

## Классификация гравитационных антенн по методам регистрации гравитационного излучения

В. О. ГЛАДЫШЕВ, А. Н. МОРОЗОВ

*The classification of gravitation antennas based on known methods of gravitation radiation registration is offered for the first time. In a basis of classification is the principle of space forming of the measuring channel namely on a surface of the Earth, in near-Earth space in limits of a Solar system in cosmological scales.*

Возможное существование гравитационных волн (ГВ) было предсказано А. Эйнштейном в работе [1], посвященной решению уравнений общей теории относительности и расчету мощности гравитационного излучения. Расчеты показали, что изменение расстояния между пробными телами вследствие воздействия гравитационной волны очень мало, поэтому длительное время проблема регистрации гравитационного излучения оставалась предметом теоретических исследований.

Существование гравитационного излучения было подтверждено экспериментальными исследованиями эффекта замедления периода двойной звездной системы PSR 1913+16 вследствие потерь энергии на гравитационное излучение [2, 3]. Результаты обработки экспериментов совпали с расчетными значениями, полученными на основе решения уравнений общей теории относительности, с высокой точностью. В последующие годы были предложены различные методы регистрации гравитационного излучения, большая часть которых осталась нереализованной либо из-за недостаточной чувствительности метода, либо вследствие сложности его технического воплощения. К настоящему времени имеется достаточно много публикаций, посвященных разработке новых методов регистрации ГВ, усовершенствованию известных методов, исследованию различных факторов, влияющих на чувствительность и помехозащищенность гравитационных антенн (ГА). Результаты некоторых работ можно использовать как в наземных, так и в космических ГА.

Работы, посвященные оптимизации параметров, методам выделения сигнала, ориентации антенн и функционированию их сетей, являются достаточно общими и могут не содержать новых методов регистрации ГВ. Здесь кроется неоднозначность, связанная с построением новых методов регистрации ГВ для получения принципиально новой информации на существующих схемах ГА. Также существуют трудности усовершенствования известных методов регистрации ГВ. При рассмотрении новых методов регистрации ГВ

могут возникнуть требования к условиям или параметрам устройств, которые принципиально неосуществимы.

Очевидно, что указанные трудности не позволяют дать окончательный вариант классификации предложенных методов регистрации ГВ. Однако разработка подобной классификации, возможно, позволила бы отделить методы регистрации от методов повышения чувствительности и помехозащищенности, распространить последние на ГА различных классов, указала на возможные пробелы в использовании известных физических явлений для построения на их основе искомых измерительных процедур. Ниже сделана попытка построения наиболее обобщенной классификации методов регистрации ГВ.

Основу данной классификации составляет принцип пространственного формирования измерительного канала: на поверхности Земли, в околоземном пространстве в пределах Солнечной системы, в космологических масштабах. Соответственно можно выделить наземные, космические и астрономические ГА.

Наземные ГА реализуют методы регистрации ГВ в устройствах или системах устройств, расположенных на поверхности Земли. Среди них наиболее известны резонансные, ротационные и ГА на свободных массах.

Резонансные ГА были построены первыми, и на них зарегистрировали неотожествленные сигналы, близкие по форме к ожидаемым всплескам ГВ. В [4] сообщалось о наблюдении совпадений между показаниями двух детекторов, один из которых расположен в Мэрилендском университете, а другой — в Арагонской национальной обсерватории на расстоянии 1000 км от первого.

В основе метода лежит взаимодействие ГВ с одной из собственных мод твердотельного резонатора, который выполнен в виде массивного высокодобротного цилиндра с датчиком, реагирующим на колебания цилиндра. Подобные антенны в 80-х годах разрабатывались в нескольких научных центрах: ЦЕРН [5], МГУ им. М. В. Ломоносова [6] и др. Для снижения теплового шума эти антенны необходимо охлаж-

дать до сверхнизких температур, а для лучшего взаимодействия ГВ с цилиндром требуется увеличивать размеры ГА, однако технически его длина ограничена 2 м. Чувствительность таких антенн достигала  $10^{-18}$ — $10^{-19}$  отн. ед. [7, 8]. К современным проблемам данного метода регистрации относятся влияние электронных систем обработки сигнала на датчик колебаний цилиндра, снижение теплового шума [9], исключение воздействия космических лучей [10].

К резонансным ГА можно отнести также дисковые антенны Токийского университета [11, 12], представляющие собой квадратные параллелепипеды с четырьмя сквозными прорезями или отверстиями и реагирующие на возмущение квадрупольной моды колебаний. В данной ГА две противоположные стороны квадрата колеблются синфазно между собой, но противоположно по отношению к двум другим. Особенность их состоит в возможности регистрации ГВ в низкочастотном (НЧ) диапазоне до частоты порядка 60 Гц. Как развитие данного метода регистрации ГВ можно рассматривать предложение о создании ГА сферической конструкции [13], позволяющей получить большее поперечное сечение, а следовательно, и эффективность преобразования энергии ГВ в акустические колебания.

В настоящее время резонансный метод имеет чувствительность, близкую к теоретически достижимой,  $10^{-20}$ — $10^{-21}$  отн. ед., однако устойчивых сигналов ГВ пока не зарегистрировано. В будущем данные ГА могли бы эффективно работать в сети гравитационных антенн в режиме длительного накопления сигнала [14].

В ротационной гравитационной антенне возможна регистрация ГВ крутильным осциллятором при условии, что поле ускорений, инициируемое ГВ, синфазно с вращением гантели. Данный резонансный метод является низкочастотным и был реализован в Токийском университете [15, 16]. Антенна настроена на частоту 60 Гц и теоретически может регистрировать непрерывное излучение на уровне  $10^{-23}$  отн. ед. К проблемам, присущим данному методу, относится нестабильность частоты вращения, а также влияние НЧ неустраиваемых шумов.

Регистрация НЧ ГВ на основе обработки сигналов с сейсмографов, расположенных на одном блоке земной коры, предложена в [17, 18]. Гравитационная волна приводит к коррелированному возбуждению противоположных торцов блока земной коры, что должно позволить выделять ГВ на фоне сейсмозумов. К требованиям данного метода относятся высокая добротность и линейность характеристик в большом динамическом диапазоне сейсмографов, включенных в сеть.

К электромагнитному варианту ротационной ГА можно отнести метод модуляции электромагнитной волны в круговом волноводе под действием ГВ [19—21]. Модуляция происходит на комбинационных частотах угловой частоты циркуляции электромагнитной волны и частоты гравитационного излучения. Данный метод реализуем в высокочастотной области порядка 1 МГц, однако не получил технического воплощения.

В ряде публикаций предлагалось использовать для регистрации ГВ сверхпроводящие состояния вещества [22, 23]. В сверхпроводящем цилиндре при воздействии ГВ возникает разность потенциалов между центром масс цилиндра и его торцами, поэтому, используя теоретический предел разрешения по напряжению  $10^{-22}$  В, для цилиндра длиной 3 м можно регистрировать вариации амплитуды сигнала  $10^{-24}$  отн. ед. Очевидно, что в данном методе к проблемам обычной ГА Вебера добавляются проблемы достижения сверхпроводящего состояния и регистрации предельных вариаций напряжения.

Также был предложен метод регистрации ГВ по измерению емкости между электропроводящими материалами. Смещение замкнутого контура, содержащего емкость, во внешнем электромагнитном поле будет приводить к возникновению тока индукции [24]. Однако, чтобы воздействие на измерительный и внешний контуры было различным, требуется компактный источник ГВ.

Известен метод регистрации ГВ с использованием схемы из двух конденсаторов, расположенных взаимно перпендикулярно и параллельно фронту ГВ и объединенных в замкнутую цепь [25]. Идея данного метода заключается в том, что заряд, индуцируемый ГВ, должен перетекать с одного конденсатора на другой. При четырехмесячном выделении тока порядка 10 пА метод может позволить обнаружить ГВ с амплитудой  $10^{-24}$  отн. ед.

Среди методов с использованием ускорителей элементарных частиц выделим метод регистрации ГВ по воздействию квадруполь, возникающего в течение  $10^{-23}$  с при столкновении электрона и позитрона, на другой квадруполь — массовый осциллятор [26].

В [27] описан эффект давления гравитационного излучения и сделан анализ возможностей его усиления. В [28] рассмотрена возможность лабораторного обнаружения НЧ ГВ с использованием кумулятивного эффекта при влиянии гравитационного излучения на сдвиг частоты фотона. В [29] предложено использовать эффект Мессбауэра для регистрации ГВ. Методы [27, 28] являются в большей части методологическими, так как их техническая реализуемость не была проанализирована в необходимой степени.

Отметим ряд методов, которые используют нелинейные оптические процессы, позволяющие эффективно усиливать воздействие ГВ. В первой группе этих методов нелинейный оптический процесс, реагирующий на ГВ, протекает в пределах резонатора лазера. В [30] для регистрации ГВ предложено использовать конкурентные нелинейные резонансы в кольцевых лазерах. Во вторую группу входят методы, чувствительность к гравитационному излучению которых достигается введением в схему ГА нелинейных оптических элементов, в частности, предлагается применять двулучепреломление, которое появляется в оптическом кристалле при его деформации в поле ГВ [31].

В [32] предлагается регистрировать ГВ по сверхузким провалам в спектре излучения нитевидного кристалла, когда колебания пробной массы передаются кристаллу и фиксируются по изменению прозрачности последнего на частоте провала. В [33] также предложено использовать нелинейный оптический кристалл в интерферометрической ГА.

В [34, 35] описан метод регистрации ГВ на основе эффекта памяти в ГА на свободных массах, который заключается в том, что всплеск ГВ после нескольких циклов колебаний уменьшается не до нуля, а до некоторого уровня. Данный эффект можно осуществить интегрированием сигнала во времени.

Ряд методов основан на идее перекачки энергии ГВ в электромагнитную при распространении ГВ вдоль электромагнитной волны. Данная идея обсуждалась в [36] для опыта Герца, в [37] — для СВЧ периодической структуры. Однако малый коэффициент перекачки энергии оставляет данный метод в числе теоретических.

В последние годы благодаря теоретическим и экспериментальным исследованиям различных физических принципов регистрации гравитационного излучения предпочтение отдается методам многолучевой интерферометрии. Использовать оптический интерферометр с когерентной оптической накачкой для регистрации ГВ впервые было предложено в [38].

Строительство лазерных интерференционных гравитационных антенн (ЛИГА) с базой порядка нескольких километров и высокой чувствительностью уже ведется в некоторых зарубежных научных центрах [39]. Часть проектов основана на схеме интерферометра Майкельсона, плечи которого содержат удобные при настройке резонаторы Фабри—Перо (РФП) с низким уровнем рассеянного света и оптическими резонансными свойствами [40, 41].

Особенности расчета отклика интерферометра Фабри—Перо в задаче регистрации гравитационных волн возникают вследствие чрезвычайно малой амплитуды ожидаемых гравитационно-волновых сигналов, которые должны вызывать небольшие вариации расстояния между зеркалами резонатора. В ряде экспериментов были получены оценки верхней границы амплитуды гравитационных волн космического происхождения [42, 43], которые накладывают ограничения на амплитуду ожидаемого смещения зеркал РФП, составляющую порядка  $10^{-15}$  м при километровых размерах резонатора [44, 45]. Для снижения влияния вибраций и шумовых факторов сейсмического происхождения зеркала РФП устанавливаются на пробных массах, слабо связанных с основанием, что приводит к появлению новых эффектов, вызванных давлением лазерного излучения на зеркала РФП.

Требования повышения чувствительности гравитационных антенн стимулировали развитие новых оптических методов регистрации сверхмалых смещений зеркал, которые привели к дополнительному усложнению процедуры измерений. В настоящее время предложено несколько методов увеличения чувствительности ЛИГА. Один из них связан с введением в двухплечий интерферометр дополнительного зеркала, переключающего световой поток из одного плеча в другое синхронно с периодом гравитационной волны, в результате чего эффективная оптическая мощность увеличивается [46].

Интерферометрические методы регистрации гравитационно-волнового излучения подробно исследованы в [47], где рассчитаны отношения сигнал—шум для интерферометра Фабри—Перо при различных режимах настройки резонатора.

В [48, 49] рассмотрены схемы многолучевых ГА с дополнительным полупрозрачным зеркалом перед фотодетектором; предложен метод нерезонансного рециклирования световой энергии и впервые — схема двойного рециклирования. Результаты экспериментального исследования последней схемы с резонаторами малых размеров и малой мощностью оптической когерентной накачки приведены в [50]. В экспериментах было зарегистрировано семикратное увеличение отношения сигнал—шум и получено согласие с выполненными расчетами.

Авторы [51—55] разработали гетеродинный метод регистрации гравитационного излучения на основе РФП, методы регистрации ГВ с использованием низкочастотного оптического резонанса, достаточно полную математическую модель РФП в поле ГВ, опираясь на решение самосогласованной системы дифференциальных уравнений, описывающих движение зеркал РФП, выполнили расчеты по оптимизации параметров РФП.

Оптимизация многолучевого РФП, предназначенного для регистрации гравитационных волн от сливающихся двойных звезд, проведена в [56]. Авторы, рассматривая схемы с обычным и двойным переотражениями в резонаторе Фабри—Перо, получили выражения для спектральной плотности шума и рассчитали отношения сигнал—шум для различных вариантов антенн с РФП. Проблема стабилизации и вопросам, связанным с возможностью волоконного исполнения интерферометров, посвящена работа [57]. К числу общих методов повышения чувствительности относятся методы,

использующие квантовые невозмущающие измерения, в которых реализуется интерферометрия квантовых состояний. Данные методы применимы как к ГА Вебера, так и к ЛИГА [58].

Описанные выше методы регистрации ГВ отражали воздействие последних на одну из степеней свободы гравитационной антенны: оптическую, акустическую, крутильную. К комбинированным относят антенны, реализующие воздействие ГВ сразу на две степени свободы. Как правило, данные методы повышают надежность выделения сигнала на фоне шума. Как пример можно указать на ЛИГА, свободные массы которой выполнены в виде цилиндров Вебера [59], что позволяет сравнивать результаты как интерферометрической, так и резонансной систем регистрации, снижать влияние теплового шума.

В ГА другой схемы два цилиндра Вебера дополняются РФП, реагирующими на изменение расстояния между ними [60]. Использование акустической степени свободы в ЛИГА возможно также при изготовлении пробных тел из плавного кварца [61].

К космическим ГА относятся антенны, регистрирующие вариации расстояния между пробными телами на дистанциях порядка размеров Солнечной системы. Большие размеры таких антенн позволяют регистрировать НЧ ГВ, имеющие достаточно высокую амплитуду.

К космическим относятся антенны, регистрирующие сигналы по измерению времени распространения электромагнитного сигнала до космического летательного аппарата (КЛА), по доплеровскому слежению за КЛА и лазерная космическая интерферометрическая ГА. Об одной из попыток регистрации ГВ по измерению времени распространения сигнала до космического аппарата «Вояджер-1» в течение нескольких дней сообщалось в [62]. Метод регистрации гравитационного излучения по модуляции доплеровского изменения частоты электромагнитного сигнала, распространяющегося между наземной станцией слежения и КЛА, предложен в [63]. Интерферометрическая регистрация НЧ ГВ с помощью многоплечевого интерферометра была рассмотрена в [64].

Орбитальный кольцевой лазерный гироскоп, состоящий из двух спутников Земли, движущихся по кольцевой орбите и обменивающихся световыми лучами, было предложено использовать для регистрации импульсных ГВ [65].

Возможность применения радиоинтерферометра с базой порядка  $1,5 \times 10^{11}$  м была рассмотрена в [66], где показано, что при использовании оптического интерферометра разрешающая способность выше на пять порядков.

Наиболее детально лазерно-интерферометрический вариант космической ГА был рассмотрен в [67]. Интерферометр должен иметь V-образную конфигурацию и включать четыре лазера на борту четырех космических аппаратов, находящихся на гелиоцентрических орбитах с периодом обращения один год. Оптический центр интерферометра образован двумя синфазными лазерами, находящимися на расстоянии 200 км друг от друга. Другие лазеры устанавливаются на расстоянии  $5 \times 10^6$  км.

Астрономические методы регистрации гравитационного излучения делятся на три группы: методы на основе слежения за электромагнитным излучением, проходящим в области сильной ГВ, методы на основе слежения за астрофизическими объектами, изменяющими свои свойства вблизи источника ГВ, а также методы на основе изменения излучательных свойств атомов в присутствии ГВ. К первой группе можно отнести методы, базирующиеся на эффекте изменения угла направления на звезду при прохождении ГВ [68], эффекте задержки изображения объектов за гравитационной линзой [69], влияния ГВ на фон микроволнового

электромагнитного излучения [70], эффекте периодического изменения положения звезды вследствие прохождения электромагнитного излучения вблизи источника ГВ [71]. Вторую группу могут составить методы, построенные на эффекте изменения частоты движения по спирали двойных звезд при воздействии ГВ [72], воздействия ГВ на вращающуюся нейтронную звезду [73]. В третью группу входят методы на основе эффекта изменения частоты излучения атома водорода вблизи источника ГВ [74], вероятности перехода ридберговского атома в поле ГВ [75] и усиления электромагнитного излучения от звезд, проходящего через мазерное облако при смещении гравитационной волной частоты перехода переизлучающего атома [76].

**Заключение.** Перечисленные методы регистрации гравитационного излучения имеют разные стелени теоретической и технической проработки. Некоторые из них (например, астрономические) зависят от влияния атмосферы Земли на прохождение электромагнитного излучения и требуют выведения аппаратуры за пределы атмосферы. Часть методов может быть реализована в существующих или строящихся ГА, таких как LIGO, VIRGO, LISA и др.

В целом наиболее перспективными, с одной стороны, и достаточно технически обеспеченными, с другой, можно назвать проекты ЛИГА, находящиеся в стадии строительства и имеющие резервы чувствительности. Этот тип широкополосных ГА содержит массу возможностей по методам проведения регистрации ГВ, методам выделения сигналов, использованию квантовых неразрушающих измерений, включению в комбинированные гравитационные антенны и в сеть антенн.

В целом, приведенная классификация определяет наиболее общие подходы к регистрации ГВ. Ее дальнейшее развитие может быть направлено по пути детализации описания методов с учетом особенностей формирования измерительного канала, методов выделения сигнала, выбора оптимальной схемы, обеспечивающей достаточный уровень чувствительности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Einstein A. *Naherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation.* — Berlin: Preuss. Akad. Wiss., 1916. — P. 688.
2. Taylor J. H., Weisberg J. M. // *Astrophysical J.* — 1982. — V. 253. — № 2. — Pt. 1. — P. 908.
3. Taylor J. H. // *Proc. 2 Marcel Gross. Meet. Gen. Relativity.* — 1982. — Pt. A. — P. 15.
4. Weber J. *Topics in Theoretical and Experimental Gravitation Physics / Eds De Sabbata V., Weber J.* — N.-Y. — London: Plenum Press, 1977.
5. Amaldi E., Pizzella G. // *Nuovo cim.* — 1986. — С. 9. — С. 829.
6. Брагинский В. Б. и др. // *ЖЭТФ.* — 1974. — Т. 66. — № 3. — С. 801.
7. Bonifazi P., Visco M. // *Nuovo cim.* — 1992. — V. 15. — № 6. — P. 943.
8. Bassan M. // *Class. and Quantum Grav.* — 1994. — V. 11. — № 6A. — P. 39.
9. Bordoni F., Karim M. // *Ibid.* — P. 61.
10. Coccia E. e. a. // *Nucl. Instrum. and Meth. Phys. Res. A.* — 1995. — V. 355. — № 2—3. — P. 624.
11. Hirakawa H. // *Proc. 2 Marcel Gross. Meet. Gen. Relativity.* — 1982. — Pt. A. — P. 21.
12. Ico Ken-ichi a. e. // *J. Phys. Soc. Jap.* — 1985. — V. 54. — № 5. — P. 1697.
13. Coccia E., Lobo J. A. // *Lab. Naz. Frascati (Rapp.)*. — 1995. — № 95—010. — P. 1.
14. Лучик Е. К., Руденко В. Н. // *Астрономический журнал.* — 1990. — Т. 67. — С. 1074.
15. Глинер Э. Б., Митрофанов И. Г. // *ЖЭТФ.* — 1979. — Т. 76. — № 6. — С. 1873.
16. Suzuki T., Akasaka N., Morimoto K. // *Rev. Sci. Instrum.* — 1992. — V. 63. — № 3. — P. 1880.
17. Брагинский В. Б., Митрофанов В. П., Якимов В. Н. // *Проблемы теории гравитации и элементарных частиц.* — 1986. — № 17. — С. 6.
18. Гусев А. В., Руденко В. Н. // *Статистическая и квантовая физика и ее приложения.* — М.: Изд-во МГУ, 1986. — С. 152.
19. Брагинский В. Б., Менский М. Б. // *Письма в ЖЭТФ.* — 1971. — Т. 13. — С. 585.
20. Kulak A. // *Acta phys. Pol.* — 1984. — V. 15. — № 1. — P. 3.
21. Mengxi T., Fangyu Li. // *Intern. Cent. Theor. Phys. [Prepr.]*. — 1990. — № 42. — P. 1.
22. Anandan Jeeva. // *Phys. Lett.* — 1995. — A110. — № 9. — P. 446.
23. Peng Huei, Peng Bo. // *Gen. Relat. and Gravit.* — 1990. — V. 22. — № 1. — P. 45.
24. Wagoner R. V., Will C. M., Paik H. J. // *Phys. Rev.* — 1979. — D19. — № 8. — P. 2325.
25. Mours B., Yvert M. // *Phys. Lett. A.* — 1989. — V. 136. — № 4—5. — P. 2009.
26. Weber J. // *Nuovo cim. B.* — 1994. — V. 109. — № 8. — P. 850.
27. Тамелло Р. Р. *Эффект давления гравитационного излучения и его усиление / Отд. физ. и астрон. АН ЭССР.* — Таллин, 1987. Предпринт NF-38.
28. Сажин М. В. // *Вестник МГУ. Физика. Астрономия.* — 1982. — Т. 23. — № 4. — С. 45.
29. Callagari G. // *Acta phys. Hung.* — 1991. — V. 70. — № 1—2. — P. 29.
30. Данилейко М. В. и др. // *Письма в ЖЭТФ.* — 1984. — Т. 39. — № 9. — С. 428.
31. Iacopini E. e. a. // *Phys. Lett.* — 1979. — A73. — № 2. — P. 140.
32. Хижняков В. // *Изв. АН ЭССР. Отд. физ. мат.* — 1988. — Т. 37. — № 2. — С. 241.
33. Kulagin V. V., Rudenko V. N. // *Phys. Lett. A.* — 1990. — V. 143. — № 8. — P. 353.
34. Брагинский В. Б., Гришук Л. П. // *ЖЭТФ.* — 1986. — Т. 89. — № 3. — С. 744.
35. Braginsky V. B., Torne Kip S. // *Nature.* — 1987. — V. 327. — № 6118. — P. 123.
36. Teissier C. F. // *Ann. Phys. Fr.* — 1985. — V. 10. — № 3. — P. 263.
37. Акишин П. Г. и др. *Двухволновой параметрический метод приема ГВ / ОИЯИ.* — Дубна, 1985. Препринт. № 13—85—968.
38. Герценштейн М. Е., Пустовойт В. И. // *ЖЭТФ.* — 1962. — Т. 43. — С. 605.
39. Drever R.W.P. // *Gen. Relativ. and Gravitat. Inv. Pap. and Discass. Rept. 10 Intern. Conf., Padua, July 3—8, 1983.* — 1984. — P. 397.
40. Torne K. S. // *Res. Modern Phys.* — 1980. — V. 52. — N 2. — Pt. 1. — P. 285.
41. Руденко В. Н. // *Эйнштейновский сборник.* — М.: Наука, 1990. — С. 351.
42. Pizzella G. // *Gravit. Wave Data Anal. Proc. Nato Adv. Res. Workshop, Cardiff, 1987.* — 1989. — P. 173
43. Брагинский В. Б. и др. // *ЖЭТФ.* — 1974. — Т. 66. — № 3. — С. 801.

44. Руденко В. Н., Сажин М. В. // Квантовая электроника. — 1980. — Т. 7. — № 11. — С. 2344.
45. Алексеев А. Д. и др. // ЖЭТФ. — 1980. — Т. 79. — № 4. — С. 1141.
46. Vinet J. — Y. // J. Physique. — 1986. — V. 47. — P. 639.
47. Кулагин В. В. Интерферометрические методы измерения в гравитационно-волновом эксперименте: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. физ.-мат. наук. — М., 1987.
48. Meers B. J. // Phys. Rev. D. — 1988. — V. 38. — № 8. — P. 2317.
49. Meers B. J. // Phys. Lett. A. — 1989. — V. 142. — № 8—9. — P. 465.
50. Strain K. A., Meers B. J. // Phys. Rev Lett. — 1991. — V. 66. — № 11. — P. 1391.
51. Морозов А. Н., Гладышев В. О. // Измерительная техника. — 1990. — № 10. — С. 26.
52. Гладышев В. О., Морозов А. Н. // Письма в ЖТФ. — 1991. — Т. 17. — № 19. — С. 11.
53. Гладышев В. О., Морозов А. Н. // Письма в ЖТФ. — 1993. — Т. 19. — № 14. — С. 38.
54. Gladyshev V. O., Morosov A. N. // J. Moscow Phys. Soc. — 1996. — V. 6. — P. 1.
55. Гладышев В. О., Морозов А. Н. // Необратимые процессы в многолучевом интерферометре Фабри—Перо. — Егорьевск: Изд-во ЕАТК ГА, 1996.
56. Krolak A., Lobo J. A., Meers B. J. // Phys. Rev. D. — 1991. — V. 43. — № 8. — P. 2470.
57. Измайлов Г. Н. и др. // ЖТФ. — 1987. — Т. 57. — № 6. — С. 1194.
58. Meier W. // Exp. Techn. Phys. — 1984. — V. 32. — № 2. — P. 109.
59. Кулагин В. В., Полнарев А. Г., Руденко В. Н. // ЖЭТФ. — 1987. — Т. 91. — № 5. — С. 1553.
60. Richard J. P. // Phys. Rev. D. — 1992. — V. 46. — № 6. — P. 2309.
61. Брагинский В. Б., Митрофанов В. П., Охрименко О. А. // Письма в ЖЭТФ. — 1992. — Т. 55. — № 7—8. — С. 424.
62. Helling R. W. // Rayonn. Gravitational NATO ASI. Centre phys. Des Houches. — 1983. — P. 485.
63. Bertotti B. // Intern. Solar. Polar Mission. — Paris: Sci. Invest., 1983. — P. 255.
64. Anderson A. J. // Proc. Int. Assoc. Geod. Symp. — Vancouver, 1987. — V. 1. — P. 83.
65. Chaboyer Brain, Henriksen R. N. // Phys. Lett. A. — 1988. — V. 132. — № 8—9. P. 391.
66. Braginsky V. B. e. a. // Intern. Cent. Theor. Phys. [Prepr]. — 1989. — № 392. — P. 1.
67. Jafry Y. R., Cornelisse J., Reinhard R. // ESA J. — 1994. — V. 18. — № 3. — P. 219.
68. Fakir R. // Astrophys. J. — 1993. — V. 418. — № 1. — Pt. 1. — P. 202.
69. Allen B. // Phys. Rev. Lett. — 1989. — V. 63. — № 19. — P. 2017.
70. Linder E. V. // Astrophys. J. — 1988. — V. 326. — № 2. — Pt. 1. — P. 517.
71. Fakir R. // Astrophys. J. — 1994. — V. 426. — № 1. — Pt. 1. — P. 74.
72. Smith S. // Phys. Rev. D. — 1987. — V. 36. — № 10. — P. 2901.
73. Денисов В. И. // Экспериментальные тесты теории гравитации. — М.: Атомиздат, 1989. — С. 102.
74. Leen T., K., Parker L., Pimentel L. O. // Gen. Relat. and Gravit. — 1983. — V. 15. — № 8. — P. 761.
75. Fischer U. // Class and Quantum Grav. — 1994. — V. 11. — № 2. — P. 463.
76. Siparov S. V. // Phys. Rev. A. — 1997. — V. 55. — № 5. — P. 3704.