

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».**

Диссертация Буткевича Алексея Геннадьевича посвящена вопросам современной космической астрометрии. Рассмотрены задачи по созданию стандартной астрометрической модели, основанной на положении о равномерном прямолинейном движении одиночных звёзд относительно барицентра Солнечной системы.

Актуальность рассматриваемой работы обусловлена фундаментальными и практическими аспектами исследования. Получена математически строгая и полностью обратимая процедура перехода от одной эпохи к другой для полного вектора шести астрометрических параметров и соответствующих ковариаций. Эта процедура включена в официальную документацию по проекту Gaia и опубликована на сайте Европейского космического агентства, что имеет важный практический аспект. Проведены исследования влияния колебаний базового угла на глобальный сдвиг тригонометрических параллаксов, определенных из спутниковых наблюдений, что позволило объяснить несоответствие величины нуль-пункта параллаксов, возникающее в результате колебаний базового угла. Разработана методика на основе теоремы Байеса для построения астрометрического каталога при недостаточном объёме наблюдательных данных. Рассмотрено влияние эффектов запаздывания, обусловленных конечностью скорости света, на стандартную астрометрическую модель. Исследована возможность обнаружения экзопланетных систем на основе орбитального движения Земли. Проведено теоретическое моделирование изучения постньютоновской гравитации на основе анализа параметра, характеризующего кривизну пространства.

Степень обоснованности научных положений и выводов диссертации заключается в том, что все результаты и положения диссертации являются новыми, основные результаты опубликованы в научных журналах, рекомендуемых ВАК, в количестве 14 статей, и докладывались на 9 международных конференциях. Личный вклад автора в публикациях в основном заключался в постановке задач, создании математического аппарата, выполнении численных экспериментов и интерпретация полученных результатов.

Диссертационное исследование Буткевича А.Г. состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы. Полный текст диссертации включает 248 страниц и содержит 23 рисунка и 5 таблиц. В списке литературы содержатся 152 наименования на 17 страницах.

Во **введении** кратко описывается основная проблема исследования, обосновывается актуальность выбранной темы, новизна и научная значимость, достоверность, апробация, личный вклад, приводятся ссылки на публикации по теме исследования, а также дается краткое содержание работы, и приводятся основные результаты.

Первая глава диссертации посвящена методологии и математическому описанию трансформации астрометрических параметров от одной эпохи к другой, а также преобразованию ошибок и корреляций в части ковариационной матрицы. Анализируется стандартная астрометрическая модель, в которой движение одиночных звёзд относительно барицентра Солнечной системы считается равномерным и прямолинейным.

Во **второй главе** рассматривается вопрос влияния колебаний базового угла на глобальный сдвиг, полученных с помощью сканера космического аппарата тригонометрических параллакс. В миссии Gaia выполняется самокалибровка с использованием собственных наблюдений КА и для определения астрометрических параметров, и для калибровки системы измерений. С целью достижения необходимой точности стараются обеспечить стабильность базового угла между полями зрения на микросекундном уровне, но в случае Gaia имеются колебания базового угла с амплитудой около одной миллисекунды дуги, что оказывает влияние на глобальный сдвиг параллакс. В диссертационном исследовании была сделана попытка решить данную проблему как аналитически, так и численно.

Третья глава посвящена вопросам построения астрометрического каталога при недостаточном объёме наблюдательных данных. С этой целью была применена теорема Байеса. Разработанный подход был предназначен для первого выпуска астрометрического каталога Gaia, но затем была продемонстрирована его востребованность и для анализа объектов переменной яркости и для слабых звёзд, которые наблюдаются в пределах порога чувствительности инструмента.

В **четвертой главе** рассмотрены вопросы о влиянии эффектов запаздывания при распространения световой волны при трансформации эпохи астрометрического каталога. В диссертационной работе в аналитическом виде решается задача учета конечности скорости света при редукции наблюдений, при этом время распространения света непрерывно меняется вследствие движения звезды относительно барицентра.

Пятая глава посвящена развитию методологии астрометрического обнаружения экзопланетных систем на основе параметров орбитального движения Земли. Такая задача рассматривается впервые в мировой практике. Суть подхода заключается в том, что в

определенных случаях движение родительской звезды, имеющей планетную систему, может полностью или частично поглощаться эффектом параллакса. Это уменьшает вероятность обнаружения такой системы и приводит к смещённой оценке параллакса. В диссертационной работе определено смещение параллакса в общем случае, и введена количественная мера, характеризующая возможность обнаружения экзопланетных систем. Данная мера учитывает орбитальное движение Земли и влияние поглощения параллакса на астрометрические невязки и названа эффективной астрометрической сигнатурой.

В **шестой главе** выполнено численное моделирование экспериментальной проверки общей теории относительности с использованием астрометрических наблюдений, выполненных сканирующей системой космического аппарата. Разработанная методология позволяет оценить параметр γ , характеризующий величину гравитационного отклонения света в рамках параметризованного постньютоновского формализма.

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертационного исследования, предложения для дальнейших исследований и практическое применение полученных в работе результатов.

Научная значимость работы заключается в развитии теории и практики методов анализа данных миллисекундной оптической космической астрометрии.

Новизна исследования определяется результатами, полученными в диссертации. Результаты оригинальны и опубликованы впервые.

Достоверность представленных результатов подтверждается использованием разработанных и апробированных численных методов анализа данных миллисекундной оптической космической астрометрии, а также согласием с результатами, опубликованными другими авторами. Результаты работы докладывались автором на 9 всероссийских и международных конференциях и изложены в 15 статьях в рецензируемых изданиях, 14 из которых опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в следующем. Результаты, полученные А.Г.Буткевичем, были использованы в процессе редукции наблюдений миссии Gaia, а также при создании трех версий астрометрического каталога Gaia, выпущенных к настоящему моменту, и будут использованы для построения еще двух версий каталога. Разработанные в диссертации методы и подходы найдут применение при редукции астрометрических наблюдательных данных, полученных с бортов космических аппаратов, в будущих космических проектах. Развитые принципы теоремы Байеса позволят получать астрометрическую информацию при недостаточном объёме наблюдательных данных и вне зависимости от способа проведения наблюдений. Исследование влияния эффектов светового запаздывания окажет решающую роль при выполнении астрометрических работ на микросекундном уровне точности. Выполненное теоретическое

моделирование связи эффектов параллаксов с орбитальным движением Земли позволит применить данный подход для астрометрического обнаружения экзопланетных систем.

Автореферат полностью отражает содержание и структуру диссертации. Автореферат содержит краткое изложение результатов диссертации, основные выводы и результаты проведенного исследования, описание его актуальности и степени новизны.

В целом диссертационная работа производит хорошее впечатление, написана ясным и понятным языком и хорошо структурирована, но не избавлена от некоторых недостатков:

1. Относительно Введения, следует отметить, что при описании каталогов, подобных Gaia, необходимо иметь в виду, что в них присутствует проблема, связанная с учетом собственным движением звезд, возникающая из-за небольшого времени производства наблюдений. Поэтому их использование при астрометрических исследованиях также носит ограниченный характер без решения обозначенной проблемы.
2. В описании структуры диссертации обозначено наличие 6 таблиц, но в тексте диссертации было обнаружено только 5 таблиц.
3. В Главе 2 приведен большой объем информации, связанной с координатными данными, но было бы полезно добавить хотя бы один рисунок для наглядности излагаемого материала.
4. На странице 66 автор пишет: «Для проверки эффекта изменения базового угла в итеративном решении мы использовали пакет програм AGISLab для моделирования Gaia », не совсем понятно, что означает «моделирование Gaia».
5. Также ниже на стр. 66 вместо, на наш взгляд, не вполне академических терминов «разумное время», «мертвое время» хотелось бы иметь более понятные формулировки.
6. На стр. 66 в выражении «Поэтому моделирование AGISLab включает в себя множество подробных особенностей из наблюдений и редукций данных реальной сканирующей астрометрической миссии, включая ряд эффектов более высокого порядка, игнорируемых в нашем аналитическом подходе» непонятно, о чем конкретно идет речь.
7. Предыдущее замечание касается и выражения на стр. 67 «В предыдущих разделах мы показали, что глобальный сдвиг параллаксов наблюдаемо неотличим от определенного изменения во времени базового угла» и выражений на стр. 68 «Косое солнечное освещение вращающегося спутника...» и «Знание тесной связи между возможным тепловым воздействием на инструмент и нуль-пунктом параллаксов привело к очень строгим инженерным спецификациям для приемлемой амплитуды краткосрочных изменений базового угла как в Hipparcos, так и в Gaia».

8. На стр. 70 написано «Пока номинальный базовый угол Γ с велик, эффекты в двух полях зрения существенно различаются», и далее «...более схожи эффекты...» хорошо бы напомнить, о каких эффектах идет речь.
9. На стр. 70. присутствует трудно понимаемое и, на наш взгляд, сумбурно написанное выражение «Следует подчеркнуть, что именно вариации базового угла вызывают возмущения полевых координат; астрометрическое решение затем пытается найти такие параллаксы и параметры ориентации, которые соответствуют возмущенным полевым координатам. Тогда очевидно, что меньший базовый угол потребует большего смещения параллакса для поглощения изменения базового угла заданной амплитуды». Там же не удалось понять текст «...которые вырождены с глобальным сдвигом параллакса...». Здесь же присутствует определенный каламбур «Этот сдвиг можно оценить, спроецировав эту вариацию на функцию в правой части уравнения (2.22) в смысле наименьших квадратов». На Стр. 71 желательно было бы уточнить в «в районе точки L_2 » как «в районе точки Лагранжа L_2 », а также «Солнечная система» пишется с большой буквы. Здесь же в выражении «В конечном поле зрения...» непонятно, что такое «конечное поле зрения», а на стр. 72 «...в худшем случае, восстановить полное вырождение» неясно, что восстанавливается.
10. На стр. 72 в выражении «...и гелиотропных углов ξ_h и Ω_h , которые представляют собой правильное направление к центру Солнца во время наблюдения» что подразумевается под «правильным направлением»?
11. На Стр. 74 в Выводах по Главе 2 автор упоминает: «Метод малых возмущений был использован...», но ранее по тексту данная формулировка нигде не упоминалась в тексте диссертации. Там же в выражении «В ходе проведенного исследования был дан ответ на вопрос, какая из имеющихся в литературе формул для сдвига параллаксов является правильной», на наш взгляд, не следовало бы быть таким категоричным и можно было бы ограничиться заключением «является более точной в случае Gaia». Имеются также повторения «Хотя вырождение не является идеальным, его трудно его трудно снять без привлечения других видов данных или внешней информации».
12. На с. 78 автор пишет: «Формально это может быть достигнуто с помощью правила Байеса. Исследована задача оптимального выбора априорной информации, когда наблюдений недостаточно для обычного пятипараметрического астрометрического решения...» и также далее по тексту неясно, что к чему относится, Байес что-то исследовал или автор диссертации.
13. На стр. Стр. 79. в параграфе «3.1. Теоретическое обоснование» в выражении «В этой главе под неопределенностью понимается любая количественная мера,

характеризующая ожидаемую степень отклонения оцениваемой величины от ее истинного значения, тогда как под ошибкой понимается разница между оценкой и истинным значением» непонятно о какой оценке идет речь. Также на стр. 80 текст «В частности, (α, δ) – барицентрическое направление на звезду...» не может быть направлением, а всего лишь координатами.

14. На Стр. 85 выражение «В этой работе мы в первую очередь интересуемся позициями и игнорируем оцененные параллаксы и собственные движения» вероятно всё-таки подразумевает координатные положения, а выражение «Это означает, что (гауссовская) апостериорная ковариация должна быть такой, чтобы построенный из нее 90%-ный доверительный эллипс в 90% случаев содержал истинное положение» понятнее было бы изложить как «Это означает, что (гауссовская) апостериорная ковариация должна быть такой, чтобы построенный из нее доверительный эллипс содержал истинные положения с вероятностью 90%», что автор и пишет в заключении данного подпараграфа.
15. Здесь также остался не до конца понятным текст «Таким образом, наш общий подход заключается в оптимизации априорной плотности вероятности для обеих целей».
16. На стр. 103 по выражению «Априорная информация включается в астрометрическое решение с использованием правила Байеса», если правильно понимаю, с использованием теоремы Байеса включается не априорная информация, а новая информация с целью определения апостериорной вероятности.
17. Общее замечание заключается в том, что диссертантом выполнен большой объем численного моделирования астрометрических параметров и процессов, но приведено ограниченное число примеров использования разработанных в работе методов и подходов конкретно к редуцированию наблюдательных данных миссии GAIA. Отсутствует и информация по обнаружению экзопланетных систем с использованием приведенного теоретического метода.
18. В работе имеется ряд несущественных замечаний и орфографических описок, например, очень много предложений, где вместо запятой автор использовал точку с запятой, а на стр. 184 читаем «Параметр γ определяет кривизну кривизны пространства...», также замечание по терминологии параметр γ вдруг стал называться на стр. 223 «параметром gamma».

Тем не менее, все перечисленные замечания не умаляют значимость работы, и не влияют на высокий уровень диссертационного исследования.

Докторская диссертация Буткевича Алексея Геннадьевича «Новые методы анализа данных миллисекундной оптической космической астрометрии» является

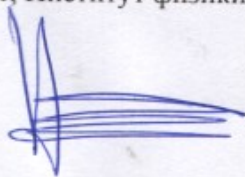
самостоятельной, выполненной на высоком научном уровне работой. Диссертация соответствует всем требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук. Поэтому считаю, что А.Г. Буткевич заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.1 «Физика космоса, астрономия».

Официальный оппонент

доктор физико-математических наук.

Казанский федеральный университет, Институт физики, профессор

«29» сентября 2025 г.



Нефедьев Юрий Анатольевич

420 008 Казань, Кремлевская 18

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Казанский (Приволжский) федеральный университет"

Тел.: +78432065289

e-mail: yuriy.nefedev@kpfu.ru

Подпись сотрудника организации

Ю.А. Нефедьева удостоверяю:

