

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА**

На правах рукописи

Белоненко Алексей Вячеславич

**Экспериментальное исследование
релятивистских гравитационных
эффектов на космических аппаратах с
квантовыми стандартами времени и
частоты**

Специальность: 1.3.1. Физика космоса, астрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва - 2025

Работа выполнена на кафедре экспериментальной астрономии Физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова.

Научный руководитель: **Руденко Валентин Николаевич**,
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Алексеев Станислав Олегович**,
доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник отдела
релятивистской астрофизики Государственного
астрономического института имени
П. К. Штернберга МГУ имени М.В.Ломоносова
Попов Михаил Васильевич,
доктор физико-математических наук, главный
научный сотрудник Астрокосмического центра
Физического института имени П. Н. Лебедева
Российской академии наук
Сушков Сергей Владимирович,
доктор физико-математических наук, доцент,
заведующий кафедрой теории относительности
и гравитации Института физики Казанского
(Приволжского) федерального университета

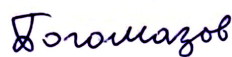
Защита состоится 23 октября 2025 года в 17 часов 00 минут на заседании диссертационного совета *МГУ.013.1* Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова по адресу: 119234, г. Москва, Университетский п-кт, д. 13, конференц-зал.

Email: dissovet@sai.msu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В.Ломоносова (Ломоносовский п-кт, д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3514>

Автореферат разослан 22 сентября 2025 года.

Ученый секретарь диссертационного
совета МГУ.013.1, доктор
физико-математических наук

 А. И. Богомазов

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

Настоящее исследование направлено на экспериментальную проверку ключевого постулата релятивистской физики – принципа эквивалентности Эйнштейна (ПЭЭ) [1], составляющего концептуальную основу общей теории относительности (ОТО) [2]. Согласно данному принципу, гравитация и ускорение локально неотличимы друг от друга. Частью ПЭЭ является эффект смещения частоты электромагнитных волн при их проходе между разнесенными в пространстве позициями с ненулевой разностью гравитационных потенциалов. Для прецизионного измерения данного эффекта нами была разработана экспериментальная методика, основанная на использовании высокоточных атомных стандартов частоты, размещенных как на наземной станции слежения (НВСЧ), так и на борту околоземного космического аппарата (БВСЧ). Исторически первая последовательная теория гравитации была сформулирована И. Ньютоном и опубликована в его фундаментальном труде «Математические начала натуральной философии» в 1687 году. В рамках ньютоновской теории свободные массивные тела (частицы) существуют и перемещаются в абсолютном пространстве-времени только под действием сил взаимного притяжения или «сил гравитации». Численно сила притяжения пары точечных (или сферически симметричных частиц однородной плотности) представляется законом всемирного тяготения Ньютона («закон обратных квадратов»), в котором естественно вводится эмпирическая константа «гравитационная постоянная», характеризующая гравитационное взаимодействие тел.

Уточнение (проверка) эмпирических основ ОТО

Уникальное свойство гравитационного поля придавать материальным телам одно и то же ускорение независимо от массы было известно уже родоначальникам физической механики из экспериментов со свободным падением (Галилей 1630 г.), с колебаниями механических маятников и наблюдениями за динамикой спутников Юпитера (Ньютон 1686 г.). При тех же начальных условиях тождественность ускорений пробных тел означает равенство их «инертных» и «гравитационных» масс и совпадение их траекторий в

зоне гравитационного поля. Впоследствии совпадение гравитационных траекторий получило название «слабого принципа эквивалентности» (СПЭ) или «универсальности свободного падения» (FFU) [1]. Погрешность этого утверждения исторически постоянно снижалась в результате улучшения тестовых экспериментов. Начиная с относительной ошибки $10^{-2} \div 10^{-3}$ (Галилей и Ньютон), погрешность пришла на уровни: 10^{-8} (Этвёш) [4], 10^{-11} (Дикке и др. 1962 г.) [3], 10^{-13} (лазерная локация Луны 2010 г.), 10^{-15} (космический эксперимент «MICROSCOPE» 2022 г.) [5]. В результате современная формулировка СПЭ гласит, что траектория свободно падающего пробного тела не зависит от его массы и внутренней структуры (молекулярно-атомного состава).

СПЭ является частью эмпирической (опытной) базы ПЭЭ. Теоретическая база ПЭЭ включает в себя специальную теорию относительности (СТО) [6], которая утверждает равноправие инерциальных (неускоренных) систем отсчета при отказе от «гипотезы дальнего действия Ньютона» и принятии постулата о наличии «максимальной скорости распространения взаимодействий» равной скорости света. Последнее ведет к изменениям математической формулировки «принципа относительности» инерциальных систем отсчета, а именно: замене «преобразований Галилея» на «преобразования Лоренца». Это, в свою очередь, означает упразднение категории абсолютного времени и распространение принципа относительности на всё пространство-время. Кроме того, гарантируется инвариантность электродинамических уравнений Максвелла [7], изотропия скорости света и вводится новый релятивистский закон сложения скоростей. В итоге, СТО (представленная Эйнштейном в 1905 г.) дала новую теоретическую основу для понимания физических процессов при скоростях, близких к скорости света.

Согласно Дикке [8] ПЭЭ состоит из трех фундаментальных положений, а именно, имеют место:

1. справедливость слабого принципа эквивалентности (СПЭ), устанавливающего равенство инертной и гравитационной массы и факт универсальности траекторий свободного падения (UFF),
2. локальная лоренц-инвариантность (LLI), т.е. независимость результатов любых локальных негравитационных экспериментов от скорости свободно падающей системы отсчета,

3. Локальная позиционная инвариантность (или универсальность «RedShift») (LPI, URS), т.е. инвариантность результатов локальных негравитационных экспериментов относительно их положения в пространстве-времени.

Под локальным негравитационным экспериментом здесь понимается тот, который проводится в достаточно малой области пространства-времени и не связан с прямым измерением гравитационных взаимодействий. Таким образом, если три перечисленных положения выполняются одновременно, то справедлив ПЭЭ. Тогда в локальных свободно падающих системах отсчета законы, управляющие экспериментами, не должны зависеть **от скорости системы отсчета** (локальная лоренц-инвариантность), а также **от местоположения системы отсчета** (локальная позиционная инвариантность), что предполагает постоянство атомных констант в этих системах отсчета.

Законы, которые удовлетворяют этому, совместимы со специальной теорией относительности – такие как уравнения электромагнитного поля (уравнения Максвелла) и стандартная модель физики элементарных частиц.

Также в локальных свободно падающих системах отсчета пробные тела не имеют ускорения и движутся по универсальным траекториям – прямым линиям, которые соответствуют «геодезическим» в терминах искривленного пространства-времени, т.е. выполняется (UFF).

Эмпирическими основаниями положений ПЭЭ являлись:

- для (1) – эксперименты по наблюдению свободного падения тел,
- для (2) – наблюдения поведения пробных тел (включая фотоны) во вращающихся системах отсчета,
- для (3) – наблюдения смещения спектральных линий удаленных звезд («RedShift» эффект).

Комментируя третий пункт ПЭЭ, «позиционная инвариантность», напомним, что эффект «RedShift» – функция только разности потенциалов между точками прохода ЕМ волны без ограничений на положения этих точек во Вселенной, т.е. это тест её однородности; равно, как и фиксация постоянства атомных констант по спектрам удаленных звезд.

Ключевое значение ПЭЭ заключается в том, что он устанавливает глубокую связь между гравитацией и геометрией пространства-времени. Теории гравитации, которые полностью реализуют ПЭЭ, должны удовлетворять постулатам метрических теорий гравитации, а именно:

- пространство-время обладает симметричной метрикой, которая определяет его геометрические свойства и служит математическим инструментом для описания характера его искривления;
- движение свободных пробных тел происходит по геодезическим линиям, определяемым данной метрикой (означает, что тела движутся по кратчайшим путям в искривленном пространстве-времени);
- в локальных свободно падающих системах отсчета негравитационные физические законы принимают ту же форму, что и в специальной теории относительности, что обеспечивает локальную эквивалентность между гравитационными и инерциальными эффектами.

В итоге наблюдаемые гравитационные эффекты можно рассматривать как геометрические свойства искривленного пространственно-временного континуума.

Заканчивая наше представление различных аспектов принципа эквивалентности Эйнштейна (ПЭЭ), уместно напомнить так называемую «гипотезу Шиффа» [9], состоящую в следующем утверждении: «Любая полная самосогласованная теория гравитации, включающая в себя слабый принцип эквивалентности (СПЭ), обязательно включает также и ПЭЭ». Данная гипотеза выглядит обоснованной, по крайней мере, для теорий, в которых выполняется закон сохранения энергии.

Цели и задачи диссертационной работы

Цель диссертационной работы заключается в проведении высокоточных измерений гравитационного смещения частоты (эффекта «RedShift») с использованием космического аппарата «РадиоАстрон» и наземных станций слежения для экспериментальной проверки предсказаний общей теории относительности.

Основные задачи исследования включают разработку методики прецизионных измерений частоты принимаемого сигнала с компенсацией доплеровских эффектов первого порядка и релятивистских поправок, а также оценку точности определения параметра нарушения принципа эквивалентности. Особое внимание уделено анализу систематических погрешностей и сравнению полученных результатов с современными теоретическими моделями.

Объект и предмет исследования

Объектом исследования является изучение релятивистского эффекта гравитационного смещения частоты электромагнитного излучения («RedShift») и связанного с ним параметра нарушения ПЭЭ. Предметом исследования выступают фазовые и частотные характеристики сигнала, записанного с КА на НСС, орбитальные параметры КА, а также характеристики ионосферы.

Методология исследования

Теоретико-методологической базой диссертации являются работы [1, 4, 3] (ПЭЭ и критерии теорий гравитации Дикке), [10, 11, 13, 14, 5, 15] (Эксперименты по проверке ПЭЭ проведенные ранее). В данной диссертационной работе применяется адаптированный компенсационный алгоритм эффекта Доплера 1-го порядка, ранее предложенный в работе [11]. Для оценки характеристик сигнала мы использовали широко распространенные спектральные методы детектирования частоты. Результат нашего эксперимента сравнивался с ранее проведенными экспериментами «Gravity Probe A» [11] и «GREAT» [13, 14].

Научная новизна

В рамках проведенной работы впервые осуществлены прецизионные измерения гравитационного смещения частоты (эффекта «RedShift») в уникальных условиях – на орбитальных расстояниях, соответствующих лунной

дистанции (~ 400 тыс. км). Данное достижение представляет значительный научный интерес.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Теоретический прогноз общей теории относительности для гравитационного смещения частоты соответствует экспериментальным данным с точностью $(1.57 \pm 3.96) \times 10^{-5}$ по параметру отклонения ε , который в случае подтверждения теории должен быть равен нулю, и в этом случае значимой величиной является только ошибка, с которой получено ε . Данный результат устанавливает новые ограничения для модифицированных теорий гравитации.
2. Разработанная методика онлайн подавления доминирующих помех за счет смены режимов синхронизации коммуникационных сигналов по наземному и бортовому стандартам частоты позволяет на порядок повысить точность измерения гравитационного сдвига частоты, также может быть применена для последующих прецизионных проверок общей теории относительности.
3. Разработанная и реализованная методика измерения гравитационного смещения частоты радиосигналов впервые была применена в условиях орбитального эксперимента для масштабов, сравнимых с расстоянием до Луны, и установила новые ограничения на возможные отклонения от принципа эквивалентности Эйнштейна в аспекте однородности релятивистского пространства-времени.
4. Разработанное программное обеспечение с использованием библиотек SOFA и astropy позволило выделить гравитационный сдвиг частоты на фоне релятивистского эффекта Доплера.
5. Разработанный комплекс программ позволяет проанализировать вклад атмосферных помех в частоту сигнала «РадиоАстрон». Компенсация ионосферного сдвига частоты на основе модели тонкой ионосферы и данных об электронной плотности позволяет выделить гравитационный сдвиг на фоне атмосферных эффектов.

Теоретическая и практическая значимость

Теоретическая значимость работы заключается в уточнении параметров гравитационного смещения частоты электромагнитных сигналов на больших расстояниях от Земли в рамках ОТО. Полученные результаты вносят вклад в развитие современных представлений о гравитации и её влиянии на распространение электромагнитных волн в условиях слабых гравитационных полей. Разработанные методы обработки данных, включая алгоритмы компенсации кинематических эффектов и итеративные методы анализа фазы сигнала, позволяют существенно повысить точность измерений последующих прецизионных экспериментов. Это открывает новые возможности для экспериментальной проверки предсказаний ОТО и других фундаментальных физических теорий с использованием космических аппаратов.

Практическая значимость исследования заключается в возможности применения разработанных методов и алгоритмов в системах спутниковой навигации для повышения точности позиционирования, а также в проектах, связанных с изучением гравитационных волн и релятивистских эффектов. Результаты работы могут быть использованы для калибровки оборудования и улучшения точности измерений в космических миссиях, направленных на изучение гравитационных полей и тестирование фундаментальных физических законов.

Кроме того, проведённое исследование создаёт основу для дальнейших работ в области релятивистской астрофизики, квантовой гравитации и космологии, способствуя развитию новых подходов к изучению гравитационных взаимодействий.

Достоверность результатов

Проведенные прецизионные измерения параметра нарушения ϵ продемонстрировали полную согласованность с данными, полученными в ходе экспериментов «Gravity Probe A» [11] и «GREAT» [13, 14]. Разработанная методология оценки ионосферного сдвига частоты прошла комплексную экспериментальную проверку на данных навигационных спутников системы GPS. Полученные результаты подтвердили достаточный уровень точности

наших алгоритмов.

Личный вклад автора

В статьях 2 (личный вклад 90%), 3 (личный вклад 75%), 6 (личный вклад 90%) является первым автором и выполнил основную часть работы по написанию программного обеспечения с помощью которых производился учет влияния ионосферного сдвига частоты применением тонкой модели ионосферы, гравитационного потенциала Луны и релятивистского эффекта Доплера. В статье 5 (личный вклад 50 %), является вторым автором, в статье опубликован финальный результат всего эксперимента, автором оптимизирован алгоритм измерения частоты принятого сигнала для гравитационных сеансов связи, проведено моделирование помех, сопутствующих измерению параметра нарушения ε , производилась обработка всех накопленных гравитационных сеансов в миссии «РадиоАстрон». В статьях 1 (личный вклад 25%) и 4 (личный вклад 25%) выполнил часть работ по оценке характеристик стандартов частоты, гравитационного потенциала наземной станции слежения.

Апробация результатов

Результаты диссертационной работы опубликованы в 6 статьях, из них в 5 статьях в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базе ядра РИНЦ «eLibrary Science Index», международными базами данных (Web of Science, Scopus, RSCI) и рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия.

Работа была представлена в докладах на следующих конференциях:

1. 2020 Тестирование Принципа Эквивалентности по данным космического эксперимента со спутником Радиоастрон (Устный) Авторы: Белоненко А.В., Гусев А.В., Руденко В.Н. 4-я Российская конференция "Основания фундаментальной физики и математики"(РУДН), Москва, Россия, 11-12 декабря 2020
2. 2021 Einstein Equivalence Principle test with RadioAstron (Устный) Авторы: Litvinov D.A., Rudenko V.N., Bartel N., Belonenko A.V., Gurvitz

- L.I., Nunes N., et al. 43rd COSPAR Scientific assembly, 2021, Сидней, Австралия, 28 января - 4 февраля 2021 - 2020
3. 2021 Update on the gravitational RedShift measured with RadioAstron at distances up to 350,000 km from Earth (Устный) Авторы: Nunes N.V., Bartel N., Belonenko A.V., Litvinov D.A., Rudenko V.N., Zakhvatkin M.V., et al. первая виртуальная конференция CASC 2021, Canadian Association of Science Centres 100 Ramsey Lake Road Sudbury, ON. P3E 5S9, Канада, 1-3 июня 2021
 4. 2021 Measurement of the gravitational RedShift effect using the satellite Spectr-R in the "RadioAstron" mission (Устный) Авторы: Белоненко А.В., Руденко В.Н., Гусев А.В., Попов Сергей Михайлович Sixteenth Marcel Grossmann Meeting - MG16, Virtual Meeting, Италия, 5-10 июля 2021
 5. 2021 Testing the principle of equivalence at a very large distance from the Earth according to the data of the Radioastron space experiment (Стендовый) Авторы: Белоненко А.В., Руденко В.Н., Гусев А.В., Попов С.М., Physical Interpretations of Relativity Theory - 2021, Москва, Россия, 7 июля 2021
 6. 2022 TESTING THE EINSTEIN EQUIVALENCE PRINCIPLE WITH RADIOASTRON (Устный) Авторы: Nunes N., Bartel N., Belonenko A.V., Gusev A., Manucharyan G., Popov S., Rudenko V. 44th COSPAR Scientific Assembly 2022, Athens, Греция, 16-24 июля 2022
 7. Measurements of the gravitational frequency shift of radio communication signals with RadioAstron satellite on a highly eccentric orbit (стендовый) Авторы: A.V. Belonenko, A.V. Gusev, V.V. Kulagin, G. D. Manucharyan, S.M. Popov, V.N. Rudenko et al.; Rencontres de Moriond 2023, Gravitation, La Thuile, 18-25 March 2023

Содержание работы

Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения и приложения. Полный объем диссертации составляет 122 страницы, включая 44 рисунка и 3 таблицы. Список литературы содержит 66 наименований.

Во **Введении** представлено теоретическое обоснование актуальности темы диссертационного исследования. Сформулированы цели и основные задачи работы, подчеркнуты элементы научной новизны и практической значимости полученных результатов. Изложены основные положения, выносимые на защиту. Отдельно указан личный вклад автора в проведенное исследование, включая разработку методик, анализ данных и интерпретацию результатов. Приведен перечень публикаций по теме диссертации, а также список конференций, на которых докладывались промежуточные и итоговые результаты. Структура диссертации кратко описана с обоснованием логики изложения материала. Кроме того, дан обзор ключевых экспериментальных работ, выполненных ранее в данной области.

Глава 1 посвящена разработке метода онлайн-компенсации доминирующего доплеровского сдвига первого порядка, который маскирует гравитационное смещение частоты в экспериментах с КА «РадиоАстрон». Представлен обзор технических характеристик спутника и проведен анализ систематических погрешностей, связанных с невозможностью одновременной работы режимов однопутевой ($1w$, КА-НСС) и двухпутевой ($2w$, НСС-КА-НСС) передачи сигнала. Детально излагается принцип работы компенсационной схемы для эффекта Доплера первого порядка, включая математическое описание метода. Особое внимание уделено сравнительному анализу режимов передачи сигнала ($1w$ и $2w$) и оценке предельной точности измерений на основе характеристик бортового водородного стандарта частоты, с приведением и интерпретацией графиков дисперсии Аллана. Обсуждаются технические сложности, возникающие при реализации онлайн-компенсации доплеровского сдвига. В разделе, посвященном компенсации эффектов второго порядка, представлена формула для остаточного сдвига эффекта Доплера 2-го порядка после применения компенсационной схемы и метод его подавления с использованием библиотек SOFA и astropy. Наглядно демонстрируется относительный вклад различных остаточных эффектов через серию графических зависимостей. Глава включает расширенный сравнительный анализ ранее проведенных экспериментов с целью выявления факторов, ограничивающих точность определения параметра нарушения ε . Завершается глава описанием наземных экспериментов по измерению «RedShift» эффекта и перспективными планами будущих космических миссий.

Глава 2 посвящена комплексному анализу атмосферных эффектов, ока-

зывающих влияние на частоту принимаемого сигнала наземной станции слежения, а также исследованию фликкер-шума. В первой части главы рассматривается влияние ионосферы, включая детальное описание ее характеристик и состава. Анализируются существующие методы компенсации ионосферных возмущений, среди которых особое внимание уделено модели однослойной тонкой ионосферы, где ключевыми параметрами выступают полное электронное содержание (ТЕС) и картирующая функция. Проведены расчеты ионосферного сдвига частоты с использованием различных ионосферных карт, а также рассмотрен двухчастотный метод компенсации данного эффекта. Сравнительный анализ эффективности методов компенсации выполнен для космического аппарата «РадиоАстрон» и спутников системы GPS.

Во второй части главы исследуется тропосферный сдвиг частоты сигнала. Дана оценка величины этого эффекта и проанализированы различные подходы к его компенсации. Приведены результаты расчетов тропосферного сдвига на основе моделей тропосферных задержек, а также отмечена частотная независимость данного эффекта в рабочем диапазоне частот «РадиоАстрона».

В заключительном разделе главы представлена оценка влияния фликкер-шума на точность измерений и обсуждаются возможные методы его учета в рамках проводимого эксперимента.

Глава 3 представляет окончательные результаты эксперимента по измерению гравитационного смещения частоты с космическим аппаратом «РадиоАстрон». В начале главы рассматривается разработанный метод детектирования частоты сигнала, основанный на спектральном алгоритме частотной оценки. Детально описывается схема частотных преобразований в высокоинформативном радиокомплексе (ВИРК), сопровождаемая теоретической оценкой предельной точности измерений с использованием информационная матрицы Фишера и неравенства Крамера-Рао.

Экспериментальная часть включает демонстрацию практического применения алгоритма остановки фазы сигнала с последующим определением частоты на НСС. Для оценки погрешностей проведено моделирование сигнала с параметрами, соответствующими орбитальной динамике «РадиоАстрона», подтвердившее, что погрешность алгоритма детектирования не превышает ошибок, вносимых бортовым стандартом частоты.

Теоретический анализ включает расчёт гравитационного потенциала на-

земной станции в модели EGM2008, с количественным сопоставлением вклада других эффектов. Ключевым результатом главы является итоговая оценка параметра нарушения ε , полученная по совокупности экспериментальных сеансов: $\varepsilon_{opt} = (1.57 \pm 3.96) \times 10^{-5}$ [16]— что свидетельствует о значительном прогрессе достигнутой точности измерений и их соответствии теоретическим предсказаниям. Полученные данные подводят итог комплексному исследованию и устанавливают новые границы точности в экспериментальной проверке «RedShift» эффекта в дальней зоне земного гравитационного поля на расстояниях, сопоставимых с дистанцией до Луны.

Публикации по теме диссертации

Результаты диссертационной работы опубликованы в 6 статьях, из них в 5 статьях в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базе ядра РИНЦ «eLibrary Science Index», международными базами данных (Web of Science, Scopus, RSCI) и рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия:

1. Litvinov D.A., Rudenko V.N., **A.V. Belonenko**, Filetkin A.I., Gusev A.V., Kulagin V.V., Porayko N.K., A.V.Alakoz, U.Bach, N.Bartel, K.G.Belousov, M.Bietenholz, A.V.Biriukov, R.Carman, G.Cimó, D.Dirkx, C.Courde, A.I.Filetkin, D.A.Duev, G.Granato, L.I.Gurvits, R.Haas, G.Herold, A.Kahlon, B.Z.Kanevsky, V.L.Kauts, G.D.Kopelyansky, G.Kronschnab, A.V.Kovalenko, A.M.Kutkin, M.Lindqvist, J.E.J.Lovell, H.Mariey, J.McCallum, G.Molera Calvés, C.Moore, K.Moore, A.Neidhardt, C.Plötz, S.V.Pogrebenko, A.Pollard, J.Quick, A.I.Smirnov, K.V.Sokolovsky, V.A.Stepanyants, J.Yang, J.-M.Torre, P.de Vicente, M.V.Zakhvatkin / Probing the gravitational RedShift with an earth-orbiting satellite // Physics Letters, Section A: General, Atomic and Solid State Physics. — 2018. — Vol. 382, no. 33. — P. 2192–2198. EDN: YENKYA. Импакт-фактор 0.69 (JCI). Личный вклад 25%. Объем 0.84 печатных листов.
2. **Belonenko A. V.**, Popov S. M., Rudenko V. N. Compensation of atmospheric hindrances in measuring the gravitational RedShift using

- satellites on-board clocks // Gravitation and Cosmology. — 2020. — Vol. 26, no. 2. — P. 128–135. EDN: VRUSCN. Импакт-фактор 0.25 (JCI). Личный вклад 90%. Объем 0.96 печатных листов.
3. **Belonenko A. V.**, Gusev A. V., Rudenko V. N. / Precision measurement of gravitational frequency shift of radio signals using rao-cramer estimates // Gravitation and Cosmology. — 2021. — Vol. 27, no. 4. — P. 383–391. EDN: RUCZSW. Импакт-фактор 0.25 (JCI). Личный вклад 75%. Объем 1.08 печатных листов.
 4. N. V. Nunes, N. Bartel, **A. V. Belonenko** G. D. Manucharyan, S. M. Popov, V. N. Rudenko, L. I. Gurvits, G. Cimò, G. Molera Calvés, M. V. Zakhvatkin / Gravitational RedShift test of eep from near earth to the distance of the moon with radioastron // Classical and Quantum Gravity. — 2023. — Vol. 40, no. 2. EDN: FRZLTM. Импакт-фактор 0.93 (JCI). Личный вклад 25%. Объем 2.4 печатных листов.
 5. Руденко В.Н., **Белоненко А.В.**, Гусев А.В., Гурин Ф.С., Кулагин В.В., Попов С.М., Манучарян Г.Д., Захваткин М.В., Коваленко А.В. Прецизионное измерение гравитационного смещения частоты электромагнитных сигналов // Журнал экспериментальной и теоретической физики. - 2024. - Т. 166. - №5. - С. 632-640. EDN: GUEJRO. Импакт-фактор 1.31 (РИНЦ). Личный вклад 50%. Объем 1.08 печатных листов.

Иные публикации

6. **Белоненко А. В.**, Руденко В. Н., Попов С. М. Прецизионное измерение гравитационного смещения радиочастот околоземных космических аппаратов // Альманах современной метрологии. — 2020. — Т. 24, № 4. — С. 27–31. EDN: HOSYUQ. Импакт-фактор 0.213 (РИНЦ). Личный вклад 90%. Объем 0.6 печатных листов.

Список литературы

- [1] *Misner, C. W.* Gravitation / Misner, C. W., Thorne, K. S., Wheeler, J. A. San Francisco: W. H. Freeman – 1973 – 1305 с.

- [2] *Einstein A.* Über den Einfluss der Schwerkraft auf die Ausbreitung des Lichtes // Annalen der Physik. – 1911. Vol. 340. P. 898-908.
- [3] *Roll, P.G., Krotkov, R.V., Dicke, R.H.* The equivalence of inertial and passive gravitational mass. // Annals of Physics, – 1964. – Февраль – 26, 442-517.
- [4] *Roland v. Eötvös, Desiderius Pekár, Eugen Fekete* Beiträge zum Gesetze der Proportionalität von Trägheit und Gravität // Annalen der Physik. – 1922. T. 68, № 11. – С. 11–66.
- [5] *Touboul, P., Métris, G., Rodrigues, M., André, Y., Baghi, Q., Bergé, J., Yvon, D.* Space test of the equivalence principle: first results of the MICROSCOPE mission. // Classical and Quantum Gravity – 2019 – Окт. – 36(22), 225006.
- [6] *Einstein, A.* Zur Elektrodynamik bewegter Körper. // Annalen Der Physik – 1905. – Июнь – 322(10), 891–921.
- [7] *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Теория поля. — 7-е изд., испр. — М.: Наука, 1988. — 512 с. — (Теоретическая физика: Учеб. пособие для вузов; Т. 2).
- [8] *Dicke R. H.* The Theoretical Significance of Experimental Relativity. – 1964 – под ред. Gordon and Breach, New York.
- [9] *L. I. Schiff.*, On Experimental Tests of the General Theory of Relativity // Am. J. Phys. – 1960 – Апр – 28, 340–343.
- [10] *R. V. Pound and G. A. Rebka, Jr.*, Apparent Weight of Photons // Phys. Rev. Lett. – 1960 – Апр – 4, С. 337 – 341.
- [11] *Vessot, R. F. C., Levine, M. W.* Test of Relativistic Gravitation with a Space-Borne Hydrogen Maser // General Relativity and Gravitation – 1979 – Фев. – Т. 10 – С. 181-204.
- [12] *R. F. C. Vessot, M. W. Levine, E. M. Mattison* Test of Relativistic Gravitation with a Space-Borne Hydrogen Maser // Phys. Rev. Lett. – 1980 – Дек – 45 – С. 2081–2084.

- [13] *P. Delva, , N.Puchades, E.Schonemann* Gravitational Redshift Test Using Eccentric Galileo Satellites // Phys. Rev. Lett – 2018 – Дек – 121 – С. 231101.
- [14] *S. Herrmann, F. Finke, M. Lulf* Test of the Gravitational Redshift with Galileo Satellites in an Eccentric Orbit // Phys. Rev. Lett – 2018 – 2018 – Дек 121 С. 231102.
- [15] *Takamoto, M., Ushijima, I., Ohmae, N.* Test of general relativity by a pair of transportable optical lattice clocks. // Nat. Photonics – 2020 – Апр. – 14 – С. 411–415.
- [16] *Rudenko V.N., A. V. Belonenko, Gusev A.V., Gurin F.S., Kulagin V.V., Popov S.M., Manucharyan G.D., Zakhvatkin M.V., Kovalenko A.V.* Precision measurement of the gravitational frequency shift of electromagnetic signals // Journal of Experimental and Theoretical Physics. - 2024. – ОКТ. - Vol. 166. - №5. - С. 632-640.