

ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени доктора физико-
математических наук Буткевича Алексея Геннадьевича
на тему «Новые методы анализа данных миллисекундной
оптической космической астрометрии»
по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия

Актуальность работы определяется появлением специализированных космических аппаратов Hipparcos, Gaia для проведения астрометрических наблюдений, и, главным образом, увеличением точности наблюдений. Для грамотной редукции наблюдений необходимо учитывать эффекты, которыми ранее можно было пренебречь ввиду их малости. Кроме этого, колоссальный объём наблюдательных данных приводит к появлению качественно новых статистических эффектов. И, наконец, необходимость пересмотра модели наблюдений связана с особенностями калибровки инструмента, в частности, базового угла между оптическими осями телескопов Gaia.

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

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 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 смещённым оценкам параллаксов для таких систем;

- 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

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. Показано, что микросекундный глобальный сдвиг параллаксов ограничивает точность определения ППН параметра γ с использованием сканирующего астрометрического спутника на уровне $\sim 3.5 \times 10^{-4}$.

Достоверность результатов диссертации подтверждается многочисленными докладами автора 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.

Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения и списка цитируемой литературы (155 наименований), приложения. Диссертация содержит 258 страниц, 25 рисунков, 6 таблиц.

Во **Введении** сформулированы актуальность, степень разработанности, объект исследования, цели и задачи, новизна, научная и практическая значимость, приведены положения, выносимые на защиту, краткое содержание диссертации, достоверность и апробация работы, личный вклад.

В **главе 1** представлена так называемая стандартная астрометрическая модель, базирующаяся на положении о равномерном прямолинейном движении одиночных звёзд относительно барицентра Солнечной системы. 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 v_r , делённое на расстояние, $\mu_r = v_r / R$.

В разделе 1.2 изложена процедура преобразования астрометрических параметров между различными эпохами, разработанная в рамках стандартной модели.

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.

В разделе 1.4 в качестве иллюстрации приведён пример упрощённого преобразования астрометрических данных.

В разделе 1.5 установлены пределы применимости модели равномерного барицентрического движения. 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.

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.

В разделе 2.2 представлены результаты численных экспериментов, проведённых для проверки аналитических выводов. Для изучения различных аспектов проблемы использовались два взаимодополняющих подхода: прямое решение и итеративное решение.

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.

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. Затем обсуждается приемлемость гауссовых априорных и апостериорных плотностей вероятности и их интерпретация в контексте астрометрического решения.

В разделе 3.2 изложена практическая процедура построения астрометрического решения с использованием априорной информации.

Раздел 3.3 содержит аналитическую иллюстрацию использования априорной информации на примере упрощённого случая, когда решение включает только одну из координат (например, δ) и параллакс.

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.

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.

Четвёртая глава посвящена исследованию вопроса о влиянии эффектов запаздывания, обусловленных конечностью скорости света, на преобразование эпохи для астрометрических каталогов. Возникает вопрос о том, как наблюдаемые барицентрические величины изменяются со временем в рамках стандартной астрометрической модели.

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

В разделе 4.2 получено строгое решение выведенного уравнения. В ходе проведённого исследования удалось найти полные аналитические решения для всех физических эффектов.

В разделе 4.3 обсуждаются различные аспекты полученного решения.

Раздел 4.4 содержит вычисление всех элементов якобиана, используемого для преобразования стандартных ошибок и корреляций.

В разделе 4.5 дан вывод приближённых формул для эффектов запаздывания. Полученные соотношения позволяют сделать важные заключения о влиянии эффектов запаздывания на астрометрические параметры.

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.

В разделах 5.1 и 5.2 выполнен статистический анализ астрометрического детектирования экзопланет. Получен полный набор формул для расчета астрометрических эффектов, обусловленных взаимодействием между орбитальным движением Земли и орбитальным движением родительской звезды для произвольных круговых орбит.

В разделе 5.3 рассматривается применение альтернативных методов детектирования экзопланет в тех случаях, когда планета не может быть обнаружена астрометрически.

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.

Шестая глава посвящена использованию измерений, выполняемых сканирующим космическим аппаратом, для экспериментальной проверки общей теории относительности.

В разделе 6.1 дано аналитическое обоснование. Рассмотрены изменения наблюдаемых величин, обусловленные малыми возмущениями параллакса и параметра γ .

Раздел 6.2 посвящён коэффициенту корреляции между нуль-пунктом параллакса и параметром γ .

В разделе 6.3 обсуждаются последствия статистической зависимости между параллаксами и параметром γ .

В разделах 6.4 и 6.5 приведены результаты численных экспериментов. Все теоретические выводы полностью подтверждены результатами репрезентативного компьютерного моделирования. 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.

В заключении подводятся итоги диссертационной работы.

Все результаты теоретической части диссертации и математического моделирования получены лично автором, докладывались на семинарах и международных конференциях.

По теме диссертации опубликовано 15 работ. Из них 14 статей в журналах, в том числе высокорейтинговых, рекомендованных ВАК для публикации результатов докторской диссертации. В шести работах диссертант является первым автором.

Все вышеперечисленные работы соответствуют теме диссертации и полностью отражают ее содержание. Вклад диссертанта в совместных публикациях обозначен. Все представленные в диссертации результаты получены лично автором. Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, подтверждается опубликованными статьями в рецензируемых журналах.

Автореферат отражает содержание диссертации.

К работе есть ряд замечаний.

Первое замечание связано с определением тригонометрического параллакса (стр.26). Очевидно, что при определении автора: «Тригонометрический параллакс обычно определяется как угол, под которым отрезок длиной в одну астрономическую единицу A виден с рассматриваемой звезды» величина тригонометрического параллакса ω_0 будет меняться в течение года, так как движение Земли по орбите приводит к параллактическому эллиптическому движению звезды (в эклиптических координатах) в зависимости от эклиптических координат звезды. Фиксирование величины тригонометрического параллакса (формула 1.14) возможно при дополнительном условии, например, барицентрический радиус-вектор \mathbf{r} геоцентра Земли, равный 1 а.е., является катетом в прямоугольном треугольнике, а \mathbf{R} – барицентрический радиус-вектор до звезды - гипотенузой.

Необходимо дать четкое определение тригонометрического параллакса, как одного из важнейших параметров, определяемых в проекте Gaia с учетом микросекундной точности измерений.

В разделе 1.5 рассматривается вопрос применимости модели равномерного барицентрического движения звезды. Поскольку в будущем каталог Gaia, по-видимому, будет принят как оптическая реализация небесной системы отсчёта, то естественно возникает вопрос о связи радио- и оптической системы координат. В этой связи желательно было бы пояснить позицию автора, как члена консорциума Gaia, по поводу учета ускорения Солнечной системы в Галактике и вызываемому этим ускорением вековой абберации (точнее изменением вековой абберации) и его влияния на собственное движение звёзд. Согласно РСДБ-измерениям влияние ускорения Солнечной системы на положение квазаров составляет 5,8 мкс дуги в год, что в полтора раза больше теоретического. Имеется ли возможность оценки этого эффекта по измерениям положений звёзд и/или наблюдаемых квазаров?

Следующий вопрос связан с выводами, сделанными в разделе 2.1.7: «изменение параллакса неотлично с точки зрения наблюдений от одновременного изменения ориентации на δ_x , δ_y , δ_z и базового угла на $\delta\Gamma$ » (формула 2.21). Почему для определения ориентации δ_x , δ_y , δ_z и вариаций базового угла $\delta\Gamma$ не использовать наблюдения квазаров? Тогда это снимает вопросы автора о возможностях самокалибровки инструмента (стр.49-50).

Второе замечание связано с вторым положением, выносимым на защиту, т.е. с методикой построения астрометрического каталога с использованием априорной информации для звёзд с малым объёмом наблюдательных данных. Насколько актуальна данная работа в настоящее время? Указывается, что данная методика была разработана для обработки данных для выпуска первого релиза GAIA и опубликована в статьях 2015-2016 гг. Наверное, эта работа была актуальна в то время, и ВАК допускает такую трактовку положения, выносимого на защиту. С другой стороны, наблюдения GAIA позиционируются как абсолютные наблюдения, т.е. наблюдения без какой-либо дополнительной априорной информации. Тем не менее результаты автора (таблицы 3.2, 3.3, рис. 3.4) убедительно доказывают если не необходимость, то желательность использования априорной информации для получения каталога звёзд.

Третье замечание связано с третьим положением, выносимым на защиту: о равномерном движении звезды относительно барицентра

Солнечной системы с учётом конечности скорости света. Математически этот эффект близок по форме к так называемой планетной абберации, на что указывает автор, и величина этого эффекта зависит от **относительной скорости наблюдателя (в данном случае КА) и звезды**. Автор указывает, что «равномерное поступательное движение барицентра не играет никакой роли ввиду эквивалентности различных инерциальных систем». Но, в этом случае работает закон сложения (вычитания) скоростей Галилея. Но даже не этот вопрос я считаю главным. Главное – это необходимость такого вычисления с точки зрения финального результата, которым являются астрометрические параметры звезды в барицентрической экваториальной системе координат на эпоху J2000.0 (в небесной системе координат). Совершенно неважно, какие параметры, измеренные на момент приема, или «истинные» на момент излучения, используются. Результат редукции в небесной системе координат должен быть одинаковым. В реальности «истинные параметры» на момент излучения не известны, но они и не нужны. В случае стандартной модели движения звезды алгоритм редукции «истинных» на момент излучения и наблюдаемых координат звезды на момент приема на эпоху J2000.0 должен дать одинаковый результат.

Последнее замечание связано с пятым положением, выносимым на защиту: о связи нуля-пункта параллаксов и параметром γ , входящим в параметризованный постньютоновский формализм. Совершенно непонятно – зачем возвращаться в прошлый век и решать задачу абсолютизации параллаксов звезд (см., например, Подобед В.В., Нестеров В.В. Общая астрометрия), когда в списке наблюдаемых объектов GAIA имеется более 200000 квазаров? Этого вполне достаточно и для оценки параметра γ , и для калибровки инструментальных параметров, после чего их можно считать известными, и решать задачу только относительно астрометрических параметров звезд (параллельно может быть решена и задача, сформулированная в первом положении, выносимом на защиту – о параметрах вариации базового угла).

Отмеченные замечания не влияют на общую высокую оценку работы, а скорее ставят дополнительные задачи, которые необходимо решить в будущем для проведения редукции наблюдений с микросекундной точностью.

Поэтому можно утверждать, что диссертация отвечает всем требованиям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения

ученых степеней, утверждённого постановлением правительства РФ №842 от 24.09.2013 г. Содержание диссертации соответствует специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия (физико-математические науки), а ее автор **Буткевич Алексей Геннадьевич** заслуживает присуждения ему степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.1. «Физика космоса, астрономия».

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук, профессор
ЗАВЕДУЮЩИЙ кафедрой небесной механики, астрометрии и гравиметрии
физического факультета Московского государственного университета имени
М.В.Ломоносова

ЗАВЕДУЮЩИЙ лабораторией гравиметрии Государственного
астрономического института имени П. К. Штернберга Московского
государственного университета имени М.В.Ломоносова

Жаров Владимир Евгеньевич

27 апреля 2026 г.

Контактные данные:

тел.: 7(495)9393764, e-mail: zharov@sai.msu.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:

01.03.01 – астрометрия и небесная механика

Адрес места работы:

119234, г. Москва, Университетский пр., д. 13,
Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,
Государственный астрономический институт имени П. К. Штернберга
Тел.: +7(495)9392046; e-mail: director@sai.msu.ru

Подпись сотрудника МГУ В. Е. Жарова удостоверяю:

начальник отдела канцелярии



Л. Н. Новикова

27 апреля 2026 г.