Итоговый отчет о выполнении проекта

№ 22-22-00248

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

* 1. **Заявленный в проекте план работы на весь срок выполнения проекта, предлагаемые методы и подходы** *(в соответствии с исходной заявкой на участие в конкурсе)*

Для выполнения задач проекта будут применяться стандартные и оригинальные методы.

К стандартным методам относятся следующие:

1. Интегрирование уравнений скалярной космологии с заданным потенциалом самодействия или масштабным фактором

2. Приближенный анализ космологической динамики в режиме медленного скатывания и быстрых осцилляций.

3. Качественный анализ обыкновенных дифференциальных уравнений космологической инфляции.

4. Методы численного моделирования, которые позволяют проводить сопоставление с наблюдательными данными и находить ограничения для параметров космологической модели.

Также будут использоваться оригинальные методы, разработанные участниками проекта:

1. Метод точной настройки потенциала и эволюции скалярного поля по масштабному фактору. Суть метода заключается в том, что зависимость масштабного фактора от времени определена из наблюдательных данных, например масштабный фактор хорошо определен при эволюции вселенной на стадии преобладания излучения или вещества. Зная такую зависимость, можно определить потенциал и кинетическую энергию скалярного поля, которые поддерживают заданную эволюцию масштабного фактора.

2. Метод точной настройки масштабного фактора и потенциала по заданной эволюции скалярного поля. В этом случае считается, что нам известна эволюция скалярного поля, скажем из решения уравнения Клейна – Гордона в пространстве Минковского при заданном физическом потенциале, и мы полагаем возможность аналогичного его поведения в космологии.

3. Метод потенциала полной энергии или метод суперпотенциала. Данный метод основан на поиске функции, связывающей потенциал и кинетическую энергию таким образом, что уравнение поля принимает форму приближения медленного скатывания, в котором потенциал заменен на суперпотенциал.

4. Метод построения моделей космологической инфляции на основе квазилинейной связи между кинетической энергией скалярного поля, что приводит к ускоренному расширению ранней Вселенной, близкому к стадии де Ситтера, то есть квазиэкспоненциальному расширению. Данный подход является альтернативным по отношению к широко применяемому в космологии приближению медленного скатывания, в котором условие квазиэкспоненциального расширения обусловлено нивелированием вклада кинетической энергии поля в космологическую динамику. Учет кинетической энергии скалярного поля определяет преимущество предложенного подхода по отношению к приближению медленного скатывания.

5. Метод генерирования новых космологических решений из известных на основе преобразований параметра Хаббла, который является эффективным подходом к построению актуальных космологических моделей как с точки зрения их верификации но наблюдательным ограничениям на значения спектральных параметров космологических возмущений, так и генерирования точных решений уравнений динамики ранней Вселенной.

6. Метод построения точных решений космологической динамики с дополнительным материальным полем и ненулевой кривизной, также редукции двухполевых киральных космологических моделей к моделям с одним полем, что позволяет обобщить анализ космологической динамики на различные стадии эволюции Вселенной.

7. Построение моделей космологической инфляции на основе скалярно-тензорной гравитации, в которых неминимальное взаимодействие скалярного поля и кривизны индуцирует отклонения от экспоненциального расширения.

8. Использование параметрических и функциональных связей между модифицированными теориями гравитации и ОТО, что приводит к возможности оценки расхождений с гравитацией Эйнштейна и дает дополнительные возможности для анализа космологических моделей, построенных на их основе.

9. Методы анализа расхождений между космологическими моделями на основе ОТО и модифицированных теорий гравитации в пространстве Фридмана-Робертсона-Уокера по космологической динамике и параметрам космологических возмущений.

10. Принцип построения космологических моделей на основе модифицированных теорий гравитации, удовлетворяющих наблюдательным ограничениям на параметры космологических возмущений для произвольных потенциалов скалярного поля и произвольной динамики.

Общий план работы:

В рамках данного проекта первый этап подразумевает обобщение перечисленных методов построения и анализа космологических моделей на случай телепараллельного эквивалента гравитации Эйнштейна и его модификаций. На втором этапе анализируются расхождения между модификациями ОТО и TEGR по фоновой динамике и параметрам космологических возмущений.

План работ на 2022 год:

1. Детальный обзор литературных источников по космологическим моделям на основе телепараллельного эквивалента гравитации Эйнштейна и его модификаций.

2. Вывод уравнений космологической динамики для рассматриваемых моделей.

3. Построение киральных космологических моделей на основе модификаций TEGR.

4. Построение точных космологических решений для космологических моделей на основе модификаций TEGR, включающих скалярно-тензорные модификации и неминимальное взаимодействие скалярного поля и скаляра Гаусса-Бонне.

Публикация 3 статей (Web of Science, Scopus) и 1 статьи (РИНЦ) по результатам работы.

Детализация первого года проекта:

1. В качестве источника ранней и поздней стадий ускоренного расширения планируется рассмотреть эволюцию скалярного поля квинтэссенции на основе скалярно-тензорных модификаций телепараллельного эквивалента гравитации Эйнштейна в том числе используя связь параметров данных теорий гравитации и TEGR и другие перечисленные выше методы. На основе анализа уравнений космологической динамики планируется выделить классы точных решений и определить фоновые параметры космологических моделей (тип космологической динамики, вид потенциалов, характер эволюции скалярного поля) соответствующих данным классам решений.

2. Построение мультиполевых киральных космологических моделей (ККМ) с различным типом взаимодействий между полями на основе TEGR. Построение космологических моделей на основе точных решений уравнений динамики для данных ККМ.

3. Определение класса метрик пространства полей (целей), редуцирующих данные модели к однополевым, также построение и анализ точных космологических решений для данного класса моделей.

4. Построение космологических моделей на основе модификаций TEGR с неминимальным взаимодействием скалярного поля и скаляра Гаусса-Бонне на основе функциональных и параметрических связей между телепараллельным эквивалентом гравитации Эйнштейна и его модификациями на фоне пространства ФРУ. Оценка ограничений на функцию неминимального взаимодействия (или константу неминимальной связи) исходя их требований ускоренного расширения ранней вселенной для канонического скалярного поля.

Ожидаемыми результатами проекта в 2022 являются:

1. Построение киральных космологических моделей на основе модификаций телепараллельного эквивалента гравитации Эйнштейна (TERG);

2. Определение функциональных и параметрических связей между телепараллельным эквивалентом гравитации Эйнштейна и его модификациями на фоне пространства ФРУ;

3. Построение точных космологических решений для космологических моделей на TEGR и его модификаций

План работ на 2023 год:

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

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

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

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

Публикация 3 статей (Web of Science, Scopus) и 1 статьи (РИНЦ) по результатам работы.

Детализация второго года проекта:

1. На основе физических потенциалов, соответствующих реализации инфляционной стадии, и уравнений космологической динамики производится оценка влияния модификаций TEGR и ОТО на характер ускоренного расширения ранней вселенной, 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.

2. 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.

3. Нахождение соотношений 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.

4. 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.

Ожидаемыми результатами реализации проекта в 2023 являются:

1. Непосредственная оценка расхождений модификаций TEGR и ОТО по фоновой динамике для физически мотивированных потенциалов скалярного поля. Оценка влияния замены скалярной кривизны на кручение на характер ускоренного расширения ранней вселенной и современной стадии эволюции.

2. Расчет параметров космологических возмущений для рассмотренных моделей. Верификация предложенных моделей космологической инфляции по наблюдательным ограничениям на значения параметров космологических возмущений.

3. Построение космологических моделей на основе модификаций TEGR, удовлетворяющих наблюдательным ограничениям на параметры космологических возмущений для произвольных потенциалов скалярного поля и произвольной динамики.

4. Расчет спектра реликтовых гравитационных волн для космологических моделей на основе модификаций TEGR и оценка расхождений со случаем ОТО и ее модификаций.

При завершении проекта предполагается обобщение полученных ранее результатов в рамках сопоставления влияния модификаций TEGR и ОТО на параметры космологических моделей и методов оценки данного влияния.

**5.2. Содержание фактически проделанной работы, полученные результаты***(за все годы, не более 10 стр.)*

В работе [1] были исследованы двухполевые космологические модели с фантомным и каноническим полями как обобщение квинтомной модели эволюции глобальной Вселенной, включая раннюю инфляционную стадию на основе гравитации Эйнштейна, аналогичные двухполевым космологическим моделям на основе телепараллельноного эквивалента общей теории относительности (TEGR). Построение киральных космологических моделей на основе модификаций TEGR выполнено с учетом работ H. Abedi and M. Salti [Gen. Rel. Grav., 47, 93 (2015)] и M. Hohman et al [arXiv:1801.05786] . Рассмотренные в статье [1] модели представлены в виде киральной космологической модели с пространством целей, конформном двумерному псевдоевклидову пространству. Найдены три вида точных решений для постоянного потенциала путем прямого интегрирования уравнений динамики и предложен новый метод построения точных космологических решений в рамках N-формализма числа е-фолдов для случая обобщенных экспоненциальных потенциалов.

В рамках данного подхода предложен новый класс точных космологических решений в инфляционных моделях с дублетом канонического и фантомного полей. Было показано, что точные решения уравнений космологической динамики могут быть получены в явном виде для любого типа масштабного фактора a(t), который подразумевает явную обратную зависимость t=t(a). Полученные решения анализировались для случая квази де Ситтеровского расширения Вселенной с учетом кинетической энергии скалярных полей, в отличие от стандартной процедуры медленного скатывания, в рамках которой кинетическая энергия скалярных полей предполагается пренебрежимо малой по сравнению с потенциалом.

Также было показано, что эффективная космологическая постоянная, которую можно рассматривать как источник повторного ускоренного расширения Вселенной, может быть индуцирована дублетом канонического и фантомного полей на больших временах в рассматриваемых моделях. Показано, что данный результат является общим свойством предложенного класса космологических решений в моделях с каноническим и фантомным полем. Данное свойство отличает предложенные модели как от однополевых космологических моделей с квинтэссенцией, так и от мультиполевых космологических моделей, в которых одно из полей является источником ускоренного расширения ранней вселенной, а другое – источником ускоренного расширения вселенной в современную эпоху ее эволюции.

Был проведен анализ динамики космологических возмущений в рассматриваемых моделях, в рамках которого было показано, что энтропийные возмущения в данном случае пренебрежимо малы, и возмущения кривизны индуцируются только адиабатическими модами. На основе данного результата был проведен расчет параметров космологических возмущений в рассматриваемых инфляционных моделях, которые сопоставлялись с наблюдательными ограничениями для оценки постоянных параметров предложенных моделей.

Отмечена перспектива дальнейшего развития данных космологических моделей посредством анализа дополнительных эффектов за счет неминимальной связи скалярных полей со скаляром Гаусса-Бонне для учета квантовых поправок в низкоэнергетическом пределе.

В работе [2] представлен новый класс точных решений в космологических моделях на основе модифицированной f(T)-гравитации с неминимальной связью скалярного поля и кручения для произвольной динамики ускоренного расширения ранней вселенной и произвольных (в том числе, полученных с позиций квантовой теории поля) потенциалов скалярного поля. Предложенные точные решения получены для квадратичной модификации телепараллельного эквивалента гравитации Эйнштейна $f(T)~T^{1/2}$ и произвольного вида неминимальной связи скалярного поля и кручения. Также было отмечено, что данные точные космологические решения не приводятся к случаю TEGR.

В рамках предложенного подхода была рассмотрена модель космологической инфляции с потенциалом скалярного поля, соответствующего модели открытой тахионной струны на основе квадратичной модификации телепараллельного эквивалента гравитации Эйнштейна $f(T)~T^{1/2}$. Для анализа возможности верификации моделей космологической инфляции на основе модификаций теории гравитации рассматривались параметр Хаббла и эволюция скалярного поля, соответствующих случаю хиггсовского потенциала для инфляционной модели на основе TEGR и ОТО, которая не соответствует наблюдательным ограничениям на значения параметров космологических возмущений. Необходимо отметить, что обычным способом построения верифицированной инфляционной модели на основе хиггсовского потенциала является учет неминимальной связи скалярного поля и кривизны.

На основе непосредственного расчета параметров космологических возмущений и сопоставления их значений с современными наблюдательными ограничениями, следующими из наблюдений анизотропии и поляризации реликтового излучения спутником PLANCK, было показано, что в рамках рассматриваемой модификации TEGR предложенная инфляционная модель верифицируется по наблюдательным данным.

В качестве перспективы дальнейших исследований отмечена возможность построения моделей космологической инфляции с другими фоновыми параметрами на основе квадратичной модификации телепараллельного эквивалента гравитации Эйнштейна $f(T)~T^{1/2}$, а также анализ различий в спектрах реликтовых гравитационных волн для предложенных моделей и космологических моделей на основе TEGR и ОТО, а также известных метрических модификаций гравитации Эйнштейна с ненулевой кривизной.

Другой тип телепараллельной гравитации с неминимальной связью скалярного поля и кручения рассматривался в работе [3] в рамках анализа влияния модификаций TERG и ОТО на возможность верификации моделей космологической инфляции по наблюдательным данным.

Показана полная эквивалентность моделей космологической инфляции на основе гравитации Эйнштейна и TEGR по фоновым решениям, условиям медленного скатывания и параметрам космологических возмущений и проанализированы их различия для случая неминимальной связи скалярного поля с кривизной или кручением.

Предложены новые модели космологической инфляции на основе связи скалярного поля с кручением и степенным соотношением между функцией неминимальной связи и параметром Хаббла $F~H^{n}$, в котором значению n=0 соответствует случай телепараллельного эквивалента гравитации Эйнштейна. Таким образом, предложенные модели соответствуют параметрическому расширению TEGR.

Для данных моделей космологической инфляции получены параметры космологических возмущений, представлен способ построения параметрически зависимых обобщений точных решений уравнений космологической динамики для случая TEGR и предложена интерпретация процедуры верификации по наблюдательным ограничениям в виде определения возможных значений параметра n ввиду зависимости значений параметров космологических возмущений от данного параметра в рассматриваемых моделях космологической инфляции.

В качестве примера рассмотрена модель степенной инфляции, для которой данный параметр имеет отрицательные значения -1<n<-0.8. Данный результат характеризует различия между моделями космологической инфляции на основе неминимальной связи скалярного поля с кручением и кривизной, поскольку в той же работе [3] было показано, что для случая n=2 космологические модели с неминимальной связью поля и кривизны соответствуют наблюдательным ограничениям для произвольных фоновых параметров.

В работе [4] 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 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.

Таким образом, результаты, полученные в работе [4] явились следствием развития метода, применяемого ранее в нашей группе в рамках космологии, основанной на модифицированных теориях гравитации с кривизной.

В работе [5] 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 [6,7] 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 [6] 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 [7] 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 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 [8] 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.

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 [9] 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] 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] Fomin I. V., Chervon S. V. New method of exponential potentials reconstruction based on given scale factor in phantonical two-field models // JCAP. 2022. Vol. 2022. Issue 4. Art.no 025. DOI:10.1088/1475-7516/2022/04/025

[2] Денцель Е. С., Фомин И. В. Обобщенные точные решения в космологических моделях с неминимальной связью скалярного поля и кручения // Пространство, время и фундаментальные взаимодействия. 2022. № 3. C. 111–119.

[3] Фомин И. В. Методы построения и верификации инфляционных моделей ранней вселенной // Пространство, время и фундаментальные взаимодействия. 2022. № 3. C. 49–62.

[4] 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.

[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)

[6] 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.)

[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)

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

[9] 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)

[10] 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 работы выполнены полностью:**

да

**5.3. Основные результаты выполнения проекта** *(не более 10 стр.)*

Построены киральные космологические модели для модификаций TEGR с учетом работ H. Abedi and M. Salti [Gen. Rel. Grav., 47, 93 (2015)] и M. Hohman et al [arXiv:1801.05786] .

Двухполевые космологические модели с фантомным и каноническим полями представлены в виде киральной космологической модели с пространством целей, конформном двумерному псевдоевклидову пространству, на основе телепараллельного эквивалента общей теории относительности (TEGR) как обобщение квинтомной модели эволюции глобальной Вселенной, включая раннюю инфляционную стадию. Найдены три вида точных решений для постоянного потенциала путем прямого интегрирования уравнений динамики и предложен новый метод построения точных космологических решений в рамках N-формализма числа е-фолдов для случая обобщенных экспоненциальных потенциалов. В рамках данного подхода предложен новый класс точных космологических решений в инфляционных моделях с дублетом канонического и фантомного полей. Показано, что точные решения уравнений космологической динамики могут быть получены в явном виде для любого типа масштабного фактора a(t), который подразумевает явную обратную зависимость t=t(a). Полученные решения анализировались для случая квазидеситтеровского расширения Вселенной с учетом кинетической энергии скалярных полей, в отличие от стандартной процедуры медленного скатывания, в рамках которой кинетическая энергия скалярных полей предполагается пренебрежимо малой по сравнению с потенциалом.

Также было показано, что эффективная космологическая постоянная, которую можно рассматривать как источник повторного ускоренного расширения Вселенной, может быть индуцирована дублетом канонического и фантомного полей на больших временах в рассматриваемых моделях. Показано, что данный результат является общим свойством предложенного класса космологических решений в моделях с каноническим и фантомным полем. Данное свойство отличает предложенные модели как от однополевых космологических моделей с квинтэссенцией, так и от мультиполевых космологических моделей, в которых одно из полей является источником ускоренного расширения ранней вселенной, а другое – источником ускоренного расширения вселенной в современную эпоху ее эволюции. Анализ динамики космологических возмущений в рассматриваемых моделях показал, что энтропийные возмущения в данном случае пренебрежимо малы, и возмущения кривизны индуцируются только адиабатическими модами. На основе данного результата был проведен расчет параметров космологических возмущений в рассматриваемых инфляционных моделях, которые сопоставлялись с наблюдательными ограничениями для оценки постоянных параметров предложенных моделей.

Отмечена перспектива дальнейшего развития данных космологических моделей посредством анализа дополнительных эффектов за счет неминимальной связи скалярных полей со скаляром Гаусса-Бонне для учета квантовых поправок в низкоэнергетическом пределе.

Получен новый класс точных решений в космологических моделях на основе модифицированной f(T)-гравитации с неминимальной связью скалярного поля и кручения для произвольной динамики ускоренного расширения ранней вселенной и произвольных (в том числе, полученных с позиций квантовой теории поля) потенциалов скалярного поля. Найдены точные решения для квадратичной модификации телепараллельного эквивалента гравитации Эйнштейна $f(T)~T^{1/2}$ и произвольного вида неминимальной связи скалярного поля и кручения. Полученные точные космологические решения не приводятся к случаю TEGR. В рамках предложенного подхода была рассмотрена модель космологической инфляции с потенциалом скалярного поля, соответствующего модели открытой тахионной струны на основе квадратичной модификации телепараллельного эквивалента гравитации Эйнштейна $f(T)~T^{1/2}$.

Как известно, случай хиггсовского потенциала для инфляционной модели на основе TEGR и ОТО не соответствует наблюдательным ограничениям на значения параметров космологических возмущений. Нами показано, на основе непосредственного расчета параметров космологических возмущений и сопоставления их значений с современными наблюдательными ограничениями, что в рамках рассматриваемой модификации TEGR предложенная инфляционная модель верифицируется по наблюдательным данным.

В качестве перспективы дальнейших исследований отмечена возможность построения моделей космологической инфляции с другими фоновыми параметрами на основе квадратичной модификации телепараллельного эквивалента гравитации Эйнштейна $f(T)~T^{1/2}$, а также анализ различий в спектрах реликтовых гравитационных волн для предложенных моделей и космологических моделей на основе TEGR и ОТО, а также известных метрических модификаций гравитации Эйнштейна с ненулевой кривизной.

Предложен другой тип телепараллельной гравитации с неминимальной связью скалярного поля и кручения, вида $F: F ∼ H^n$, в рамках анализа влияния модификаций TERG и ОТО на возможность верификации моделей космологической инфляции по наблюдательным данным. Показана полная эквивалентность моделей космологической инфляции на основе гравитации Эйнштейна и TEGR по фоновым решениям, условиям медленного скатывания и параметрам космологических возмущений и проанализированы их различия для случая неминимальной связи скалярного поля с кривизной или кручением. Предложены новые модели космологической инфляции на основе связи скалярного поля с кручением и степенным соотношением между функцией неминимальной связи и параметром Хаббла $F~H^{n}$, в котором значению n=0 соответствует случай телепараллельного эквивалента гравитации Эйнштейна. Таким образом, предложенные модели соответствуют параметрическому расширению TEGR. Для данных моделей космологической инфляции получены параметры космологических возмущений, представлен способ построения параметрически зависимых обобщений точных решений уравнений космологической динамики для случая TEGR и предложена интерпретация процедуры верификации по наблюдательным ограничениям в виде определения возможных значений параметра n ввиду зависимости значений параметров космологических возмущений от данного параметра в рассматриваемых моделях космологической инфляции. В качестве примера рассмотрена модель степенной инфляции, для которой данный параметр имеет отрицательные значения -1<n<-0.8. Полученный результат характеризует различия между моделями космологической инфляции на основе неминимальной связи скалярного поля с кручением и кривизной, поскольку для случая n=2 космологические модели с неминимальной связью поля и кривизны соответствуют наблюдательным ограничениям для произвольных фоновых параметров.

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). Построены 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. Рассчитаны 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 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.

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

Исследовано 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. Предложенный подход к построению и анализу космологических моделей может быть применен и к произвольным космологическим моделям.

Исследованы космологические модели, основанные на скалярно-торсионной гравитации с неминимальной связью между скалярным полем и кручением достаточно общего вида. Получена система точных решений космологических динамических уравнений для произвольного параметра Хаббла H=H(t) и произвольной эволюции скалярного поля $\phi=\phi(t)$. 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.

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 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 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.

Предложен оригинальный 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. 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 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.

Изучена 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.

**Все запланированные научные результаты достигнуты:**

да

**5.4. Описание выполненных работ и полученных научных результатов** (в том числе степень выполнения проекта) 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)*

В работе [1] Fomin I., Chervon S. JCAP. 2022. V. 2022. 4, 025 двухполевые космологические модели с фантомным и каноническим полями на основе TEGR представлены в виде киральной модели с пространством целей, конформном двумерному псевдоевклидову пространству. Найдены три класса точных решений для постоянного потенциала и предложен новый метод построения точных решений в рамках N-формализма для случая обобщенных экспоненциальных потенциалов. Предложен новый класс точных решений в явном виде для любого типа масштабного фактора a(t). Решения получены для квазидеситтеровского расширения Вселенной с учетом кинетической энергии скалярных полей. Показано, что эффективная космологическая постоянная, как источник повторного ускоренного расширения Вселенной, индуцирована дублетом канонического и фантомного полей на больших временах в рассматриваемых моделях. Анализ динамики космологических возмущений в рассматриваемых моделях показал, что энтропийные возмущения пренебрежимо малы, и возмущения кривизны индуцируются только адиабатическими модами. На основе этого результата был проведен расчет параметров космологических возмущений в рассматриваемых инфляционных моделях, которые для верификации результатов сопоставлялись с наблюдательными ограничениями для оценки постоянных параметров предложенных моделей.

В работе [2] Денцель Е. С., Фомин И. В. Пространство, время и фундаментальные взаимодействия. 2022. № 3. C. 111–119 представлен новый класс точных решений в космологических моделях на основе модифицированной f(T)-гравитации с неминимальной связью скалярного поля и кручения для произвольной динамики ускоренного расширения ранней вселенной и произвольных потенциалов скалярного поля. Точные решения получены для квадратичной модификации TEGR $f(T)~T^{1/2}$ и произвольного вида неминимальной связи скалярного поля и кручения.

В работе [3] Фомин И. В. Пространство, время и фундаментальные взаимодействия. 2022. № 3. C. 49–62 дан анализ влияния модификаций TERG и ОТО на возможность верификации моделей космологической инфляции по наблюдательным данным. Показана полная эквивалентность моделей космологической инфляции на основе ОТО и TEGR по фоновым решениям, условиям медленного скатывания и параметрам космологических возмущений. Рассмотрены их различия для случая неминимальной связи скалярного поля с кривизной или кручением. Предложены новые модели космологической инфляции на основе связи скалярного поля с кручением и степенным соотношением между функцией неминимальной связи и параметром Хаббла $F~H^{n}$, в котором значению n=0 соответствует случай TEGR.

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.

***на английском языке***

In [1] Fomin I., Chervon S. JCAP. 2022. V. 2022. 4, 025 two-field cosmological models with phantom and canonical fields based on TEGR are presented in the form of a chiral model with a target space conformal to two-dimensional pseudo-Euclidean space. Three classes of exact solutions for a constant potential are found and a new method for constructing exact solutions within the N-formalism for the case of generalized exponential potentials is proposed. A new class of exact solutions is proposed in explicit form for any type of scale factor a(t). Solutions are obtained for the quasi-de-Sitter expansion of the Universe taking into account the kinetic energy of scalar fields. It is shown that the effective cosmological constant, as a source of repeated accelerated expansion of the Universe, is induced by a doublet of canonical and phantom fields at large times in the models under consideration. An analysis of the dynamics of cosmological perturbations in the models under consideration showed that entropy perturbations are negligible, and curvature perturbations are induced only by adiabatic modes. Based on this result, the parameters of cosmological disturbances in the inflation models under consideration were calculated, which, to verify the results, were compared with observational constraints to estimate the constant parameters of the proposed models.

In [2] Dentzel E. S., Fomin I. V. Space, time and fundamental interactions. 2022. No. 3. P. 111–119 a new class of exact solutions in cosmological models based on modified f(T)-gravity with a non-minimal connection between the scalar field and torsion is presented for arbitrary dynamics of the accelerated expansion of the early universe and arbitrary scalar field potentials. Exact solutions are obtained for the quadratic modification TEGR $f(T)~T^{1/2}$ and an arbitrary form of non-minimal connection between the scalar field and torsion.

In [3] Fomin I.V. Space, time and fundamental interactions. 2022. No. 3. P. 49–62 an analysis of the influence of modifications of TERG and General Relativity on the possibility of verifying cosmological inflation models using observational data is given. The complete equivalence of cosmological inflation models based on general relativity and TEGR is shown in terms of background solutions, slow roll-off conditions and parameters of cosmological perturbations. Their differences are considered for the case of a non-minimal connection between the scalar field and curvature or torsion. New models of cosmological inflation are proposed based on the connection of the scalar field with torsion and the power relation between the non-minimal coupling function and the Hubble parameter $F~H^{n}$, in which the value n=0 corresponds to the TEGR case.

In [4] Chervon S.V. and Fomin I.V. Symmetry. 2023, 15, 291 an extension of the approach of parametric and functional relations (PFR) is proposed; The application of PFD to the problems of constructing and analyzing models of cosmological inflation based on the scalar-torsion theory of gravity with a non-minimal connection $F: F ∼ H^n$ is considered. Conditions for constructing phenomenologically correct cosmological models that satisfy modern observational data are formulated. In addition, two classes of exact solutions of the cosmological dynamics equations for this model are considered. The parameters of cosmological perturbations are considered and compared with models based on TEGR. A method for reconstructing scalar-torsion theories of gravity consistent with the physical potential of the scalar field is indicated. The basis of this approach is to modify the cosmological inflationary model with physical potentials that do not satisfy observational constraints for the TEGR case. Modification of the theory of gravity allows one to verify inflationary models in accordance with observational data. Scalar-torsion gravity obtained by this method corresponds to a non-minimal coupling for a weak field.

In [5] Fomin I.V., Chervon S.V., Bolshakova K.A. Modified inflationary models based on scalar-torsion gravity // arXiv: 2312.01142v1 [gr-qc] (submitted to the journal Universe) considered the influence of a non-minimal coupling of the scalar field and torsion on cosmological dynamics and the potential of the scalar field for the case of parametric coupling $F\sim H^{n}$ between the Hubble parameter and the non-minimal coupling function. It is noted that taking into account the non-minimal coupling makes it possible to verify inflation models using observational restrictions on the parameters of cosmological perturbations, in contrast to models with minimal coupling. The proposed approach to construction and analysis can be applied to arbitrary cosmological models.

In [6] Dentsel E. S., Fomin I. V. Space, time and fundamental interactions No. 1, pp. 46–50 (2023) and [7] Fomin I. V., Chervon S. V., Dentsel E. S. Reconstruction of the scalar-torsion gravity version from the frame of exact cosmological solutions // arXiv: 2312.01145v1 [gr-qc] (submitted to the journal Symmetry) considered cosmological models based on scalar-torsion gravity with a non-minimal coupling between the scalar field and torsion sufficiently general appearance. In these works, a system of exact solutions of cosmological dynamic equations was obtained for an arbitrary Hubble parameter H=H(t) and an arbitrary evolution of the scalar field $\phi=\phi(t)$. A connection has been established between the non-minimal coupling function and the scalar field potential $G(\phi)\ sim\left[V(\phi)\right]^{-\frac{1}{2(m-1)}}$, which indicates that in these models the type of non-minimal connection between the scalar field and torsion depends on the type of the scalar field potential.

In [8] Fomin I.V., Dentsel E.S. Space, Time and Fundamental Interactions (2023) (in press) a method is proposed for constructing an unlimited number of exact solutions of the equations of cosmological dynamics for the case of Einstein gravity and the teleparallel equivalent of general relativity. The exact cosmological solutions obtained within this approach imply complex types of evolution of the scalar field and the dynamics of the expansion of the universe. 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.

In [9] Gladyshev V.O., Kauts V.L., Kayutenko A.V., Morozov A.N., Nikolaev P.P., Fomin I.V., Sharandin E.A. Space, Time and Fundamental Interactions (2023) (in press) within the framework of the analysis of coupled states of gravitational and electromagnetic waves, a method for detecting gravitational waves by their influence on the external magnetic field was considered. It is shown that this method is more effective for detecting low-frequency gravitational waves. However, to directly detect gravitational waves using this method, it is necessary to increase the sensitivity of SQUID magnetometers and increase the induction of the generated magnetic field.

In [10] Manucharyan G.D., Fomin I.V., Gladyshev V.O., Litvinov D.A. Space, time and fundamental interactions (2023) (in press) the specificity of the spectrum 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 an increase in the energy density of relict gravitational waves in the high-frequency spectrum density, which allows us to consider the GW range 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 concluded 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).

**5.5. Перечень публикаций по проекту за весь срок выполнения проекта** *(заполняется автоматически на основании форм 2о)*

**1.** [*Фомин И.В., Червон С.В. (Fomin I.V., Chervon S.V.)***New method of exponential potentials reconstruction based on given scale factor in phantonical two-field models**](https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1475-7516/2022/04/025/meta)Journal of Cosmology and Astroparticle Physics Vol. 2022 , Issue 4 .- Art.no 025, DOI: 10.1088/1475-7516/2022/04/025 <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2022/04/025> (2022 г.) **иные источники финансирования**

**2.** [*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**](https://www.mdpi.com/2073-8994/15/2/291)Symmetry vol. 15, no. 2, стр. 291 <https://doi.org/10.3390/sym15020291> (2023 г.) **SCOPUS**

**3.** *Фомин И.В., Денцель Е.С. (Fomin I.V., Dentsel E.S.)*[**Inflationary models based on generalized exact cosmological solutions**](https://grant.rscf.ru/file/pubs/file/00000000000000009262885_/file.pdf)Пространство, время и фундаментальные взаимодействия (2023 г.) **РИНЦ иные ББД**

**4.** *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**](https://grant.rscf.ru/file/pubs/file/00000000000000009267950_/file.pdf)Пространство, время и фундаментальные взаимодействия (2023 г.) **РИНЦ иные ББД**

**5.** *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**](https://grant.rscf.ru/file/pubs/file/00000000000000009268157_/file.pdf)Пространство, время и фундаментальные взаимодействия (2023 г.) **РИНЦ иные ББД**

**6.** *Денцель Е.С., Фомин И.В. (Dentsel E. S., Fomin I. V.)*[**Exact solutions in cosmological models with non-minimal coupling of scalar field and torsion**](https://grant.rscf.ru/file/pubs/file/00000000000000007264481_/file.pdf)Пространство, время и фундаментальные взаимодействия №1, C. 46–50 [https://doi.org/10.17238/issn2226-8812.2023.1.46–50](https://doi.org/10.17238/issn2226-8812.2023.1.46%E2%80%9350) (2023 г.) **РИНЦ**

**7.** *Фомин И.В. (Fomin I.V.)*[**Методы построения и верификации инфляционных моделей ранней вселенной**](https://grant.rscf.ru/file/pubs/file/00000000000000007274021_/file.pdf)Пространство, время и фундаментальные взаимодействия номер 3, выпуск 40, страницы 49-62 <https://doi.org/10.17238/issn2226-8812.2022.3.49-62> (2022 г.) **РИНЦ**

**8.** *Денцель Е. С., Фомин И.В. (Dentsel E.S., Fomin I. V.)*[**Обобщенные точные решения в космологических моделях с неминимальной связью скалярного поля и кручения**](https://grant.rscf.ru/file/pubs/file/00000000000000007274056_/file.pdf)Пространство, время и фундаментальные взаимодействия номер 3, том 40, страницы 111-119 <https://doi.org/10.17238/issn2226-8812.2022.3.111-119> (2022 г.) **РИНЦ**

**5.6. Возникли исключительные права на результаты интеллектуальной деятельности (РИД), созданные при выполнении проекта:**

Нет

**5.7. Публикационные показатели реализации проекта** *(нарастающим итогом, данные формируются автоматически)*Показатели публикационной активности приводятся в отношении публикаций, имеющих соответствующую ссылку на поддержку Российского научного фонда.
Плановые значения указываются только для показателей, предусмотренных соглашением.

| **Показатели** | **Единица измерения** | **2022 г.** | **2023 г.** |
| --- | --- | --- | --- |
| **план** | **факт** | **план** | **факт** |
| Количество содержащих результаты исследований по проекту различных публикаций1 членов научного коллектива в ведущих рецензируемых2 российских и зарубежных научных изданиях**1 К указанным публикациям не относятся публикации, содержащие ссылки на иные, помимо данного гранта РНФ, источники финансирования; публикации, направленные в издательство до начала практической реализации проекта (до заключения грантового соглашения); публикации типа «тезисы».**2 Издания, индексируемые в библиографических зарубежных базах данных публикаций и/или Russian Science Citation Index (RSCI). | Ед. | 3 | 0 | 6 | 4 |
| в том числе: |  |  |  |  |  |
| в изданиях, индексируемых в библиографических базах данных Web of Science и/или SCOPUS | Ед. |  | 0 |  | 1 |
| в изданиях, входящих в первый квартиль (Q1) по импакт-фактору JCR Science Edition или JCR Social Sciences Edition, по SJR (принадлежность издания к Q1 в Scopus определяется по базе данных http://www.scimagojr.com/) | Ед. |  | 0 |  | 0 |
| в **российских** изданиях, входящих во второй квартиль (Q2) по импакт-фактору JCR Science Edition или JCR Social Sciences Edition, по SJR (принадлежность издания к Q2 в Scopus определяется по базе данных http://www.scimagojr.com/) | Ед. |  | 0 |  | 0 |
| в изданиях, индексируемых в библиографической базе данных RSCI | Ед. |  | 0 |  | 0 |
| в изданиях, индексируемых в иных зарубежных библиографических базах данных | Ед. |  | 0 |  | 3 |
| Количество публикаций3 с учетом квартилей3 Указанное количество публикаций может изменяться в случае принятия экспертным советом РНФ решения об отказе учета публикации в качестве отчетной или отказа от применения повышающего коэффициента в отношении публикации в изданиях, входящих в первый (Q1) или второй (Q2) квартили. | Ед. | 3 | 0 | 6 | **4** |

**5.8. Научным коллективом опубликовано с указанием на получение финансовой поддержки только от Фонда по направлению научного исследования не менее 6 содержащих результаты исследований по проекту различных публикаций членов научного коллектива в ведущих рецензируемых российских и зарубежных научных изданиях (с учетом квартилей):**нет

***Пояснения о причинах невыполнения данного пункта соглашения (п.2.6.5 соглашения):***

В отчете за 2022 год при описании следующих опубликованных статей:

6. Денцель Е.С., Фомин И.В. (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.)

7. Фомин И.В. (Fomin I.V.) Методы построения и верификации инфляционных моделей ранней вселенной Пространство, время и фундаментальные взаимодействия номер 3, выпуск 40, страницы 49-62 https://doi.org/10.17238/issn2226-8812.2022.3.49-62 (2022 г.)

8. Денцель Е. С., Фомин И.В. (Dentsel E.S., Fomin I. V.) Обобщенные точные решения в космологических моделях с неминимальной связью скалярного поля и кручения Пространство, время и фундаментальные взаимодействия номер 3, том 40, страницы 111-119 https://doi.org/10.17238/issn2226-8812.2022.3.111-119 (2022 г.)

не было указано, что журнал "Пространство, время и фундаментальные взаимодействия" кроме РИНЦ индексируется в зарубежной базе данных CrossRef.

Ссылка с информацией о журнале на e-library: https://www.elibrary.ru/title\_about\_new.asp?id=38058.

На данный момент, эти статьи не учтены в пункте 5.7 Публикационные показатели реализации проекта.

Поправки к информации по данным статьям в настоящий момент на сайте РНФ внести невозможно.

После учета данных статей количество публикаций (с указанием поддержки гранта) с учетом квартилей за весь срок выполнения проекта - 7, что соответствует выполнению п.2.6.5 соглашения.

**Сведения о публикациях требуют корректировки (в том числе имеется дублирование)**

да

***Пояснения о необходимых изменениях в публикациях, представленных в отчетах прошлых лет:***

Требуется добавление статьи (2022 год)

Морозов А.Н., Голяк И.С., Фомин И.В., Червон С.В. Детекторы высокочастотных гравитационных волн на основе гравитационно-оптического резонанса. Пространство, время и фундаментальные взаимодействия. 2022. № 41. C. 49-61.

http://stfi.ru/ru/issues/2022/04/STFI\_2022\_04\_Morozov.html

которая не была включена в отчет за 2022 год.

В статье указано, что работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 22–22–00248.

К информации о статьях:

1. Денцель Е. С., Фомин И.В. (Dentsel E.S., Fomin I. V.) Обобщенные точные решения в космологических моделях с неминимальной связью скалярного поля и кручения Пространство, время и фундаментальные взаимодействия номер 3, том 40, страницы 111-119 https://doi.org/10.17238/issn2226-8812.2022.3.111-119 (2022 г.)

2. Фомин И.В. (Fomin I.V.) Методы построения и верификации инфляционных моделей ранней вселенной Пространство, время и фундаментальные взаимодействия номер 3, выпуск 40, страницы 49-62 https://doi.org/10.17238/issn2226-8812.2022.3.49-62 (2022 г.)

3. Денцель Е.С., Фомин И.В. (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. Морозов А.Н., Голяк И.С., Фомин И.В., Червон С.В. Детекторы высокочастотных гравитационных волн на основе гравитационно-оптического резонанса. Пространство, время и фундаментальные взаимодействия. 2022. № 41. C. 49-61.

необходимо добавить, что кроме РИНЦ журнал "Пространство, время и фундаментальные взаимодействия" индексируется в зарубежной базе данных CrossRef.

Ссылка с информацией о журнале на e-library: https://www.elibrary.ru/title\_about\_new.asp?id=38058

**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»:**

III летняя международная молодежная школа «Гравитация, космология и астрофизика», посвященная памяти академика РАН В.И. Пустовойта, 4-9 июля 2022, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Ссылка на программу: https://pirt.bmstu.ru/ru\_ru/summer-school-2022/

1. С.В. Червон. Киральные самогравитирующие модели: точные решения и вычисление космологических параметров (устный доклад)

2. И.В. Фомин. Методы построения и верификации инфляционных моделей ранней Вселенной (устный доклад)

3. Е.С. Денцель, И.В. Фомин. Точные решения в космологических моделях, основанных на телепараллельной гравитации (устный доклад)

V Международная зимняя школа-семинар по гравитации, астрофизике и космологии «Петровские чтения - 2022», 21-25 ноября 2022, КФУ, Казань, Россия

Ссылка на программу: https://kpfu.ru/portal/docs/F\_355367922/Programma.pdf

1. С.В. Червон. Космологические модели на основе телепараллельной гравитации и ее модификаций (устный доклад)

2. И.В. Фомин. Гравитационные волны в моделях космологической инфляции на основе модифицированных теорий гравитации (устный доклад)

3. Т.И. Чаадаева. Киральная космологическая модель $f(R; \Box R)$ гравитации (устный доклад)

4. К.А. Большакова. Модель хиггсовской инфляции и наблюдательные данные (устный 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)

**5.9. Возможность практического использования результатов проекта в экономике и социальной сфере (при наличии, в том числе формирование научных и технологических заделов, обеспечивающих экономический рост и социальное развитие Российской Федерации, создание новой или усовершенствование производимой продукции (товаров, работ, услуг), создание новых или усовершенствование применяемых технологий)**

 **5.10. Информация об использовании результатов проекта в экономике и социальной сфере (приводятся сведения об уже состоявшемся внедрении результатов исследований в практическую деятельность, при наличии)**

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 итогового отчета о выполнении проекта, в том числе в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет»;
* проект не имел других источников финансирования;
* проект не являлся 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**/