Отчет о выполнении проекта

№ 22-22-00248

«Верифицируемые космологические модели на основе телепараллельной гравитации и ее модификаций»,

в 2023 году

**Номер регистрации сведений о начинаемой научно-исследовательской работе в единой государственной информационной системе учета научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ гражданского назначения ([rosrid.ru](https://rosrid.ru/" \t "_blank))**:  
В соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 12 апреля 2013 г. № 327 «О единой государственной информационной системе учета научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ гражданского назначения».  
122032100125-9

**1.1. Заявленный в проекте план работы научного исследования на отчетный период**  
Формируется в соответствии с заявкой на участие в конкурсе.

1. Анализ расхождений модификаций TEGR и ОТО по фоновой динамике.

Будут рассмотрены точные решения уравнений космологической динамики для случая квадратичной модификации телепараллельного эквивалента гравитации Эйнштейна f(T)~T^{1/2} и модели со степенной зависимостью параметра Хаббла от функции неминимальной связи скалярного поля и кручения F~H^{n} в рамках анализа параметрических связей TERG и ее модификаций. Также данные модели предлагается обобщить посредством учета нелинейного самодействия скалярного поля и учета космологических эффектов для инфляции на основе нескольких скалярных полей на основе киральных космологических моделей. Данные модели предполагается сопоставить с космологическими моделями на основе скалярно-тензорных теорий гравитации с неминимальной связью скалярного поля и кривизны.

2. Расчет спектров реликтовых гравитационных волн для построенных космологических моделей.

На основе анализа эволюции тензорных возмущений планируется нахождение спектров реликтовых гравитационных волн для рассмотренных космологических моделей на основе предложенных модификаций телепараллельного эквивалента гравитации Эйнштейна. В данном случае, одной из основных задач является определение диапазона частот, в котором плотность энергии реликтовых гравитационных волн будет максимальной.

3. Анализ расхождений модификаций TEGR и ОТО по параметрам космологических возмущений и спектру реликтовых гравитационных волн.

На основе анализа эволюции космологических возмущений для рассмотренных инфляционных моделей с учетом модификаций TEGR и ОТО планируется получить численные оценки расхождений в значениях параметров космологических возмущений между моделями с одинаковыми фоновыми параметрами, но различным типом гравитации. Также планируется сопоставить спектры реликтовых гравитационных волн для случая TEGR и ОТО и их модификаций. Отметим, что для решения данной задачи необходимо рассматривать постинфляционную эволюцию предложенных космологических моделей.

В качестве развития анализа эволюции космологических возмущений для рассмотренных инфляционных моделей на основе модификаций TEGR планируется определение соотношений между параметрами моделей, которые соответствуют возможности их верификации по наблюдательным ограничениям на параметры космологических возмущений для произвольных параметров моделей.

4. Анализ возможностей непосредственного детектирования реликтовых гравитационных волн для рассмотренных космологических моделей.

Ввиду планируемого повышения чувствительности гравитационно-волновых детекторов следующего поколения, таких как Laser Interferometer Space Antenna (LISA), Deci-Hertz Interferometer Gravitational-Wave Observatory (DECIGO) , Big-Bang Observer (BBO), Einstein Telescope (ET) и др. в различных диапазонах частот, актуальной задачей данного исследования является оценка возможности непосредственной регистрации реликтовых гравитационных волн, предсказываемых в предложенных моделях, то есть анализ возможности их непосредственной верификации с помощью перспективных гравитационно-волновых детекторов.

**1.2. Заявленные научные результаты на конец отчетного периода**  
Формируется в соответствии с заявкой на участие в конкурсе.

1. На основе физических потенциалов, соответствующих реализации инфляционной стадии, и уравнений космологической динамики будет дана оценка влияния модификаций TEGR и ОТО на характер ускоренного расширения ранней вселенной, на выход из стадии инфляции и повторного ускоренного расширения вселенной по сравнению со стандартными космологическими моделями. В качестве физически мотивированных потенциалов будут рассматриваться потенциал Хиггса, потенциал Колемана-Вайнберга, потенциал в инфляции Старобинского и другие виды потенциалов скалярного поля.

В качестве актуальных моделей гравитации будут рассматриваются предложенные в первом году реализации проекта модели квадратичной модификации телепараллельного эквивалента гравитации Эйнштейна f(T)~T^{1/2} и модели со степенной зависимостью параметра Хаббла от функции неминимальной связи скалярного поля и кручения F~H^{n} в рамках анализа параметрических связей TERG и ее модификаций. Также будет дано обобщение для данных моделей посредством учета нелинейного самодействия скалярного поля и учета космологических эффектов для инфляции на основе нескольких скалярных полей на основе киральных космологических моделей. Также будут развиваться методы сопоставления космологических моделей на основе неиминимальной связи скалярного поля с кручением и кривизной, предложенные в первый год реализации проекта.

2. Будет выполнен расчет параметров космологических возмущений в первом (линейном) порядке теории космологических возмущений для моделей космологической инфляции с одним скалярным полем и киральных космологических моделей. Представление полученных результатов на диаграмме скалярный спектральный индекс – тензорно-скалярное отношение для сопоставления наблюдательным данным.

Используя методы расчета параметров космологических возмущений в космологических моделях на основе f(T)-гравитации с неминимальной связью скалярного поля и кручения, рассмотренные в первом году выполнения проекта, будет представлен анализ соответствия предложенных космологических моделей современным наблюдательным ограничениям, следующим из наблюдений анизотропии и поляризации реликтового излучения.

3. Будут установлены соотношения между параметрами модификаций TEGR и космологической динамикой, соответствующих верифицируемым по наблюдательным данным инфляционным моделям для произвольных потенциалов скалярного поля (полей). Модельно независимая оценка параметров космологических возмущений на основе данных соотношений.

Для решения данной задачи планируется использовать как ранее рассмотренные в рамках данного проекта модели модифицированной телепараллельной гравитации, так и поиск новых параметрических и функциональных связей между TEGR и ее модификациями, соответствующих возможности верификации космологических моделей по наблюдательным данным для произвольных фоновых параметров. Данный метод подразумевает возможность верификации по наблюдательным данным не за счет выбора конкретной модели инфляции, как это рассматривается в стандартных инфляционных моделях, а за счет специальной связи между параметрами моделей.

4. Будет выполнен расчет спектра реликтовых гравитационных волн для космологических моделей на основе модификаций TEGR и определение диапазона частот, соответствующего максимальной плотности энергии гравитационных волн. Оценка возможности их детектирования с помощью существующих и перспективных методов.

Данное направление исследований имеет важное значение как для непосредственного подтверждения справедливости применения инфляционной парадигмы при описании эволюции ранней вселенной, так и для анализа справедливости предложенных в проекте моделей космологической инфляции.

Планируется учет специфики спектра реликтовых гравитационных волн по отношению к стандартным инфляционным моделям, основанным на ОТО и TEGR, за счет их модификаций. Результатом данного анализа является определение диапазона частот реликтовых гравитационных волн, в котором их энергия максимальна, что соответствует оценке возможности их прямой регистрации с помощью перспективных детекторов гравитационных волн.

**1.3. Сведения о фактическом выполнении плана работы в отчетный период**  
***(фактически проделанная работа, от 3 до 10 стр.)***

В работе [1] предложено расширение подхода параметрических и функциональных отношений (ПФО); рассматривается применение ПФО к проблемам построения и анализа моделей космологической инфляции на основе скалярно-торсионной теории гравитации с неминимальной связью между скалярным полем и кручением.

Получены уравнения космологической динамики, исследованы их свойства для инфляционных моделей, основанных на скалярно-торсионной теории гравитации. Показано, что только два из трех уравнений независимы, и любые два из них можно использовать для полного описания космологической динамики. Предложено описание космологической модели, основанной на телепараллельном эквиваленте общей теории относительности (TEGR).

Рассматриваются космологические модели, основанные на скалярно-торсионной гравитации со степенной параметрической связью между параметром Хаббла и функцией неминимальной связи $F: F ∼ H^n$. Сформулированы условия построения феноменологически корректных космологических моделей, удовлетворяющие современным данным наблюдений. Кроме того, рассматривается два класса точных решений (обобщенных и специальных) уравнений космологической динамики для этой модели.

Далее рассматриваются параметры космологических возмущений для инфляционной модели на основе скалярно-торсионной гравитации со степенной связью, которые сопоставляются с моделями на базе TEGR.

Также восстанавливаются скалярно-торсионные теории гравитации, согласованные с физическим потенциалом скалярного поля. Основа этого подхода заключается в модификации космологической инфляционной модели с физическими потенциалами, которые не удовлетворяют наблюдательным ограничениям для случая TEGR. Модификация теории гравитации позволяет верифицировать инфляционные модели в соответствии с наблюдательными данными. Скалярно-торсионная гравитация, полученная этим методом, соответствует неминимальной связи для слабого поля.

Таким образом, результаты, полученные в работе [1] явились следствием развития метода, применяемого ранее в нашей группе в рамках космологии, основанной на модифицированных теориях гравитации с кривизной.

В работе [2] рассматривалось влияние неминимальной связи скалярного поля и кручения на космологическую динамику и потенциал скалярного поля для случая параметрической связи $F\sim H^{n}$ между параметром Хаббла и функцией неминимальной связи.

На примере степенной инфляции было показано, что неминимальная связь между скалярным полем и кручением может вызвать существенные изменения в космологической динамике.

Также для степенной параметризации влияния модификаций телепараллельного эквивалента общей теории относительности было показано, что потенциал скалярного поля изменяется следующим образом: $V~ F(\phi)V\_{(TEGR)}$, где $F(\phi)$ – функция неминимальной связи между скалярным полем и кручением.

Следует отметить, что учет неминимальной связи также позволяет верифицировать модели космологической инфляции по наблюдательным ограничениям на параметры космологических возмущений в отличие моделей с минимальной связью.

Не смотря на то, что предложенный подход к построению и анализу космологических моделей в данной статье был продемонстрирован для двух случаев степенной и экспоненциально-степенной инфляции, он может быть применен и к произвольным космологическим моделям.

В работах [3,4] рассматривались космологические модели, основанные на скалярно-торсионной гравитации с неминимальной связью между скалярным полем и кручением достаточно общего вида.

В данных работах получена система точных решений космологических динамических уравнений для произвольного параметра Хаббла H=H(t) и произвольной эволюции скалярного поля $\phi=\phi(t)$.

В работе [3] было показано, что модели космологической инфляции со степенным потенциалом скалярного поля, построенные на основе скалярно-торсионной гравитации вида $f(T,\phi)\_{STG}=-G(\phi)\sqrt{T}$ соответствуют наблюдательным ограничениям в отличие от случая ТЕГР или ОТО.

В работе [4] на основе этих обобщенных точных решений был сделан вывод, что гравитационное взаимодействие в рамках скалярно-торсионной гравитации в таких моделях должно определяться функцией $f(T,\phi)\_{STG}=-G(\phi) \sqrt{T}$, что соответствует некоторым поправкам к обычному скалярно-торсионному обобщению телепараллельного эквивалента общей теории относительности $f(T,\phi)\_{STG}=-G(\phi)T$.

Было показано, что на инфляционной квазидеситтеровской стадии эволюции Вселенной эти поправки весьма малы.

На основе соответствия произвольных моделей космологической инфляции, основанных на обобщенных точных решениях наблюдательным ограничениям на значения параметров космологических возмущений, установлена следующая связь между неминимальной функцией связи и потенциалом скалярного поля $G(\phi)\ sim\left[V(\phi)\right]^{-\frac{1}{2(m-1)}}$, то есть в данных моделях тип неминимальной связи между скалярным полем и кручением зависит от типа потенциала скалярного поля.

На основе предложенного подхода были определены вид эволюции потенциала $V=V(t)$ и функции неминимальной связи $G=G(t)$ для квазидеситтеровской динамики ускоренного расширения Вселенной с параметром Хаббла $H\simeq const$.

Также, в качестве примера предложенного подхода, был реконструирован тип скалярно-торсионной гравитации для космологической инфляции с экспоненциальным потенциалом скалярного поля.

В работе [5] предложен метод построения неограниченного числа точных решений уравнений космологической динамики для случая гравитации Эйштейна и телепараллельного эквиввалента общей относительности. Точные космологические решения, полученные в рамках данного подхода, подразумевают сложные типы эволюции скалярного поля и динамики расширения вселенной.

В качестве примера рассмотрены решения уравнений космологической динамики в виде рядов, каждый член которых и весь ряд являются точными решениями. Показано, что при определенном выборе параметров, полученные решения соответствуют корректной динамике расширения вселенной на различных стадиях ее эволюции.

Развитием предложенного метода является как его модификация для построения неограниченного числа точных решений уравнений космологической динамики для космологических моделей на основе скалярно-торсионной гравитации, так и развитие методов верификации полученных решений по наблюдательным ограничениям на параметры космологических возмущений.

В работе [6] в рамках анализа связанных состояний гравитационных и электромагнитных волн рассматривался метод детектирования гравитационных волн по их влиянию на внешнее магнитное поле. Показано, что данный метод более эффективен для детектирования низкочастотных гравитационных волн.

Тем не менее, для непосредственного детектирования гравитационных волн данным способом требуется повышение чувствительности СКВИД-магнетометров и увеличение индукции генерируемого магнитного поля.

В работе [7] рассмотрена специфика спектра реликтовых гравитационных волн, для космологических моделей, основанных на различных модифицированных теориях гравитации, включая скалярно-торсионную гравитацию и гравитацию Эйнштейна.

Показано, что модификации гравитации Эйнштейна и ее телепараллельного эквивалента приводят к возрастанию плотности энергии реликтовых гравитационных волн в высокочастотной плотности спектра, что позволяет рассматривать диапазон ГВ порядка нескольких мегагерц в качестве перспективного диапазона для настройки детекторов гравитационных волн.

Рассматривается возможность обнаружения высокочастотных реликтовых гравитационных волн с помощью процесса преобразования гравитонов в фотоны в постоянном и переменном магнитном поле. Проводится сравнение чувствительности детекторов этого типа с чувствительностью других существующих и перспективных детекторов высокочастотных гравитационных волн.

На основе анализа оценки чувствительности различных типов детекторов высокочастотных гравитационных волн был сделан вывод, что наибольшей чувствительностью при детектировании высокочастотных реликтовых гравитационных волн (в мегагерцовом диапазоне) обладают детекторы, основанные на использовании гравитационно-оптического резонанса в интерферометрах Фабри-Перо.

Таким образом, дальнейшее развитие данного метода детектирования реликтовых гравитационных волн может рассматриваться в качестве перспективного направления по непосредственной проверке появления тензорных возмущений на инфляционной стадии эволюции вселенной и их дальнейшей эволюции.

[1] Chervon S.V. and Fomin I.V. Reconstruction of Scalar-Torsion Gravity Theories from the Physical Potential of a Scalar Field // Symmetry. 2023, 15, 291.

[2] Fomin I.V., Chervon S.V., Bolshakova K.A. Modified inflationary models based on scalar-torsion gravity // arXiv: 2312.01142v1 [gr-qc] (направлена в журнал Universe)

[3] Dentsel E. S., Fomin I. V. Exact solutions in cosmological models with non-minimal coupling of scalar field and torsion // Пространство, время и фундаментальные взаимодействия №1, C. 46–50 https://doi.org/10.17238/issn2226-8812.2023.1.46–50 (2023 г.)

[4] Fomin I.V., Chervon S.V., Dentsel E.S. Reconstruction the scalar-torsion gravity version from the frame of exact cosmological solutions // arXiv: 2312.01145v1 [gr-qc] (направлена в журнал Symmetry)

[5] Fomin I.V., Dentsel E.S. Inflationary models based on generalized exact cosmological solutions // Пространство, время и фундаментальные взаимодействия (2023 г.) (в печати)

[6] Gladyshev V.O., Kauts V.L., Kayutenko A.V., Morozov A.N., Nikolaev P.P., Fomin I.V., Sharandin E.A. The analysis of coupled gravitational and electromagnetic waves // Пространство, время и фундаментальные взаимодействия (2023 г.) (в печати)

[7] Manucharyan G.D., Fomin I.V., Gladyshev V.O., Litvinov D.A. On the detection of high-frequency relic gravitational waves // Пространство, время и фундаментальные взаимодействия (2023 г.) (в печати)

**Все планируемые в отчетный период работы выполнены полностью:**

да

**1.4. Сведения о достигнутых конкретных научных результатах в отчетном периоде  
*(от 1 до 5 стр.)***

В работе [4] [Chervon S.V. and Fomin I.V. Symmetry. 2023, 15, 291] предложено расширение подхода параметрических и функциональных отношений (ПФО); рассматривается применение ПФО к проблемам построения и анализа моделей космологической инфляции на основе скалярно-торсионной теории гравитации с неминимальной связью $F: F ∼ H^n$. Сформулированы условия построения феноменологически корректных космологических моделей, удовлетворяющие современным данным наблюдений. Кроме того, рассматривается два класса точных решений уравнений космологической динамики для этой модели. Рассматриваются параметры космологических возмущений, которые сопоставляются с моделями на базе TEGR. Указан способ восстановления скалярно-торсионных теорий гравитации, согласованные с физическим потенциалом скалярного поля. Основа этого подхода заключается в модификации космологической инфляционной модели с физическими потенциалами, которые не удовлетворяет наблюдательным ограничениям для случая TEGR. Модификация теории гравитации позволяет верифицировать инфляционные модели в соответствии с наблюдательными данными. Скалярно-торсионная гравитация, полученная этим методом, соответствует неминимальной связи для слабого поля.

В работе [5] [Fomin I.V., Chervon S.V., Bolshakova K.A. Modified inflationary models based on scalar-torsion gravity // arXiv: 2312.01142v1 [gr-qc] (направлена в журнал Universe)] рассматривалось влияние неминимальной связи скалярного поля и кручения на космологическую динамику и потенциал скалярного поля для случая параметрической связи $F\sim H^{n}$ между параметром Хаббла и функцией неминимальной связи. Отмечается, что учет неминимальной связи позволяет верифицировать модели инфляции по наблюдательным ограничениям на параметры космологических возмущений в отличие моделей с минимальной связью. Предложенный подход к построению и анализу может быть применен к произвольным космологическим моделям.

В работах [6] [Dentsel E. S., Fomin I. V Пространство, время и фундаментальные взаимодействия №1, C. 46–50 (2023 г.)] и [7] [Fomin I.V., Chervon S.V., Dentsel E.S. Reconstruction the scalar-torsion gravity version from the frame of exact cosmological solutions // arXiv: 2312.01145v1 [gr-qc] (направлена в журнал Symmetry)] рассматривались космологические модели, основанные на скалярно-торсионной гравитации с неминимальной связью между скалярным полем и кручением достаточно общего вида. В данных работах получена система точных решений космологических динамических уравнений для произвольного параметра Хаббла H=H(t) и произвольной эволюции скалярного поля $\phi=\phi(t)$. Установлена связь между неминимальной функцией связи и потенциалом скалярного поля $G(\phi)\ sim\left[V(\phi)\right]^{-\frac{1}{2(m-1)}}$, которая указывает на то, что в данных моделях тип неминимальной связи между скалярным полем и кручением зависит от типа потенциала скалярного поля.

В работе [8] [Fomin I.V., Dentsel E.S. Пространство, время и фундаментальные взаимодействия (2023 г.) (в печати)] предложен метод построения неограниченного числа точных решений уравнений космологической динамики для случая гравитации Эйнштейна и телепараллельного эквивалента общей относительности. Точные космологические решения, полученные в рамках данного подхода, подразумевают сложные типы эволюции скалярного поля и динамики расширения вселенной. В качестве примера рассмотрены решения уравнений космологической динамики в виде рядов, каждый член которых и весь ряд являются точными решениями. Показано, что при определенном выборе параметров, полученные решения соответствуют корректной динамике расширения вселенной на различных стадиях ее эволюции.

В работе [9] [Gladyshev V.O., Kauts V.L., Kayutenko A.V., Morozov A.N., Nikolaev P.P., Fomin I.V., Sharandin E.A. Пространство, время и фундаментальные взаимодействия (2023 г.) (в печати)] в рамках анализа связанных состояний гравитационных и электромагнитных волн рассматривался метод детектирования гравитационных волн по их влиянию на внешнее магнитное поле. Показано, что данный метод более эффективен для детектирования низкочастотных гравитационных волн. Тем не менее, для непосредственного детектирования гравитационных волн данным способом требуется повышение чувствительности СКВИД-магнетометров и увеличение индукции генерируемого магнитного поля.

В работе [10] [Manucharyan G.D., Fomin I.V., Gladyshev V.O., Litvinov D.A. Пространство, время и фундаментальные взаимодействия (2023 г.) (в печати)] рассмотрена специфика спектра реликтовых гравитационных волн, для космологических моделей, основанных на различных модифицированных теориях гравитации, включая скалярно-торсионную гравитацию и гравитацию Эйнштейна. Показано, что модификации гравитации Эйнштейна и ее телепараллельного эквивалента приводят к возрастанию плотности энергии реликтовых гравитационных волн в высокочастотной плотности спектра, что позволяет рассматривать диапазон ГВ порядка нескольких мегагерц в качестве перспективного диапазона для настройки детекторов гравитационных волн. На основе анализа оценки чувствительности различных типов детекторов высокочастотных гравитационных волн был сделан вывод, что наибольшей чувствительностью при детектировании высокочастотных реликтовых гравитационных волн (в мегагерцовом диапазоне) обладают детекторы, основанные на использовании гравитационно-оптического резонанса в интерферометрах Фабри-Перо.

**Все запланированные в отчетном периоде научные результаты достигнуты:**

да

**В ходе реализации проекта выполнялись эксперименты с участием лабораторных животных:**  
нет

**1.5. Описание выполненных в отчетном периоде работ и полученных научных результатов для публикации на сайте РНФ**

***на русском языке****(до 3 страниц текста, также указываются ссылки на информационные ресурсы в сети Интернет (url-адреса), посвященные проекту)*

Предложена степенная параметризация влияния неминимальной связи скалярного поля и кручения на параметры космологических моделей включая как параметры фоновой динамики, так и параметры космологических возмущений. Данный метод позволяет рассматривать телепарараллельную гравитацию с неминимальной связью скалярного поля и кручения (скалярно-торсионную гравитацию) в качестве параметрически зависимого обобщения телепараллельного эквивалента общей теории относительности (TEGR). Значения параметра, характеризующего влияние неминимальной связи на характер реализации инфляционной стадии и эволюцию космологических возмущений, определяются из наблюдательных ограничений на параметры космологических возмущений по наблюдениям анизотропии и поляризации реликтового излучения. Также показано, что учет неминимальной связи скалярного поля и кручения позволяет верифицировать модели космологической инфляции по наблюдательным ограничениям на параметры космологических возмущений в отличие моделей с минимальной связью.

Из точных решений уравнений космологической динамики достаточно общего вида получен новый тип скалярно-торсионной гравитации, который может рассматриваться в качестве альтернативного ранее предложенным. Спецификой предложенной теории гравитации является возможности верификации инфляционных моделей с произвольными потенциалами скалярного поля в линейном порядке зависимости тензорно-скалярного отношения от спектрального индекса скалярных возмущений r~(1-n\_S), в отличие от моделей на основе гравитации Эйнштейна и ее телепараллельного эквивалента, для которых верифицированные модели имеют квадратичную зависимость r~(1-n\_S)^2 и строятся для конкретных потенциалов. В результате анализа предложенной скалярно-торсионной гравитации было показано, что вне зависимости от типа динамики ускоренного расширения ранней вселенной характер неминимальной связи скалярного поля и кручения определяется только видом потенциала скалярного поля.

Предложен метод построения неограниченного числа точных решений уравнений космологической динамики для случая гравитации Эйнштейна и телепараллельного эквивалента общей относительности. Принцип построения точных решений такого вида основан на приведении уравнений космологической динамики к определенной форме с генерирующей функцией специального вида. В качестве примера рассмотрены решения уравнений космологической динамики в виде рядов, каждый член которых и весь ряд являются точными решениями. Показано, что при определенном выборе параметров, полученные решения соответствуют корректной динамике расширения вселенной на различных стадиях ее эволюции. В силу возможности построения неограниченного числа точных решений, дальнейшее исследование свойств данной генерирующей функции позволит определить общие свойства космологических моделей, построенных на основе данных теорий гравитации.

Рассмотрена специфика постинфляционной эволюции реликтовых гравитационных волн, для космологических моделей, основанных на различных модифицированных теориях гравитации, включая скалярно-торсионную гравитацию и гравитацию Эйнштейна. Показано, что модификации гравитации Эйнштейна и ее телепараллельного эквивалента приводят к появлению дополнительной стадии преобладания «жесткой энергии» и возрастанию плотности энергии реликтовых гравитационных волн в высокочастотной плотности спектра. Показано, что параметр состояния «жесткой энергии» зависит от типа модифицированной теории гравитации и приводятся оценки данного параметра для различных модификаций ОТО и TEGR.

Данный результат позволяет рассматривать диапазон реликтовых гравитационных волн порядка нескольких мегагерц в качестве перспективного диапазона для настройки гравитационно-волновых детекторов. На основе анализа оценки чувствительности различных типов детекторов высокочастотных гравитационных волн было показано, что наибольшей чувствительностью при детектировании высокочастотных реликтовых гравитационных волн в мегагерцовом диапазоне обладают детекторы, основанные на использовании гравитационно-оптического резонанса в интерферометрах Фабри-Перо, который можно рассматривать в качестве перспективного подхода к решению задачи непосредственного детектирования реликтовых гравитационных волн.

***на английском языке***

A power-law parameterization of the influence of the non-minimal coupling of the scalar field and torsion on the parameters of cosmological models is proposed, including both the parameters of the background dynamics and the parameters of cosmological perturbations. This method allows us to consider teleparallel gravity with a non-minimal coupling between the scalar field and torsion (scalar-torsion gravity) as a parametrically dependent generalization of the teleparallel equivalent of general relativity (TEGR). The values of the parameter characterizing the influence of the non-minimal coupling on the nature of the inflationary stage and the evolution of cosmological perturbations are determined from observational consytaints on the parameters of cosmological perturbations based on observations of anisotropy and polarization of the cosmic microwave background radiation (CMB). It is also shown that taking into account the non-minimal coupling of the scalar field and torsion allows one to verify models of cosmological inflation using observational constraints on the parameters of cosmological perturbations, in contrast to models with minimal coupling

From exact solutions of the equations of cosmological dynamics of a fairly general form, a new type of scalar-torsion gravity was obtained, which can be considered as an alternative to those previously proposed. A specific feature of the proposed theory of gravity is the possibility of verifying inflationary models with arbitrary scalar field potentials in the linear order of dependence of the tensor-scalar ratio on the spectral index of scalar perturbations r~(1-n\_S), in contrast to models based on Einstein gravity and its teleparallel equivalent, for which verified models have a quadratic dependence r~(1-n\_S)^2 and are built for specific potentials. As a result of the analysis of the proposed scalar-torsion gravity, it was shown that, regardless of the type of dynamics of the accelerated expansion of the early universe, the nature of the non-minimal connection between the scalar field and torsion is determined only by the type of the scalar field potential.

A method is proposed for constructing an unlimited number of exact solutions to the equations of cosmological dynamics for the case of Einstein gravity and the teleparallel equivalent of general relativity. The principle of constructing exact solutions of this type is based on reducing the equations of cosmological dynamics to a certain form with a generating function of a special type. As an example, solutions to the equations of cosmological dynamics in the form of series are considered, each term of which and the entire series are exact solutions. It is shown that with a certain choice of parameters, the solutions obtained correspond to the correct dynamics of the expansion of the universe at various stages of its evolution. Due to the possibility of constructing an unlimited number of exact solutions, further study of the properties of this generating function will make it possible to determine the general properties of cosmological models built on the basis of these theories of gravity.

The specificity of the post-inflationary evolution of relict gravitational waves is considered for cosmological models based on various modified theories of gravity, including scalar-torsion gravity and Einstein gravity. It is shown that modifications of Einstein gravity and its teleparallel equivalent lead to the emergence of an additional stage of the predominance of “stiff energy” and an increase in the energy density of relict gravitational waves in the high-frequency spectrum density. It is shown that the parameter of the “stiff energy” state depends on the type of modified theory of gravity, and estimates of this parameter are given for various modifications of general relativity and TEGR.

This result allows us to consider the range of relict gravitational waves of the order of several megahertz as a promising range for tuning gravitational wave detectors. Based on an analysis of the sensitivity assessment of various types of high-frequency gravitational wave detectors, it was shown that detectors based on the use of gravitational-optical resonance in Fabry-Perot interferometers have the greatest sensitivity when detecting high-frequency relict gravitational waves in the megahertz range, which can be considered as a promising approach to solving the problem of direct detection of relict gravitational waves.

**1.6. Файл с дополнительными материалами** *(при необходимости представления экспертному совету РНФ дополнительных графических материалов к отчету по проекту, файл размером до 3 Мб в формате pdf)*  
[скачать...](https://grant.rscf.ru/file/stage/rep/000000000000004282250-3_/FileRep.pdf)  
  
**1.7. Перечень публикаций в отчетном периоде по результатам проекта** *(добавляются из списка публикаций, зарегистрированных участниками проекта)*

**1.** [*Червон С.В., Фомин И.В., (Chervon S.V., Fomin I.V.)***Reconstruction of Scalar-Torsion Gravity Theories from the Physical Potential of a Scalar Field**Symmetry (2023 г.)](https://www.mdpi.com/2073-8994/15/2/291)**SCOPUS**

**2.** *Фомин И.В., Денцель Е.С. (Fomin I.V., Dentsel E.S.)***Inflationary models based on generalized exact cosmological solutions**Пространство, время и фундаментальные взаимодействия (2023 г.) **иные ББД РИНЦ**

**3.** *Манучарян Г.Д., Фомин И.В., Гладышев В.О., Литвинов Д.А. (Manucharyan G.D., Fomin I.V., Gladyshev V.O., Litvinov D.A.)***On the detection of high-frequency relic gravitational waves**Пространство, время и фундаментальные взаимодействия (2023 г.) **иные ББД РИНЦ**

**4.** *Гладышев В.О., Кауц В.Л., Каютенко А.В., Морозов А.Н., Николаев П.П., Фомин И.В., Шарандин Е.А. (Gladyshev V.O., Kauts V.L., Kayutenko A.V., Morozov A.N., Nikolaev P.P., Fomin I.V., Sharandin E.A.)***The analysis of coupled gravitational and electromagnetic waves**Пространство, время и фундаментальные взаимодействия (2023 г.) **иные ББД РИНЦ**

**1.8. В отчетном периоде возникли исключительные права на результаты интеллектуальной деятельности (РИД), созданные при выполнении проекта:**

Нет

**1.9. Показатели реализации проекта**  
**Показатели кадрового состава научного коллектива***рассчитываются как округленное до целого отношение суммы количества месяцев, в которых действовали в отчетном периоде в отношении членов научного коллектива приказы о составе научного коллектива, к количеству месяцев, в которых действовало в отчетном периоде соглашение.*.  
Плановые значения указываются только для показателей, предусмотренных соглашением.

| **Показатели** | **Единица измерения** | **2023 год** | |
| --- | --- | --- | --- |
| **план** | **факт** |
| Число членов научного коллектива | человек | 4 | 4 |
| Число исследователей в возрасте до 39 лет (включительно) среди членов научного коллектива | человек | 2 | 2 |
| Число аспирантов (интернов, ординаторов, адъюнктов) очной формы обучения среди членов научного коллектива | человек |  | 0 |
| Количество лиц категории «Вспомогательный персонал» | человек |  | 0 |

**Публикационные показатели реализации проекта:***значения показателей формируются автоматически на основе данных, представленных в форме 2о (накопительным итогом). Показатели публикационной активности приводятся в отношении публикаций, имеющих соответствующую ссылку на поддержку Российского научного фонда и на организацию (в последнем случае – за исключением публикаций, созданных в рамках оказания услуг сторонними организациями)*.  
Плановые значения указываются только для показателей, предусмотренных соглашением.

**1.10. Информация о представлении достигнутых научных результатов на научных мероприятиях** **(конференциях, симпозиумах и пр.)**  
*(в том числе форма представления – приглашенный доклад, устное выступление, стендовый доклад)*

IV летняя международная молодежная школа «Гравитация, космология и астрофизика». 3-7 июля 2023, (МГТУ им. Н.Э. Баумана, Россия)

Ссылка на программу: https://pirt.bmstu.ru/ru\_ru/программа-летней-школы-2021/

1. Фомин Игорь. Модели космологической инфляции на основе теории гравитации Эйнштейна и ее модификаций (устный доклад)

2.Червон Сергей. Динамические модели ускоренного расширения Вселенной (устный доклад)

ХХIII International Meeting Physical Interpretations of Relativity Theory PIRT- 2023. 3-6 July 2023.( МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия)

Ссылка на программу: https://pirt.bmstu.ru/ru\_ru/научная-программа/

1.Fomin Igor, Dentsel Evgenii. Inflationary models based on the generalized exact cosmological solutions (устный доклад)

2.Chervon Sergey, Bolshakova Katerina. Exact power-law solutions in the scalar-torsion cosmology (устный доклад)

3.Chaadaeva Tatyana, Fomin Igor, Chervon Sergey. Torsion Scalar Gravity with a Galileon-type field self-interaction (устный доклад)

4.Manucharyan Gevorg, Fomin Igor, Gladyshev Vladimir, Litvinov Dmitry. On the detection of high-frequency relic gravitational waves (устный доклад)

VI Международная зимняя школа-семинар по гравитации, астрофизике и космологии «Петровские чтения - 2023». 27 ноября-1 декабря 2023

( КФУ, Казань, Россия) .

Ссылка на программу: https://kpfu.ru/portal/docs/F861170063/Programma\_v5.pdf

1.С.В. Червон. Chiral cosmology in teleparallel modified gravity (устный доклад)

2.И.В. Фомин. Cosmological models based on scalar-torsion gravity (устный доклад)

3.К.А. Большакова. Solutions in scalar-torsion gravity for power-law evolution of the scalar field (устный доклад)

4.Т.И. Чаадаева. Некоторые космологические решения скалярно-торсионной гравитации с полем самодействия галилеонного типа (устный доклад)

International Scientific Conference "Space. Time. Civilization. STC-2023", 4-7 November, Cairo, Egypt

Ссылка на програму: https://stc2023.com/#program

Igor Fomin. Cosmological models based on the modified gravity theories (устный доклад)

**1.11. Все публикации, информация о которых представлена в пункте 1.9, имеют указание на получение финансовой поддержки от Фонда:**

да

**1.12. Информация (при наличии) о публикациях в СМИ, посвященных результатам проекта, с упоминанием Фонда:**

Нет

**1.13. Форма трудового договора с руководителем проекта соответствует указанной в исходной заявке на участие в конкурсе (п. 2.16 Формы 2):**  
«Организация будет являться основным местом работы (характер работы – не дистанционный): да»

да

**Заключенный с руководителем проекта трудовой (срочный трудовой) договор не является договором о дистанционной работе и предусматривает продолжительность рабочего времени исходя из ежедневного или еженедельного графика работы (за исключением (ст. 104 ТК РФ) работников, занятых на круглосуточных непрерывных работах, а также на других видах работ, где по условиям производства (работы) не может быть соблюдена установленная ежедневная или еженедельная продолжительность рабочего времени).  
В случае осуществления работы в режиме гибкого рабочего времени (ст. 102 ТК РФ), была обеспечена отработка руководителем проекта суммарного количества рабочих часов в течение рабочего дня или недели.  
Руководитель проекта при его реализации проживает и осуществляет трудовую деятельность на территории Российской Федерации. Организация в соответствии с подпунктом «е» пункта 2.3.13 грантового соглашения своевременно информировала Фонд о предоставлении руководителю проекта отпуска (отпусков) без сохранения заработной платы общей длительностью более 90 дней в течение предшествующих 365 календарных дней:**

да

**1.14. План работ научного исследования в отчетном году не изменялся и выполнен в полном объеме:**

да

**1.15. Реализация проекта была направлена на проведение исследований в целях развития новых для научных коллективов тематик (в том числе, на определение объекта и предмета исследования, составление плана исследования, выбор методов исследования) и формирование исследовательских команд**

да

**1.16. Результаты исследований по проекту представлены в виде доклада на очной научной конференции, тематика которой включает в себя тематику проекта**

да

**Ссылка на Программу конференции в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет»:**

IV летняя международная молодежная школа «Гравитация, космология и астрофизика». 3-7 июля 2023, (МГТУ им. Н.Э. Баумана, Россия)

Ссылка на программу: https://pirt.bmstu.ru/ru\_ru/программа-летней-школы-2021/

1. Фомин Игорь. Модели космологической инфляции на основе теории гравитации Эйнштейна и ее модификаций (устный доклад)

2.Червон Сергей. Динамические модели ускоренного расширения Вселенной (устный доклад)

ХХIII International Meeting Physical Interpretations of Relativity Theory PIRT- 2023. 3-6 July 2023.( МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия)

Ссылка на программу: https://pirt.bmstu.ru/ru\_ru/научная-программа/

1.Fomin Igor, Dentsel Evgenii. Inflationary models based on the generalized exact cosmological solutions (устный доклад)

2.Chervon Sergey, Bolshakova Katerina. Exact power-law solutions in the scalar-torsion cosmology (устный доклад)

3.Chaadaeva Tatyana, Fomin Igor, Chervon Sergey. Torsion Scalar Gravity with a Galileon-type field self-interaction (устный доклад)

4.Manucharyan Gevorg, Fomin Igor, Gladyshev Vladimir, Litvinov Dmitry. On the detection of high-frequency relic gravitational waves (устный доклад)

VI Международная зимняя школа-семинар по гравитации, астрофизике и космологии «Петровские чтения - 2023». 27 ноября-1 декабря 2023

( КФУ, Казань, Россия) .

Ссылка на программу: https://kpfu.ru/portal/docs/F861170063/Programma\_v5.pdf

1.С.В. Червон. Chiral cosmology in teleparallel modified gravity (устный доклад)

2.И.В. Фомин. Cosmological models based on scalar-torsion gravity (устный доклад)

3.К.А. Большакова. Solutions in scalar-torsion gravity for power-law evolution of the scalar field (устный доклад)

4.Т.И. Чаадаева. Некоторые космологические решения скалярно-торсионной гравитации с полем самодействия галилеонного типа (устный доклад)

International Scientific Conference "Space. Time. Civilization. STC-2023", 4-7 November, Cairo, Egypt

Ссылка на програму: https://stc2023.com/#program

Igor Fomin. Cosmological models based on the modified gravity theories (устный доклад)

Настоящим подтверждаю:

* самостоятельность и авторство текста отчета о выполнении проекта;
* при обнародовании результатов, полученных в рамках поддержанного РНФ проекта, научный коллектив ссылался на получение финансовой поддержки проекта от РНФ и на организацию, на базе которой выполнялось исследование;
* согласие с опубликованием РНФ сведений из отчета (итогового отчета) о выполнении проекта, в том числе в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет»;
* проект не имеет других источников финансирования;
* проект не является аналогичным\*\*\*\*\* по содержанию проекту, одновременно финансируемому из других источников.

\*\*\*\*\* Проекты, аналогичные по целям, задачам, объектам, предметам и методам исследований, а также ожидаемым результатам. Экспертиза на совпадение проводится экспертным советом Фонда.

**Подпись руководителя проекта** \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ /**С.В. Червон**/