

P13-2011-124

В. Ю. Батусов, Ю. А. Будагов, М. В. Ляблин

ЛАЗЕРНЫЙ ДАТЧИК УГЛОВОЙ КОМПОНЕНТЫ  
СЕЙСМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ  
ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Направлено в журнал «Письма в ЭЧАЯ»

Батусов В. Ю., Будагов Ю. А., Ляблин М. В.

P13-2011-124

Лазерный датчик угловой компоненты сейсмических колебаний  
земной поверхности

Предложен принципиально новый метод измерения угла сейсмического наклона земной поверхности. Метод открывает возможность on-line стабилизации положения лазерного луча как весьма протяженной координатной оси в метрологическом обеспечении прецизионного сооружения крупномасштабных физических установок. Метод апробирован экспериментально: впервые зарегистрированы низкочастотные периодические угловые колебания земной поверхности с амплитудой  $5 \cdot 10^{-7}$  рад и величиной шума регистрации  $2,5 \cdot 10^{-8}$  рад. Измерения были выполнены в ЦЕРН в период сооружения спектрометрического комплекса АТЛАС.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В. П. Дзелепова ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2011

Batusov V. Yu., Budagov J. A., Lyablin M. V.

P13-2011-124

Laser Sensor of the Earth Surface Seismic Vibration  
Angular Component

A principally new method to measure the seismic tilt angle is proposed. The method opens up the possibility of on-line stabilization of the laser ray extended coordinate axis in the metrology support of large scale physics equipment high precision assembly. The method has been approved experimentally: for the first time the low frequency periodic angular oscillation of the earth surface has been registered with  $5 \cdot 10^{-7}$  rad amplitude and  $2.5 \cdot 10^{-8}$  rad registration noise. The measurements were performed at CERN during the assembly of the ATLAS Spectrometer.

The investigation has been performed at the Dzhelepov Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2011

## ВВЕДЕНИЕ

Создание современных крупномасштабных исследовательских установок и объектов гражданского назначения требует высокоточного геодезического сопровождения.

Для этих целей, как правило, используется расположенная на монолитном основании система реперных меток и связанная с ними система координат (NETWORK). Известное расположение меток и осей — метрологических составляющих NETWORK — обеспечивает проектную точность сооружаемой установки. Понятно, что неопределенность в пространственной локализации реперных меток и координатных осей прямым образом влияет на погрешность в контролируемых размерах сооружаемой установки.

Затруднения принципиального характера возникают при метрологическом обеспечении сборки особо крупных, протяженных исследовательских комплексов: доступный геодезический арсенал (в ряде случаев) недостаточен и не отвечает требованиям жестких проектных допусков именно вследствие трудностей в стабилизации пространственного положения элементов NETWORK. В первую очередь это относится к созданию и стабилизации весьма протяженных координатных осей (реперных линий). Необходимость в использовании протяженных реперных линий возникает при высокоточном монтаже большого числа ускорительных секций коллайдеров (например ILC/CLIC) и последующей on-line стабилизации элементов собранной конструкции.

В кратковременном плане, такова задача определения расположения трубки с пучками сталкивающихся протонов LHC в спектрометрическом комплексе АТЛАС и последующей установки ее в номинальное положение.

Опыт разработки и использования лазерной измерительной системы [1–3] в создании адронного калориметра АТЛАС и связанные с ним последующие исследования распространения луча лазера в атмосферном воздухе [4–8] показали перспективность использования лазерного луча в качестве реперной линии.

В данной работе исследована устойчивость такой линии как важного элемента NETWORK по отношению к угловой компоненте сейсмических шумовых колебаний.

Этот вид шума является одним из основных, влияющих на стабильность положения протяженной лазерной реперной линии. Он приводит к неконтролируемому наклону основания лазерного источника и угловому смещению лазерного луча. Сейсмический наклон земной поверхности обусловлен поверхностными звуковыми волнами, вызванными разными причинами (лунные и солнечные приливы, сейсмические колебания, движение терминатора по земной поверхности, шумы индустриального происхождения и др.). Теоретические оценки сейсмического шумового наклона земной поверхности находятся в диапазоне  $10^{-7} - 10^{-8}$  рад [9].

Если измерять (мониторировать) угловое положение поверхности Земли, то, учитывая эту информацию, можно попытаться обеспечить on-line стабилизацию направления лазерного луча. В качестве репера предлагается взять за основу направление вектора силы тяжести. Его изменение (до 10 нрад [9]) носит долговременный — сутки и более — характер. В качестве эталона горизонтальности предлагается использование *поверхности жидкости*: она перпендикулярна вектору силы тяжести.

Предложенная идея метода осуществлена в устройстве регистрации шумового наклона земной поверхности.

В дальнейшем планируется мониторинг угла наклона земной поверхности и создание принципиально новой системы NETWORK с on-line стабилизацией направления лазерного луча как весьма протяженной реперной линии с угловой стабильностью, достаточной для высокоточного сооружения и контроля экспериментальных установок значительных размеров, состоящих из большого числа структурных элементов.

## **ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЯ СЕЙСМИЧЕСКОГО НАКЛОНА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

На рис. 1 показан сосуд с жидкостью, расположенный на основании, монолитно связанном с поверхностью Земли.

Наклон поверхности Земли изменяет угол между поверхностью жидкости и основанием. Если расположить лазер на том же основании, то его луч после отражения от поверхности жидкости отклонится от первоначального направления в зависимости от углового наклона  $\phi$  земной поверхности.

Угол отклонения  $\theta$  отраженного луча лазера от своего первоначального положения будет в два раза больше угла наклона земной поверхности  $\phi$ . Фиксация такого рода изменения направления лазерного луча осуществляется позиционно-чувствительным квадрантным фотоприемником (КФП) [10], также монолитно связанным с поверхностью Земли.

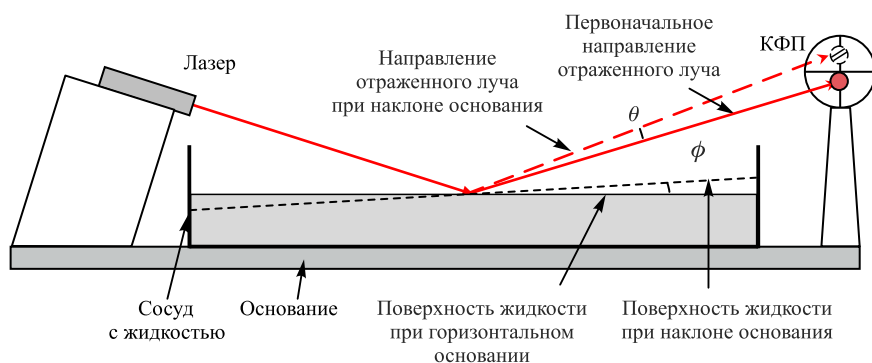


Рис. 1. Принцип измерения углового сейсмического наклона земной поверхности при помощи лазерного луча

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

На рис. 2 показана блок-схема экспериментальной установки для регистрации сейсмического наклона земной поверхности относительно горизонтального положения поверхности жидкости.

Опора установки  $O$  выполнена в виде массивной трубы из нержавеющей стали. На ней размещалось верхнее основание  $O_1$  для крепления лазера  $L$ , юстировочных элементов и КФП. Кювета с жидкостью располагалась в нижней части трубы.

Нижняя часть трубы крепилась к основанию  $O_2$ , оборудованному микрометрическим позиционером  $K$  для фиксированного наклона при калибровке измерений.

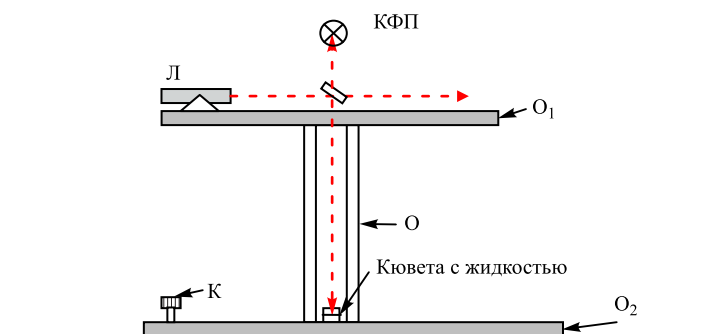


Рис. 2. Схема экспериментальной установки по измерению сейсмического наклона земной поверхности

Лазерный луч при помощи полупрозрачного зеркала направлялся перпендикулярно относительно первоначального положения в кювету с жидкостью, отражался от поверхности жидкости и посылался на КФП. Сигнал с КФП регистрировался 24-битным АЦП и компьютером. В схеме измерения использовалась дуантная конфигурация КФП.

Для увеличения чувствительности измерений при помощи телескопического коллиматора, установленного перед лазерным источником, проводилась регулируемая фокусировка лазерного луча на поверхность КФП.

### ВЕЛИЧИНА ДОСТИЖИМОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ДАТЧИКА

Величина регистрируемого дуантным фотоприемником (ДФП) смещения одномодового лазерного луча, соответствующая шумам лазерного источника, определяется соотношением

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{\Delta d}{D}, \quad (1)$$

где  $\frac{\Delta P}{P}$  — нестабильность мощности излучения в сечении лазерного луча;  $D$  — диаметр лазерного луча на ДФП;  $\Delta d$  — вызванное шумами  $\frac{\Delta P}{P}$  «смещение» лазерного луча на ДФП [11].

Минимальный диаметр луча  $D$  определяется конструктивными особенностями КФП и не может быть меньше 100 мкм. Для лазерного источника с нестабильностью мощности излучения в сечении луча  $\frac{\Delta P}{P} = 10^{-5}$  [12, 13] из (1) находим имитируемую шумами величину углового наклона  $\frac{\Delta d}{l}$ : при длине оптического пути  $l = 1$  м она достигает  $\frac{\Delta d}{l} 10^{-9}$  рад.

### ИСТОЧНИКИ ШУМОВ ДЕТЕКТОРА

Одним из основных шумов при долговременных измерениях в предложенном детекторе является зависимость его показаний от температуры. Величина изменения температуры воздуха за период день–ночь достигает 10 °С. При ее колебании изменяется объем жидкости и, соответственно, уровень ее горизонтального положения, что, в свою очередь, приводит к смещению отраженного лазерного луча на КФП.

Для решения этой проблемы используется соосное расположение падающего и отраженного лучей (рис. 2), при этом изменение уровня жидкости не сказывается на результатах измерения.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ

Чувствительность собранного детектора сейсмического наклона земной поверхности определена экспериментально. На рис. 3 представлен график непрерывной записи измерения положения лазерного луча на ДФП в установке (рис. 2) с калибровочным наклоном  $\phi_k = 2 \cdot 10^{-5}$  рад нижнего основания  $O_2$  детектора.

Определив величину сигнала  $u_k$ , соответствующую калибровочному наклону  $\phi_k$ , получаем калибровочный коэффициент  $K = u_k / \phi_k$ . В этом эксперименте он составил величину  $K = 310 \pm 20$  В/рад.

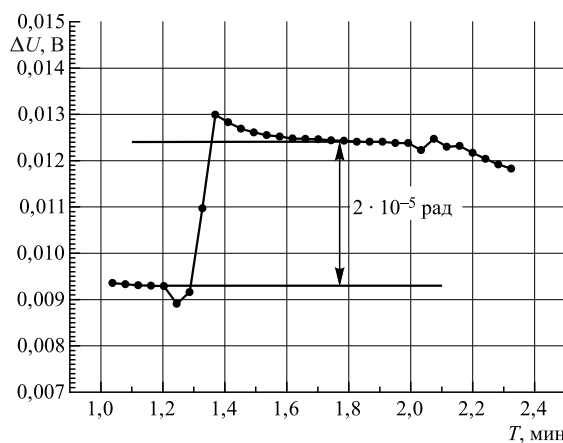


Рис. 3. Сигнал с ДФП, возникающий при калибровочном наклоне  $\phi_k = 2 \cdot 10^{-5}$  рад нижнего основания  $O_2$  установки (см. рис. 2)

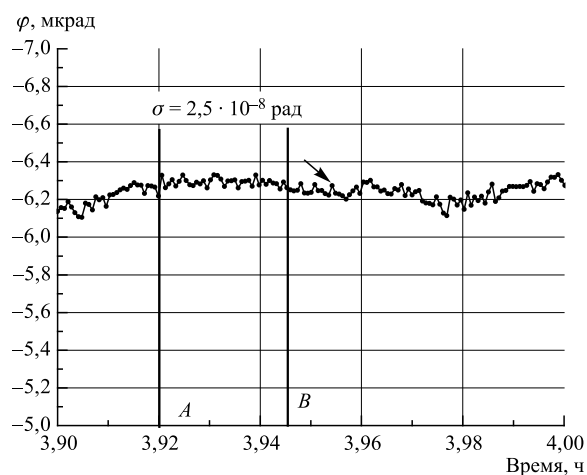


Рис. 4. Определение величины шумового наклона за промежуток времени 2 мин

На рис. 4 представлена непрерывная запись изменения угла наклона земной поверхности в течение 6 мин.

Определенное за период 2 мин (участок  $AB$  на рис. 4) среднеквадратичное отклонение угла наклона земной поверхности  $\sigma$  составило  $2,5 \cdot 10^{-8}$  рад. На рис. 5 показана гистограмма участка  $AB$  данных рис. 4.

На рис. 6 представлена непрерывная запись ночных измерений в течение 12 ч в ЦЕРН. Интервал изменения угла наклона составил  $> 20 \cdot 10^{-6}$  рад.

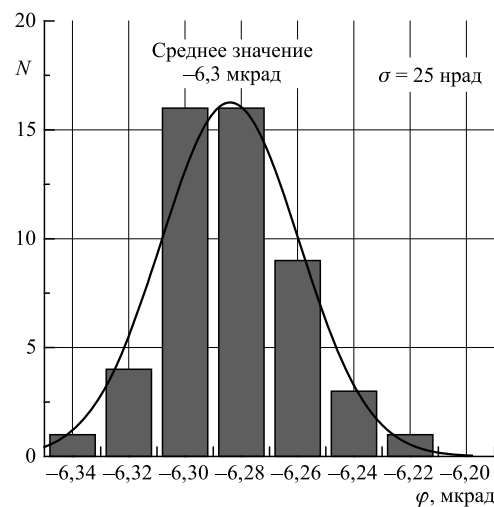


Рис. 5. Гистограмма данных измерения, соответствующих участку  $AB$  рис. 4

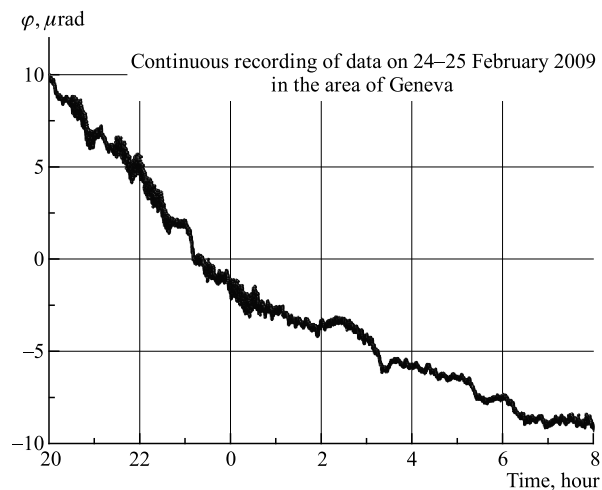


Рис. 6. Наклон измерительной установки за промежуток времени 12 ч



Для стабилизации направления лазерного луча (реперной линии) необходимо обнаружение и регистрация угловой компоненты сейсмических колебаний. Созданный детектор решает эту задачу.

В период сейсмической активности датчик зарегистрировал периодическое прохождение поверхностных сейсмических волн. На рис. 7 показана непрерывная запись углового положения земной поверхности в период с 23 по 24 февраля 2009 г. в районе Женевы.

На рис. 8 приведены результаты фурье-анализа данных, представленных на рис. 7.

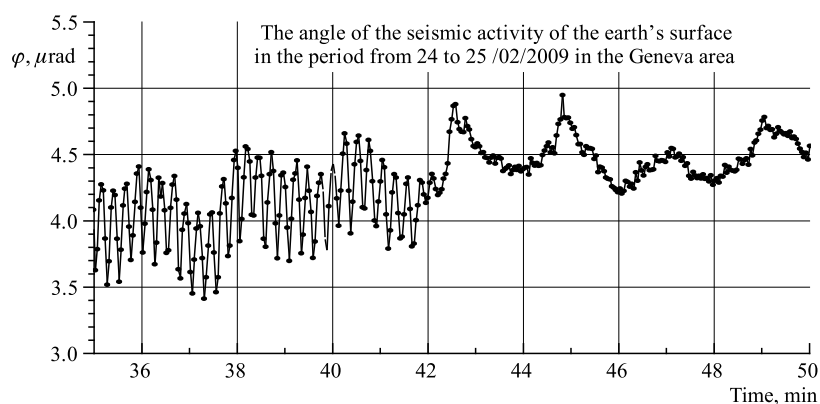


Рис. 7. Периодический наклон земной поверхности с 23 по 24 февраля 2009 г. в районе Женевы

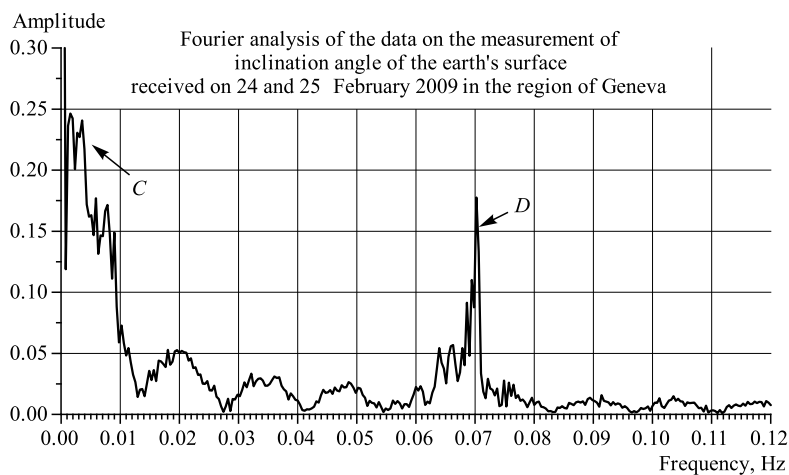


Рис. 8. Фурье-анализ угловых колебаний земной поверхности (по данным рис. 7)

Измерения обнаружили две гармоники с периодами  $T_C = 250$  с и  $T_D = 14$  с в относительно интенсивной  $\sim 5 \cdot 10^{-7}$  рад угловой компоненте периодических сейсмических колебаний земной поверхности в области низких частот  $10^{-3}$ – $10^{-1}$  Гц. Мониторирование подобных колебаний позволит, как представляется, в режиме on-line обеспечить угловую стабильность направления лазерного луча в реперных линиях.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ

Предложенный принцип регистрации при помощи отраженного от поверхности жидкости лазерного луча, фиксируемого позиционно-чувствительным фотоприемником, подтвержден экспериментально. Впервые экспериментально выделена и зарегистрирована угловая составляющая сейсмического колебания земной поверхности.

Простота оптической схемы и достаточно большой диапазон измеряемых углов наклона земной поверхности  $> 2 \cdot 10^{-5}$  рад (см. рис. 5) открывают возможность использования прибора для наблюдения достаточно интенсивных сейсмических явлений и их последующего мониторинга с целью компенсации в комплексе NETWORK со стабильными лазерными реперными линиями.

Измерения выявили зависимость результатов от изменения внешней температуры, что сказывается на результатах долговременных измерений (см. рис. 5). Для определения степени влияния внешней температуры на элементы детектора создается термостабильный объем вокруг установки, материал термочувствительных элементов установки будет заменен на термостабильные инвар и кварц, а также будет модифицирована геометрическая схема установки с целью минимизации нелинейных деформаций элементов конструкции.

### ВЫВОДЫ

На основе свойства горизонтальности поверхности жидкости предложен и осуществлен опыт по измерению угловой компоненты сейсмического шума земной поверхности. Экспериментально выполнено мониторингирование угловых движений поверхности Земли. Это открывает возможность стабилизировать лазерную реперную линию с точностью  $\sim 10^{-8}$  рад для метрологического обеспечения протяженных исследовательских установок и объектов гражданского назначения.

Угловая компонента сейсмического шума является «производной» от поверхностных сейсмических волн. Таким образом, созданный по такой схеме детектор является источником существенно новой информации по тектонике Земли.

Детектор позволяет измерять угловую компоненту поверхностных сейсмических волн в диапазоне частот  $10^{-4}$ –1 Гц с интервалом изменения углов  $\approx 2 \cdot 10^{-5}$  рад.

Устройство имеет патентную и научно-исследовательскую привлекательность.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Batusov V. et al.* High Precision Laser Control of the ATLAS Tile-Calorimeter Module Mass Production at JINR // Part. Nucl., Lett. 2001. V. 105, No. 2. P. 33–40.
2. *Batusov V. et al.* Development of Laser Measurements at the ATLAS Tile-Calorimeter Module Production. JINR Preprint E13-2001-257. Dubna, 2001. 6 p.
3. *Batusov V. et al.* Development and Application of High-Precision Metrology for the ATLAS Tile-Calorimeter Construction (Pre-Assembly Experience and Lessons). JINR Preprint E13-2004-177. Dubna, 2004. 26 p.
4. *Batusov V. et al.* On Laser Beam Fiducial Line Application for Metrological Purposes. JINR Preprint E13-2007-98. Dubna, 2007.
5. *Batusov V. et al.* A Study of an Air Medium Influence on the Rectilinearity of Laser Ray Proliferation towards the Using for Large Distances and High-Precision Metrology // Part. Nucl., Lett. 2007. V. 4, No. 1. P. 92–95.
6. *Batusov V. Yu. et al.* Observation of Specific Features of Laser Beam Propagation in Air with Standing Acoustic Waves // Part. Nucl., Lett. 2010. V. 7, No. 1. P. 33–38.
7. *Ляблин М. В.* Разработка и использование методов лазерной метрологии при создании адронного калориметра АТЛАС и их дальнейшее развитие для контроля положения длинномерных физических установок: Автореф. дис. . . . канд. физ.-мат. наук. ОИЯИ, 13-2011-30. Дубна, 2011.
8. *Батусов В. Ю., Будагов Ю. А., Ляблин М. В., Сисакян А. Н.* Устройство для формирования лазерного луча. Патент на изобретение № 2401986 РФ 20 окт. 2010 г.
9. *Цубои Т.* Гравитационное поле Земли. М.: Мир, 1982.
10. <http://www.pacific-sensor.com/pages/quadrant.html>
11. *Batusov V. et al.* Photodetector Noise Limitations of the Laser Ray Space Localization Precision. JINR Preprint E13-2008-90. Dubna, 2008. 6 p.
12. *Jameson Rollins et al.* Solid-State Laser Intensity Stabilization at the  $10^{-8}$  Level // Optics Letters. 2004. V. 29, Issue 16. P. 1876–1878.
13. *Воронин Э. С. и др.* Уменьшение флуктуации выходной мощности He–Ne лазера // ПТЭ. 1971. № 5. С. 200–201.

Получено 29 ноября 2011 г.

Редактор *А. И. Петровская*

Подписано в печать 11.04.2012.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,75. Уч.-изд. л. 0,89. Тираж 265 экз. Заказ № 57619.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований  
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: [publish@jinr.ru](mailto:publish@jinr.ru)

[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)