

ОТЗЫВ

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

За последние десятилетия наблюдательная астрометрия совершила качественный скачок в своем развитии. Особенно хорошо это видно на примере оптической космической астрометрии. Первым полностью реализованным космическим астрометрическим экспериментом был проект Hipparcos. Основной каталог Hipparcos содержит 118 тысяч звезд и представляет собой каталог миллисекундной точности. Проект Hipparcos потребовал многих уточнений в анализе астрометрических наблюдений. Эффекты, которые ранее не учитывались при построении звездных каталогов, такие как гравитационное отклонение света телами в Солнечной системе и релятивистская звездная абберация, должны были учитываться для того, чтобы достичь точности в миллисекунду дуги, которая стала возможной благодаря наблюдениям из космоса.

Миссия Gaia (2013–2025 гг.), целью которой являлось достижение точности на уровне 10 микросекунд дуги, потребовала дальнейшего усложнения моделирования данных, т.к. при переходе на новый уровень точности становятся значимыми эффекты, которыми ранее можно было пренебречь из-за их малости, а колоссальный объем наблюдательных данных приводит к появлению качественно новых статистических эффектов. Поэтому, как усовершенствование имеющихся, так и разработка новых методов анализа данных с учетом требований точности оптической космической астрометрии являются весьма актуальными задачами.

Этим вопросам и посвящена настоящая диссертация, что позволяет сделать вывод об актуальности и несомненной научной важности и ценности выполненных исследований.

Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения и списка использованной литературы (155 наименования), содержит 25 рисунков и 6 таблиц. Общий объем диссертации составляет 258 страниц. По теме диссертации автором опубликовано 15 работ, из них 14 статей в журналах, рекомендованных ВАК для публикации результатов докторской диссертации, и 1 статья в сборнике трудов конференции. Указан личный вклад автора во всех совместных работах. Основные результаты исследований 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 всероссийских и международных конференциях.

Во введении формулируются цели и задачи исследования и дается их обоснование, приводятся полученные результаты, приводятся выносимые на защиту положения и результаты, описывается структура диссертации. Кроме того, приводится список опубликованных автором работ и указывается участие автора в совместных работах.

В первой главе рассмотрена стандартная астрометрическая модель, базирующаяся на положении о равномерном прямолинейном движении одиночных звезд относительно барицентра Солнечной системы. В рамках стандартной модели изложена математически строгая процедура преобразования астрометрических параметров между различными эпохами. Полученное преобразование является строго обратимым: последующее преобразование от конечной к начальной эпохе приводит к исходным значениям параметров. Эта процедура включена в официальную документацию по проекту Gaia и опубликована на сайте Европейского космического агентства. Построено преобразование ковариационных матриц между различными эпохами, которое также является полностью обратимым. Установлены пределы применимости модели равномерного барицентрического движения.

Вторая глава посвящена исследованию влияния колебаний базового угла на глобальный сдвиг тригонометрических параллаксов, полученных из наблюдений

сканирующего астрометрического спутника с двумя полями зрения. Т.к. в литературе существовали две различные формулы для сдвига, то вопрос был исследован как аналитически, так и численно и противоречие было устранено. Сдвиг параллакс вследствие колебаний базового угла происходит из-за применимости для ориентации принципа самокалибровки. Это обстоятельство обязательно должно быть принято во внимание при планировании будущих проектов в области космической астрометрии. Полученные результаты составили основу для устранения эффектов, вызванных имеющимися колебаниями базового угла, при 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, и изложена практическая процедура построения астрометрического решения с использованием априорной информации. Описаны численные эксперименты, выполненные для того, чтобы продемонстрировать практическую осуществимость разработанной методики. Внесение априорной информации позволяет получить не только надёжные оценки положения, но и их формальные ошибки, которые правильно характеризуют ошибки фактические. Выполнено сравнение каталогов Gaia DR2 и DR3, показавшее, что разработанная методика даёт надёжные оценки точности положений для звезд с двухпараметрическим решением, несмотря на то, что положения являются смещёнными.

Разработанная методика была применена при создании всех трёх астрометрических каталогов Gaia, имеющихся в настоящий момент.

Четвёртая глава посвящена исследованию вопроса о влиянии эффектов запаздывания, обусловленных конечностью скорости света, на преобразование эпохи для астрометрических каталогов в рамках стандартной астрометрической модели. Эта задача рассматривалась рядом авторов, в результате чего было найдено несколько приближённых решений. В ходе проведённого исследования удалось найти полные аналитические решения для всех физических эффектов, 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. Показано, 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. Получена удобная формула, которая позволяет делать качественно выводы о возможности обнаружения экзопланет с использованием наблюдений Gaia.

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. Вопрос о влиянии систематических ошибок параллакс на определение параметра γ рассмотрен впервые.

В настоящее время известно два механизма возникновения глобального сдвига параллакс. Статистическая зависимость между параллаксами и параметром γ приводит к тому, что гипотетическое отклонение от общей теории относительности, которое в данном контексте эквивалентно тому, что значение параметра γ отлично от единицы, может вызвать изменение нуль-пункта параллакс. И наоборот, наличие глобального сдвига параллакс

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. Все теоретические выводы полностью подтверждены результатами репрезентативного компьютерного моделирования. В ходе выполнения численных экспериментов был обнаружен неизвестный ранее эффект: найдено, что чувствительность астрометрии Gaia к параметру γ существенным образом зависит от эклиптической широты. Было установлено, что указанный эффект является следствием ранее неизвестной асимметрии, присущей применяемой в проекте Gaia схеме сканирования небесной сферы. Этот результат вошел в список «Важнейших достижений в области астрономии» Научного совета по астрономии ОФН РАН.

В заключении приводятся основные результаты, полученные в диссертационной работе.

Представленный А.Г. Буткевичем к защите комплекс научно-методических разработок, исследований и полученных на их основе результатов вносит значительный вклад в развитие актуального направления оптической космической астрометрии, а именно, обработки, анализа и интерпретации наблюдений, полученных миссией Gaia. Автор использует в работе достаточно широкий спектр собственных разработок (некоторые из них получены впервые), методик и программ. Это позволило автору успешно рассмотреть целый ряд задач и получить новые результаты. Разработанные автором алгоритмы, программы, полученные выводы и рекомендации могут использоваться при решении других задач астрометрии.

Такой подход позволил А.Г. Буткевичу получить целый ряд новых результатов. Отметим некоторые из них:

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 и обоснованность полученных результатов подтверждается тем, что

- 1) приведены ссылки на все используемые программные пакеты; 2) программное обеспечение протестировано на объектах с известными особенностями; 3) полученные результаты (везде, где это было возможно) сравнивались с результатами других авторов; 4) результаты докладывались и обсуждались на 9 научных конференциях, представлены в 15 статьях.

Диссертация хорошо оформлена. Изложение логично и содержит всю необходимую для понимания информацию. Рисунки в достаточной мере иллюстрируют и дополняют изложение. Имеется некоторое количество опечаток и неточностей. Так,

1. на стр. 27 и 91 астрономическая единица обозначена по-разному;
2. на стр. 43 и 44 – опечатки в формуле ускорения в плоскости Галактики;
3. в Автореферате на стр. 21 опечатка в выражении для доплеровского множителя.

Автором диссертации проведена значительная исследовательская работа, которая представляет собой оригинальное завершённое исследование и вносит существенный вклад в раздел оптической космической астрометрии, такие его задачи, как задача модификации стандартной астрометрической модели с учетом конечности скорости света, разработка и применение методики использования априорной информации для построения астрометрического каталога при малом объеме наблюдательных данных, исследование влияния орбитального движения Земли на астрометрическое обнаружение экзопланет. Применяемые автором методики и полученные результаты могут быть использованы при решении широкого круга задач космической астрометрии: редукции данных и составлении астрометрических каталогов Gaia и будущих космических проектов, основанных на сканирующем аппарате с двумя полями зрения; вне зависимости от способа выполнения наблюдений – построения астрометрических каталогов с недостаточным объемом наблюдательных данных; преобразования астрометрической и звездно-кинематической информации от одной эпохи к другой; оптимизации поиска экзопланет астрометрическими методами.

Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Диссертация А. Г. Буткевича “Новые методы анализа данных миллисекундной оптической космической астрометрии” удовлетворяет критериям, установленным “Положением о порядке присуждения ученых степеней от 24.09.2013”, а ее автор Буткевич Алексей Геннадьевич заслуживает присуждения ему степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.1, «Физика космоса, астрономия».

Ведущий научный сотрудник
доктор физ.-мат. наук

Подпись Ю.А.Чернетенко удостоверяю,
ученый секретарь ИПА РАН,
доктор тех. наук

22.04.2026 г.

Чернетенко Юлия Андреевна
доктор физико-математических наук
старший научный сотрудник
тел. +7 921 883 9048
сл.т. 2751090
email: cya@iaaras.ru
ведущий научный сотрудник

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт прикладной астрономии Российской академии наук

196140, Санкт-Петербург, Пулковское шоссе, 86, 69

Ю.А. Чернетенко

Л.В. Федотов