

## Оптический метод регистрации высокочастотных гравитационных волн\*

В.О. Гладышев, И.В. Фомин, Ил.С. Голяк, А.Л. Назолин,  
П.П. Демкин, В.Л. Кауц, А.А. Есаков, С.Е. Табалин

Рассматривается возможность регистрации высокочастотных гравитационных волн космологических и астрофизических источников посредством гравитационно-оптического резонанса в интерферометрах Фабри – Перо. Рассмотрены основные характеристики высокочастотных реликтовых гравитационных волн, необходимые для оценки параметров детектора. Приведены характеристики гравитационно-волновых антенн, необходимые для регистрации высокочастотных реликтовых гравитационных волн с учетом теоретических ограничений на их плотность энергии. Найдено ограничение на частоту принципиально регистрируемых гравитационных волн посредством предложенного метода детектирования. Определен оптимальный диапазон частот  $f \sim 3\text{--}10$  МГц для настройки предложенного детектора. На основе работы созданного макета комплекса для регистрации высокочастотных гравитационных волн показано, что реализация данной схемы подразумевает корреляцию сигналов нескольких гравитационно-волновых антенн в течение характерного времени, необходимого для регистрации гравитационных волн посредством предложенного метода.

**Ключевые слова:** гравитационные волны, интерферометры Фабри – Перо, гравитационно-волновые детекторы, система сбора данных, система синхронизации.

\*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №19–29–11015).

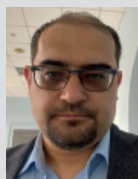
### Введение

После первых обнаружений гравитационных волн посредством наземных лазерных интерферометров LIGO и VIRGO [1, 2] на основе интерферометрического метода [3] можно утверждать, что появился новый инструмент для прецизионных измерений в области астрофизики и космологии. Данные наземные детекторы низкочастотных гравитационных волн имеют максимальную чувствительность в диапазоне частот от 10 Гц до 10 кГц [1, 2], в котором развитие технологии наблюдения и обилие астрофизических источников, таких

как процессы слияния черных дыр и нейтронных звезд, обеспечили первые обнаружения гравитационных волн. Проектируемый космический лазерный интерферометр LISA рассчитан на диапазон частот 0.1–10 МГц [4], ориентируясь преимущественно на двойные черные дыры и белые карлики. Также отметим недавнее обнаружение гравитационных волн сверхнизких частот 0.1–100 нГц на ос-



**ГЛАДЫШЕВ**  
Владимир Олегович  
Московский государственный  
технический университет  
им. Н.Э. Баумана



**ФОМИН**  
Игорь Владимирович  
Московский государственный  
технический университет  
им. Н.Э. Баумана



**ГОЛЯК**  
Илья Семенович  
Московский государственный  
технический университет  
им. Н.Э. Баумана



**НАЗОЛИН**  
Андрей Леонидович  
профессор РАН,  
Московский государственный  
технический университет  
им. Н.Э. Баумана



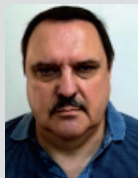
**ДЁМКИН**  
Павел Павлович  
АО Центр прикладной физи-  
ки МГТУ им. Н.Э. Баумана



**КАУЦ**  
Владимир Леонидович  
Московский государственный  
технический университет  
им. Н.Э. Баумана



**ЕСАКОВ**  
Артём Александрович  
Московский государственный  
технический университет  
им. Н.Э. Баумана



**ТАБАЛИН**  
Сергей Егорович  
Московский государственный  
технический университет  
им. Н.Э. Баумана

нове многолетнего анализа сигналов радиопульсаров (методом пульсарного тайминга) в проекте NANOGrav (США) и других аналогичных проектов в мире [5, 6]. В качестве источников сверхнизкочастотных гравитационных волн рассматривают как системы сверхмассивных черных дыр в ядрах галактик, так и физические процессы на инфляционной стадии эволюции ранней Вселенной [5, 6].

Тем не менее, в настоящее время существует множество теоретических предпосылок к существованию гравитационных волн с достаточно высокой спектральной плотностью энергии в высокочастотном диапазоне. В качестве источников высокочастотных гравитационных волн рассматриваются первичные черные дыры, бозонные звезды, космические струны, флуктуации частиц темной материи, процессы, происходящие в ранней Вселенной и т. д. [7–9].

Возможным источником анизотропии и поляризации реликтового излучения являются реликтовые гравитационные волны, возникшие на первоначальной стадии формирования Вселенной, которые заполняют Вселенную в виде стохастического фона [8, 9]. Для широкого класса космологических моделей, включающих инфляционную стадию эволюции ранней Вселенной, должно наблюдаться достаточно резкое возрастание спектральной плотности энергии гравитационных волн для частот от  $10^5$  до  $10^{10}$  Гц [10–12]. Таким образом, обнаружение высокочастотных реликтовых гравитационных волн, с одной стороны, дает дополнительное теоретическое обоснование существования инфляционной стадии эволюции Вселенной, а с другой – позволяет проверить корректность данных моделей по сравнению с другими классами космологических моделей, подразумевающих отсутствие возрастания плотности энергии высокочастотных реликтовых гравитационных волн в высокочастотном диапазоне [8, 9].

Необходимо отметить, что высокочастотные гравитационные волны

в настоящее время не были зарегистрированы, несмотря на большое число различных методов их детектирования [7].

В данной работе рассматривается применение метода гравитационно-оптического резонанса в интерферометрах Фабри – Перо для регистрации высокочастотных гравитационных волн. Даны оценки параметров детекторов данного типа, необходимых для регистрации реликтовых гравитационных волн.

Также приводятся результаты разработки макета комплекса для обработки процесса получения и обработки информации с комплекса лазерных интерференционных гравитационных антенн наземного и космического базирования.

### Высокочастотные реликтовые гравитационные волны

Согласно теории космологических возмущений, на стадии инфляции квантовые флуктуации скалярного поля порождают соответствующие возмущения метрики пространства-времени. В рамках теории космологических возмущений наблюдаемая анизотропия и поляризация реликтового излучения объясняются действием двух типов возмущений, а именно скалярных и тензорных возмущений или реликтовых гравитационных волн. Третий тип возмущений, а именно векторные возмущения, быстро затухают в процессе ускоренного расширения ранней Вселенной [8, 9].

В качестве наблюдательной характеристики реликтовых гравитационных волн (тензорных возмущений) в современную эпоху эволюции вселенной рассматривается плотность энергии, которую обычно определяют посредством безразмерной величины [8, 9]

$$\Omega_{\text{GW}}(f) = \frac{1}{\rho_c} \frac{d\rho_{\text{GW}}}{d \log f}, \quad (1)$$

где  $\rho_c = 3H_0^2/8\pi G$  – критическая плотность;  $H_0 = 100 h \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$  – значение параметра Хаббла в современную эпоху ( $h \approx 0.68$ );  $f$  – частота гравитационных волн; также  $\rho_{\text{GW}} = \frac{1}{4} \langle \dot{h}_{ab} \dot{h}^{ab} \rangle_\lambda$  – плотность энергии, полученная из усреднения производных по времени тензоров гравитационных волн  $h_{ab}$  по всем длинам волн  $\lambda$ .

Характер перехода от инфляционной стадии к стадии преобладания излучения оказывает существенное влияние на спектр реликтовых гравитационных волн [8–13]. Отклонения параметра состояния вещества от значения, соответствующего излучению  $w=1/3$  при данном переходе, индуцируют существенный рост плотности энергии реликтовых гравитационных волн в диапазоне высоких частот. Данные отклонения параметра состояния вещества от значения, соответствующего излучению, связаны с наличием дополнительной стадии преобладания «жесткой энергии»  $1/3 < w_s \leq 1$  между завершением инфляционной стадии и началом стадии преобладания излучения [8–13].

Для космологических моделей ранней Вселенной с отсутствием постинфляционной стадии преобладания «жесткой энергии» плотность энергии гравитационных волн с частотами  $f > 10^{-15}$  Гц оценивается следующим образом [13]:

$$\Omega_{GW} \leq 7 \cdot 10^{-17} \quad (2)$$

Для космологических моделей с дополнительной эпохой преобладания «жесткой энергии» плотность энергии гравитационных волн с частотами от  $f \sim 10^5 - 10^{10}$  Гц оценивается как [13]:

$$\Omega_{GW} \leq 2.7 \cdot 10^{-6}. \quad (3)$$

Данная оценка позволяет рассматривать возможность определить параметры детектора, необходимые для наблюдения реликтовых гравитационных волн с плотностью энергии  $\Omega_{GW} \approx 10^{-6}$  на данных частотах.

### Оценка чувствительности интерферометра Фабри – Перо при использовании гравитационно-оптического резонанса

Гравитационно-оптический резонанс в многолучевом интерферометре возникает, если выполняется условие, что на длине  $L$  резонатора укладывается целое число полуволн гравитационного излучения [14]:

$$\frac{fL}{c} = \frac{n}{2}, \quad (4)$$

где  $c$  – скорость света;  $n$  – целое число:  $n=1, 2, 3...$

Отметим, что при использовании многолучевого интерферометра для регистрации высокочастотных гравитационных волн не требуется создание сложной системы развязки зеркал, применяющейся для гравитационных антенн, работающих в низкочастотной части спектра [1, 2]. Это связано с тем, что частота механических колебаний зеркал интерферометра в этом случае оказывается существенно меньше частоты гравитационной волны [14].

Рассмотрим случай настройки многолучевого резонатора при  $n=1$ . Тогда отклик  $\delta W(t)$  гравитационной антенны, созданной на базе интерферометра Фабри – Перо, на высокочастотную гравитационную волну можно оценить по формуле [13–15]:

$$\delta W(t) = \frac{QL}{\lambda_e} W_0 h(t), \quad (5)$$

где  $\delta W(t)$  – вариации мощности прошедшего интерферометр лазерного излучения;  $Q$  – добротность интерферометра Фабри – Перо;  $\lambda_e$  – длина волны лазерного излучения;  $W_0$  – мощность лазерного излучения на входе в интерферометр Фабри – Перо;  $h(t)$  – амплитуда гравитационной волны. Выражение (5) является приближенным, и зависит от точки настройки интерферометра Фабри – Перо [14]. Для уменьшения дробового фотонного шума в работах [13, 15] рассматривалась возможность существенного уменьшения мощности лазерного излучения, поступающего на фотоприемник  $W_{ph}$  до значения, ограниченного обнаружимой спектральной плотностью флуктуаций метрики  $W_{ph}/W_0 = 2.2 \cdot 10^{-12}$ .

Теперь рассчитаем значения детектируемых гравитационных волн с плотностью энергии  $\Omega_{GW} = 10^{-6}$  для следующих параметров гравитационно-волновой антенны:  $\lambda_e = 1064$  нм,  $Q = 10^6$ ,  $T = 10^6$  с,  $W_0 = 10^3$  Вт. В табл. 1 приведены результаты

расчета предельной чувствительности высокочастотной гравитационной антенны для различной частоты  $f$  гравитационной волны [13]. Частота  $f$  гравитационной волны связана с длиной интерферометра  $L$  формулой (4) при  $n=1$ .

Для рассматриваемых параметров детектора ограничение на частоту регистрируемых гравитационных волн  $f > 2 \cdot 10^6$  Гц [13].

**Таблица 1.** Минимальное время детектирования  $T$  и длина резонатора  $L$  для наблюдения гравитационных волн с частотой  $f$  для максимальной плотности энергии реликтовых гравитационных волн  $\Omega_{GW}^{(max)} \approx 10^{-6}$

$\Omega_{GW}^{(max)}$	$f_{GW}$	$T, c$	$L, m$
$10^{-6}$	$3 \cdot 10^6$	9	50
$10^{-6}$	$5 \cdot 10^6$	879	30
$10^{-6}$	$1 \cdot 10^7$	$4.6 \cdot 10^5$	15
$10^{-6}$	$2 \cdot 10^7$	$2.4 \cdot 10^8$	7.5

Минимальную длину резонатора Фабри – Перо можно оценить как  $L \approx 15$  м с соответствующим временем наблюдения  $T \approx 5$  дней, так как в последнем случае при  $L \approx 7.5$  м время наблюдения составляет  $T \approx 7.6$  лет.

Таким образом, предлагаемый подход в принципе позволяет обнаруживать реликтовые гравитационные волны в диапазоне частот  $f \sim 3 - 10$  МГц, если выполняется условие гравитационно-оптического резонанса в резонаторе Фабри – Перо длиной  $L \approx 50 - 15$  м.

Отметим, что в данном случае необходимое время наблюдения  $T \sim \Omega_{GW}^{-2}$  [13]. По этой причине, если плотность энергии гравитационных волн  $\Omega_{GW} < \Omega_{GW}^{(max)}$ , время наблюдения  $T$ , необходимое для регистрации гравитационных волн, значительно увеличивается. Следовательно, диапазон частот  $f \sim 3 - 10$  МГц наиболее оптимален для обнаружения гравитационных волн посредством предложенного подхода.

Таким образом, проведенные оценки чувствительности высокочастотной

стотной гравитационной антенны, использующей гравитационно-оптический резонанс, показали, что чувствительность такой антенны в принципе может достичь необходимого уровня для регистрации высокочастотных гравитационных волн в указанном диапазоне частот. Также отметим, что предложенный метод позволяет детектировать высокочастотные гравитационные волны, индуцированные астрофизическими источниками, с близкой к данному значению плотностью энергии [7].

### Макет комплекса для регистрации высокочастотных гравитационных волн

Для анализа корреляции сигналов нескольких детекторов была разработана и реализована схема экспериментального макета для регистрации гравитационных волн. Макет включал два независимых интерферометра Фабри – Перо с плечом 2 м, в которых зеркала интерферометра жестко связаны между собой и с основанием интерферометра. Для такого случая при регистрации высокочастотных флуктуаций метрики пространства-времени выполняется условие малости

механической частоты колебаний зеркал по сравнению с их частотой. Накачка интерферометров осуществлялась лазерами с длиной волны 1 064 нм и выходной оптической мощностью не менее 1 Вт. [16–18]. Также был разработан алгоритм совместного получения и обработки экспериментальных данных двух экспериментальных макетов лазерной гравитационной антенны [16–18].

С использованием экспериментального макета и разработанной системы сбора и обработки данных была проведена долговременная запись сигнала с двух антенн с автоматическим расчетом корреляции между ними. Также было показано, что реализация данной схемы позволяет редуцировать максимальный сдвиг (задержку) между оцифрованными значениями сигналов двух разнесенных в пространстве антенн до времени, необходимого для регистрации гравитационных волн посредством предложенного подхода [16–18].

### Заключение

В данной работе рассматривался метод регистрации высокочастотных гравитационных волн посредством гравитационно-оптического резонанса в интерферометрах Фабри – Перо. Была показана принципиальная возможность регистрации гравитационных волн с плотностью энергии  $\Omega_{GW} \approx 10^{-6}$  и частотами  $f \sim 3\text{--}10$  МГц посредством предложенного подхода.

Дальнейшая работа по созданию детектора высокочастотных реликтовых гравитационных волн и высокочастотных гравитационных волн от астрофизических событий связана с использованием рассмотренных методов регистрации, сбора и анализа данных отклика детектора на гравитационно-волновые возмущения метрики пространства-времени.

## Литература

1. **B.P. Abbott, P. Abbott, T.D. Abbott et al.** *Phys. Rev. Lett.*, 2016, **116**, 6, 061102. DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.061102.
2. **B.P. Abbott, P. Abbott, T.D. Abbott et al.** *Astrophys. J. Lett.*, 2017, **848**, L13. DOI: 10.3847/2041-8213/aa920c.
3. **В.И. Пустовойт** *УФН*, 2016, **186**, 9, 1133. DOI: 10.3367/UFNr.2016.03.037900.
4. **S. Vitale** *Gen. Relativ. Gravit.*, 2014, **46**, 1730. DOI: 10.1007/s10714-014-1730-2.
5. **G. Agazie, A. Anumarlapudi, A.M. Archibald et al.** *Astrophys. J. Lett.*, 2023, **951**, 1, L8. DOI: 10.3847/2041-8213/acdac6.
6. **A.D. Johnson, P.M. Meyers, P.T. Baker et al.** *Phys. Rev. D*, 2021, **103**, 10, 103012. DOI: 10.1103/PhysRevD.103.103012.
7. **N. Aggarwal, O.D. Aguiar, A. Bauswein et al.** *Living Rev. Rel.*, 2021, **24**, 4. DOI: 10.1007/s41114-021-00032-5.
8. **И.В. Фомин, С.В. Червон, А.Н. Морозов** *Гравитационные волны ранней вселенной*, РФ, Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018, 154 с.
9. **M. Giovannini** *Prog. Part. Nucl. Phys.*, 2020, **112**, 103774. DOI: 10.1016/j.pnpnp.2020.103774.
10. **S. Ahmad, R. Myrzakulov, M. Sami** *Phys. Rev. D*, 2017, **96**, 063515. DOI: 10.1103/PhysRevD.96.063515.
11. **I.V. Fomin, S.V. Chervon, A.N. Morozov, I.S. Golyak** *Eur. Phys. J. C*, 2022, **82**, 642. DOI: 10.1140/epjc/s10052-022-10601-9.
12. **Г.Д. Манучарян, И.В. Фомин** *Пространство, время и фундаментальные взаимодействия*, 2022, **40**, 119. DOI: 10.17238/issn2226-8812.2022.3.119-131.
13. **А.Н. Морозов, И.С. Голяк, И.В. Фомин, С.В. Червон** *Пространство, время и фундаментальные взаимодействия*, 2022, **41**, 49. DOI: 10.17238/issn2226-8812.2022.4.49-61.
14. **И. Бичак, В.Н. Руденко** *Гравитационные волны в ОТО и проблема их обнаружения*, СССР, Москва, Изд-во МГУ, 1987. 264 с.
15. **И.С. Голяк, А.Н. Морозов, И.В. Фомин** *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, Сер. Естественные науки*, 2022, **2(101)**, 57. DOI: 10.18698/1812-3368-2022-2-57-67.
16. **И.С. Голяк, А.Н. Морозов, А.Л. Назолин, С.Е. Табалин** *Радиостроение*, 2020, **3**, 35. DOI: 10.36027/rdeng.0320.0000172.
17. **И.С. Голяк, А.Н. Морозов, А.Л. Назолин, С.Е. Табалин** *Радиостроение*, 2020, **5**, 42. DOI: 10.36027/rdeng.0520.0000184.
18. **А.Н. Морозов, И.С. Голяк, А.Л. Назолин** *В XII Всероссийской конференции «Необратимые процессы в природе и технике»: труды конференции: в 2 томах (РФ, Москва, 31 января – 3 февраля 2023)*, 2023, т. 2, 24.

English

# Optical Method for Registration High-Frequency Gravitational Waves\*

*Vladimir O. Gladyshev*

Bauman Moscow State Technical University  
5, 2<sup>nd</sup> Bauman Str., Moscow, 105005, Russia  
gladyshev@bmstu.ru

*Igor V. Fomin*

Bauman Moscow State Technical University  
5, 2<sup>nd</sup> Bauman Str., Moscow, 105005, Russia  
fomin\_iv@bmstu.ru

*Iliya S. Golyak*

Bauman Moscow State Technical University  
5, 2<sup>nd</sup> Bauman Str., Moscow, 105005, Russia  
iliyagol@mail.ru

*Andrey L. Nazolin*

RAS Professor,  
Bauman Moscow State Technical University  
5, 2<sup>nd</sup> Bauman Str., Moscow, 105005, Russia  
nazolin72@mail.ru

*Pavel P. Demkin*

JSC Center for Applied Physics of Bauman MSTU  
28 bld. 1, Aminevskoe Highway, Moscow, 121357, Russia  
Demkin.Pavel1996@yandex.ru

*Vladimir L. Kauts*

Bauman Moscow State Technical University  
5, 2<sup>nd</sup> Bauman Str., Moscow, 105005, Russia  
kauts@bmstu.ru

*Artem A. Esakov*

Bauman Moscow State Technical University  
5, 2<sup>nd</sup> Bauman Str., Moscow, 105005, Russia  
a.esakov@inbox.ru

*Sergey E. Tabalin*

Bauman Moscow State Technical University  
5, 2<sup>nd</sup> Bauman Str., Moscow, 105005, Russia  
tabalin@mail.ru

## Abstract

The possibility of recording high-frequency gravitational waves from cosmological and astrophysical sources through gravitational-optical resonance in Fabry – Perot interferometers is considered. The main characteristics of high-frequency relic gravitational waves necessary for estimating the detector parameters are considered. The characteristics of gravitational wave antennas necessary for recording high-frequency relic gravitational waves are given with taking into account theoretical restrictions on their energy density. A limitation has been found on the frequency of fundamentally registered gravitational waves using the proposed detection method. The optimal  $f \sim 3\text{--}10$  MHz frequency range for tuning the proposed detector has been determined. Based on the operation of the created prototype of a complex for recording high-frequency gravitational waves, it is shown that the implementation of this scheme involves the correlation of signals from several gravitational wave antennas during the characteristic time required for recording gravitational waves using the proposed method.

**Keywords:** gravitational waves, Fabry – Perot interferometers, gravitational wave detectors, data acquisition system, synchronization system.

\*The work was financially supported by RFBR (project 19–29–11015).

## Tables

**Table 1.** Minimum detection time  $T$  and resonator length  $L$  for observing gravitational waves with frequency  $f$  and amplitude  $h$  for maximum energy density of relic gravitational waves  $\Omega_{GW}^{(max)} \approx 10^{-6}$

$\Omega_{GW}^{(max)}$	$f_{GW}$	$T, c$	$L, m$
$10^{-6}$	$3 \cdot 10^6$	9	50
$10^{-6}$	$5 \cdot 10^6$	879	30
$10^{-6}$	$1 \cdot 10^7$	$4.6 \cdot 10^5$	15
$10^{-6}$	$2 \cdot 10^7$	$2.4 \cdot 10^8$	7.5

## References

1. **B.P. Abbott, P. Abbott, T.D. Abbott et al.**  
*Phys. Rev. Lett.*, 2016, **116**, 6, 061102.  
DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.061102.
2. **B.P. Abbott, P. Abbott, T.D. Abbott et al.**  
*Astrophys. J. Lett.*, 2017, **848**, L13. DOI: 10.3847/2041-8213/aa920c.
3. **В.И. Пучцовоўн**  
*УФН*, 2016, **186**, 9, 1133. DOI: 10.3367/UFNr.2016.03.037900.
4. **S. Vitale**  
*Gen. Relativ. Gravit.*, 2014, **46**, 1730.  
DOI: 10.1007/s10714-014-1730-2.
5. **G. Agazie, A. Anumarlapudi, A.M. Archibald et al.**  
*Astrophys. J. Lett.*, 2023, **951**, 1, L8. DOI: 10.3847/2041-8213/acdac6.
6. **A.D. Johnson, P.M. Meyers, P.T. Baker et al.**  
*Phys. Rev. D*, 2024, **109**, 10, 103012.  
DOI: 10.1103/PhysRevD.109.103012.
7. **N. Aggarwal, O.D. Aguiar, A. Bauswein et al.**  
*Living Rev. Rel.*, 2021, **24**, 4. DOI: 10.1007/s41114-021-00032-5.
8. **I.V. Fomin, S.V. Chervon, A.N. Morozov**  
*Gravitation Waves of the Early Universe [Gravitatsionnye volny ranney vseleynoy]*, RF, Moscow, BMSTU Publ., 2018, 154 pp. (in Russian).
9. **M. Giovannini**  
*Prog. Part. Nucl. Phys.*, 2020, **112**, 103774.  
DOI: 10.1016/j.ppnp.2020.103774.
10. **S. Ahmad, R. Myrzakulov, M. Sami**  
*Phys. Rev. D*, 2017, **96**, 063515. DOI: 10.1103/PhysRevD.96.063515.
11. **I.V. Fomin, S.V. Chervon, A.N. Morozov, I.S. Golyak**  
*Eur. Phys. J. C*, 2022, **82**, 642.  
DOI: 10.1140/epjc/s10052-022-10601-9.
12. **G.D. Manucharyan, I.V. Fomin**  
*Space, Time and Fundamental Interactions [Prostranstvo, vremya i fundamentalnye vzaimodeystvia]*, 2022, **40**, 119 (in Russian).  
DOI: 10.17238/issn2226-8812.2022.3.119-131.
13. **A.N. Morozov, I.S. Golyak, I.V. Fomin, S.V. Chervon**  
*Space, Time and Fundamental Interactions [Prostranstvo, vremya i fundamentalnye vzaimodeystvia]*, 2022, **41**, 49 (in Russian).  
DOI: 10.17238/issn2226-8812.2022.4.49-61.
14. **I. Bichak, V.N. Rudenko**  
*Gravitational Waves of the General Theory of Relativity and the Problem of Their Detection [Gravitatsionnye volny obshchey teorii otноситelnosti i problema ikh obnaruzheniya]*. Moscow, MSTU Publ., 1987, 264 pp. (in Russian).
15. **I.S. Golyak, A.N. Morozov, I.V. Fomin**  
*Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences [Vestnik MGTU im. N.E. Baumana, Ser. Yestestvennye nauki]*, 2022, **2**(101), 57 (in Russian).  
DOI: 10.18698/1812-3368-2022-2-57-67.
16. **I.S. Golyak, A.N. Morozov, A.L. Nasolin, S.E. Tabalin**  
*Radio Engineering [Radiostroenie]*, 2020, **3**, 35 (in Russian).  
DOI: 10.36027/rdeng.0320.0000172.
17. **I.S. Golyak, A.N. Morozov, A.L. Nasolin, S.E. Tabalin**  
*Radio Engineering [Radiostroenie]*, 2020, **5**, 42 (in Russian).  
DOI: 10.36027/rdeng.0520.0000184.
18. **A.N. Morozov, I.S. Golyak, A.L. Nasolin**  
*In Proc. XII Conference "Irreversible Processes in Nature and Technology" [XII Vserossiyskaya konferentsia «Neobratimye protsessy v prirode i tekhnike»: trudy konferentsii: v 2 tomakh]* (RF, Moscow, 31 Jan. – 3 Feb., 2023), 2023, vol. 2, 24 (in Russian).