике и от относительного положения Земли и звезды.

В разделе 5.3 рассматривается применение альтернативных методов детектирования экзопланет в тех случаях, когда планета не может быть обнаружена астрометрически. В то время как фотометрические транзиты полезны для этих целей только в пределах узкой полосы вдоль эклиптики, лучевых скоростей позволяют обнаруживать такие системы на большей части небесной сферы, за исключением областей вокруг полюсов эклиптики. Более того, расхождение между светимостью родительской звезды, полученной из тригонометрического параллакса, и астрофизическими данными может предоставить доказательства наличия невидимого компаньона. Этот эффект может быть существенным для невидимых спутников, являющихся массивными коричневыми карликами.

Стоит отметить, что все результаты, полученные для одной планеты, справедливы для систем с несколькими экзопланетами, поскольку движение родительской звезды является суперпозицией эффектов, производимых каждой из планет по отдельности. Эффекты поглощения параллакса на характеристику планетарных орбит в этой работе не рассматривались; эта сложная и важная проблема заслуживает специального изучения.

В разделе 5.4 обсуждается предельная масса астрометрически детектируемой планеты. Получена удобная формула, которая позволяет делать качественно выводы об обнаружении экзопланет с использованием наблюдений Gaia. Так, например, исходя из имеющихся данных о точности измерений Gaia, можно заключить, что планеты с массой менее $200M_{\oplus}$, обращающиеся вокруг звёзд солнечного типа, могут быть детектированы не далее 10 пк от Солнца.

Шестая глава посвящена использованию измерений, выполняемых сканирующим космическим аппаратом, для экспериментальной проверки общей теории относительности. Астрометрические наблюдения позволяют оценить параметр γ , который определяет величину гравитационного отклонения света в рамках параметризованного постньютоновского формализма (Турышев, 2009). На сегодняшний день наиболее точная оценка этого параметра составляет $(2.1 \pm 2.3) \cdot 10^{-5}$. Ожидалось, что в ходе выполнения проекта Gaia точность определения параметра γ будет улучшена минимум на порядок. Однако, следует отметить, что эти выводы основывались на простых статистических соображениях, связанных с оценками точности наблюдений и большим объёмом данных; систематические ошибки при этом во внимание не принимались. Как известно, в тригонометрических параллаксах Gaia EDR3 присутствует как глобальный сдвиг, так и зональные вариации. Кроме того, методика выполнения измерений, реализованная в эксперименте Gaia, характеризуется существенной корреляцией между параллаксами и параметром γ . Вопрос о влиянии систематических ошибок параллаксов на определение параметра γ ранее не рассматривался в литературе. Были исследованы различные аспекты этой проблемы.

В разделе 6.1 дано аналитическое обоснование. Рассмотрены изменения наблюдаемых величин, обусловленные малыми возмущениями параллаксов и параметра γ . В частности, получена оценка относительной величины эффектов, которая для проекта Gaia имеет вид

$$\frac{\Delta\varpi \text{ [мксд]}}{\Delta\gamma [10^{-5}]} = -\frac{1}{35}$$

Эта пропорция иллюстрирует как абсолютную величину эффектов, так и направление их изменения. Если, например, параллакс увеличивается на 10 мксд, это соответствует такому изменению наблюдаемых величин, которое можно описать уменьшением параметра γ на величину 350×10^{-5} . И наоборот, изменение наблюдаемых величин в результате увеличения параметра γ на 10^{-5} можно описать уменьшением параллакса на 0.03 мксд.

Раздел 6.2 посвящён коэффициенту корреляции между нуль-пунктом параллакса и параметром γ . Величина коэффициента корреляции определена двумя различными способами: с помощью метода корреляционных функций и с использованием метода наименьших квадратов. Второй подход является более общим и позволяет также рассмотреть случай двумерных наблюдений, тогда как метод корреляционных функций применим только к одномерным наблюдениям.

В разделе 6.3 обсуждаются последствия статистической зависимости между параллаксом и параметром γ . Во-первых, гипотетическое отклонение от общей теории относительности, которое в данном контексте эквивалентно тому, что значение параметра γ отлично от единицы, может вызвать изменение нуль-пункта параллакса. И наоборот, наличие глобального сдвига параллакса может дать смещённую оценку параметра γ , что, в свою очередь, может привести к ошибочным физическим интерпретациям.

Выведены аналитические формулы, описывающие оба эти эффекта для используемой в проекте Gaia методики производства наблюдений. Продемонстрировано, что, в рамках сегодняшних знаний, возможный сдвиг параллакса вследствие гипотетического отклонения параметра γ от единицы не превышает 0.2 мксед, что лежит за пределами достигнутого в настоящее время уровня точности. Напротив, анализ влияния нуль-пункта параллакса на оценку параметра γ показал, что абсолютная величина нуль-пункта не должна превышать 0.25 мксед для того, чтобы возможно было оценить параметр γ с точностью, сопоставимой с результатами эксперимента, выполненного с помощью космического аппарата Кассини.

В разделах 6.4 и 6.5 приведены результаты численных экспериментов. Все теоретические выводы полностью подтверждены результатами репрезентативного компьютерного моделирования. Более того, в ходе выполнения численных экспериментов был обнаружен неизвестный ранее эффект. Было найдено, что чувствительность астрометрии Gaia к параметру γ существенным образом зависит от эклиптической широты, как показано на Рисунке 4. Было установлено, указанный эффект является следствием ранее

неизвестной асимметрии, присущей применяемой в проекте Gaia схеме сканирования небесной сферы. Дополнительные численные эксперименты полностью подтвердили это заключение. Этот результат вошел в список «Важнейших достижений в области астрономии» Научного совета по астрономии ОФН РАН.

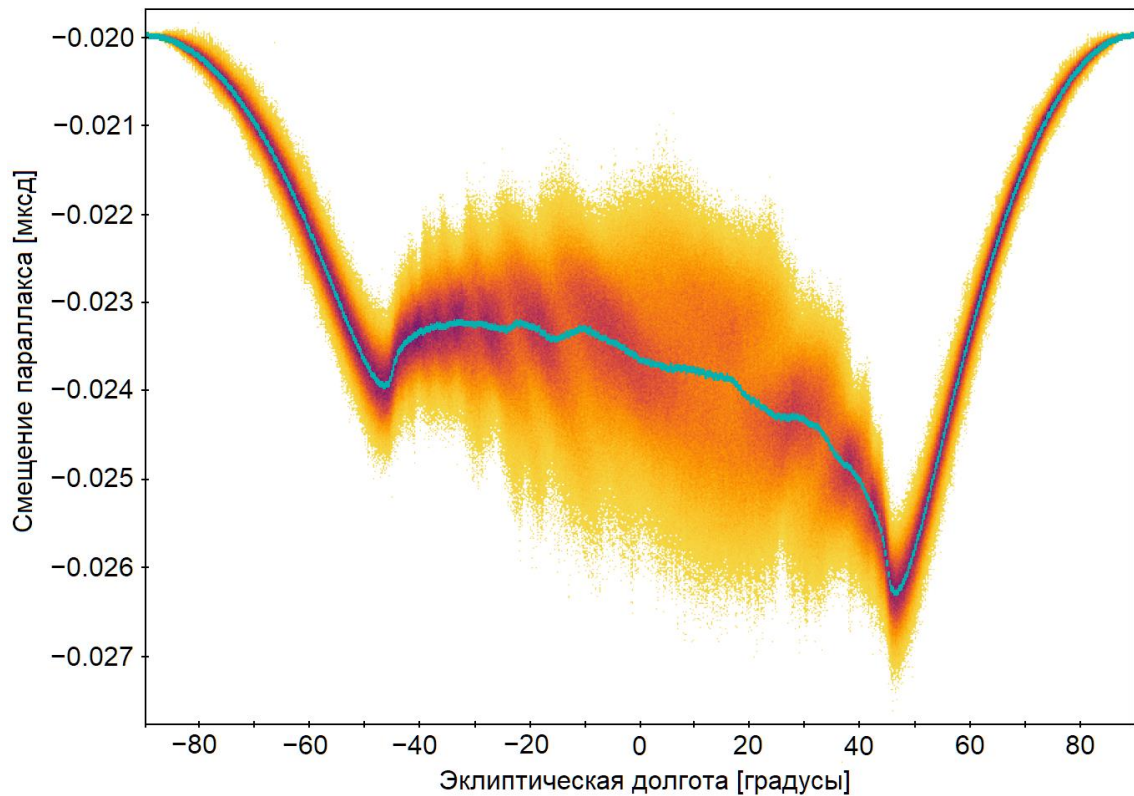


Рисунок 4. – Зависимость ошибок параллаксов от эклиптической широты в астрометрическом решении с пятью миллионами звёзд. Наблюдения были сгенерированы с использованием номинальной схемы сканирования. Бирюзовая кривая показывает скользящую медиану.

Можно заключить, что полученные результаты накладывают существенные дополнительные ограничения на величину нуль-пункта параллаксов для надёжного оценивания параметра γ . С другой стороны, обнаруженная неравномерная чувствительность открывает путь к оптимизации определения параметра γ из наблюдений с борта сканирующего космического аппарата.

В **заключении** суммированы основные результаты, представленные в диссертационной работе.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Hobbs D., Holl B., Lindegren L., Raison F., Klioner S. A., **Butkevich A. G.** Determining PPN gamma with Gaia's Astrometric Core Solution // Relativity in Fundamental Astronomy, IAU Symposium 261 / eds. S. A. Klioner, P. K. Seidelman, M. H. Soffel. — 2009. — P. 315—319.
2. **Butkevich A. G.**, Lindegren L. Rigorous treatment of barycentric stellar motion. Perspective and light-time effects in astrometric and radial velocity data // Astronomy & Astrophysics. — 2014. — Vol. 570. — P. A62. — DOI: 10.1051/0004-6361/201424483.
3. Michalik D., Lindegren L., Hobbs D., **Butkevich A. G.** Gaia astrometry for stars with too few observations. A Bayesian approach // Astronomy & Astrophysics. — 2015. — Vol. 583. — A68. — DOI: 10.1051/0004-6361/201526936.
4. Gaia Collaboration, Prusti T., ..., **Butkevich A. G.**,... The Gaia mission // Astronomy & Astrophysics. — 2016. — Vol. 595. — A1. — DOI: 10.1051/0004-6361/201629272.
5. Gaia Collaboration, Brown A. G. A., ..., **Butkevich A. G.**,... Gaia Data Release 1. Summary of the astrometric, photometric, and survey properties // Astronomy & Astrophysics. — 2016. — Vol. 595. — A2. — DOI: 10.1051/0004-6361/201629512.
6. Lindegren L., ..., **Butkevich A. G.**,... Gaia Data Release 1. Astrometry: one billion positions, two million proper motions and parallaxes // Astronomy & Astrophysics. — 2016. — Vol. 595. — A4. — DOI: 10.1051/0004-6361/201628714.
7. **Butkevich A. G.**, Klioner S. A., Lindegren L., Hobbs D., van Leeuwen F. Impact of basic angle variations on the parallax zero point for a scanning astrometric satellite // Astronomy & Astrophysics. — 2017. — Vol. 603. — A45. — DOI: 10.1051/0004-6361/201730781.
8. Klioner S. A., Geyer, R., Steidelmüller H., **Butkevich A. G.** Data timing, time transfer and on-board clock monitoring for space astrometry with Gaia // Space Science Reviews. — 2017. — Vol. 212. — P. 1423—1432. — DOI: 10.1007/s11214-017-0419-8.
9. **Butkevich A. G.** Astrometric detectability of systems with unseen companions:

- effects of the Earth orbital motion // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2018. — Vol. 476. — P. 5658—5668. — DOI: 10.1093/mnras/sty686.
10. **Butkevich A. G.** Proper motion and secular variations of Keplerian orbital elements // Frontiers in Astronomy and Space Sciences. — 2018. — Vol. 5. — article id. 18. — DOI: 10.3389/fspas.2018.00018.
 11. Gaia Collaboration, Brown A. G. A., ..., **Butkevich A. G.**,... Gaia Data Release 2. Summary of the contents and survey properties // Astronomy & Astrophysics. — 2018. — Vol. 616. — A1. — DOI: 10.1051/0004-6361/201833051.
 12. Gaia Collaboration, Brown A. G. A., ..., **Butkevich A. G.**,... Gaia Early Data Release 3: Summary of the contents and survey properties // Astronomy & Astrophysics. — 2021. — Vol. 649. — A1. — DOI: doi:10.1051/0004-6361/202039657.
 13. **Butkevich A. G.**, Vecchiato A., Bucciarelli B., Gai M., Crosta M.T., Lattanzi M. G. Post-Newtonian gravity and Gaia-like astrometry. Effect of PPN γ uncertainty on parallaxes // Astronomy & Astrophysics. — 2022. — Vol. 663. — A71. — DOI: 10.1051/0004-6361/202243237.
 14. Gai M. , Vecchiato A. , Riva A., **Butkevich A. G.**, Busonero D., Qi, Z. , Lattanzi M. G. Relative Astrometry in an Annular Field // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. — 2022. — Vol. 134. — article id. 035001. — DOI: 10.1088/1538-3873/ac50a1.
 15. **Butkevich A. G.**, Vecchiato A., Bucciarelli B., Gai M., Crosta M.T., Lattanzi M. G., Riva A. Constraints on Testing Post-Newtonian Gravity with Scanning Space Astrometry // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. — 2024. — Vol. 136. — article id. 114508. — DOI: 10.1088/1538-3873/ad8ef6.

Благодарности

Автор считает своим долгом выразить искреннюю благодарность администрации Пулковской обсерватории и всем тем, кто содействовал настоящей работе: А. Т. Байковой, В. В. Бобылеву, В. В. Витязеву, И. С. Гусевой, А. В. Девяткину, В. Н. Ершову, Н. Р. Ихсанову, И. И. Канаеву, С. А. Клионеру, С. М. Копейкину, В. В. Макарову, З. М. Малкину, Ю. А. Наговицыну, К. Н. Наумову, С. Д. Петрову, А. В. Степанову, К. В. Холшевникову, А. С. Цветкову,

М. С. Чубею, Б. Буччиарелли, Ф. ван Леувену, А. Веккиато, М. Гаю, М.Т. Кросте, М. Г. Латтанци, Л. Линдегрину, Д. Хоббсу.

Цитируемая литература

1. Абалакин В. К. Основы эфемеридной астрономии. — М. : Наука, 1979. — 448 с.
2. Андерсон Э., Фрэнсис Ч. XHIP: Расширенная компилятивная версия каталога HIPPARCOS // Письма в Астрономический журнал. — 2012. — Т. 38. — С. 374—392.
3. Боярчук А. А., Багров А. В., Микиша А. М., Рыхлова Л. В., Смирнов М. А., Токовинин А. А., Эцин И. Ш. Космическая оптическая интерферометрия для астрометрии // Космические исследования. — 1999. — Т. 37. — С. 3—12.
4. Брандт З. Анализ данных: статистические и вычислительные методы для научных работников и инженеров. — М. : Мир, АСТ, 2003. — 686 с.
5. Буткевич А. Г. Методика построения астрометрического каталога из наблюдений с борта сканирующего космического аппарата : дисс. канд. физ.-мат. наук / Буткевич А. Г. — ГАО РАН, 2002. — 118 с.
6. Витязев В. В. Новые методы анализа звездных каталогов и неравномерных временных рядов : дисс. д-ра физ.-мат. наук / Витязев В. В. — ИПА РАН, 1999. — 316 с.
7. Витязев В. В. Анализ астрометрических каталогов с помощью сферических функций. — СПб. : Изд-во С.-Петербур. ун-та, 2017. — 224 с.
8. ГАИШ. Космический астрономический эксперимент “Ломоносов” Сб. науч. тр. / под ред. В. В. Нестерова, А. М. Черепашука, Е. К. Шеффера. — М. : Изд. МГУ, 1992. — 257 с.
9. Девяткин А. В. Комплексный анализ наблюдений тел Солнечной системы методами астрометрии и фотометрии : дисс. д-ра физ.-мат. наук / Девяткин А. В. — СПбГУ, 2011. — 373 с.
10. Ершов В. Н., Чубей М. С., Ильин А. Е., Копылов И. М., Горшанов Д. Л., Канаев И. И., Кирьян Т. Р. Космическая астрометрическая система “Струве”. Научное обоснование проекта. — СПб. : Глаголь, 1995. — 256 с.
11. Жаров В. Е. Сферическая астрономия. — Фрязино : Век 2, 2006. — 480 с.

12. Кардашев Н. С., Хартов В. В., Абрамов В. В., Авдеев В. Ю. “Радиоастрон” – Телескоп размером 300 000 км: основные параметры и первые результаты наблюдений // *Астрономический журнал*. — 2013. — Т. 90. — С. 179—222.
13. Копейкин С. М. Релятивистские системы отсчёта в Солнечной системе // *Астрономический журнал*. — 1989. — Т. 66. — С. 1069—1080.
14. Копейкин С. М. Теория относительности в наблюдательной радиоастрономии // *Астрономический журнал*. — 1990. — Т. 67. — С. 10-20.
15. Малкин З. М. К использованию векторных сферических функций // *Известия Главной Астрономической Обсерватории в Пулкове*. — 2024. — Т. 234. — С. 13—21.
16. Маррей К. Э. Векторная астрометрия. — Киев : Наукова думка, 1986. — 327 с.
17. Понятов А. А. «Gaia»: Новый взгляд на небо // *Наука и жизнь*. — 2022. — № 9. — С. 10—16.
18. Пугачев В. С. Теория вероятностей и математическая статистика. — Изд. 2-е. — М. : Физматлит, 2002. — 96 с.
19. Турышев В. Г. Экспериментальные проверки общей теории относительности: недавние успехи и будущие направления исследований // *Успехи физических наук*. — 2009. — Т. 179. — С. 3—34.
20. Цветков А. С. Достижения космической астрометрии // *Вестник РАН*. — 2021. — Т. 91. — С. 142—136.
21. Цветков А. С. Основные статистическо-кинематические свойства каталога Gaia EDR3 // *Вестник РАН*. — 2022. — Т. 92. — С. 57—73.
22. Baan W. A., An T., Henkel C., et al. H₂O MegaMaser emission in NGC 4258 indicative of a periodic disc instability // *Nature Astronomy*. — 2022. — Vol. 6. — P. 976—983.
23. Brown A. G. A. Microarcsecond astrometry: Science highlights from Gaia // *Annual Review of Astronomy & Astrophysics*. — 2021. — Vol. 59. — P. 59-115.
24. Eisner E. Effect of light Time on Stellar Proper Motion // *The Astronomical Journal*. — 1967. — Vol. 72. — P. 214.
25. ESA. The HIPPARCOS and TYCHO catalogues. Astrometric and photometric star catalogues derived from the ESA HIPPARCOS Space Astrometry Mission. — ESA

Special Publication. — 1997. — Vol. 1200.

26. Gaia Collaboration, Prusti T., de Bruijne, J. H. J., et al. The Gaia mission // *Astronomy & Astrophysics*. — 2016a. — Vol. 595. — A1. — 36 pp.
27. Gaia Collaboration, Brown A. G. A., Vallenari A., et al. Gaia Data Release 1. Summary of the astrometric, photometric, and survey properties // *Astronomy & Astrophysics*. — 2016b. — Vol. 595. — A2. — 23 pp.
28. Gaia Collaboration, Brown A. G. A., Vallenari A., et al. Gaia Data Release 2. Summary of the contents and survey properties // *Astronomy & Astrophysics*. — 2018. — Vol. 616. — A1. — 22 pp.
29. Gaia Collaboration, Brown A. G. A., Vallenari A., et al. Gaia Early Data Release 3: Summary of the contents and survey properties // *Astronomy & Astrophysics*. — 2021. — Vol. 649. — A1. — 20 pp.
30. Gaia Collaboration, Vallenari A., Brown A. G. A., et al. Gaia Data Release 3: Summary of the contents and survey properties // *Astronomy & Astrophysics*. — 2021. — Vol. 674. — A1. — 22 pp.
31. Golub G. H., van Loan C. F. *Matrix computations*. — 4th edn. — NY : The John Hopkins University Press, 2012. — 784 pp.
32. Høg E., Fabricius, C., Makarov, V. V., et al. Construction and verification of the Tycho-2 Catalogue // *Astronomy & Astrophysics*. — 2000. — Vol. 357. — P. 367—386.
33. Horner S. D. Germain M. E., Harris F. H., et al. Full-sky Astrometric Mapping Explorer: an optical astrometric survey mission // *UV, Optical, and IR Space Telescopes and Instruments, SPIE Conference Series Vol. 4013* / eds. J. B. Breckinridge, P. Jakobsen. — 2000. — P. 473—481.
34. Ilin A. E., Butkevich A. G., Chubey M. S., et al. Project STRUVE // *Hipparcos-Venice '97 Proceedings*. — 1997. — P. 831—834. — (ESA SP-402).
35. Klioner S. A practical relativistic model for microarcsecond astrometry in space // *The Astronomical Journal*. — 2003. — Vol. 125. — P. 1580—1597.
36. Kopeikin S. M. Relativistic reference frames for astrometry and navigation in the Solar System // *New trends in astrodynamics and applications III, American Institute of Physics Conference Series, Vol. 886* / eds. E. Belbruno. — 2007. —

P. 268—283.

37. Lindegren L., Lammers U., Hobbs D., et al. The astrometric core solution for the Gaia mission. Overview of models, algorithms, and software implementation // *Astronomy & Astrophysics*. — 2012. — Vol. 538. — A78. — 47 pp.
38. Lindegren L., Perryman M. A. C. GAIA: Global Astrometric Interferometer for Astrophysics // *Hipparcos-Venice '97 Proceedings*. — 1997. — P. 799—802. — (ESA SP-402).
39. Perryman M. A. C. *Astronomical Applications of Astrometry. Ten Years of Exploitation of the Hipparcos Satellite Data*. — Cambridge : Cambridge University Press, 2009. — 670 pp.
40. Perryman M. A. C. *The Exoplanet Handbook*. — 2nd edn. — Cambridge : Cambridge University Press, 2018. — 972 pp.
41. Röser S. DIVA - Beyond HIPPARCOS and Towards GAIA // *Reviews in Modern Astronomy*. — 1999. — Vol. 12. — P. 97—106.
42. Schwarzschild K. Ueber den Einfluss der saecularen Aberration auf die Fixsternörter // *Astronomische Nachrichten*. — 1894. — Vol. 136. — P. 81—84.
43. Shao M., Baron R. The Practice of Astrometry in Space with the Space Interferometry Mission Instrument // *Working on the Fringe: Optical and IR Interferometry from Ground and Space*. ASP Conference Series Vol. 194 / eds. S. Unwin, R. Stachnik. — 1999. — P. 107—113.
44. Stumpff P. Rigorous treatment of the heliocentric motion of stars // *Astronomy & Astrophysics*. — 1985. — Vol. 144. — P. 232—240.
45. Tanga P., Pauwels T., Mignard F. et al. Gaia Data Release 3. The Solar System survey // *Astronomy & Astrophysics*. — 2023. — Vol. 674. — A12. — 32 pp.
46. van Leeuwen F. *Hipparcos, the New Reduction of the Raw Data*. — NY : Springer, 2007. — 481 pp.
47. Vityazev V. V., Tsvetkov A. S. Intercomparison of kinematics derived from catalogues UCAC4, PPMXL and XPM with vector spherical harmonics // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2014. — Vol. 442. — P. 1249-1264.