

**ОТЗЫВ**  
**официального оппонента**  
**на диссертацию на соискание ученой степени**  
**кандидата физико-математических наук**  
**Белоненко Алексея Вячеславича**  
**на тему «Экспериментальное исследование релятивистских**  
**гравитационных эффектов на космических аппаратах с квантовыми**  
**стандартами времени и частоты»**  
**по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия**

Диссертация Белоненко А.В. посвящена экспериментальной проверке ЭПЭ эйнштейновского принципа эквивалентности ЭПЭ, который составляет эмпирическую базу общей теории относительности (ОТО) и других релятивистских теорий гравитации. Проверка осуществляется путем исследования вариаций частоты электромагнитных волн в гравитационном поле. Эффект гравитационного смещения частоты является составной частью ЭПЭ. Его прецизионное измерение относится к числу важных задач фундаментальной физики. В этом отношении работа диссертанта несомненно актуальна, вносит заметный вклад не только как подтверждение результатов ОТО, но также как поиск отклонений, открывающих пути к новой физике.

Диссертация состоит из: введения, трех глав, заключения, списка литературы, списка рисунков и таблиц и трех приложений, в которых приводится вывод алгебраических выражений, использованных в диссертации. Содержание диссертации написано хорошим русским языком.

Введение структурно четкое: актуальность обоснована, цель и новизна сформулированы, личный вклад автора явно указан.

Содержание первой главы охватывает два основных аспекта. Первый — преодоление ключевой проблемы, связанной с компенсацией доминирующего доплеровского сдвига первого порядка, что затрудняет выделение релятивистского гравитационного эффекта. Второй — разработка метода онлайн-компенсации и проведение системного анализа технических

ограничений аппаратного комплекса. Одним из результатов анализа стала количественная оценка систематических погрешностей, возникающих из-за технического ограничения — отсутствие возможности одновременной работы двух режимов передачи сигнала. Разработанный метод компенсации доплеровского сдвига первого порядка включает анализ режимов передачи сигнала и оценку точности гравитационного сдвига по бортовому стандарту. Для сдвигов второго порядка созданы аналитическая модель остаточного эффекта и алгоритм коррекции на базе астрономических библиотек SOFA и astropy. Сравнительный анализ с предшествующими экспериментами выявил факторы, ограничивающие точность измерения параметра нарушения  $\varepsilon$ .

Глава 2 посвящена анализу атмосферных возмущений и флуктуационных шумов, влияющих на стабильность частоты сигнала. Последовательно рассматриваются ионосферные и тропосферные эффекты, а также ограничения, связанные с фликкер-шумом.

В разделе об ионосфере проанализированы физические механизмы воздействия ионизированной среды на распространение радиосигналов. Особое внимание уделено обзору методов компенсации ионосферной задержки, включая аппроксимацию однослойной моделью тонкой ионосферы.

Анализ тропосферного влияния включает количественную оценку величин частотного сдвига для условий эксперимента "РадиоАстрон". Установлена частотная независимость эффекта в рабочем диапазоне миссии, а также проведено сравнение различных моделей тропосферных задержек.

Заключительная часть главы содержит оценку вклада фликкер-шума в общую погрешность измерений. Рассмотрены теоретические подходы к учёту данного типа шумов в прецизионных гравитационных экспериментах.

В третьей главе представлены финальные данные экспериментального измерения гравитационного смещения частоты в рамках проекта «РадиоАстрон». Их обработка объединяет алгоритм спектрального детектирования и анализ преобразований сигнала в наземном приёмном

комплексе. Предельная точность измерений была оценена с привлечением аппарата информационной матрицы Фишера и неравенства Крамера-Рао.

Численное моделирование, учитывающее реальную орбитальную динамику космического аппарата, подтвердило, что ошибка, вносимая алгоритмической обработкой (включая спектральный анализ), не выше нестабильности бортового водородного стандарта.

Основным достижением стала оценка параметра нарушения принципа эквивалентности  $\varepsilon = (1.57 \pm 3.96) \times 10^{-5}$ . Для вычислений гравитационного потенциала была задействована модель EGM2008. Полученный результат формирует новые рекордные ограничения для экспериментальной проверки гравитационного красного смещения в дальней зоне гравитационного поля Земли на расстояниях порядка лунной орбиты. В заключении перечислены основные результаты, полученные в диссертации.

Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Имеются следующие замечания:

1. В работе часто используются термины, которые не являются общепринятыми. Например: «орбита полного цикла» вместо «один виток орбиты» (с. 34), «релятивистское пространство-время» вместо просто «пространство-время» (с.16). То же касается аббревиатур: ПЭЭ вместо ЭПЭ для эйнштейновского принципа эквивалентности, FFU вместо UFF для принципа универсальности свободного падения. Наконец, сам термин Redshift, вынесенный в заголовки разделов 1 и 3, является жаргонным. В отечественной литературе принят термин «гравитационное красное смещение».

2. В цитированиях литературных источников часто используется только номер ссылки без указания авторов публикации, что затрудняет чтение диссертации.

3. Многие рисунки, например рисунок 1.9, нуждаются в более подробной подписи под рисунком.

4. В разделе 1.13 утверждается, что миссия ACES (проверка ОТО с помощью цезиевых часов на МКС), планируется к запуску. Однако, запуск миссии уже произошел 21 апреля этого года.

5. Неясен критерий выбора автором гравитационных сеансов для обработки. Гравитационные сеансы проводились с 2014 г., но в таблице 3.2 на с. 108 представлены лишь сеансы с 2016 г. Также в данной таблице приведено несколько сеансов 2017 г., но неясно, учитывалась ли автором нестабильная работа бортового водородного стандарта в 2017 г., связанная с исчерпанием его ресурса.

6. Не проанализировано, как повлияла плотность распределения измерительных сеансов по орбите на точность оценки параметра нарушения  $e$ .

7. В теории задержки в тропосфере есть модели сухого и влажного воздуха. Однако из текста 2й главы в численном примере не ясно, использовались ли актуальные данные радиометров в Пушино.

Оценивая диссертацию в целом, можно утверждать, что работа выполнена на высоком научном уровне и свидетельствует о достаточной квалификации автора. Основные работы диссертанта опубликованы в ведущих научных журналах с высоким импакт-фактором. Сделанные замечания относятся в основном к оформлению диссертации и принятому в ней стилю изложения и не влияют на общую оценку данной диссертационной работы.

Полученные результаты могут быть использованы в ПОМИ РАН, ПИЯФ, ГАИШ, ФТИ им. А.Ф.Иоффе и других организациях, ведущих исследования в области физики высоких энергий и космологии. Также они могут быть использованы в ФИАН, ИКИ РАН, НПО им. Лавочкина, ЦНИИМАШ и других организациях, разрабатывающих КА и аппаратуру для них для будущих космических проектов.

Указанные выше замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия, а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова, а также оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель Белоненко Алексей Вячеславич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории «Изучение быстропеременных процессов и спектроскопии» отдела космической радиоастрономии Астрокосмического центра Физического института имени П. Н. Лебедева Российской академии наук

**ПОПОВ Михаил Васильевич**

**03 октября 2025 года**

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация: 01.03.02 – Астрофизика и радиоастрономия

Контактные данные:

тел.: +7 (495) 333-23-01, e-mail: popov069@asc.rssi.ru

Адрес места работы:

119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 53, Физический институт имени П. Н. Лебедева Российской академии наук  
Тел.: +7 (495) 333-23-01; e-mail: popov069@asc.rssi.ru