

ИНЖЕНЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

УДК 520,52-08,53-08,525.625,539

ПОВЫШЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ЛАЗЕРНОГО ГИРОСКОПА В ПОДЗЕМНОЙ ЛАБОРАТОРИИ БНО ИЯИ РАН

© 2025 г. К. В. Руденко^{а, *}, Ю. М. Гаврилюк^б, Ф.С. Гурин^б, С. И. Орешкин^б, В. Н. Руденко^б,
Ю. Д. Голяев^с, И.И. Савельев^с, В.А. Цеваков^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 “Полюс” им. М.Ф. Стельмаха”, Москва, 117342 Россия

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

Поступила в редакцию 21.07.2025 г.

После доработки 22.07.2025 г.

Принята к публикации 28.07.2025 г.

Исследована возможность применения лазерного гироскопа с круговой поляризацией волн и зеемановской частотной подставкой для проведения различного типа геофизических измерений. Приведены первые результаты измерений скорости вращения Земли зеемановским лазерным гироскопом с периметром 20 см в подземной лаборатории БНО ИЯИ РАН в условиях максимального исключения внешних воздействующих факторов – с термостабилизацией, экранированием э/м полей, минимизацией сейсмических шумов. Отмечено увеличение чувствительности регистрации на порядок (до $10^{-3} \text{ }^\circ/\text{ч}$) по сравнению с ранее проведенными экспериментами в городской наземной лаборатории. Показана возможность непрерывной работы установки в удаленном режиме более 6 мес.

Ключевые слова: лазерный гироскоп, инерциальные датчики, измерения земного вращения

DOI: 10.56304/S2079562925060259

1. ВВЕДЕНИЕ

Лазерные гироскопы (ЛГ) являются эффективными устройствами для построения компактных приборов, обладающих высокой чувствительностью к вариациям угловой скорости в широком диапазоне, хорошей долговременной стабильностью и отсутствию движущихся механических элементов в конструкции [1]. Эффект Саньяка [2], являющийся по своей сути чисто кинематическим эффектом, в сочетании с применением лазерной генерации в кольцевом резонаторе, позволяет реализовать высокостабильный фазовый метод детектирования и может обеспечить потенциально высокую чувствительность к изменению угловых скоростей. Основное уравнение лазерного гироскопа [1]

$$\Delta\nu = \frac{4S}{\lambda L} \Omega, \quad (1)$$

где $\Delta\nu$ — разность частот встречных волн в кольцевом резонаторе, S и L — площадь и длина резонатора, λ — длина волны излучения лазера в покоящемся резонаторе, Ω — угловая скорость вращения, идеально подходит для построения датчика угловой скорости, т. к. детектируемая разность частот оказывается линейна относительно скоро-

сти вращения резонатора. Коэффициент пропорциональности $M = \frac{4S}{\lambda L}$ называют масштабным коэффициентом ЛГ.

На основе большого ЛГ (БЛГ) с периметром резонатора более 4 м 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 и геофизических приложений. Кроме этого, при дополнительном инструментальном оснащении БЛГ может быть использован для фундаментальной проблемы поиска “темной материи” [3].

В нашей предыдущей работе [4] исследовалась модель лазерного гироскопа (ЛГ) на основе датчика К5 производства НИИ “Полюс” в московской лаборатории. Среднее значение проекции скорости вращения Земли, измеренное в наших экспериментах при вертикальном размещении оси чувствительности датчика, равнялось $12.41 \pm 0.01 \text{ }^\circ/\text{ч}$ (здесь и далее точность измерения задается стандартным отклонением результатов

измерений от среднего значения). В задачу настоящей работы входила экспериментальная оценка шумов нашего ЛГ и возможность достижения более высокой чувствительности в “идеальных” внешних условиях — условиях подземной лаборатории БНО ИЯИ, а также оценка временной стабильности характеристик ЛГ. Под идеальными внешними условиями подразумевалось отсутствие внешних механических шумов, стабилизированный температурный и влажностный режим, минимизацию внешних электрических и магнитных полей. Предполагалось уменьшить ошибку измерений как минимум на порядок — то есть достигнуть уровня стандартного отклонения регистрируемых экспериментальных данных на уровне 10^{-3} °/ч. В данной статье представлены результаты такого исследования.

2. ЗЕЕМАНОВСКИЙ ЛАЗЕРНЫЙ ГИРОСКОП

В качестве исследуемого прибора использовалась серийная модель зеемановского лазерного датчика угловой скорости, производимая АО “НИИ “Полус” им. М.Ф. Стельмаха” под маркировкой К5. Датчик представляет собой изготовленный в цельном куске ситалла кольцевой He–Ne лазер, имеющий периметр $L = 20$ см. Подробное описание оптико-физической схемы и конструкции можно найти в работах [5, 6]. Ограничимся тут лишь перечислением основных физико-технических решений. Лазер работает на длине волны 632.8 нм и обладает непланарным резонатором, что приводит к снятию частотного вырождения для циркулярно поляризованных мод противоположной ориентации. Частотная подставка формируется за счет наложения на рабочие каналы лазера знакопеременного продольного магнитного поля. Продольный эффект Зеемана в совокупности с непланарным резонатором позволяет формировать в резонаторе две бегущие навстречу друг другу и невзаимодействующие волны с разными частотами без размещения внутри резонатора дополнительных оптических элементов. В результате мы получаем стабильный одномодовый двухчастотный лазер. Два из четырех зеркал резонатора установлены на пьезоэлементы для контроля периметра резонатора. Система контроля периметра обеспечивает стабильность длины резонатора на уровне $10^{-3} \lambda$, а также позволяет перестраивать периметр резонатора между 6-ю последовательными продольными модами. Лазер помещен в два магнитных экрана, каждый из которых обеспечивает ослабление внешнего магнитного поля не менее чем в 100 раз. Кроме этого, эти два экрана играют роль тепловых изоляторов, ограничивая теплообмен с окружающей средой. Входным сигналом для системы регистрации является бегущая интерференционная картина (биения), получаемая от смешения встречных волн, распро-

страняемых в резонаторе. Гармонический сигнал биений преобразуется в последовательность импульсов, которые и подсчитываются за выбранный промежуток времени. Скорость вращения высчитывается по формуле

$$\Omega = \frac{KN}{T}, \quad (2)$$

где T — время накопления импульсов, N — число импульсов, K — обратная величина масштабного коэффициента. Для нашего ЛГ $K = 0.6875$ °/импульс.

3. ПРЕДЕЛЬНАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ЛГ

Полезным выходным сигналом ЛГ является разность частот бегущих встречных волн, поэтому предельная чувствительность ЛГ определяется шириной линии излучения лазера. При гипотетической ситуации, когда все технические факторы, вызывающие флуктуации частот генерируемых волн сведены к нулю, определяющим фактором для ширины линии генерации будут естественные флуктуации, обусловленные принципиально неустраняемыми причинами: квантовым характером спонтанного излучения и атомной структурой вещества резонатора. Оценка величины этих флуктуаций ширины линии излучения лазера дается формулой Шавлова–Таунса [7]. В пересчете на флуктуацию угловой скорости для нашей модели датчика мы получим:

$$\Delta\Omega = \frac{\lambda L}{4S} \frac{c\mu}{2\pi L} \sqrt{\frac{h\nu T_m}{2P_{\text{out}}}}, \quad (2)$$

где μ — величина потерь в резонаторе, T_m — коэффициент пропускания выходного зеркала, P_{out} — выходная мощность, ν — частота генерации, c , h — скорость света и постоянная Планка. Подставив в эту формулу параметры нашего датчика: $P_{\text{out}} = 10^{-4}$ Вт, $T_m = 10^{-3}$, $\mu = 0.15\%$, $L = 0.2$ м, $S = 0.025$ м², $\lambda = 632.8$ нм мы получим $\Delta\Omega \approx 6 \cdot 10^{-9}$ рад/с^{1/2} или $1.2 \cdot 10^{-3}$ °/с^{1/2}.

Столь высокая потенциальная чувствительность для газовых лазеров не удивительна, так как использование высокодобротного резонатора с высокой внутренней мощностью генерации и дает подобный результат. Прямой путь повышения чувствительности ЛГ связан с увеличением периметра резонатора — увеличивается масштабный коэффициент ЛГ. Однако, в этом случае приходится уменьшать мощность генерации, чтобы оставаться в режиме генерации на одной продольной моде. Снижение же мощности приводит к увеличению флуктуаций по формуле (2). В этом состоит одна из проблем в изготовлении ЛГ большого масштаба. Отметим, что полученная оценка в $6 \cdot 10^{-9}$ рад/с^{1/2} находится на уровне значений чувствительности, достигаемой на лазерных гироскопах с периметром порядка 4 м [3]. Тем не менее, по-

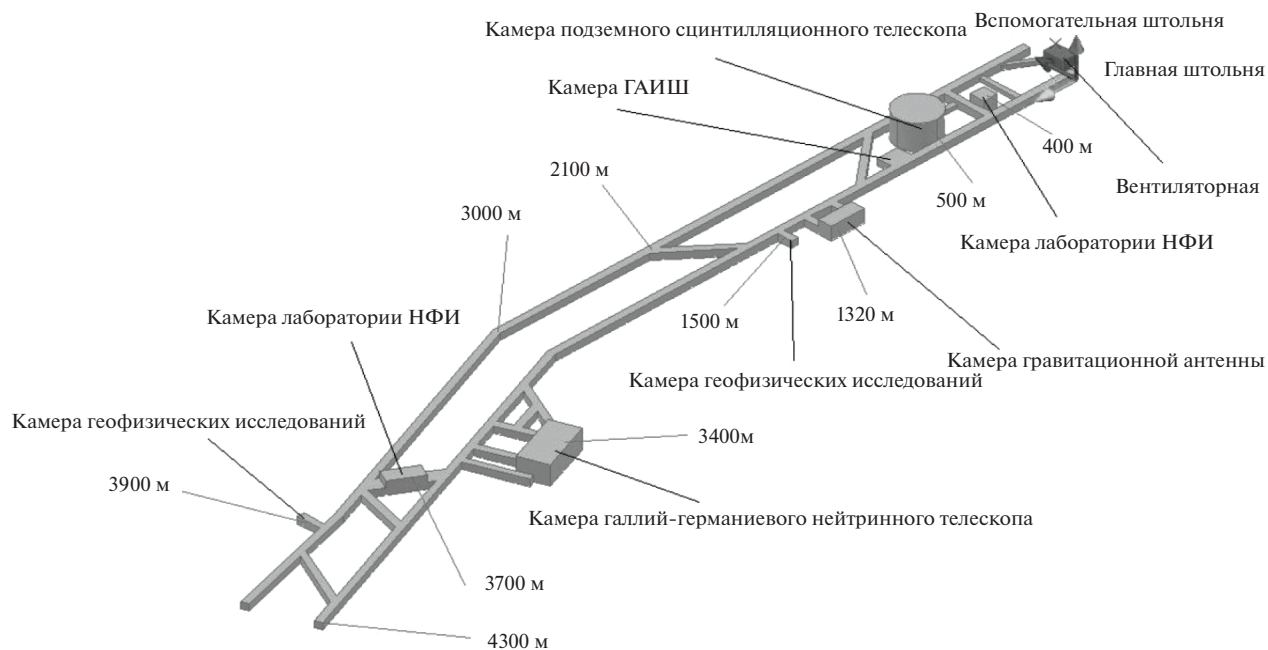


Рис. 1. Схема размещения экспериментальных установок в главной штольне БНО ИЯИ.

лучив подобную оценку, можно попробовать приблизиться к ней, проводя эксперименты по измерению предельной чувствительности ЛГ малого размера в идеальных внешних условиях.

4. ПОДЗЕМНАЯ ЛАБОРАТОРИЯ БНО ИЯИ

Подземная лаборатория оборудована в уникальном научном комплексе Баксанской нейтринной обсерватории (БНО) ИЯИ РАН в Баксанской долине (широта $43^{\circ}16'32''$). Эксперименты по нейтринной астрофизике, проводимые в БНО с 1977 г., способствовали развитию подземной научной инфраструктуры (рис. 1). На удалении 1350 м от входа в тоннель в лаборатории ОГРАН (оптическая гравитационная антенна) и был установлен ЛГ. Помещение лаборатории разделено на две камеры: предварительная и основная. В основной камере на горной породе установлены монолитные бетонные постаменты большой массы. Температура в предварительной камере устанавливается внешними условиями на уровне 19.5°C , сезонные колебания температуры не превышают 2°C . В основной камере система температурной стабилизации удерживает значение 25°C с точностью 0.1°C (указано стандартное отклонение). Также в лаборатории осуществляется непрерывный сбор данных с двух наклономеров (ориентированных север-юг, запад-восток), установленных в непосредственной близости от ЛГ. Сейсмический фон в подземных лабораториях БНО относится к естественным шумам окружения, ограничивая реальную разрешающую способность датчи-

ков, которые там установлены. По этой причине он периодически подвергался тщательным измерениям. Последний подробный отчет о таких измерениях был опубликован в работе [8]. Характерные амплитуды наклонов шумового сейсмического фона лаборатории лежат в пределах долей угловых секунд [9].

5. УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА И РЕЖИМЫ РАБОТЫ ДАТЧИКА

ЛГ на основе датчика К5 в двух магнитных экранах, блок управления, компьютер с системой сбора и обработки данных размещался на немагнитном оптическом столе на гранитном постаменте в термостабилизированной камере подземной лаборатории. Корпус датчика располагался горизонтально поверхности земли.

Устройство датчика К5 и его системы управления позволяют реализовывать различные режимы работы, которые были разработаны за последние годы. Одной из основных проблем земановских ЛГ, ограничивающих их чувствительность и стабильность, является крайне высокая чувствительность к внешним и внутренним магнитным полям. Детальный разбор самых разных эффектов и их влияние на величину смещения нуля проведены в работе [10]. Учитывая накопленный опыт, нами был выбран квазичетырехчастотный режим со знакопеременной прямоугольной магнитной подставкой и дополнительным ее «ошумлением» медленным прямоугольным меандром [6]. В результате применения данных параметри-

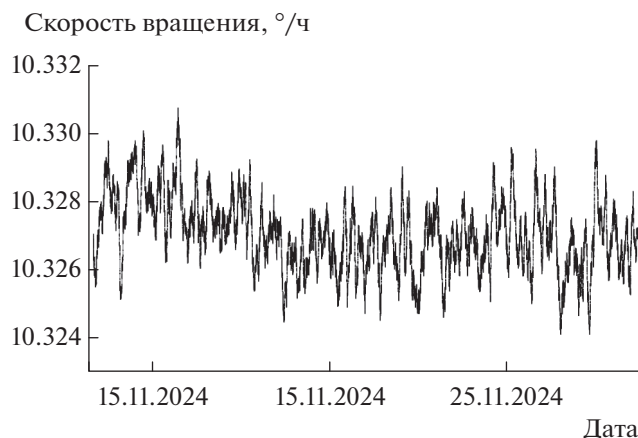


Рис. 2. Результаты непрерывной записи данных о скорости вращения земли за один месяц с усреднением 1 ч. Зарегистрированное среднее значение скорости вращения $10.32704 \pm 0.0011^\circ/\text{ч}$.

ческих модуляций можно добиться максимально-го снижения размеров динамических зон захвата, что позволяет максимально линейаризовать выходную характеристику ЛГ, уменьшить влияние внутренних и внешних магнитных полей, уменьшить дрейф нуля. В наших экспериментах частота знакопеременной подставки составляла 250 Гц и амплитуда 30 кГц. Частота медленного меандра — 4 Гц. Учитывая необходимость долговременной работы датчика и технические особенности передачи пакетов данных мы использовали время работы на одной моде в 320 с. Период накопления данных для съема одного измерения составлял 12.8 с.

Пробные эксперименты, проведенные нами в московской лаборатории [4], выявили критическую необходимость стабилизации температуры датчика для уменьшения дисперсии выходных данных. Дневные вариации температуры в лаборатории на уровне ± 2 градуса не позволяли получить величину стандартного отклонения менее чем $10^{-2}^\circ/\text{ч}$. В наших условиях термо-стабилизированной подземной лаборатории удалось достичь стабилизации температуры корпуса датчика в диапазоне $\pm 0.1^\circ\text{C}$ на протяжении всего времени проведения эксперимента. Кроме того, нам удалось стабилизировать температуру корпуса датчика на отметке 42°C , что совпадает с областью нулевого коэффициента теплового расширения оптического ситалла [11], тем самым минимизируя возможные ошибки в работе системы контроля длины резонатора.

Сбор данных был автоматизирован и адаптирован для непрерывной работы. Кроме значений накопленных импульсов система записывала необходимые параметры для контроля работы датчиков: температуру датчика и температуру экранов, температуру воздуха в промежутке между

двумя магнитными экранами, среднюю амплитуду сигнала, данные напряжений на пьезоэлементах, управляющие сигналы. Вся собранная информация автоматически отправлялась московскую лабораторию, где проходила ее первичная обработка.

6. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На настоящий момент в непрерывном режиме датчик проработал уже более 6 месяцев. Кроме непрерывной записи данных о скорости вращения земли, был проведен эксперимент по изменению наклона датчика — изменения величины проекции оси вращения земли на ось чувствительности датчика. Датчик, лежащий неподвижно на горизонтальной поверхности показывает значение скорости вращения, равное проекции оси вращения на направление оси чувствительности. Расчетное значение проекции скорости вращения земли на ось чувствительности датчика, для координат подземной лаборатории составляет $10.327^\circ/\text{ч}$. Пример непрерывной записи скорости вращения земли в период с 02.11.2024 по 02.12.2024 в отсутствие внешних воздействий с усреднением данных окном в 1 час представлен на рис. 2. Среднее значение скорости вращения по этим данным — $10.32704^\circ/\text{ч}$, а величина стандартного отклонения по этим данным составляет $0.0011^\circ/\text{ч}$, что соответствует чувствительности $\sim 3 \cdot 10^{-7}$ рад/с^{1/2}.

Кроме получения данных непрерывной записи скорости вращения, был проведен эксперимент по измерению скорости при калиброванном наклоне датчика, чтобы убедиться в том, что записываемые данные являются действительно данными о скорости вращения Земли, а также получить еще одну оценку времени необходимого накопления данных для подтверждения точности детектирования изменения скорости вращения. Идея эксперимента состояла в изменении проекции угловой скорости вращения на вертикальную ось чувствительности датчика и регистрации изменений в показаниях скорости вращения. Имеющийся у нас стенд позволял минимально изменять угол наклона датчика на величину $1.9'$. Наклон осуществлялся в направлении на север для облегчения пересчета получаемых данных о скорости вращения. Погрешность в определении направления на сервер составляла $\sim 2^\circ$. На рис. 3 представлены экспериментальные и теоретические данные величины изменения скорости вращения от наклона датчика.

В зависимости от величины изменения угла мы выбирали время усреднения так, чтобы получить величину стандартного отклонения получаемых данных меньше, чем теоретическое изменение величины скорости при отклонении на этот угол. При изменении угла наклона на минимальное значение в $1.9'$, время усреднения выбиралось

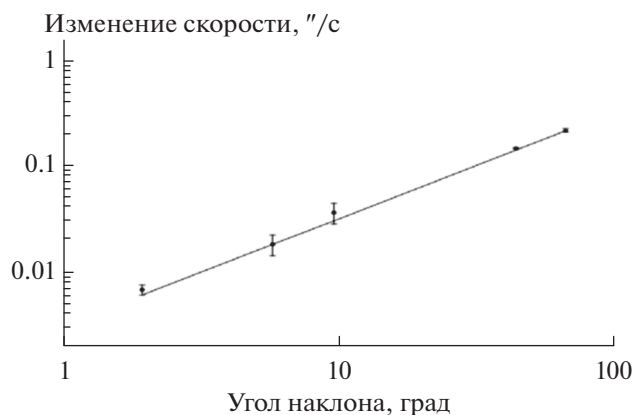


Рис. 3. В логарифмическом масштабе представлены экспериментальные (точки) и теоретические (прямая линия) значения изменения детектируемой скорости вращения от угла наклона оси чувствительности датчика на север.

4 ч, при этом стандартное отклонение измерений составило $7 \cdot 10^{-4}$ "/с, а изменение величины скорости 0.006 "/с. Таким образом можно сказать, что мы уверенно детектировали изменение скорости, вызванное наклоном оси чувствительности датчика, а стандартное отклонение в $7 \cdot 10^{-4}$ "/с за 4 ч усреднений соответствует чувствительности 0.08 "/с $^{1/2}$ или дрейфу нуля $1.3 \cdot 10^{-3}$ °/ч. Для больших величин углов времени усреднения выбирались в диапазоне от 1 ч (для угла $3.8'$) до 1 мин (для угла $66.8'$). Отметим, что по результатам исследований шумового фона штольни БНО ИЯИ характерные амплитуды наклонных колебаний земной поверхности лежат в диапазонах десятых долей угловых секунд [9]. Соответственно, достигнутая нами чувствительность не позволяет детектировать эти фоновые сейсмические колебания.

7. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

За время проведения эксперимента никаких заметных гео-событий не произошло, температура оставалась стабильной, на больших временных участках отсутствовали внешние возмущения. Соответственно, по этим участкам можно оценить статистические характеристики шумов нашей системы. Наиболее полную информацию о статистике шумов системы и возможности достижения максимальной точности дает метод вариаций Аллана, который является стандартом де-факто в оценке параметров стандартов частоты, а в последние годы активно развивается и в гироскопии. На рис. 4 представлена полученная по экспериментальным данным за 35 дней вариация Аллана, рассчитанная по формуле с перекрытием (Overlapping Allan Variation) [12, 13]. На отметке 320 с мы видим характерную особенность, положение которой точно совпадает с периодом пере-

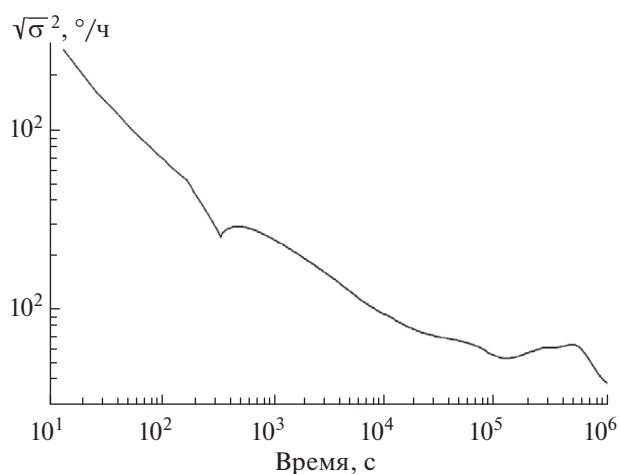


Рис. 4. Вариация Аллана, рассчитанная по формуле с перекрытием (Overlapping Allan Variation [13]), экспериментальных данных за 35 дней непрерывных измерений.

ключений между модами в квазичетырехчастотном режиме. Минимум дисперсии достигается на временах $\sim 10^5$ с. Дальнейшее увеличение времени усреднения уже не приводит к увеличению точности измерений. Наблюдаемое после времен 10^6 с дальнейшее падение дисперсии сложно интерпретировать, так как на таких временах мала статистика данных и ошибка существенно нарастает. Согласно нашим данным мы можем использовать времена усреднений до 10^5 с, получая при этом ошибку измерений в $\sim 5 \cdot 10^{-4}$ °/ч. Это время усреднения было использовано нами для градуировки нашего датчика. Рассчитанное среднее значение скорости вращения при усреднении окном 10^5 с позволило определить смещение нуля датчика равное $0.2789^\circ/\text{ч}$.

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проанализирована возможность применения лазерного гироскопа для различных типов геофизических измерений. Проведены первые эксперименты по непрерывной записи данных о скорости вращения Земли с помощью зеемановского ЛГ (периметр резонатора 20 см) длительностью более 6 мес в подземной лаборатории БНО ИЯИ. Размещение ЛГ в подземной лаборатории позволило достигнуть чувствительность на уровне $3 \cdot 10^{-7}$ рад/с $^{1/2}$, что соответствует величине стандартного отклонения 10^{-3} °/ч при накоплении данных за 1 ч. Полученный результат лучше на порядок, по сравнению с предварительными экспериментами, проводимыми в московской лаборатории. На наш взгляд, определяющим фактором в улучшении чувствительности явилась ста-

билизация температуры датчика на уровне одной десятой градуса.

9. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Aronowitz F.* The Laser Gyro. Laser Applications. Monte R. (Ed.). 1971. V. 1. New York: Academic Press.
2. *Sagnac G.C.R.* // Acad. Sci. Paris. 1913. V. 157. P. 708.
3. *Rudenko V.N. et al.* // Phys. Usp. 2022. V. 65. P. 920–951.
4. *Руденко К.В., Оreshkin С.И., Попов С.М. и др.* // Ядерн. физ. инжинир. 2024. Т. 15 (6). С. 599–606 [*Rudenko K.V., Oreshkin S.I., Popov S.M., et al.* // Phys. At. Nucl. 2024. V. 87 (12). P. 1836–1842].
5. *Azarova V.V. et al.* // Quantum Electron. 2000. V. 30 (2). P. 96.
6. *Azarova V.V. et al.* // Quantum Electron. 2015. V. 45 (2). P. 171.
7. *Schawlow A.L., Townes C.H.* // Phys. Rev. 1958. V. 112. P. 1940.
8. *Naticchioni L. et al.* // Eur. Phys. J. Plus. 2022. V. 137. P. 124.
9. *Осика В.И. и др.* // Мат. 50-й юб. сес. Междунар. сем. им. Д.Г. Успенского – В.Н. Страхова “Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей”. 2024. Москва.
10. *Kolbas Yu.Yu. et al.* // Quantum Electron. 2015. V. 45 (6). P. 573–581.
11. *Запотьмько Н.Р., Власов А.В.* // Тез. докл. XXII Междунар. науч.-техн. конф. “Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов.” Государственный научный центр РФ “Технология”. 2023. Обнинск.
12. *Allan D.W.* // Proc. IEEE. 1966. V. 54 (2). P. 221–230.
13. *Riley W.J.* Handbook of Frequency Stability Analysis. 2008. Boulder, CO, USA: Time and Frequency Division Physics Laboratory. National Institute of Standards and Technology.

Sensitivity Enhancing of a Laser Gyroscope in the Underground Laboratory of BNO INR RAS

K. V. Rudenko^{1, *}, Yu. M. Gavriluk², F. S. Gurin², S. I. Oreshkin²,
V. N. Rudenko², Yu. D. Golyaev³, I. I. Savelyev³, and V. A. Tsevakov³

¹*Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

²*Sternberg Astronomical Institute, Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

³*POLYUS Research Institute of M.F. Stelmakh, Moscow, 117342 Russia*

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

Received July 21, 2025; July 22, 2025; accepted July 28, 2025

Abstract—The possibility of using a laser gyroscope with circular polarization of waves and a Zeeman frequency biasing for conducting various types of geophysical measurements is investigated. The first results of measuring the Earth’s rotation velocity by a Zeeman laser gyroscope with a perimeter of 20 cm in the underground laboratory of the BNO INR RAS are presented under conditions of maximum exclusion of external influencing factors – with thermal stabilization, shielding of electromagnetic fields, and minimization of seismic noise. An increase in the registration sensitivity by an order of magnitude (up to 10^{-3} grad/hour) is noted compared to previously experiments in the urban ground-based laboratory. The possibility of continuous operation of the installation in a remote mode for more than 6 months is shown.

Keywords: laser gyroscope, inertial sensors, earth rotation measurements