**Отчет по проекту**

Прецизионная Лазерная Метрология для Ускорителей и Детекторных Комплексов

**Шифр темы 02-0-1126 (1127 ранее)**

Представлен отчёт по итогам работы над проектом «Прецизионная Лазерная Метрология для Ускорителей и Детекторных Комплексов»

* Разработан малогабаритный прецизионный лазерный инклинометр. Создана малая партия таких приборов.
* Начато его тестирование в ведущих научных центрах России и за рубежом.
* Продолжается совершенствование конструкции МПЛИ с целью уменьшения зависимости его производства от комплектующих из зарубежных стан.
* Начато изучение микросейсмического фона на коллайдере НИКА.

**Развернутый научный отчет**

Описание проделанной научной работы и полученных результатов.

**Малогабаритный прецизионный Лазерный инклинометр**

За время существования предыдущего проекта прецизионный лазерный инклинометр прошел эволюцию в шесть поколений.

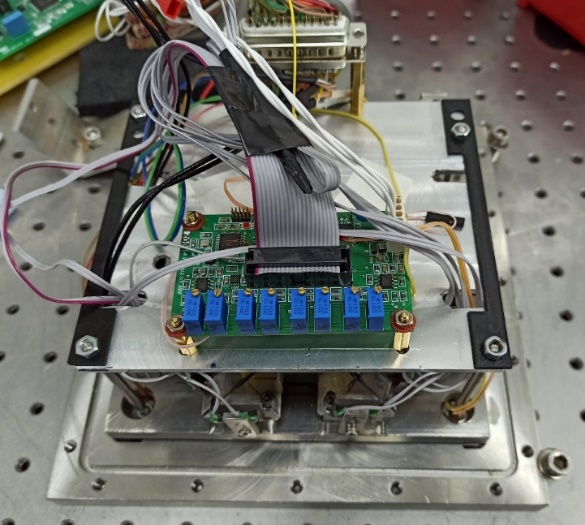


Рис.2 Малогабаритный Прецизионный Лазерный Инклинометр

На Рис.2 показан внешний вид чувствительного элемента малогабаритного ПЛИ. Предыдущие поколения прецизионного лазерного инклинометра обладали габаритами, которые не позволяли его использовать в условиях Интерферометрической Гравитационный Антенны VIRGO и тоннеля LHC.

Малогабаритность инклинометра достигнута с использованием инновационного позиционно-чувствительного метода регистрации смещения пятна лазерного луча -метод делительных пластинок. Этот метод позволил уменьшить длину фокуса лазерных лучей в МПЛИ и соответственно его габариты. Наше исследование метода опубликовано в статье [].

Эксперименты с изготовленными нами делительными пластинками показали: сигналы фотоприемников не имеют особенностей в зоне линейного смещения. При диаметре колированного лазерного луча 6.8 мм нам удалось сфокусировать лазерный луч до диаметра пятна 10 микрон при длине фокусного расстояния 7,5 см. Таким образом, нам удалось уменьшить длину фокуса лазерного луча более чем в 13 раз и тем самым осуществить компактную реализацию ПЛИ [17].

*Схема МПЛИ*

Нам удалось скомпоновать все оптические элементы инклинометра конструкцию с размерами 20х20х20см.

Electrical Feedthrough

Optical fiber Feedthrough

Laser

Collimator

DP1

DP2

DP3

DP4

Cuvette with liquid

Optical fibre

ADC

PC

**2**

**1**

**3**

**4**

**5**

**6**

**7**

**8**

Lens

Lens

Vacuum Volume

**Horizontal**

**Vertical**

**Vertical**

Optical Cube

#1

#2

#3

На Рис.14 показана оптическая схема инклинометра

Рис.5 Схема МПЛИ

В МПЛИ использовался лазер S4FC637 (Thorlabs) с оптоволоконным выходом излучения. Длина волны излучения λ=0.637µм, Мощность излучения 7мВт.

Лазерное излучение через оптоволоконный ввод подавалось в вакуумный объём МПЛИ. Затем при помощи коллиматора оно направлялось на оптический куб №1. Половина лазерного луча использовалась для формирования реперных лучей, вторая половина – для создания сигнального луча. После отражения от поверхности жидкости лазерный луч направлялся обратно на ОК1, где его половина мощности попадала в блок формирования сигнальных лучей. При помощи ОК2 и ОК3 и зеркал З1 и З2 формировались реперные и сигнальные лазерные лучи. Они подавались на позиционно-чувствительные фотоприёмные устройства - Делительные Пластинки ДП1, ДП2, ДП3, ДП4 для анализа их смещения в двух ортогональных направлениях (горизонтальное и вертикальное направления выбирались относительно вектора силы тяжести). В каждом ПЧФУ Делительная Пластинка использовались два фотоприёмника. Таким образом, в системе регистрации углового положения сигнальных и реперных лазерных лучей имелись восемь информационных каналов (**1,2,3,4,5,6,7,8**). Сигналы с фотоприёмников регистрировались двумя четырёхканальными АЦП Data Translation DT9824 и записывались в компьютер.

В работе над МПЛИ мы отказались от юстировки лазерных лучей, как это было в предыдущих поколениях ПЛИ. Основная причина отказа в том, что юстировочные устройства являются источником низкочастотных шумов. В МПЛИ использовалось монолитное крепление всех оптических элементов – лазерный коллиматор, оптические делительные кубы, зеркала линзы - на Специальной Платформе (СП). СП монолитно крепится за неподвижную платформу Малогабаритного Прецизионного Лазерного Инклинометра, в которой размещена кювета с жидкостью.

Особенностью Малогабаритного ПЛИ является перенос всех юстировочных операций в инклинометре на юстировку ПЧФУ Делительная Пластинка. Юстировка ПЧФУ Делительная Пластинка относительно пятна фокуса лазерного луча осуществлялась при помощи пьезоэлектрических линейных позиционеров (NEWPORT AG-LS25). Линия деления делительной пластинки устанавливалась на центр сфокусированного лазерного луча при помощи пьезоэлектрического позиционера с точностью минимального шага позиционера 100 нм. При диаметре пятна лазерного луча 18µм такой шаг позволил точно находить центр лазерного луча и добиваться равной мощности на фотоприёмниках ПЧФУ Делительная Пластинка. PhD1 и PhD2.

Все оптические элементы крепились за металлические элементы конструкции при помощи клея.

Металлическая конструкция МПЛИ выполнена из нержавеющей стали. Это связано с тем, что МПЛИ крепится на бетонное основание. Коэффициент линейного расширения стали примерно равен коэффициенту линейного расширения бетона, что позволяет избежать деформации конструкции МПЛИ при изменении температуры.

Для обеспечения монолитности конструкции калибровочный узел в МПЛИ был выполнен в виде внешнего самостоятельного устройства. Перед использованием инклинометра проводилась калибровка МПЛИ. Сьюстированный и вакуумированный МПЛИ устанавливался на калибровочное устройство, на котором при помощи методики интерферометрической калибровки определялись калибровочные коэффициенты.

Точность калибровочного устройства позволяет определять калибровочные коэффициента с точностью 1%.

В Метрологической лаборатории ЛЯП в 2021г был собран первый прототип МПЛИ.

После прохождения целого ряда модификаций мы получили тот вариант МПЛИ, который может быть использован, как для низкочастотной области спектра [<10-3Гц] угловых сейсмических изменений поверхности, так и для высокочастотной области , в которой сосредоточены микросейсмические колебания земной и индустриальной природы.

*Регистрации сигналов в МПЛИ*

На Рис.6 показаны вычисленные сигналы , в которых учтены влияния нестабильности мощности лазерного излучения и угловое шумовое движение лазерного луча.

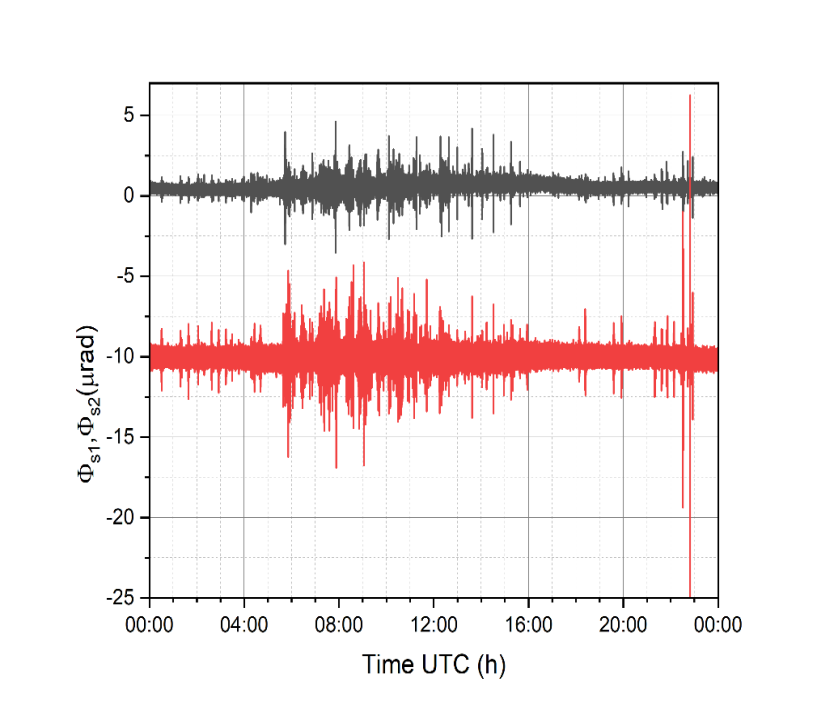


Рис.6 Обработанные сигналы угловых наклонов поверхности Земли за период 24 часа

Измерение наклонов земной поверхности проводилось в направлениях Восток-Запад и Север-Юг.

**Точность измерения и шумы в МПЛИ**

Точность измерения ПЛИ определяется величиной минимального зарегистрированного микросейсмического сигнала. Как правило, величина шума определяется минимальным значением спектральной плотности микросейсмических сигналов, зарегистрированных в течение определенного промежутка времени. В нашем случае в качестве такого промежутка времени мы традиционно используем сутки (24 часа).

Величина минимальный спектральной плотности определяется в диапазоне частот, в котором присутствует большинство микросейсмических сигналов (10-3-10Гц). Проблема шумов связана с тем, что в спектре микросейсмических сигналов присутствуют как узкополосные сигналы: Микросейсмический Пик, землетрясения, индустриальные шумы и др., так и широкополосные: движение материков, магмы, деформация поверхности земли под действием ветровой нагрузки и температуры и др.. Поэтому в сейсмометрии этот уровень устанавливается как базовый, а чувствительность сейсмического прибора определятся по аппаратным шумам [24].

Минимальная величина угловых колебаний зарегистрирована нами при помощи ПЛИ в Гарни (Армения). Она составила 1.8 10-11 рад/Гц ½.

Из анализа данных, представленных на Рис.20, величина минимального сигнала, который был зарегистрирован, в нашем случае составила 6·10-11рад/Гц1/2 (Рис.20).

Из анализа смещения пятна реперного луча была определена инструментальная точность измерения МПЛИ. *Инструментальная погрешность онлайн измерения МПЛИ составила 5 10-10рад.*

**Результаты измерения МПЛИ на различных участках земной поверхности**

В настоящее время малогабаритный прецизионный лазерный инклинометр выпускается небольшой серией в Лаборатории Ядерных Проблем. Их производство связано с тестированием МПЛИ для различных задач:

* Для прогноза землетрясения один экземпляр установлен а Горнийской международной геофизической обсерватории (Армения).
* Два экземпляра ПЛИ установлены вблизи северного зеркала ИГА ВИРГО. он регистрируют угловые микросейсмы и их данные используются в системе шумоподавления гравитационной антенны
* Пять ПЛИ работают в системе тоннелей ЦЕРНА. Два вблизи детектора ALICE

И два -возле детектора CMC и один в транспортном тоннеле №1

* Два МПЛИ работают в зале MPD NICA
* Три МПЛИ в Метрологической лаборатории ЛЯП
* Один МПЛИ в Федеральном Исследовательском Центре « Единая Геофизическая Служба РАН» Камчатский филиал Петропавловск-Камчатский

Все инклинометры находятся в состоянии непрерывного суточного мониторинга.

Продемонстрируем работу некоторых из них на примере регистрации землетрясения в Турции.

В Турции шестого февраля 2023г. в 01:17:36.1 UTC и в 10:24:49.6 UTCпроизошли два масштабных, разрушительных землетрясения с магнитудами *7.8 Mw, 7.5Mw.*

В момент хемлетрясениий работал три прецизионных лазерный инклинометра (ПЛИ) установленных на территории Дубна ОИЯИ(малогабаритный ПЛИ), Женева CERN (ПЛИ), Петропавловск -Камчатский «Единая Геофизическая Служба « РАН Камчатский филиал (малогабаритный ПЛИ).

Расстояние от эпицентра более сильного 7.8 Mw зеилетрясения до точек наблюдений составили 2165км (Дубна), 2736км (Женева), 8533км (Петропавловс камчатский).

Рис 11-13 показаны сейсмограммы зарегистрированных ПЛИ землетрясений

Рис.11 Сейсмограмма землетрясения в Турции зарегистрированное МПЛИ в Метрологичаскаяч Лаборатория Дубна



Рис.12 Сейсмограмма землетрясения в Турции зарегистрированное ПЛИ в транспортном тоннеле №1 Женева CERN



Рис.13 Сейсмрграмма землетрясения в Турции зарегистрированное МПЛИ в сейсмокамере на территории«Единая Геофизическая Служба « РАН Камчатский филиал Пктропавловск-Камчатский

Как видно из Рис.11-13 наблюдается уменьшение амплитуды угловых колебаний поверхности Земли в зависимости от расстояния от места землетрясения до точки наблюдения. Также при регистрации землетрясений на Камчатке отчётливо видны компоненты землетрясений прошедшие через мантию и ядро Земли.

Все представленные данные получены в единой временной шкале UTC что позволяет проводить исследования по распространению сейсмических волн по поверхности и в глубинных слоях Земли. Эти графики дают представление об организации сети для определения изменения ландшафта земной поверхности под действием микросейсмов. Мы имеем распределённое на поверхности Земли расположение ПЛИ, которые объединены требованиями:

* Синхронная регистрация сигналов наклонов земной поверхности
* Направление измерения ПЛИ совпадают
* Расстояние между ПЛИ известно.
* Точность выполнения требований сети определяется точностью калибровки. относительная точность калибровки составляет ≈10-2 и лимитируется в основном наличием сопутствующей микросейсмической активностью во время калибровки.

**Установка двух МПЛИ в Зале МPD коллайдера НИКА**

Для определения величины микросейсмических колебаний на коллайдере НИКА были использованы два МИПЛИ. Одновременная работа двух МПЛИ необходима для контроля качества измерений в зависимости от времени работы МПЛИ при регистрации угловых колебаний поверхности Земли.

**Результаты Измерения угловой микросейсмической активности поверхности Земли в зале МPD коллайдера НИКА**

После установки двух МПЛИ в зале MPD начался посуточный мониторинг угловых наклонов земной поверхности в двух ортогональных направлениях. Направления регистрации одного МПЛИ совпадают со вторым МПЛИ. На Рис.25 показана регистрация угловых наклонов земной поверхности за 23.июня.2022(четверг).



Рис.25 Суточный мониторинг угловой микросейсмической активности в двух ортогональных направлениях в зале MPD 23.06.2022(четверг).

Как видно из Рис.25, за суточный период наблюдения выделяются две временные области с разной величиной угловых наклонов земной поверхности. В ночной период с 18-00 вечера до 7-00 утра средняя величина изменения угловых колебаний в диапазоне частот 10-3 Гц-7 Гц поверхности пола МПД составила- 0.6 мкрад. В рабочий период с 7-00 утра по 18-00 вечера – 3.7мкрад. Отчётливо видны индустриальные шумы, которые присутствуют в рабочий период. Также в период работы с 16 по 24часа наблюдается аномальная величина узкополосных индустриальных шумов с амплитудой до 1мкрад.

На Рис.26 представлен Фурье анализ угловых колебаний поверхности Земли на основе данных на Рис.25.



Рис.26 Фурье анализ суточного набора данных за 23.06.2022

Из зарегистрированных колебаний отчётливо выделяются колебания типа «Микросейсмический Пик» [0.1-1Гц], нерегулярные индустриальные шумы [1-5Гц], и область резонансных индустриальных шумов с частотами 6,44Гц, 8,33Гц и др.. Также заметен сигнал с Иваньковской ГЭС с частотой 1.6667Гц=5/3 Гц

**Одновременная регистрация сигналов двумя разнесёнными МПЛИ**

Для демонстрации достоверности зарегистрированных данных представим одновременную регистрацию угловых колебаний поверхности Земли двумя МПЛИ по совпадающим направлениям.

****

Рис.30 Измерение МПЛИ1 в направлении соответствующему вертикальному движению лазерного луча в МПЛИ



Рис.31 Измерение МПЛИ2 в направлении ответствующему вертикальному движению лазерного луча в МПЛИ

*Полученные данные говорят об устойчивости измерений МПЛИ и возможности их использования для визуализации угловых колебаний поверхности Земли на коллайдере НИКА.*

**Итоги работы по проекту за 3-х летний период**

**1. Малогабаритный монолитный Прецизионный Лазерный Инклинометр (МПЛИ)**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Этапы | Начало | Окончание |
| Конструирование МПЛИ и изготовление | 2021 | 2022 |
| Тестирование в составе ИГА VIRGO и в Тоннеле LHC | 2022 | 2023 |
| Тестирование МПЛИ для прогноза землетрясений(Армения,Узбекистан) | 2022 | 2023 |

За трёхлетний период по предыдущему продлению проекта завершен цикл работ по созданию малогабаритного Прецизионного Лазерного Инклинометра.

В комплекс работ входили:

1. Создание плат управления МПЛИ
2. Изготовлено 10 плат фирмой “Tехнокомплект” 10плат “Shirak Tehnology”
3. создание конструктивных элементов МПЛИ мастерские ЛЯП. Изготовлено 13 комплектов механических элементов МПЛИ.
4. Собранно в рамках работы сектора №3 шесть образцов МПЛИ. Продолжается работа по изготовлению оставшихся 7 МПЛИ. Установка МПЛИ в научных центрах России и за рубежом.
5. На данный момент установлено шесть образцов МПЛИ.

* В Гарнийской международной Геофизической обсерватории -1шт
* В Единой геофисической службе PAH Петропавловс Камчатский-1шт.
* В зале МПД колайдера НИКА -2шт
* В Метрологической Лаборатории 3шт

1. Создан комплекс программ обеспечивающий работу МПЛИ в режиме удалённого доступа
2. Написано три статьи в реферируемых источниках. Работ были доложены на семинарах ЛЯП и ЛВЭ.
3. Продолжаются работы по совершенствованию конструкции МПЛИ.

В рамках этих работ получены новые результаты которые активно внедряются в конструкцию МПЛИ:

* Создание оптических элементов в которых отсутствуют паразитные лучи. Изготовление их происходит в Метрологической лаборатории ЛЯП.
* Переход на фотовольтаических режим работы фотоприёмника позволил поднять сигнал в МПЛИ более чес в 50раз, что позволило использовать менее прецизионный АЦП 18бит. Подобные АЦП серийно изготавливаются промышленностью РФ по цене в 5раз меньше прецизионных АЦП Data Translation. Это позволило уменьшить стоимость МПЛИ.
* Замена дорогостоящего лазера с оптоволоконным выводом излучения одномодовым лазером, позволило избавиться от температурного неустранимого шума возникающего в оптическом волокне. Новый лазер располагается в вакуумном объёме и не требует дополнительного места для блока питания. Замена лазера позволила уменьшить стоимость МПЛИ.
* Замена управляющего компьютера на основе Ноутбука мини компьютером.

 Это позволило уменьшить объём сопутствующего оборудования для МПЛИ и уменьшить стоимость МПЛИ.

* Для развития серии МПЛИ проводятся работы по изготовлению плат управления МПЛИ силами сект №2 ОНИРИ ЛЯП.

На сегодняшний момент в серийно изготавливаемой конструкции МПЛИ мобильно внедряются необходимые новшества, которые улучшают конструкцию МПЛИ, уменьшают мощность потребляемую МПЛИ и стоимость конечного образца. Достигнутая скорость изготовления составляет 1 МПЛИ в месяц.

В силу сложных политических условий МПЛИ не смог участвовать в экспериментах на в CERN, на гравитационной антенне VIRGO и в Узбекистане.

В сложившихся условиях начата работа по созданию МПЛИ созданного исключительно из элементной базы российского производства.

**Система визуализации угловых микросейсмичеких наклонов земной поверхности для коллайдера НИКА[[1]](#footnote-1) и LHC[[2]](#footnote-2) при помощи МПЛИ**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Этапы | Начало | Окончание |
| Установка МПЛИ на полу коллайдера НИКА | 2021 | 2022 |
| Определения угловой микросейсмической активности в зоне расположения коллайдера НИКА | 2022 | 2023 |
| Разработка принципиальной схемы сети МПЛИ для коллайдера НИКА | 2022 | 2023 |

 Работы по установке двух образцов МПЛИ в зале MPD NICA успешно завершены в 2022г. В настоящее время проводится суточный мониториг угловой микросейсмической активности. Результаты измерений показывают высокий уровень угловой микросейсмической активности в рабочий период.

Результаты измерений и определение влияния наклонов земной поверхности на коллайдер NICA доложены на семинаре руководству ЛВЭ.

Результатом работы на этой частью предыдущего продления проекта стало создание нынешнего проекта по созданию сети из МПЛИ для визуализации угловой микросейсмической активности на коллайдере NICA с дальнейшей целью -стабилизация движения фокусов пучков коллайдера.

**Создание сети из четырёх Монолитных ПЛИ в Армении для прогноза Землетрясений[[3]](#footnote-3)**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Этапы | Начало | Окончание |
| Установка МПЛИ в Международной геофизической обсерватории Гарни | 2021 | 2022 |
| Мониторинг микросейсмической активности в зоне разлома земной коры в ГАРНИ | 2022 | 2023 |
| Изготовление 3-х образцов МПЛИ (при наличии финансирования) и размещение их в геофизических центрах в Армении. | 2022 | 2023 |

В 2022 был установлен один экземпляр МПЛИ в Горнийской международной обсерватории и начат мониторинг угловой микросейсмов в температурно стабильных условиях. В силу политических причин установка дополнительных МПЛИ оказалась затруднительной. По данным мониторинга ведётся эксперимент по определению чувствительности МПЛИ от времени наблюдения угловых подвижек поверхности Земли. В настоящее время изучается вопрос о производстве МПЛИ с деталями РФ производства. При этих условиях поставка МПЛИ станет возможной.

**2. Сопутствующие метрологические активности**

**Лазерная Реперная Линия длиной 130 м**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Этапы | Начало | Окончание |
| Проведение экспериментов на ЛРЛ без угловой стабилизации платформ ЛРЛ | 2021 | 2022 |
| Проведение экспериментов на ЛРЛ с угловой стабилизации платформ ЛРЛ | 2022 | 2023 |
| Эксперимент по сравнению распространения лазерного луча в закрытой трубе и в вакууме | 2022 | 2023 |

В связи с развитием ускорительного комплекса ЛЯП на базе ускорителя электронов эта часть проекта переориентирована на проработку технического решения по созданию ЛРЛ для этого ускорителя. Работы по ЛРЛ 130м продолжаются в 2023г. и мы надеемся на получение дополнительных результатов.

**Интерферометрический измеритель длины**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Этапы | Начало | Окончание |
| Проведение экспериментов на Интерферометрическом Измерителе длины в вакууме | 2021 | 2022 |
| Написание программы по онлайн обработке сигналов ИИД | 2022 | 2023 |
| Проведение экспериментов с новой онлайн программой на длине 2м -16м | 2022 | 2023 |

Эксперименты в воздушной среде выявили зависимость измеряемой длины измерения от показателя преломления воздуха вызванной температурой и изменение давления окружающей среды. Был изготовлен вакуумный бокс и при помощи Гелий неонового лазера с оптоволоконным выводом излучения начаты исследования в вакууме.

В течение текущего 2023г мы планируем получение результатов по измерению смещения плеча интерферометра в вакууме.

**Сейсмоизолированная от угловых колебаний поверхности Земли исследовательская платформа**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Этапы | Начало | Окончание |
| Проведение экспериментов на малой сейсмоизолированной платформе с МПЛИ | 2021 | 2022 |
| Проведение экспериментов на большой сейсмоизолированной платформе (оптический стол) с двумя МПЛИ | 2022 | 2023 |
| Сейсмоизоляция оптических столов ЛРЛ при помощи СИП | 2022 | 2023 |

Активно продолжается работа по созданию сейсмоизолированной от угловых колебаний поверхности Земли исследовательская платформы для этих целей было изготовлено два образца МПЛИ. После регистрации угловых микросейсмических сигналов на платформе при помощи специально написанной программе вырабатывается сигнал на пьезостакереы под платформой, в результате чего платформа стабилизируется. На данный момент проводятся эксперименты по стабилизации в области частот 10-5-1Гц. В течение 2023г мы рассчитываем на получение первых результатов. Эта активность будет продолжена в качестве дополнительной метрологической активности в нынешнем проекте.

**Выводы**

За трёхлетний период несмотря на проблемы с финансированием проекта и политическими проблемами основные результаты предыдущего преодоления проекта достигнуты.

Полностью разработан МПЛИ и Начато его серийное изготовление.

Дополнительно к предыдущему проекту существенно улучшена конструкция МПЛИ. Это позволило существенно удешевить его создание и улучшить характеристики МПЛИ.

Запущены два МПЛИ на НИКА. результаты измерений указывают на необходимость начала работ по метрологическому сопровождению коллайдера НИКА сетью из МПЛИ. Эти предложения являются основой нынешнего проекта.

Начато размещение МПЛИ в научных центрах РФ и за рубежом.

Дополнительно к планам предыдущего проекта размещён один МПЛИ в Петропавловск Камчатском.

**Литература**

1. B. Di Girolamo , J.-Ch. Gayde, D. Mergelkuhl, M. Schaumann, J. Wenninger, Switzerland N. Azaryan, J. Budagov, V. Glagolev, M. Lyablin, G. Shirkov, G. Trubnikov, Russia The monitoring of the effects of earth surface inclination with the precision laser inclinometer for high luminosity colliders Proceedings of RuPAC2016, St. Petersburg, Russia, P. 210-212
2. N. Azaryan, J. Budagov, J-Ch. Gayde, B. Di Girolamo, V. Glagolev, M. Lyablin

D. Mergelkuhl, G. Shirkov The Innovative Method of High Accuracy Interferometric Calibration of the Precision Laser Inclinometer Physics of Particles and Nuclei Letters, 2017, Vol. 14, No. 1, pp. 112–122. 2017

1. N. Azaryan, V. Batusov, J. Budagov, V. Glagolev, M. Lyablin, Trubnikova , G. Shirkova , J.-Ch. Gayde, B. Di Girolamo , A. Herty , H. Mainaud Durand, D. Mergelkuhl , V. Rude Comparative Analysis of Earthquakes Data Recorded by the Innovative Precision Laser Inclinometer Instruments and the Classic Hydrostatic Level System Physics of Particles and Nuclei Letters, 2017, Vol. 14, No. 3, pp. 480–492. © Pleiades Publishing, Ltd., 2017
2. Температурная стабильность 0.0050С бетонного пола в Транспортном тоннеле №1 ЦЕРН в месте расположения прецизионного лазерного Инклинометра Н.С. Азарян, Ю.А. Будагов, М.В. Ляблин, А.А. Плужников, Б Ди Джироламо, Ж-Кр. Гайде, Д. Мергелькуль Р13-2017-36
3. N. Azaryan, J. Budagov, M. Lyablin, A. Pluzhnikov, B. Di Girolamo, J.-Ch. Gayde, D. Mergelkuhl Determination of the maximum recording frequency by the Precision Laser Inclinometer of an earth surface angular oscillation Physics of Particles and Nuclei LettersNovember 2017, Volume 14, Issue 6, pp 920–929
4. Компенсация углового шумового колебания лазерного луча в Прецизионном Лазерном Инклинометре Н.С. Азарян, Ю.А. Будагов, М.В. Ляблин, А.А. Плужников, Б Ди Джироламо, Ж-Кр. Гайде, Д. Мергелькуль Р13-2017-34
5. N. Azaryan, J. Budagov, M. Lyablin, A. Pluzhnikov, B. Di Girolamo, J.-Ch. Gayde, D. Mergelkuhl The compensation of the noise due to angular oscillations of the laser beam in the Precision Laser Inclinometer Physics of Particles and Nuclei Letters November 2017, Volume 14, Issue 6, pp 930–938
6. Определение Максимальной частоты угловых колебаний поверхности Земли регистрируемых Прецизионным лазерным Инклинометром Н.С. Азарян, Ю.А. Будагов, М.В. Ляблин, А.А. Плужников, Б Ди Джироламо, Ж-Кр. Гайде, Д. Мергелькуль Р13-2017-35
7. Azaryan, N.; Budagov, J.; Lyablin, M.; Pluzhnikov, A.; Gayde, J.-Ch.; Di Girolamo, B.; Mergelkuhl, D.The temperature stability of 0.005°C for the concrete floor in the CERN Transfer Tunnel #1 hosting the Precision Laser Inclinometer Physics of Particles and Nuclei Letters, Volume 14, Issue 6, pp.913-919
8. Professional Precision Laser Inclinometer: the Noises Origin and Signal Processing

N. Azaryan, J. Budagov, V. Glagolev, M. Lyablin, A. Pluzhnikov, A. Seletsky, G. Trubnikova, B. Di Girolamo, J.-C. Gayde & D. Mergelkuhlb Physics of Particles and Nuclei Letters volume 16,№3 pages 264–276 (2019)

1. The Seismic Angular Noise of an Industrial Origin Measured by the Precision Laser Inclinometer in the LHC Location Area N. Azaryan, J. Budagov, V. Glagolev, M. Lyablin, A. Pluzhnikov, A. Seletsky, G. Trubnikov, B. Di Girolamo, J.-C. Gayde & D. Mergelkuhl Physics of Particles and Nuclei Letters volume 16, №4 pages343–353(2019)
2. Position-Sensitive Photoreceivers: Sensitivity and Detectable Range of Displacements of a Focused Single-Mode Laser Beam N. S. Azaryan, J. A. Budagov, M. V. Lyablin, A. A. Pluzhnikov, B. Di Girolamo, J.-Ch. Gayde & D. Mergelkuhl Physics of Particles and Nuclei Letters volume 16, №4 pages 223
3. Colliding Beams Focus Displacement Caused by Seismic Events N. S. Azaryan, J. A. Budagov, M. V. Lyablin, A. A. Pluzhnikov, G. Trubnikov, G. Shirkov, O. Bruning, B. Di Girolamo, J.-Ch. Gayde, D. Mergelkuhl & L. Rossi Physics of Particles and Nuclei Letters volume 16, №4 pages377–396(2019)
4. Budagov, J. ; Di Girolamo, B. ; Lyablin, M. The Method of Temperature Resistivity Creation of the Compact Precision Laser Inclinometer Physics of Particles and Nuclei Letters, Volume 17, Issue 7, p.931-937 ( December 2020), DOI: 10.1134/S1547477120070031
5. N. Azaryan, J. Budagov, V. Vernikovskya, M. Lyablin, A. Pluzhnikov, O. Smykovsky, B. Di Girolamo, J.-Ch. Gayde, D. Mergelkuhl Minimization of the Long Term Noises of the 24-Bit ADC for the Precision Laser Inclinometer. Phys. Part. Nuclei Lett. 18, 773–785 (2021).
6. B. Di Girolamo, J. A. Budagov, M. V. Lyablin, S. Vlachos The Precision Laser Inclinometer 12th Int. Particle Acc. Conf. IPAC2021, Campinas, SP, Brazil JACoW Publishing, ISBN: 978-3-95450-214-1 ISSN: 2673-5490 doi:10.18429/JACoW-IPAC2021-WEPAB281
7. Yu. A. Budagov, V. V. Glagolev, M. V. Lyablin, E. V. Pishchalnikova, A. M. Kuzkin, G. V. Trubnikov, B. Di Girolamo Position-Sensitive Measurements of a Single-Mode Laser Beam Spot Using the Dividing Plate Method Physics of Particles and Nuclei Letters Pub Date: 2023-01-10 , DOI:10.1134/s1547477122060061
8. M. V. Lyablin, Yu. V. Klemeshov Laser Power Stabilization in a Precision Laser InclinometerPhysics of Particles and Nuclei Letters, 2023, Vol. 20, No. 2, pp. 140–155., 2023.DOI: 10.1134/S1547477123020176
9. Патент на изобретение RU 2510488 C2 Устройство для измерения угла наклона Ю.А Будагов , М. В.Ляблин
10. Патент на изобретение RU 2734451 C1 Устройство для измерения углов наклона поверхности Ю. А Будагов. М. В. Ляблин
11. Патент на изобретение RU 2740489 C1 Лазерный инклинометр для длительной регистрации угловых наклонов земной поверхности Ю.А Будагов, М.В. Ляблин
12. Патент на изобретение RU 2747047 C1 Лазерный инклинометр Ю.А Будагов М. В.Ляблин
13. <https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsuphotonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/ssd/s5980_etc_kpin1012e.pdf>
14. Nick Ackerley Principles of Broadband Seismometry Encyclopedia of Earthquake Engineering DOI 10.1007/978-3-642-36197-5\_172-1
15. B. Muratori, Luminosity and luminous region calculations for the LHC, LHC Project Note 301 (2002).

2.2.4. Список основных публикаций авторов ОИЯИ, включая ассоциированный персонал по результатам работы по проекту.

1. 2.2.5. В.Ю Батусов, Ю.А.Будагов, М.В.Ляблин Лазерный датчик угловой компоненты сейсмических колебаний P13-2011-124
2. Batusov, V. Budagov, J. Lyablin, M. A laser sensor of a seismic slope of the Earth surface Physics of Particles & Nuclei Letters; Jan2013, Vol. 10 Issue 1, p43-48, 6p
3. J. Budagov, M. Lyablin, and G. Shirkov, “The search for and registration of superweak angular ground motions,” JINR Commun. E18-2013-107 (Dubna, 2013)
4. V. Batusov, J. Budagov, V. Glagolev, M. Lyablin, G. Shirkov, J.-Ch. Gayde , B.Di Girolamo , H. Mainaud Durand , D. Mergelkuhl Recent advances and perspectives of the high precision laser metrology presented at the workshop "CLIC 2014", 3-7 Februaury 2014, CERN, Geneva, Switzerland Дубна : JINR.. E13-2014-21)
5. Budagov, J. ; Glagolev, V. ; Lyablin, M. ; Shirkov, G. ; Mainaud Durand, H. Air temperature stabilization in the thermally isolated optical laboratory Physics of Particles and Nuclei Letters, May 2014, Vol.11(3), pp.294-29
6. N. Azaryan1, V.Batusov1, J. Budagov1, V. Glagolev1, M. Lyablin1’\*, G. Trubnikov1, G. Shirkov1, J.-Ch. Gayde2, B.Di Girolamo2, D. Mergelkuhl2, M.Nessi2 The precision laser inclinometer long-term measurement in thermo-stabilized conditions (first experimental data) E13-2014-97
7. Budagov, J. Glagolev, V. Lyablin, M. Shirkov, G. Mainaud Durand, H. Stern, G.A laser based fiducial line for high precision multipoint alignment system Physics of Particles & Nuclei Letters; May2014, Vol. 11 Issue 3, p286-293, 8p
8. V. Batusov, J. Budagov, M. Lyablin, G. Shirkov, J. -Ch. Gayde, D. Mergelkuhl

The sensitivity limitation by the recording ADC to Laser Fiducial Line and Precision Laser Inclinometer Physics of Particles and Nuclei Letters December 2015, Volume 12, Issue 7, pp 813–818

1. Batusov, V. ; Budagov, J. ; Lyablin, M. ; Gayde, J. ; Di Girolamo, B. ; Mergelkuhl, D. ; Nessi, M. The Laser Fiducial Line measurement precision in open air media determined in comparison with laser tracker AT-401 Physics of Particles and Nuclei Letters, 2015, Vol.12(2), pp.297-304
2. Azaryan, N. ; Batusov, V. ; Budagov, J. ; Glagolev, V. ; Lyablin, M. ; Trubnikov, G. ; Shirkov, G. ; Gayde, J. ; Di Girolamo, B. ; Mergelkuhl, D. ; Nessi, M The precision laser inclinometer long-term measurement in thermo-stabilized conditions (First Experimental Data) Physics of Particles and Nuclei Letters, 2015, Vol.12(4), pp.532-535
3. V. Batusov, J. Budagov, M. Lyablin, G. Shirkov, J. -Ch. Gayde, D. Mergelkuhl The calibration of the Precision Laser Inclinometer Physics of Particles and Nuclei Letters December 2015, Volume 12, Issue 7, pp 819–823
4. N. Azaryan, V. Batusov, J. Budagov, V. Glagolev, M. Lyablin, G. Trubnikov, G. Shirkov, J.-Ch. Gayde 1, B. Di Girolamo , D. Mergelkuhl , M. Nessi

The precision laser inclinometer long-term sensitivity in thermo-stabilized conditions Presented by M. Lyablin at CLIC Workshop 2015 (26-30 January 2015, CERN) Dubna E13-2015-35

1. B. Di Girolamo , J.-Ch. Gayde, D. Mergelkuhl, M. Schaumann, J. Wenninger, Switzerland N. Azaryan, J. Budagov, V. Glagolev, M. Lyablin, G. Shirkov, G. Trubnikov, Russia The monitoring of the effects of earth surface inclination with the precision laser inclinometer for high luminosity colliders Proceedings of RuPAC2016, St. Petersburg, Russia, P. 210-212
2. N. Azaryan, J. Budagov, J-Ch. Gayde, B. Di Girolamo, V. Glagolev, M. Lyablin

D. Mergelkuhl, G. Shirkov The Innovative Method of High Accuracy Interferometric Calibration of the Precision Laser Inclinometer Physics of Particles and Nuclei Letters, 2017, Vol. 14, No. 1, pp. 112–122. 2017

1. N. Azaryan, V. Batusov, J. Budagov, V. Glagolev, M. Lyablin, Trubnikova , G. Shirkova , J.-Ch. Gayde, B. Di Girolamo , A. Herty , H. Mainaud Durand, D. Mergelkuhl , V. Rude Comparative Analysis of Earthquakes Data Recorded by the Innovative Precision Laser Inclinometer Instruments and the Classic Hydrostatic Level System Physics of Particles and Nuclei Letters, 2017, Vol. 14, No. 3, pp. 480–492. © Pleiades Publishing, Ltd., 2017
2. Температурная стабильность 0.0050С бетонного пола в Транспортном тоннеле №1 ЦЕРН в месте расположения прецизионного лазерного Инклинометра Н.С. Азарян, Ю.А. Будагов, М.В. Ляблин, А.А. Плужников, Б Ди Джироламо, Ж-Кр. Гайде, Д. Мергелькуль Р13-2017-36
3. N. Azaryan, J. Budagov, M. Lyablin, A. Pluzhnikov, B. Di Girolamo, J.-Ch. Gayde, D. Mergelkuhl Determination of the maximum recording frequency by the Precision Laser Inclinometer of an earth surface angular oscillation Physics of Particles and Nuclei LettersNovember 2017, Volume 14, Issue 6, pp 920–929
4. Компенсация углового шумового колебания лазерного луча в Прецизионном Лазерном Инклинометре Н.С. Азарян, Ю.А. Будагов, М.В. Ляблин, А.А. Плужников, Б Ди Джироламо, Ж-Кр. Гайде, Д. Мергелькуль Р13-2017-34
5. N. Azaryan, J. Budagov, M. Lyablin, A. Pluzhnikov, B. Di Girolamo, J.-Ch. Gayde, D. Mergelkuhl The compensation of the noise due to angular oscillations of the laser beam in the Precision Laser Inclinometer Physics of Particles and Nuclei Letters November 2017, Volume 14, Issue 6, pp 930–938
6. Определение Максимальной частоты угловых колебаний поверхности Земли регистрируемых Прецизионным лазерным Инклинометром Н.С. Азарян, Ю.А. Будагов, М.В. Ляблин, А.А. Плужников, Б Ди Джироламо, Ж-Кр. Гайде, Д. Мергелькуль Р13-2017-35
7. Azaryan, N.; Budagov, J.; Lyablin, M.; Pluzhnikov, A.; Gayde, J.-Ch.; Di Girolamo, B.; Mergelkuhl, D.The temperature stability of 0.005°C for the concrete floor in the CERN Transfer Tunnel #1 hosting the Precision Laser Inclinometer Physics of Particles and Nuclei Letters, Volume 14, Issue 6, pp.913-919
8. Professional Precision Laser Inclinometer: the Noises Origin and Signal Processing

N. Azaryan, J. Budagov, V. Glagolev, M. Lyablin, A. Pluzhnikov, A. Seletsky, G. Trubnikova, B. Di Girolamo, J.-C. Gayde & D. Mergelkuhlb Physics of Particles and Nuclei Letters volume 16,№3 pages 264–276 (2019)

1. The Seismic Angular Noise of an Industrial Origin Measured by the Precision Laser Inclinometer in the LHC Location Area N. Azaryan, J. Budagov, V. Glagolev, M. Lyablin, A. Pluzhnikov, A. Seletsky, G. Trubnikov, B. Di Girolamo, J.-C. Gayde & D. Mergelkuhl Physics of Particles and Nuclei Letters volume 16, №4 pages343–353(2019)
2. Position-Sensitive Photoreceivers: Sensitivity and Detectable Range of Displacements of a Focused Single-Mode Laser Beam N. S. Azaryan, J. A. Budagov, M. V. Lyablin, A. A. Pluzhnikov, B. Di Girolamo, J.-Ch. Gayde & D. Mergelkuhl Physics of Particles and Nuclei Letters volume 16, №4 pages 223
3. Colliding Beams Focus Displacement Caused by Seismic Events N. S. Azaryan, J. A. Budagov, M. V. Lyablin, A. A. Pluzhnikov, G. Trubnikov, G. Shirkov, O. Bruning, B. Di Girolamo, J.-Ch. Gayde, D. Mergelkuhl & L. Rossi Physics of Particles and Nuclei Letters volume 16, №4 pages377–396(2019)
4. Budagov, J. ; Di Girolamo, B. ; Lyablin, M. The Method of Temperature Resistivity Creation of the Compact Precision Laser Inclinometer Physics of Particles and Nuclei Letters, Volume 17, Issue 7, p.931-937 ( December 2020), DOI: 10.1134/S1547477120070031
5. N. Azaryan, J. Budagov, V. Vernikovskya, M. Lyablin, A. Pluzhnikov, O. Smykovsky, B. Di Girolamo, J.-Ch. Gayde, D. Mergelkuhl Minimization of the Long Term Noises of the 24-Bit ADC for the Precision Laser Inclinometer. Phys. Part. Nuclei Lett. 18, 773–785 (2021).
6. B. Di Girolamo, J. A. Budagov, M. V. Lyablin, S. Vlachos The Precision Laser Inclinometer 12th Int. Particle Acc. Conf. IPAC2021, Campinas, SP, Brazil JACoW Publishing, ISBN: 978-3-95450-214-1 ISSN: 2673-5490 doi:10.18429/JACoW-IPAC2021-WEPAB281
7. Yu. A. Budagov, V. V. Glagolev, M. V. Lyablin, E. V. Pishchalnikova, A. M. Kuzkin, G. V. Trubnikov, B. Di Girolamo Position-Sensitive Measurements of a Single-Mode Laser Beam Spot Using the Dividing Plate Method Physics of Particles and Nuclei Letters Pub Date: 2023-01-10 , DOI:10.1134/s1547477122060061
8. M. V. Lyablin, Yu. V. Klemeshov Laser Power Stabilization in a Precision Laser InclinometerPhysics of Particles and Nuclei Letters, 2023, Vol. 20, No. 2, pp. 140–155., 2023.DOI: 10.1134/S1547477123020176

2.2.6 Опубликованные работы за период последнего продления проекта 2021-2023

1. The precision laser inclinometer long-term sensitivity in thermo-stabilized conditions Presented by M. Lyablin at CLIC Workshop 2015 (26-30 January 2015, CERN) Dubna E13-2015-35
2. . Di Girolamo , J.-Ch. Gayde, D. Mergelkuhl, M. Schaumann, J. Wenninger, Switzerland N. Azaryan, J. Budagov, V. Glagolev, M. Lyablin, G. Shirkov, G. Trubnikov, Russia The monitoring of the effects of earth surface inclination with the precision laser inclinometer for high luminosity colliders Proceedings of RuPAC2016, St. Petersburg, Russia, P. 210-212
3. B. Di Girolamo, J. A. Budagov, M. V. Lyablin, S. Vlachos The Precision Laser Inclinometer 12th Int. Particle Acc. Conf. IPAC2021, Campinas, SP, Brazil JACoW Publishing, ISBN: 978-3-95450-214-1 ISSN: 2673-5490 doi:10.18429/JACoW-IPAC2021-WEPAB281

2.2.7. Патенты и изобретения

1. Патент на изобретение RU 2510488 C2 Устройство для измерения угла наклона Ю.А Будагов , М. В.Ляблин
2. Патент на изобретение RU 2734451 C1 Устройство для измерения углов наклона поверхности Ю. А Будагов. М. В. Ляблин
3. Патент на изобретение RU 2740489 C1 Лазерный инклинометр для длительной регистрации угловых наклонов земной поверхности Ю.А Будагов, М.В. Ляблин
4. Патент на изобретение RU 2747047 C1 Лазерный инклинометр Ю.А Будагов М. В.Ляблин

1. Предложение ак. Г.В. Трубникова [↑](#footnote-ref-1)
2. Соглашение ЦЕРН - ОИЯИ [↑](#footnote-ref-2)
3. Соглашение Армения ОИЯИ [↑](#footnote-ref-3)