

ИНЖЕНЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

УДК 520, 52-08, 53-08, 525.625, 539

ГРАВИ-ИНЕРЦИАЛЬНЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ АСТРО-ГЕО-ФИЗИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ В ПОДЗЕМНОЙ ЛАБОРАТОРИИ БНО ИЯИ РАН

© 2024 г. К. В. Руденко^а *, С. И. Орешкин^б, С. М. Попов^б, В. Н. Руденко^б, В. В. Азарова^с,
Ю. Д. Голяев^с, И.И. Савельев^с, А.Г. Шураев^с

^аМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия

^бАстрономический институт им. П.К. Штернберга, Московский
государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, 119234 Россия

^сАО «НИИ «Полус» им. М.Ф. Стельмаха», Москва, 117342 Россия

*E-mail: rudenko@ilc.edu.ru

Поступила в редакцию 01.06.2024 г.

После доработки 03.07.2024 г.

Принята к публикации 15.07.2024 г.

Рассматривается проект крупномасштабной установки — большой кольцевой лазерный гироскоп (БЛГ) с чувствительностью к вариациям скорости вращения и угловым наклонам лабораторной базовой поверхности, а также к вращательной асимметрии показателя преломления оптической среды, в том числе вакуума. С помощью такого инструмента, размещенного в подземной обсерватории, возможно получение информации актуальной для физики элементарных частиц, квантовой теории поля, лазерной физики, астрометрии, глобальной геодинимики и сейсмологии. Прикладным выходом может стать ранний прогноз глобальных катаклизмов типа землетрясений. В качестве практического шага поддержки проекта приведены результаты пробных экспериментов с малогабаритным лазерным гироскопом (ЛГ).

Ключевые слова: лазерный гироскоп, инерциальные датчики, измерения земного вращения, земные тороидальные моды, эффект грави-магнетизма, частицы темной материи

DOI: 10.56304/S2079562924060356

1. ВВЕДЕНИЕ

Гравитационные измерения в наземном и космическом масштабах в настоящее время представляют активно развивающуюся область фундаментальной и прикладной науки. При этом основными инструментами и методами исследований служат оптические измерительные приборы, методы прецизионной радио и оптической интерферометрии. Среди подземных установок Баксанской нейтринной обсерватории (БНО ИЯИ РАН) к такому типу инструментов относится опто-акустическая гравитационная антенна ОГАН. Также планируется создание еще одного многоцелевого измерителя грави-инерциального типа — БЛГ, в котором измерение параметров вращения основано на эффекте Саньяка в активном лазерном интерферометре.

Измерение гравитационных эффектов локально неотличимо от инерциальных (принцип эквивалентности). Однако возможно построение инерциального измерителя угловой скорости земного вращения. Для астрономии это вопрос чрезвычайно

важный, поскольку знание модуля вектора угловой скорости, его пространственных и временных вариаций важны для прецизионной астрометрии, космической навигации, фундаментальных астрофизических приложений. На текущий момент есть понимание того, что ЛГ является прецизионным инерциальным интегрирующим датчиком проекции угловой скорости и угловых перемещений на его ось чувствительности. Однако, располагаясь на земной поверхности, он может быть также чувствительным деформационным датчиком, регистрирующим наклоны, поскольку его реакция зависит от угла между осью вращения и осью чувствительности ЛГ. При этом геофизические приложения БЛГ заметно шире задачи мониторинга вариаций вращения Земли. Например, сюда относятся измерения внутренней геодинимики земных масс типа движения тектонических плит, колебаний внутреннего твердого ядра и др.

Особо нужно указать на возможные приложения к задачам фундаментальной гравитации. В частности, имеется ввиду задача измерения реля-

тивистского эффекта Лензе–Тирринга в аномалиях земного вращения. Этот эффект имеет принципиальное (эвристическое) значение, расширяя понятие “относительности” (отсутствие привилегированной системы отсчета) на Вселенную в целом (принцип Маха). Кроме этого, при дополнительном инструментальном оснащении, БЛГ может быть использован для фундаментальной проблемы поиска “темной материи”. В частности, создавая сильное магнитное поле в отдельном секторе кольцевого светового тракта, можно осуществить попытку поиска гипотетических составляющих темной материи — аксионов, которые согласно современной квантовой электродинамике могли бы рождаться в недрах Солнца и прилетать на Землю. Наконец, БЛГ можно использовать как стенд для развития и отработки новой методики прецизионных угловых измерений с последующим применением в гравитационных экспериментах.

История возникновения и развития ЛГ, физика их работы и многочисленные приложения в деталях содержатся, например, в недавнем обзоре [1]. В данной работе мы рассматриваем избранные аспекты проекта БЛГ и приводим результаты тестовых экспериментов с малой моделью — малагабаритным ЛГ.

2. ИЗВЕСТНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ С БЛГ

Исследование возможностей БЛГ в измерении гео-динамических возмущений насчитывает уже более 30 лет. Накоплен опыт создания и эксплуатации около десятка экспериментальных установок различного масштаба. Достигнут заметный прогресс в понимании физических и технических особенностей их функционирования. Сформулированы цели и пути их дальнейшего улучшения

Первым инструментом типа БЛГ “большой лазерный гироскоп Саньяка” для астро-гео-динамических измерений считается установка С-I собранная в Кентерберийском университете в Крайстчерче, Новая Зеландия. “Кентерберийское кольцо” (С-I) охватывало площадь примерно 0.75 м^2 и имело частоту “расщепления встречных мод” (индикатор вращения) почти 71 Гц. Это был первый кольцевой лазер подземного расположения, который наглядно демонстрировал эффект расщепления мод, обусловленный вращением Земли. Механическая конструкция этого прибора не позволяла, однако, проведение непрерывного мониторинга на длительных временных интервалах. Далее, при участии американских (FESG) и немецких (BKG) групп в той же локации был создан усовершенствованный вариант С-II моноблочной конструкции с улучшенной долговременной стабильностью (изготовлен компанией Carl Zeiss в Оберкохене, Германия). Ключевыми технологиями были применение стеклокерамики Zerodur

в качестве основного материала светового тракта (для геометрической стабильности) и оптического контакта зеркал для прочного закрепления и получения идеального вакуумного уплотнения. С 1997 г. С-II работает в той же пещере Кашмир, Крайстчерч. Он имеет частоту Саньяка 79.4 Гц и приспособлен к длительным наблюдениям. Оказалось, однако, что размер 1 м^2 недостаточен для регистрации малых изменений во вращении Земли. Подробное описание С-II и его свойств дано в [2].

На текущий момент самая большая действующая установка “кольцевой лазер G” размещена в Геодезической Обсерватории г. Ветцель (Бавария) [3]. Большой “кольцевой лазер G” похож на С-II. Он также изготовлен из материала zerodur, но в полумоноблочной конструкции. Четыре прямоугольных стержня (полоски) zerodur, жестко прикреплены к опорной гранитной плите и удерживают квадратный светопровод с длиной стороны 4 м. Суммарный коэффициент теплового расширения составляет менее $1 \cdot 10^{-8} \text{ К}^{-1}$. Четыре зеркала и их держатели прикреплены на лицевых сторонах стержней молекулярной адгезией. Эта техника обеспечивает стабильное вакуумное уплотнение. Зеркала чрезвычайно высокого качества. Малые потери в единицы 10^{-6} позволяют снизить обратное рассеяние до не критического уровня. Активная среда — газовая смесь He-Ne с давлением в несколько гектопаскалей, возбуждается разрядом в трубке (Pugex gain tube) переменным электрическим полем для поддержания процесса генерации. Стабильность генерации обеспечивается с помощью контура обратной связи, управляющего процессом накачки. Несмотря на серьезные меры, предпринятые для стабильности фундамента, в этой установке не удалось устранить наклонов из-за деформаций грунта термо-упругого или гидрологического происхождения на уровне микрорадиан. Эта помеха выглядит неустранимой в принципе. Наклоны в направлении север-юг значительно маскируют измеряемый сигнал земного вращения и должны прецизионно измеряться и компенсироваться. Другие параметры окружающей среды, такие как температура в разных местах, влажность воздуха, давление воздуха и уровень грунтовых вод на установке “G-ring laser” также отслеживаются с периодичностью один раз в минуту и учитываются при коррекции данных.

В итоге, оценка максимальной чувствительности установки составляет $9 \cdot 10^{-11} \text{ рад/(с Гц}^{1/2})$ [3]. Для достижения разрешения 10^{-9} от скорости вращения Земли (или $7.3 \cdot 10^{-14} \text{ рад/с}$) требуется время интегрирования 420 ч (15–20 дней). Однако на данной установке (г. Ветцель) это трудно достижимо из-за инструментальных дрейфов.

На текущий момент в подземной обсерватории Гран Сассо (LNGS Италия) создается кольцевая лазерная установка GINGER. Это один из

ключевых проектов INFN (Итальянский институт ядерной физики), куда входят секции Пизы, Неаполя, Леньяро, Падуи и Турина в коллаборации с INGV (Национальный институт геофизики и вулканологии), при международном сотрудничестве с Германией (Тех. университет Мюнхена) [4]. Обсерватория LNGS обеспечивает хорошую экранировку от всех видов поверхностных возмущений (шумов окружения). На данном этапе на максимально удаленном от зоны активности научно-технического персонала месте, смонтирован квадратный вертикальный гироскоп масштаба 3.6 м, представляя промежуточный вариант, с кодом GINGERino [5]. Этот предварительный инструмент предназначен для измерения фона вращательных возмущений очень низкой частоты внутри LNGS, с целью тестирования пригодности данной локализации для монтажа большой установки по детектированию релятивистского эффекта Лензе–Тиррига (ЛТ). Следует отметить, что измерение эффекта ЛТ осложнено не только его малостью, но также тем, что в данной измерительной схеме он является статическим. Добавляется серьезная проблема отделения его от систематических ошибок оптической, термодинамической и механической природы. Для избавления от систематики полезно было бы сравнить данные, полученные на разных удаленных станциях, обладающих таким же инструментом. Это облегчает задачу фильтрации глобальных вариаций от инструментальных и местных возмущений. В этом отношении создание такой установки в подземных условиях Баксанской Нейтринной Обсерватории — аналога LNGS в Италии — представляется весьма востребованным.

Важно, что наличие нескольких глобальных обсерваторий с большими гиро-лазерами работает на решение фундаментальной астрометрической задачи установления связи между локально геодезической системой отсчета и небесной системой “неподвижных звезд”. Возможность параллельного измерения различных релятивистских эффектов в обеих системах стимулирует развитие проектов по поиску новой физики. Наиболее близко к целям исследований проекта ГС, стоит установка G-Pisa субметрового масштаба, расположенная в главном павильоне гравитационно-волнового детектора ВИРГО. Этот кольцевой лазерный гироскоп предназначен для контроля геодинатических и сейсмических возмущений центральной части гравитационного детектора — оптического интерферометра Майкельсона на подвесных зеркалах. Геометрически кольцевой лазер G-Pisa — квадрат с периметром ~5 м. Резонатор лазера изготовлен из трубок нержавеющей стали имеет регулируемую модульную структуру с 4-мя держателями зеркал, расположенных по углам. Средняя мощность излучения $W = 10^{-7}$ Вт, длина волны 632.8 нм. Для указанных значений расчетные формулы про-

гнозирует оценку чувствительности инструмента G-Pisa на уровне 10^{-9} рад/(с Гц^{1/2}) [1]. На практике предельная величина измеримой вариации скорости вращения составляет около 10^{-8} рад/с при времени измерения 1 ч.

В заключении краткого обзора опыта работы с БЛГ, отметим важный современных тренд их использования в сейсмологии. Современный центр сейсмического мониторинга представляется классической сейсмической станцией слежения с традиционным набором измерителей линейных смещений и деформаций в широкой полосе частот, но с добавлением геодезического ЛГ — измерителя вращений. В стандартной сейсмологии вращением, вызванным землетрясением, пренебрегали. Соответствующие возмущения считались малыми, и не было инструментов с требуемым разрешением. Высокое разрешение БЛГ наряду с их невосприимчивостью к линейным ускорениям изменило ситуацию. Применение этих приборов становится привлекательным для сейсмологических исследований. Регистрация удаленных сейсмических всплесков (землетрясений) по ротационным возмущениям выглядит перспективной методикой [6]. Ожидаемый диапазон измеряемых вариаций угловых скоростей оценивается как $10^{-14} < \Omega < 1$ рад/с, плюс диапазон частот сигнала для теле-сейсмических волн $0.003 < f_s < 10$ Гц. При различной ориентации кольцевых лазеров они могут обеспечить регистрацию вращательных возмущений как от сейсмических волн Лява, так и Рэлея. Для сейсмического применения ЛГ его долгосрочная инструментальная стабильность не так важна, как в задаче измерения вращения Земли. Более важным является кратковременная стабильность и механическая жесткость резонатора для устойчивой работы в одномодовом режиме. В краткосрочной перспективе технология кольцевых лазеров вносит в сейсмологию новый вид наблюдений за движением грунта, следствия которого пока не полностью изучены. Сочетание этих инструментов с классическим набором линейных геофизических датчиков с оптической системой индикации (сеймометры, гравиметры, деформографы) — представляет актуальный тренд формирования международных научных центров GGOS (Глобальная система геодезических наблюдений).

3. КОНКРЕТНЫЕ ЗАДАЧИ ПРОЕКТА ГС

Основной целью проекта ГС является разработка и конструктивная реализация БЛГ в подземных условиях БНО ИЯИ РАН с разрешением по угловой скорости Ω земного вращения $\sim 10^{-9} \Omega$. На пути к этой цели конкретной задачей первого подготовительного этапа представляется создание прототипа ЛГ (гироскопа дециметрового масштаба) с чувствительностью к вращательным ускорениям

$(10^{-7}-10^{-8})$ рад/(с Гц^{1/2}), достаточной для регистрации вариаций скорости земного вращения с точностью в тысячные доли процента за время порядка одного часа. Также выполнение измерений фона деформационных наклонов главной штольни БНО на уровне тысячных долей угловой секунды. Сбор (накопление) банка деформационно-вращательных измерений с целью прогнозирования возможности создания крупногабаритного ЛГ (2–3 м) с рекордной чувствительностью 10^{-9} рад/(с Гц^{1/2}) к вращательным ускорениям в специфических условиях подземных лабораторий БНО ИЯИ РАН.

4. АРГУМЕНТАЦИЯ ЗАДАЧ И ДОСТИЖИМОСТЬ РЕШЕНИЯ

В настоящее время параметры вращения Земли измеряют методами космической геодезии: VLBI (длинно базовая радио интерферометрия), SLR (лазерная локация спутников), GPS (спутниковая система глобального позиционирования) и DORIS-доплеровская орбитография с помощью радиолокационной аппаратуры на спутнике. Достигнута точность 0.01 мс при времени измерения порядка суток и 0.1 угл. мс по полюсным координатам. Общим принципом является относительное измерение вращения путем наблюдения опорных точек, — далеких звезд или космических аппаратов (КА) за пределами Земли. Все эти методы очень сложны и громоздки — требуют глобальных сетей и организационных структур для наблюдения и обработки данных, которые координируются международными службами IVS, ILRS, IGS и IDS. Мониторинг вращения с использованием гравитационных датчиков ГС реализует совершенно другой подход.

Лазерные гироскопы работают на эффекте Саньяка, т.е. на зависимости параметров генерации от вращательного ускорения прибора. Оптическая интерферометрия благодаря малой длине волны лазерного излучения позволяет достигнуть весьма высокого разрешения. ЛГ, жестко прикрепленный к Земле, дает возможность мгновенного контроля угловой скорости земного вращения и пространственной ориентации ее оси. ЛГ может быть наклономером и сейсмические возмущения им также регистрируются. Однако он не служит просто дополнением к известным датчикам в сейсмологии. С его освоением появляются качественно новые возможности — регистрация и измерение тороидальных мод собственных колебаний Земли, возбуждаемых землетрясениями. Набор традиционных инструментов — сейсмометров и деформографов (стрейн-метров) в лице ЛГ снабжается новым типом датчика — “измерителем вращения грунта” [7], что дает полное описание движений в данной точке поверхности. Освоение такого прибора означает появление новой области

геофизических исследований, определяемую как “ротационная сейсмология”.

Далее новой перспективой считается возможность использования БЛГ для экспериментального исследования вращательных эффектов релятивистской гравитации. В частности, для измерения пост-ньютоновских отличий гравитационного поля сферических масс, обладающих спином (квантованым моментом вращения). Выполненные к настоящему времени космические эксперименты со спутниками Земли LAGEOS и Gravity Probe-B, доказывают существование спиновых гравитационных эффектов [8, 9] в пределах численных оценок следующих из ОТО. Текущее состояние техники лазерных гироскопов позволяет обсуждать продолжение таких исследований в земных условиях. Особенно интересно измерение прецессии Лензе–Тирринга (LT) для земной оси или эффекта «гравитационного увлечения систем отчета» [10]. В спутниковых экспериментах геодезическая прецессия оси была подтверждена с точностью лучше 1%, но прецессия Лензе–Тирринга, как эффект на два порядка более слабый, измерена лишь с точностью 20% [11]. Между тем эвристическая роль последнего эффекта весьма высока, поскольку именно он работает в пользу универсальности принципа относительности систем отчета в ОТО — эквивалентность инерции и гравитации (т.н. принцип Маха). Исходя из опыта эксплуатации существующих БЛГ разумно считать достижимую чувствительность не хуже, чем 10^{-11} рад/(с Гц^{1/2}). Такое разрешение в принципе достаточно (после нескольких месяцев сбора данных), чтобы измерить эффект увлечения локальной системы отчета с точностью до нескольких процентов.

Потребность новых исследований кольцевых гиро-лазеров не ограничивается областью гравитационных измерений. Как оптические интерферометры они представляют интерес для регистрации малых вариаций показателя преломления среды, заполняющей тракт светопровода. Имеются предложения по использованию таких инструментов в задаче поиска гипотетических частиц темной материи — аксионов [12, 13]. Принцип работы ЛГ в таком качестве основан на эффектах Примакова: прямом — резонансное превращение фотонов в аксионы в присутствии сильного магнитного поля, и обратном — распад аксиона на два фотона. При создании сильного внешнего магнитного поля на выбранном участке светового тракта кольца поток аксионов вызывает изменение частоты расщепления мод Саньяка на уровне близком к предельной регистрируемой разности фаз $7 \cdot 10^{-14}$ рад.

Приведенный список (неполный) возможных исследований по проекту ГС демонстрирует его мульти-дисциплинарный характер. Оправдывает

необходимость отработки технологии и накопление опыта эксплуатации инструмента ГС на пилотных моделях промежуточного масштаба 10–100 см с последующим переходом к крупно-габаритной установке 1–3 м, предельная чувствительность которой должна быть адекватна перечисленным выше целям. Выполнимость задачи построения и эксплуатации пилотной модели гироскопа Саньяка гарантируется прошлым опытом работы с подобными установками группы ИЯИ-ГАИШ МГУ и НИИ Полус, обеспечивающим технологическую базу проекта.

5. ИЗМЕРЕНИЕ ЗЕМНОГО ВРАЩЕНИЯ МАЛОЙ МОДЕЛЬЮ ГС

Для отработки техники непрерывной эксплуатации датчиков в нашей лаборатории собрана установка на базе датчика НПО Полус [14] с длиной периметра $L = 20$ см и масштабным коэффициентом $M = 2.75$. Схема управления обеспечивает стабильность тока разряда на уровне 0.1%, а также оснащена системами: перестройки резонатора между 4-мя последовательными продольными модами резонатора, формирование знакопере-

менной частотной подставки и ее дополнительную модуляцию медленным меандром для уменьшения влияние динамических зон захвата. Сбор данных автоматизирован и совмещен с контролем температуры датчика и системой контроля стабилизации резонатора. Подобное описание этих технических решений можно найти в работах [14–16]. Для экранирования от внешних магнитных полей датчик помещен во внешний магнитный экран, изготовленный из трех слоев пленки ММР-50, обеспечивающий ослабление поля не менее чем на порядок.

Результаты проведенных первых экспериментов по наблюдению скорости земного вращения в лабораторных условиях (г. Москва) представлены на рис. 1. Для широты нашей лаборатории (55.70639° с.ш.) расчетное значение угловой скорости составляет 12.426 угл. сек./с. Результирующее среднее значение скорости вращения, полученное в наших экспериментах, составило 12.41 ± 0.01 угл. сек./с (здесь и далее точность измерения задается стандартным отклонением результатов измерений от среднего значения). Наблюдается также явная корреляция изменения температуры датчика и детектируемой скорости.

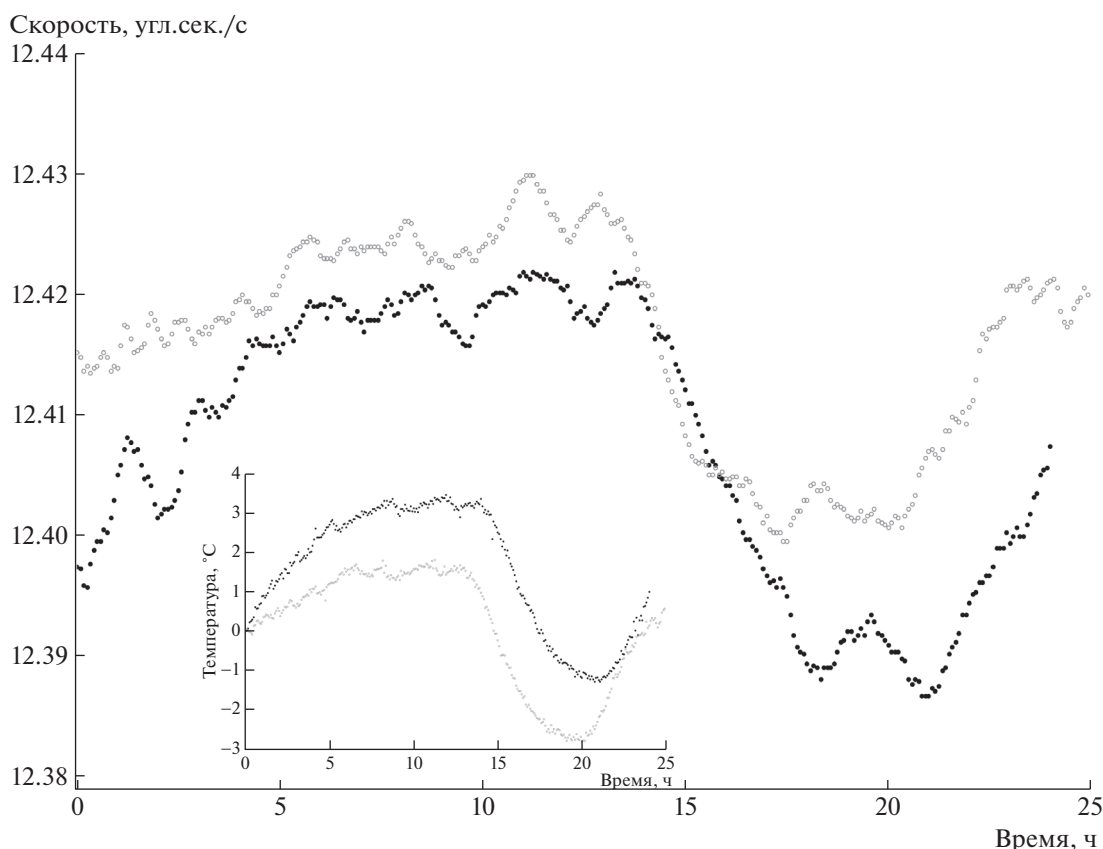


Рис. 1. Угловая скорость вращения для двух мод резонатора (черные и серые точки, время накопления 1 ч). Среднее значение $\Omega = 12.41 \pm 0.01$ угл. сек./с (указано стандартное отклонение). На врезке — график изменения температуры датчика.

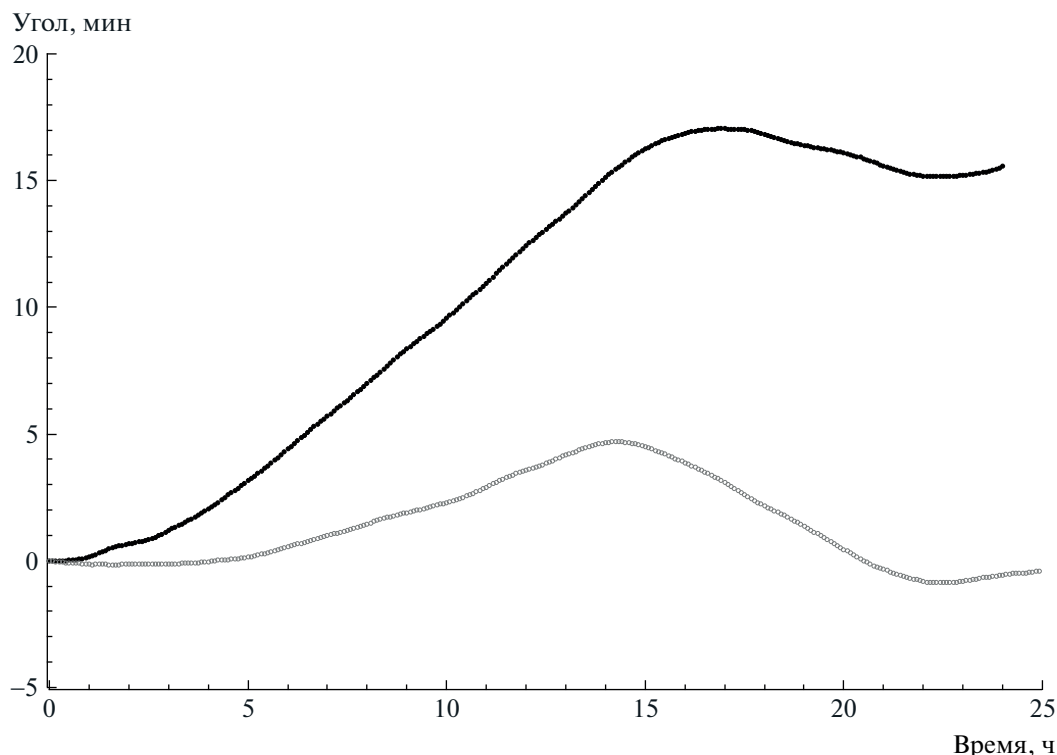


Рис. 2. Накопленный угол ориентации для двух мод резонатора (черные и серые точки, время накопления 1 ч).

Наш эксперимент проводился без какой-то специализированной системы стабилизации температуры. Видно, что данные, получаемые на участках с малыми изменения температуры, обладают гораздо меньшей дисперсией, нежели вся картина в целом. Это позволяет надеяться, что дополнительная термо-стабилизация датчика позволит уменьшить дисперсию и выйти на уровень точности 10^{-3} угл. сек/с ($\sim 3 \cdot 10^{-7}$ рад/(с Гц $^{1/2}$)) при накоплении данных за один час измерений. На рис. 2 представлен временной ход накопления угла ориентации датчика. Более значительный накопленный угол на одной из лазерных мод (черные точки на графике) обусловлен тем, что именно на этой моде производился старт измерений, и первые несколько часов требовались для выхода на стационарный режим.

В текущей ситуации пути повышения чувствительности и точности измерений сводятся к двум основным — совершенствование экранирования от внешнего магнитного поля и температурная стабилизация до уровня $\sim 1^\circ\text{C}$. Известно, что одна из основных проблем датчиков, в которых невязимые промежутки магнитного поля и формирования частотной подставки на основе эффекта Зеемана, является высокая чувствительность к внешним магнитным полям [16]. Результаты записи скоро-

сти вращения длительность 3.5 сут без дополнительного магнитного экрана представлены на рис. 3. Видно, что абсолютные значения получаемой скорости вращения имеют большее отклонение от расчетной, чем в экспериментах с дополнительным магнитным экраном. Также, выход на стационарный температурный режим произошел за 40 ч работы. Величина стандартного отклонения измеренной скорости вращения на контрольном участке длительностью 45 ч (спустя 40 ч после старта измерений) работы дает величину 0.003 угл. сек./с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные на текущий момент результаты предварительных экспериментов подтверждают перспективность продолжения исследований, возможность даже на малой модели с периметром 20 см выйти на уровень чувствительности 10^{-3} угл. сек/с при стабилизации температуры, соответствующем магнитном экранировании и дополнительной алгоритмической коррекции остаточных колебаний температуры, что соответствует $\sim 3 \cdot 10^{-7}$ рад/(с Гц $^{1/2}$), за время накопления один–четыре часа. При успешной долговременной стабилизации параметров установки, в частности в условиях подземного размещения в лаборатории БНО ИЯИ РАН, будет возможно и уве-

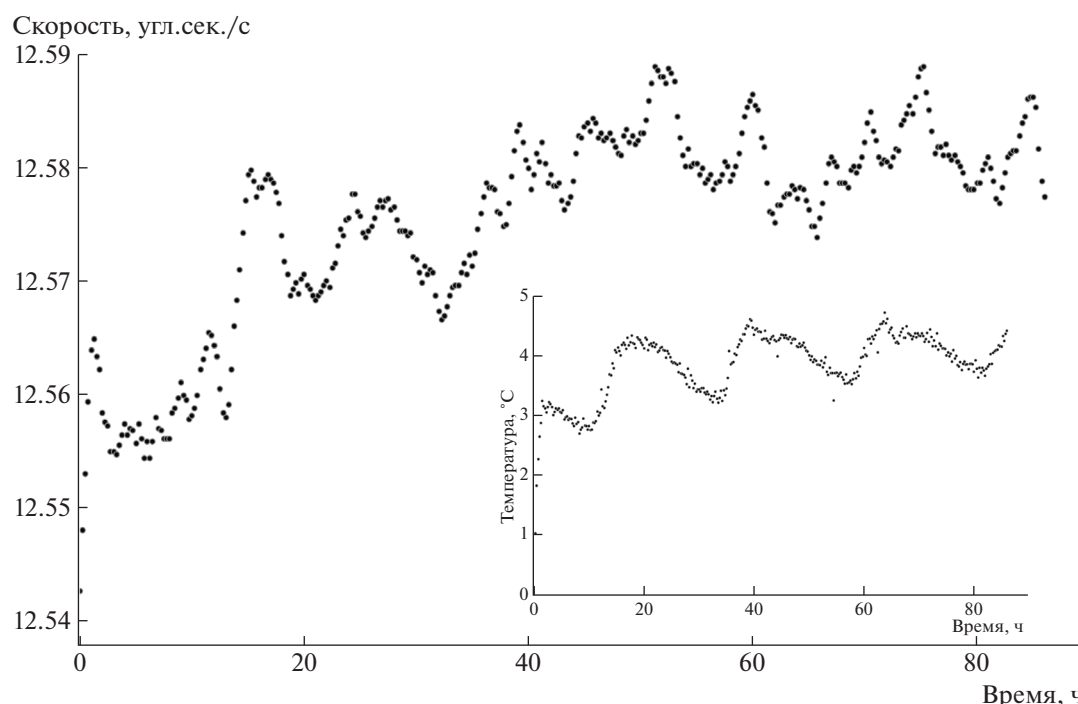


Рис. 3. Угловая скорость вращения без дополнительного магнитного экрана на одной моде резонатора (время накопления — 1 ч., шаг точек — 15 мин). Среднее значение на отрезке после 40-го часа $\Omega = 12.581 \pm 0.003$ угл. сек./с. На врезке график изменения температуры датчика.

личение времени накопления данных, что позволит еще больше увеличить чувствительность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Rudenko V.N., Oreshkin S.I., Rudenko K.V. // Phys. Usp. 2022. V. 65. P. 920–951.
2. http://www2.phys.canterbury.ac.nz/~physrin/content/about_us.php
3. Rowe C.H. et al. // Appl. Opt. 1999. V. 38. P. 2516.
4. <http://web2.infn.it/GINGER/index.php/it/>
5. Santagata R. et al. // Class. Quantum Grav. 2015. V. 32. P. 055013.
6. Igel H. et al. // Geophys. J. Int. 2007. V. 168. P. 182.
7. Igel H. et al. // Geophys. Res. Lett. 2011. V. 38. P. L21303.
8. Ciufolini I., Pavlis C. // Nature. 2004. V. 431. P. 958.
9. Schiff L.I. // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 1960. V. 46. P. 871.
10. Lense J., Thirring H. // Phys. Z. 1918. V. 19. P. 156.
11. Everitt C.W.F. et al. // Phys. Rev. Lett. 2011. V. 106. P. 2211014.
12. Peccei R.D., Quinn H.R. // Phys. Rev. D. 1977. V. 16. P. 1791.
13. Sikivie P. // Phys. Rev. D. 1985. V. 32. P. 2988.
14. Azarova V.V. et al. // Quantum Electron. 2000. V. 30 (2). P. 96.
15. Azarova V.V. et al. // Quantum Electron. 2015. V. 45 (2). P. 171.
16. Kolbas Yu.Yu. et al. // Quantum Electron. 2015. V. 45 (6). P. 573.

Gravity-Inertial Laser Detector of Astro-Geophysical Disturbances in the Underground Laboratory of the BNO INR RAS

K. V. Rudenko^{1, *}, S. I. Oreshkin², S. M. Popov², V. N. Rudenko², V. V. Azarova³,
Yu. D. Golyaev³, I. I. Savelyev³, and A. G. Shuraev³

¹ Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

² Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University, Moscow, 119234 Russia

³ Stelmakh Research Institute POLYUS, Moscow, 117342 Russia

*e-mail: rudenko@ilc.edu.ru

Received June 1, 2024; revised July 3, 2024; accepted July 15, 2024

Abstract—The design of a large ring laser gyroscope with the record sensitivity to variations in the rotation speed and angular inclinations of the laboratory base surface, as well as to the rotational asymmetry of the re-

fractive index of the optical medium, including vacuum is presented. Such an instrument placed in an underground observatory will allow one to obtain information relevant to particle physics, quantum field theory, laser physics, astrometry, global geodynamics, and seismology. In addition, it can be applied to forecast global cataclysms such as earthquakes. As a practical step to support the project, the results of trial experiments with a small-sized laser gyroscope (LG) are presented.

Keywords: laser gyroscope, inertial sensors, measurements of the Earth's rotation, terrestrial toroidal modes, gravity magnetism, dark matter particles