

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д002.023.01,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ “ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМ.
П.Н. ЛЕБЕДЕВА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК“ (ФИАН) ПО
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА
НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 9 июня 2022 года № 1

О присуждении Литвинову Дмитрию Александровичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико – математических наук

Диссертация “Проверка эйнштейновского принципа эквивалентности с помощью космического аппарата “Радиоастрон” по специальностям 01.03.02 “Астрофизика и звездная астрономия” и 01.04.03 “Радиофизика” принята к защите 10 марта 2022 г., протокол №2232, диссертационным советом Д002.023.01, созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки “Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук”, 119991, Москва, Ленинский проспект, дом 53, ФИАН, приказ № 105/нк от 11.04.2012 Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Соискатель Литвинов Дмитрий Александрович, 1981 года рождения, в 2007 году окончил Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, с присвоением квалификации “Физик” по специальности “Физика”. В период с 1 марта 2007 г. по 28 февраля 2010 г. Литвинов Д.А. обучался в очной аспирантуре физического факультета Московского государственного университета по специальности 01.04.02 “Теоретическая физика”. Удостоверение о сдаче кандидатских экзаменов № 17 выдано 18.02.2010 Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова. Литвинов Д.А. был зачислен в Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук в качестве экстерна в период с 1 июня 2021 г. по 30 ноября 2021 г. для сдачи кандидатского экзамена по специальности 01.03.02 “Астрофизика и звездная астрономия”. Справка о сдаче кандидатского экзамена по специальности “Астрофизика и звездная астрономия” (01.03.02) № 16-21

выдана 29.11.2021 в ФГБУН “Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН”. В настоящее время соискатель работает младшим научным сотрудником в Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН.

Диссертация выполнена в Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН. Научный руководитель по специальности 01.03.02 – Пилипенко Сергей Владимирович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник отдела теоретической астрофизики АКЦ ФИАН; научный руководитель по специальности 01.04.03 – Руденко Валентин Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом гравитационных измерений ГАИШ МГУ.

Официальные оппоненты:

Черепенин Владимир Алексеевич, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, профессор, главный научный сотрудник Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН (ИРЭ РАН);

Барсуков Дмитрий Петрович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН (ФТИ РАН),

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН), ул. Профсоюзная, дом 84/32, г. Москва, – в своем положительном отзыве, подготовленном главным научным сотрудником ИКИ РАН, заведующим лабораторией магнитоплазменных процессов в релятивистской астрофизике отдела 64 д.ф.-м.н., профессором Г. С. Бисноватым-Коганом, подписанным ученым секретарем ИКИ РАН к.ф.-м.н. А.М. Садовским и утвержденным директором ИКИ РАН член-корреспондентом РАН А.А. Петруковичем, указала, что диссертация представляет собой законченный научно-исследовательский труд и удовлетворяет всем требованиям “Положения о порядке присуждения ученых степеней”, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Литвинов Дмитрий Александрович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 01.03.02 “Астрофизика и звездная астрономия” и 01.04.03 “Радиофизика”.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается темой исследований, высокой компетентностью в областях науки, соответствующих паспортам специальностей 01.03.02 (“Астрофизика и

звездная астрономия”) и 01.04.03 (“Радиофизика”), профессиональными должностными обязанностями и наличием публикаций оппонентов и сотрудников ведущей организации по тематике диссертационной работы.

Результаты диссертационной работы Д.А. Литвинова изложены в 5 научных публикациях в рецензируемых изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией. Содержание диссертационной работы Д.А. Литвинова изложено доступно, корректно и полно. В работах представлены основные положения диссертации. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах. В главных работах вклад соискателя является основным или равным вкладу соавторов.

Наиболее значительные работы соискателя по теме диссертации, опубликованные в рецензируемых изданиях:

Бирюков А. В., Кауц В. Л., Кулагин В. В., Литвинов Д. А., Руденко В.Н. Измерение гравитационного красного смещения с помощью космического радиотелескопа “Радиоастрон” // *Астрономический журнал*. 2014. Т. 91, No 11. С. 887–900.

Litvinov D. A. et al., Probing the gravitational redshift with an Earth-orbiting satellite // *Physics Letters A*. 2018. Vol. 382, no. 33. P. 2192–2198.

Nunes N. V., Bartel N., Bietenholz M. F., Zakhvatkin M. V., Litvinov D. A., Rudenko V. N., Gurvits L. I., Granato G., Dirx D. The gravitational redshift monitored with RadioAstron from near Earth up to 350,000 km // *Advances in Space Research*. 2020. Vol. 65, no. 2. P. 790–797.

Litvinov D., Pilipenko S. Testing the Einstein equivalence principle with two Earth-orbiting clocks // *Classical and Quantum Gravity*. 2021. Vol. 38, no. 13. P. 135010.

Litvinov D. A., Nunes N. V., Filetkin A. I., Bartel N., Gurvits L. I., Molera Calves G., Rudenko V. N., Zakhvatkin M. V. The antenna phase center motion effect in high-accuracy spacecraft tracking experiments // *Advances in Space Research*. 2021. Vol. 68, no. 10. P. 4274–4291.

На диссертацию поступили положительные отзывы официальных оппонентов и ведущей организации.

В отзыве **оппонента д.ф.-м.н. Черепенина В.А.** (специальность оппонента – 01.04.03 “Радиофизика”) говорится о том, что диссертация Литвинова Д.А. посвящена актуальной проблеме поиска нарушений эйнштейновского принципа эквивалентности (ЭПЭ) путем измерения эффекта смещения частоты электромагнитных сигналов, распространяющихся в гравитационном поле. Отмечено, что обнаружение и оценка величины таких отклонений, оказывающихся неизбежным следствием попыток объединения общей теории относительности (ОТО) и квантовой теории, позволят заложить основы более полной физической картины мира и, возможно, достичь объединения всех четырех известных типов физических взаимодействий. По первой главе, в которой описана концепция эксперимента по проверке ЭПЭ с помощью двух космических аппаратов на околоземной орбите, оппонентом особо выделен следующий полученный автором результат: для любого типа часов (независимо от доминирующего в их выходном сигнале типа шума – белого, фликкера, броуновского) всегда существует оптимальное значение периода орбиты спутников. Результаты первой главы, по мнению оппонента, несомненно окажутся полезны при проектировании будущих экспериментов по проверке ЭПЭ и измерению гравитационного замедления времени. По второй главе отмечена важность разработанной впервые математической модели эффекта движения фазового центра бортовых и наземных остронаправленных антенн, учитывающей ошибки наведения, а также разработанной впервые схемы компенсации данного эффекта с помощью многоканальных линий связи. В отзыве указано на один из наиболее важных и новых результатов работы, изложенный в третьей главе, заключающийся в том, что впервые осуществлена проверка ЭПЭ путем измерения эффекта гравитационного замедления времени с точностью 3×10^{-2} на расстояниях от 10 до 350 тыс. км от Земли. Такая проверка стала возможной только благодаря запуску наземно-космического интерферометра “Радиоастрон”. В отзыве также приводится анализ соответствия диссертации двум заявленным специальностям и сделан вывод о том, что отнесение диссертации к двум специальностям (01.03.02 – “Астрофизика и звездная астрономия” и 01.04.03 – “Радиофизика”) является обоснованным. В отзыве высказан ряд замечаний, основными из которых являются следующие. При оценке достижимой точности эксперимента по измерению эффекта гравитационного замедления времени с “Радиоастроном” и наземной станцией Грин Бенк автор исходит из нереалистичного предположения о непрерывном приеме сигнала со спутника. По мнению оппонента, следовало бы учесть условия видимости спутника со станции и получить более реалистичную оценку точности эксперимента. Далее, при оценке точности эксперимента с двумя спутниками рассмотрен узкий класс

орбит с фиксированной высотой перигея порядка 1000 км. Следовало бы рассмотреть более широкий класс орбит, что позволило бы оценить возможность совместного проведения подобных экспериментов с другими космическими проектами, в первую очередь, космической РСДБ. Также, в работе не учтена чувствительность бортового стандарта к вариациям температуры и магнитного поля.

В отзыве **оппонента к.ф.-м.н. Барсукова Д.П.** подчеркивается, что проверка предсказаний ОТО и поиск всевозможных отклонений от них на максимально большом диапазоне расстояний, масс и энергий находятся в фокусе современной астрофизики и позволяют наложить ограничения на параметры альтернативных теорий гравитации, что, возможно, даст ключ к пониманию природы темной энергии. Отмечено, что развитая в диссертации аналитическая модель космического эксперимента по проверке ЭПЭ продемонстрировала, что измерение красного смещения может давать на 5-6 порядков более жесткие ограничения на допустимую величину нарушения ЭПЭ, чем прямые наблюдения за траекториями движения тел. Указано, что предложенная автором улучшенная методика учета эффекта движения фазового центра остронаправленных следящих антенн найдет применение как при дальнейшей обработке данных спутника Спектр-Р (“Радиоастрон”), так и будет полезна при проектировании будущих космических радиотелескопов. Отмечена важность полученного результата по проверке ЭПЭ с помощью “Радиоастрона”, поскольку он ограничивает величину нарушения ЭПЭ в большом диапазоне расстояний от центра Земли вплоть до 350 000 км. Данный результат позволяет наложить дополнительные ограничения на параметры альтернативных теорий гравитации и его, безусловно, нужно будет учитывать при их дальнейшем развитии. Указано, что выводы диссертации надежны и достоверны и являются новыми и научно значимыми. В отзыве дан ряд замечаний. Так, по мнению оппонента, стоило бы привести оценки ограничений на сдвиги частот вызванные негравитационными эффектами; обсудить возможность получить ограничения на величину других эффектов ОТО, например, на величину эффекта увлечения инерциальных систем отсчета и значения постньютоновских поправок к гравитационному потенциалу; обсудить вклад поправок, связанных с гравитационным полем Солнца и Луны. Остальные замечания относятся к оформлению диссертации и стилю изложения. Указано, что полученные диссертантом 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.

В отзыве **ведущей организации ИКИ РАН** анализируется содержание работы, дается обоснование актуальности выбранной темы исследования. Подчеркивается, что несмотря на имеющееся согласие с экспериментальными данными, теоретические работы по модификации ОТО становятся все более популярными, поскольку в пределе сильной гравитации такие модификации могли бы давать большие отличия от ОТО. Эксперименты по проверке постулатов ОТО на научных спутниках находятся в русле современных поисков отклонений от ее предсказаний, и это делает работу диссертанта весьма актуальной. В отзыве указано, что результаты диссертации стимулируют дальнейшие исследования эффекта гравитационного сдвига частоты стандартов с точностью второго порядка по гравитационному полю Земли. Исследования эффекта движения фазового центра узконаправленных наземных и бортовых антенн важны для широкого класса текущих и будущих экспериментов по доплеровскому слежению за космическими аппаратами. Отмечено, что существенным результатом является вывод о том, что эффект движения фазового центра можно практически устранить (уменьшить на 4-5 порядков) при использовании двух одновременно работающих линий связи с космическим аппаратом: однопутевой линии спутник-Земля, и двухпутевой – Земля-спутник-Земля. В части экспериментальной проверки ЭПЭ путем измерения эффекта гравитационного замедления времени с помощью космического аппарата Спектр-Р (“Радиоастрон”) подчеркивается, что подобные эксперименты представляют собой проверку той части принципа эквивалентности, которая утверждает “пространственную универсальность ЭПЭ”, т.е. независимость результатов опыта от места его проведения. Кроме того, интерес представляет методология экспериментов по проверке ЭПЭ путем измерения эффекта гравитационного смещения частоты коммуникационных радиосигналов со спутника, что может быть использовано в будущих экспериментах. Указано, что все результаты работы являются новыми и представляют научную ценность, образуя основу для дальнейших экспериментальных поисков отклонений от предсказаний ПЭ. Достоверность представленных результатов доказывается тщательностью анализа систематических и случайных ошибок, а также поддержкой публикаций в высокорейтинговых журналах. Высказан ряд замечаний. Так, неясно, почему автор не приводит никаких (даже предварительных) результатов совместной обработки одно и двух путевых данных, что должно существенно улучшить оценку параметра соответствия измерений формулам ОТО. Остальные замечания носят редакционный

характер. Указано, что отнесение диссертации к двум специальностям (01.03.02 – “Астрофизика и звездная астрономия” и 01.04.03 – “Радиофизика”) является обоснованным.

Во всех отзывах оппонентов и ведущей организации отмечается, что высказанные замечания никак не влияют на значимость и высокую оценку диссертационной работы Литвинова Д.А., а соискатель, безусловно, заслуживает присуждения ему степени кандидата физико-математических наук по специальностям 01.03.02 “Астрофизика и звездная астрономия” и 01.04.03 “Радиофизика”.

Соискатель представил полные ответы на все высказанные в отзывах замечания.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

Разработана математическая модель космических и наземно-космических экспериментов по проверке ЭПЭ, основанных на измерении эффекта гравитационного замедления времени с помощью высокостабильных часов, учитывающая гравитационное воздействие тел Солнечной системы, окрашенный характер шума часов и возможную зависимость нарушающего ЭПЭ вклада в гравитационное замедление времени от типа часов и источника гравитационного поля.

Впервые предложена и **разработана** идея эксперимента по проверке ЭПЭ с помощью околоземных спутников, оснащенных высокостабильными часами. Определена оптимальная конфигурация орбит спутников. **Показано**, что точность измерения гравитационного замедления времени в таком эксперименте может достичь 3×10^{-10} .

Впервые **разработана** математическая модель эффекта движения фазового центра бортовых и наземных остронаправленных антенн, учитывающая ошибки наведения. **Разработана** схема компенсации данного эффекта с помощью многоканальных линий связи.

Предложена схема компенсации нерелятивистского эффекта Доплера в экспериментах по доплеровскому слежению за космическими аппаратами, основанная на использовании широкополосных сигналов от различных источников.

Осуществлена проверка ЭПЭ путем измерения эффекта гравитационного замедления времени с точностью 3×10^{-2} на расстояниях от 10 до 350 тыс. км от Земли с использованием данных доплеровского слежения за космическим

аппаратом Спектр-Р (“Радиоастрон”), полученных в сеансах связи КА с наземными станциями слежения.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики заключается в следующем:

Результаты работы могут быть использованы при разработке концепций будущих экспериментов по проверке ЭПЭ и иных высокоточных экспериментов, использующих данные доплеровского слежения за КА.

Предложенная математическая модель экспериментов по проверке ЭПЭ, основанных на измерении эффекта гравитационного замедления времени, может быть использована для оценки точности, обработки и интерпретации данных наземных и космических экспериментов с атомными часами текущего и следующего поколений.

Предложенная концепция эксперимента с двумя околоземными спутниками открывает возможность улучшения точности проверки ЭПЭ на 5 порядков.

Разработанная математическая модель эффекта движения фазового центра антенн, учитывающая ошибки наведения, а также демонстрация компенсации данного эффекта с помощью схемы Gravity Probe A закладывают основу для будущих высокоточных экспериментов по доплеровскому слежению за КА с помощью остронаправленных антенн.

Разработанная схема компенсации нерелятивистского эффекта Доплера и тропосферного сдвига частоты, основанная на смешанном режиме синхронизации несущего и модулирующего сигналов линии связи с КА, может быть использована в будущих экспериментах по измерению гравитационного замедления времени.

Проведенное измерение эффекта гравитационного замедления времени с помощью КА Спектр-Р (“Радиоастрон”) подтверждает справедливость ЭПЭ с точностью 3×10^{-2} на расстояниях от 10 до 350 тыс. км от Земли и закладывает основания для дальнейших экспериментальных проверок данного принципа.

Оценка достоверности результатов исследования:

Высокая достоверность полученного экспериментального результата по проверке ЭПЭ подтверждается его согласием с опубликованными ранее результатами экспериментов Gravity Probe A и GREAT. Достоверность теоретических результатов обеспечивается надежностью методик, реализованных в программном обеспечении, которое использовалось при моделировании, и независимой проверкой результатов различными методами. Достоверность представленных результатов также подтверждается апробацией

на российских и зарубежных международных конференциях и семинарах и публикациями в ведущих международных рецензируемых изданиях.

Личный вклад соискателя состоит в разработке концепции проведения экспериментов с “Радиоастроном”, в обработке и анализе данных, разработке методов и программного обеспечения для обработки данных, в планировании наблюдений с “Радиоастроном”, участии в создании модели эффекта нарушения ЭПЭ, в проведении моделирования, в интерпретации полученных результатов, их обсуждении, формулировке выводов и подготовке публикаций.

Диссертационный совет отмечает, что диссертационная работа соответствует двум специальностям 01.03.02 (“Астрофизика и звездная астрономия”) и 01.04.03 (“Радиофизика”). Цель диссертационной работы находится в русле исследований по созданию и совершенствованию физической картины мира, раскрытию природы процессов и явлений в космическом пространстве – и поэтому соответствует специальности 01.03.02. Диссертация посвящена исследованию распространения электромагнитного излучения в космическом пространстве под действием гравитации со стороны тел Солнечной системы, что соответствует паспорту специальности 01.03.02, а также исследованию приема и распространения радиоволн, что соответствует паспорту специальности 01.04.03. Построенная в диссертации математическая модель гравитационного эксперимента по проверке ЭПЭ с учетом шумовых параметров часов, новая концепция эксперимента по проверке ЭПЭ с помощью двух космических аппаратов и новые результаты проверки ЭПЭ по данным проекта “Радиоастрон” вносят вклад в области науки, соответствующие специальности 01.03.02. Разработанная математическая модель эффекта движения фазового центра бортовых и наземных остронаправленных антенн и новая схема компенсации нерелятивистского эффекта Доплера составляют вклад диссертации в исследования антенных систем и способов передачи радиосигналов, что относится к специальности 01.04.03.

Для проведения защиты диссертации Д.А. Литвинова, тема которой охватывает две специальности, только по одной из которых диссертационному совету предоставлено право проведения защиты диссертаций, в состав диссертационного совета на одно заседание были введены три доктора наук по второй специальности 01.04.03 (Протокол № 2232 заседания диссертационного совета по приему к защите от 10 марта 2022 г. – в Приложении к данному заключению). Основное содержание диссертации соответствует научной

специальности 01.03.02, по которой диссертационный совет имеет право принимать к защите диссертации.

На заседании 9 июня 2022 года диссертационный совет принял решение присудить Литвинову Дмитрию Александровичу ученую степень кандидата физико-математических наук. При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 19 человек, из них 15 докторов наук и 1 кандидат наук по специальности 01.03.02, и 3 доктора наук по специальности 01.04.03, участвовавших в заседании, из 25 человек, входящих в расширенный состав совета, проголосовали:

за – 19,
против – 0,
недействительных бюллетеней – 0.

Заместитель председателя
диссертационного совета, д.ф.-м.н.

Ковалев Ю.Ю.

Ученый секретарь
диссертационного совета, к.ф.-м.н.

Шахворостова Н.Н.

09 июня 2022 г.