Прецизионные инклинометры на основе позиционно-чувствительных методов регистрации смещения лазерного луча

Краснoперов А.В.

17 июня 2026 г.

Инклинометры

Инклинометр (от лат. inclino — наклоняю и …метр) — прибор, предназначенный для измерения угла наклона различных объектов относительно гравитационного поля Земли. (https://ru.wikipedia.org/wiki/Инклинометр)

- Строительство. Мониторинг положения зданий и механических конструкций
- Контроль мостов, туннелей, плотин
- Горное дело и бурение скважин
- Авиация
- Геодезия (контроль оползней)
- Геофизика (сейсмоактивность, долгосрочные деформации)
- …

Ручные и электрические, с аналоговым или цифровым выходом

Количество осей: это одноосевые (ось X), двухосевые (оси X и Y) и трёхосевые (оси X, Y и Z)

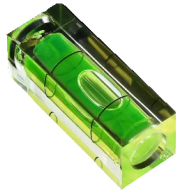
Ручные - точность ~ 1 градуса = 0.0175 рад

Отвес

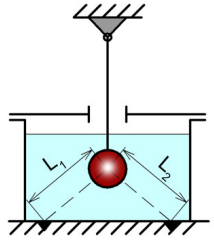


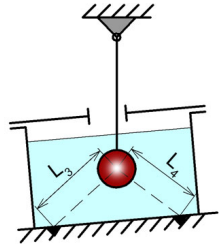
Одно и двух координатные уровни



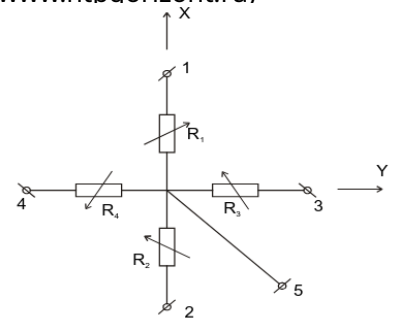


Маятниковый наклонометр Горизонт (https://www.ntpgorizont.ru)
https://www.hydro-pnevmo.ru/topic.php?ID=244

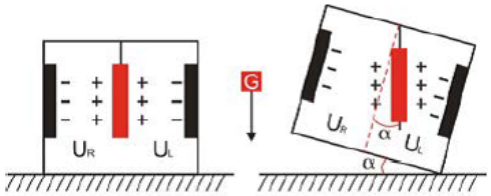




L1 < L3; L2 > L4.



MEMS - Микроэлектромеханические системы





LCR328T/LCR318T - Разрешение: 0,1° ~ 1.75 мрад

HCR726S Разрешение: 0,001° ~ 17.5 мкрад

https://www.sensor-systems.ru/product_234.html

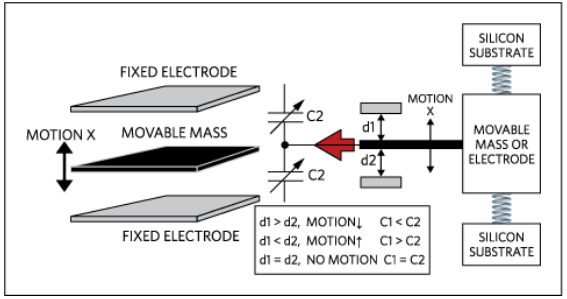


Диапазоны: ±360“ - ± 57600“

Погрешность 0.5 % от диапазона **8.72 мкрад**

1“ = 4,84814e-6 рад

3х-осный MEMS- акселерометр



Точность от 1° до 0.001°

Электролитические датчики наклона

Электролитические датчики (также называемые пузырьковыми или уровневыми) содержат проводящую жидкость внутри герметичного корпуса с несколькими электродами. Физический отклик жидкости на гравитацию создаёт изменение соотношения сопротивлений между парами электродов, пропорциональное углу наклона.

Инклинометры Jewell instuments с разрешением

- 500 серия (LILY SELF-Leveling borehole tiltmeter) ~ 5 нрад
- 600 серия A601-2 ~ 25 нрад
- 700 серия A701-2 ~ 100 нрад







Наклономер НШ-11 ИФЗ им. О.Ю. Шмидта РАН

ISSN: 0131-6230, eISSN: 2312-6965, https://doi.org/10.21455/si,
http://elibrary.ru/title_about.asp?id=25597
English translation: Seismic Instruments, ISSN: 0747-9239 (Print) 1934-7871 (Online), https://link.springer.com/journal/11990
Сейсмические приборы. 2022. Т. 58, № 1. С.29–52. https://doi.org/10.21455/si2022.1-2
The metadata in English is presented at the end of the article!

УДК 550.34

Развитие систем прецизионных наклономерных наблюдений в условиях подземной обсерватории

© 2022 г. В.В. Гравиров, А.В. Дещеревский, Ю.О. Кузьмин, Д.В. Лиходеев, А.Л. Собисевич, И.А. Широков

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия
Автор для переписки: А.В. Дещеревский, e-mail: adeshere@ifz.ru

Поступила в редакцию 24.12.2021 г.; после доработки 12.03.2022 г.
Принята к публикации 15.03.2022 г.

Аннотация. Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований в рамках комплексной проблемы совершенствования отечественных систем прецизионных инструментальных наблюдений на базе Северокавказской геофизической обсерватории ИФЗ РАН. Обсерватория расположена в пределах Эльбрусского вулканического центра в глубокой штольне уникального объекта научной инфраструктуры – Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН. Приведены краткие сведения о подземной лаборатории, проанализированы метрологически значимые характеристики основного инструмента – двухкомпонентного наклономера, а также подробно описаны система регистрации данных, алгоритмы их первичной обработки и организация хранения полученных временных рядов. Выполнены оценки влияния помех естественной и техногенной природы на результаты интерпретации как приливных, так и более долговременных вариаций наклонов, предложена методика минимизации влияния отдельного класса помех и проведена экспресс-оценка амплитуды наблюдаемого прилива.

Ключевые слова: наклономеры, штольневые наблюдения, прецизионный мониторинг, временные ряды, обработка данных, скачки уровня, земные приливы, программный пакет ABD

Цитируйте эту статью как: *Гравиров В.В., Дещеревский А.В., Кузьмин Ю.О., Лиходеев Д.В., Собисевич А.Л., Широков И.А.* Развитие систем прецизионных наклономерных наблюдений в условиях подземной обсерватории // Сейсмические приборы. 2022. Т. 58, № 1. С.29–52. https://doi.org/10.21455/si2022.1-2

Введение и постановка задачи

В настоящее время считается общепринятым, что самыми высокоточными методами регистрации геодеформационных процессов являются наклономерно-деформометрические наблюдения. В настоящее время уровень чувствительности (разрешения) этих методов достигает величин относительных деформаций порядка 10^{-10} [*Hodgkinson et al.,* 2013; *Тимофеев и др.,* 2019; *Кузьмин и др.,* 2020; *Meurers et al.,* 2021].

Прецизионные наклономерные наблюдения успешно используются для регистрации приливных и тектонических наклонов земной поверхности с целью изучения внутреннего строения Земли [*Melchior,* 1983; *Мельхиор,* 1968; *Островский,* 1979; *Agnew,* 1986], поиска предвестников землетрясений, вулканической активности [*Agnew,* 2007; *Широков и др.,* 2009], изучения распространения медленных деформационных волн и активизации разломов [*Кузьмин,* 2019, 2020, 2021], а также для геодинамического мониторинга особо ответственных объектов [*Кузьмин и др.,* 2018]. Преимущество наклономеров

Наклономер НШ и система регистрации данных

Устройство и характеристики наклономера

Двухкоординатные штольневые наклономеры были разработаны в ОКБ ИФЗ АН СССР в середине 1990-х годов и с тех пор неоднократно модернизировались. Прибор измеряет наклон поверхности относительно местной гравитационной вертикали в двух взаимно перпендикулярных направлениях по отклонению вертикального маятника с использованием емкостного преобразователя смещений (рис. 4).

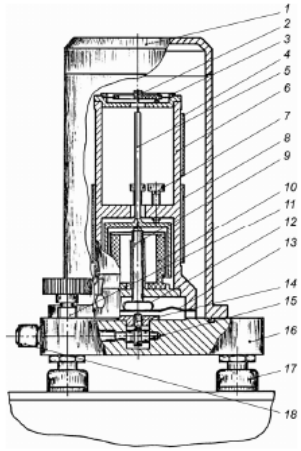


Рис. 4. Устройство наклономера: *1* – защитный колпак; *2* – упругий подвес; *3* – плоская пружина; *4* – согласующее устройство; *5* – маятник; *6* – корпус; *7* – упорный винт; *8* – плата трансформатора; *9* – шток; *10* – керамический корпус; *11* – установочный винт; *12*, *13* – пружины; *14* – ось; *15* – эксцентрик; *16* – основание; *17* – опора; *18* – ручка арретирования

Основой конструкции наклономера является вертикальный маятник массой 100 г на галтельном подвесе. Металлическая нить толщиной 0.5 мм имеет утонение длиной 15 мм и диаметром 200 мкм чуть ниже (в 10 мм от) точки подвеса. Благодаря этому внутренние деформации нити не искажают смещение маятника. Такой маятник всегда ориентирован точно по вертикали и максимально защищен от помех.

Неастазированный вертикальный маятник лишен недостатков, присущих горизонтальным маятникам, однако отсутствие механического усиления требует применения высокоточных датчиков смещения. В приборе использованы емкостные датчики с

монолитным керамическим корпусом, обеспечивающие контроль смещений маятника с субатомной точностью.

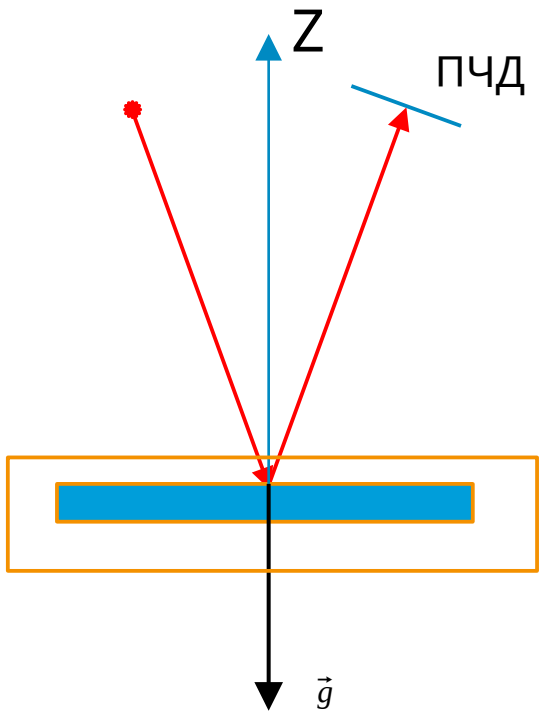
Диапазон измеряемых наклонов составляет ~2000 мс дуги (далее просто мс) с погрешностью 0.1 мс. (Имеется также загрубленный режим с увеличенным в 10 раз диапазоном и соответствующей точностью). Паспортный диапазон измеряемых частот составляет от 0 до 0.005 Гц, но на практике пишутся частоты от 0 до 0.1 Гц. Диапазон рабочих температур от +5° С до +45° С, паспортная термостабильность 500 мс/град.

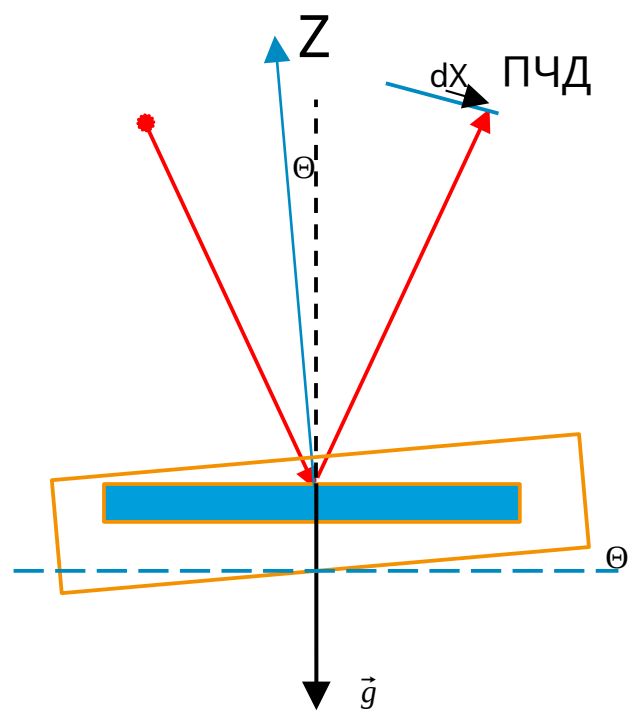
Коэффициент преобразования по напряжению составляет 5 мВ/мс. Дрейф нуля не превышает 800 мс/год. Система оборудована встроенной системой калибровки [*Алешин и др.,* 2017*; Кузьмин и др.,* 2020].

Наклономер НШ-11 установлен на постаменте 2 (см. рис. 2, 3) в точке с координатами 43.24882 N, 42.72218 E, *H*=1715 м. Сечение штрека 4×3.5 м, азимут простирания 11° (см. рис. 2). Наклономер генерирует два аналоговых выходных сигнала (два координатных канала), которые подаются на вход цифровой системы регистрации.

Погрешность 0.1 мс
0.48 нрад

Принцип работы лазерного инклинометра





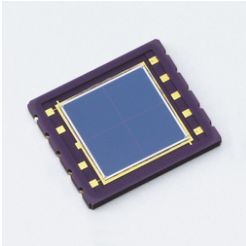
Задачи

- Измерение угловых колебаний Земной поверхности с целью прогнозирования землетрясений. Геофизические измерения. (Армения, Камчатка, Нарочь)
- Измерение микросейсмических угловых колебаний поверхности Земли индустриального происхождения (VIRGO, зал MPD NICA)
- Измерение долговременных деформаций земной поверхности (Туннель коллайдера LHC, NICA)

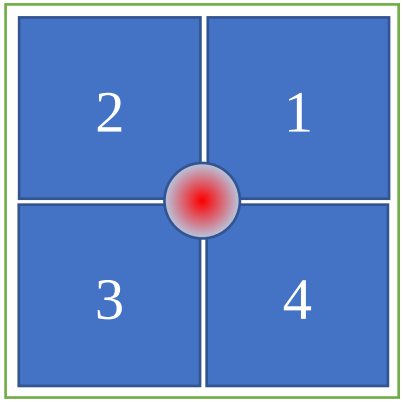
Позиционно-чувствительные детекторы

- Квадрантный фотоприемник - ***Профессиональный ПЛИ***
- Метод делительных пластин - ***Малогабаритный ПЛИ***
- Видеоматрица - ***«Матричный» ПЛИ***

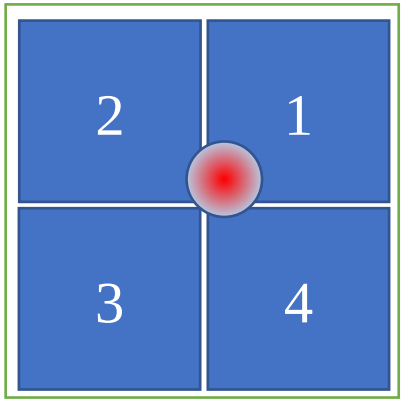
Квадрантный фотоприемник



Без смещения



Смещение в результате наклона



Смещения лазерного луча

$\Delta X = [(U_1+U_4) – (U_2+U_3)]/U$

$\Delta Y = [(U_1+U_2) – (U_3+U_4)]/U$

где

$U = U_1+U_2+U_3+U_4$

Углы наклона Sx и Sy

$Sx = Kx * \Delta X$ и $Sy = Ky * \Delta Y$

Kx и Ky – калибровочные коэффициенты

Sx и Sy позволяют определить общий наклон ПЛИ и его направление

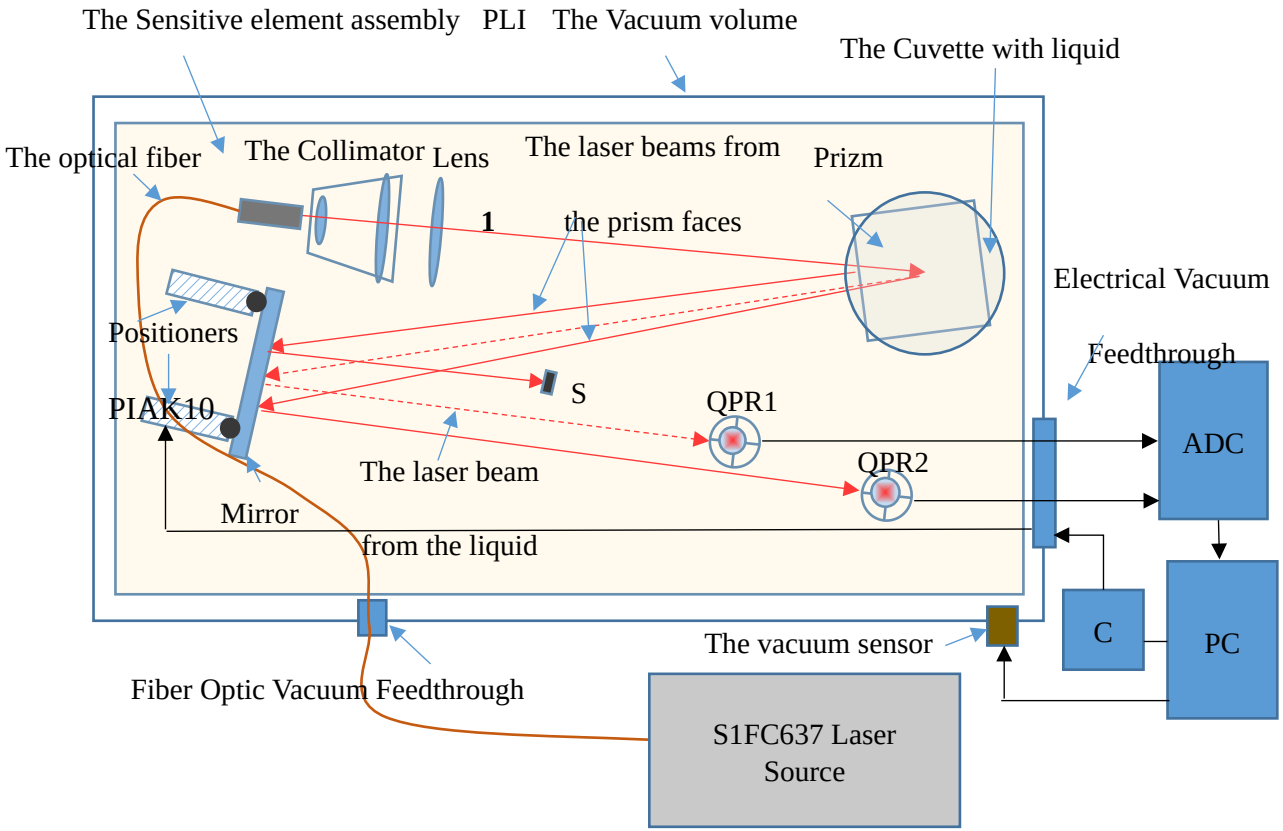
Профессиональный прецизионный лазерный инклинометр (ППЛИ)

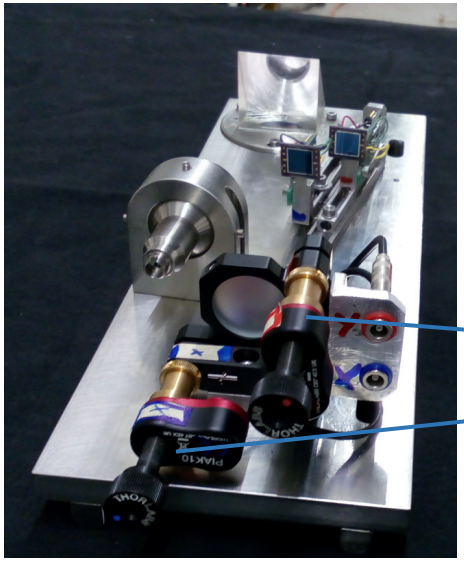
Работа велась под руководством Ю.А. Будагова

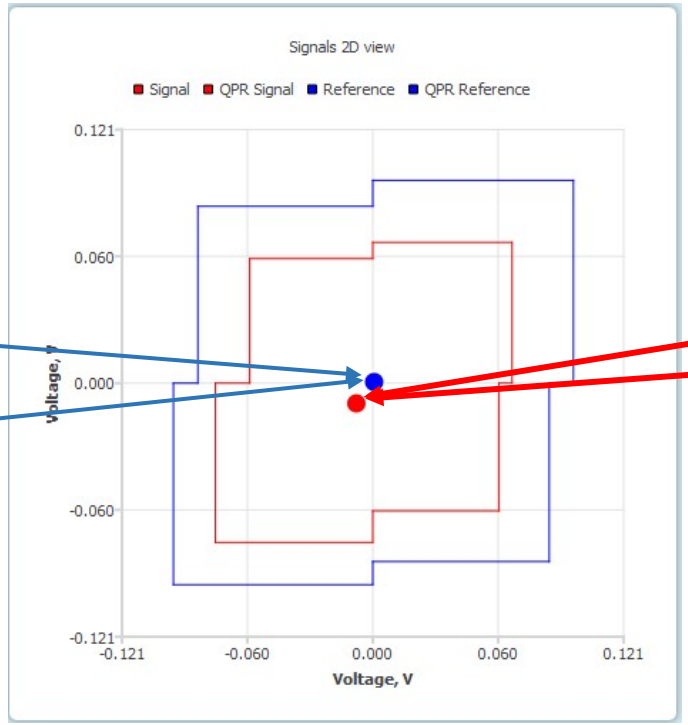
- 2010 – начало работ
- 2011 – первая публикация
- 2012 – Патент РФ на изобретение
- до 2015 – работа инклинометра “на воздухе”, начиная с 2015 – в вакуумной камере
- 2016 – ППЛИ – PLI01 (ЦЕРН) и ППЛИ в Гарни
- 2017 – 6 ППЛИ
- 2019 – установка 2 ППЛИ на Virgo
- 2021 - установка 4 ППЛИ в тоннеле LHC

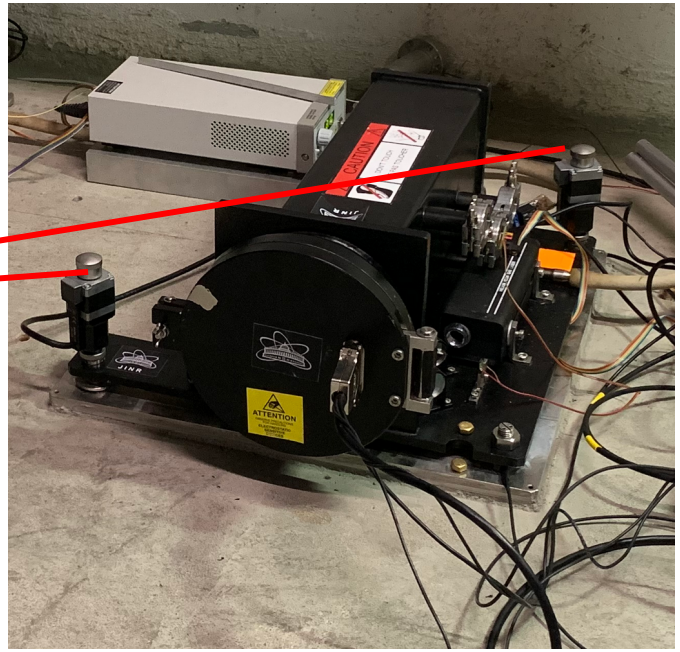
Принципы работы и конструкция инклинометра защищены Патентами РФ

Конструкция ППЛИ



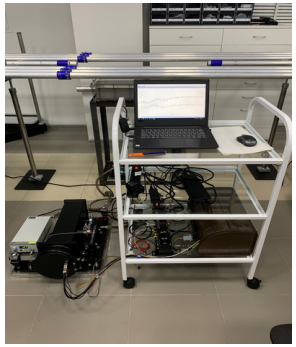



Signals 2D view
Signal
QPR Signal
Reference
QPR Reference
0.121
0.060
0.000
-0.060
-0.121
Voltage, V
-0.121
-0.060
0.000
0.060
0.121
Voltage, V

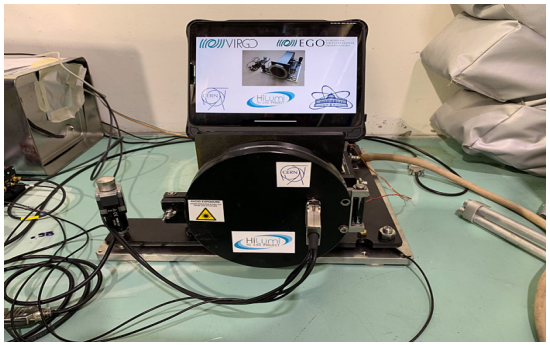


5 ППЛИ, ЦЕРН





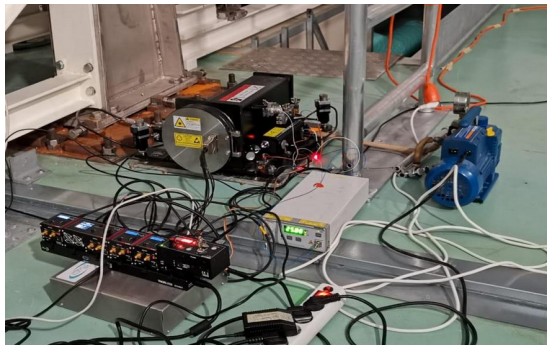
2 ППЛИ, Vigro,EGO



8 ППЛИ

ППЛИ, Гарни, Армения





Плодотворное сотрудничество



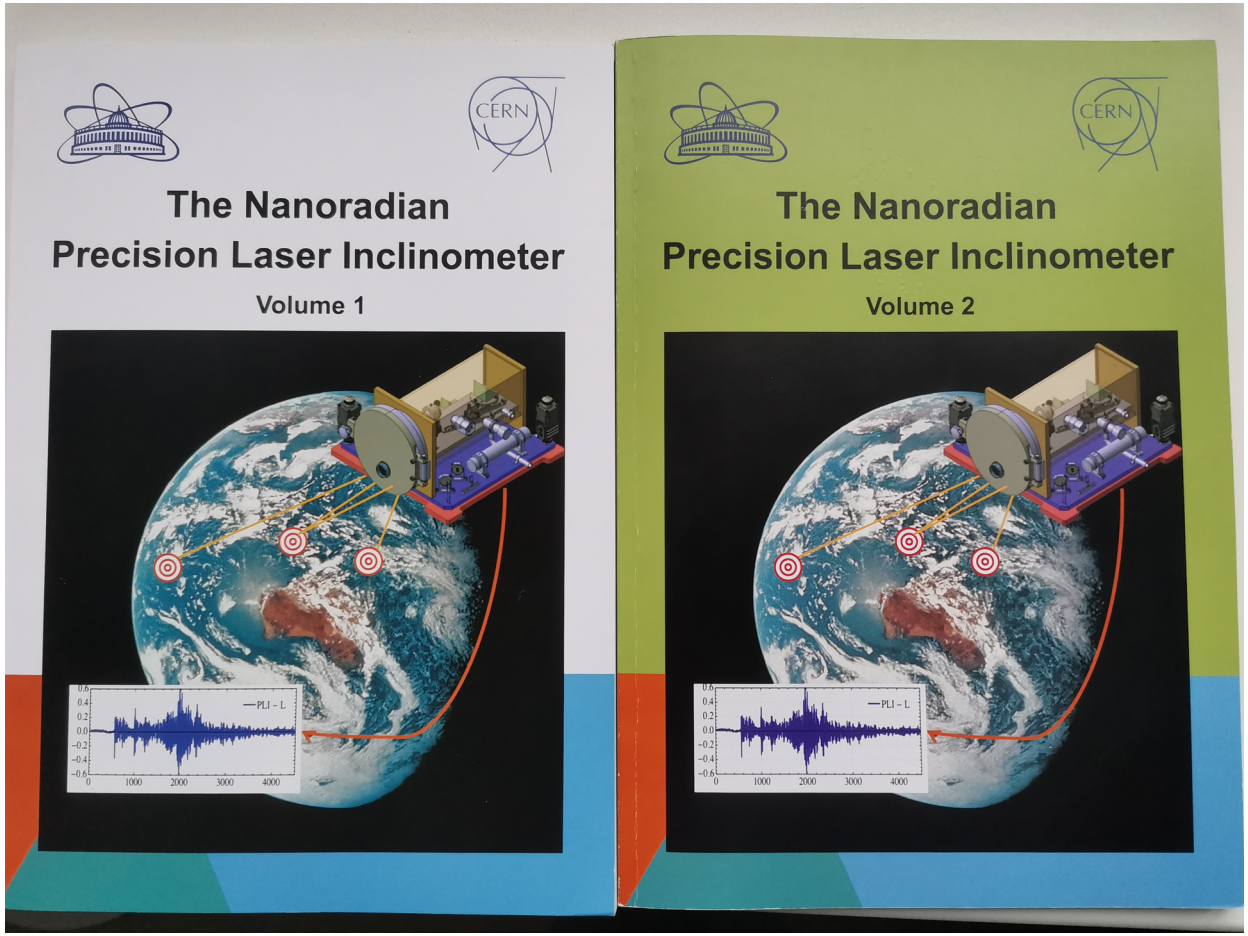
Группа ЦЕРН Beniamino Di Girolamo, Helene Mainaud Durand, Slawomir Sudak, Cedric Charrondiere.

Сеть из 4 ППЛИ в кольце LCH, DAQ на основе cRIO

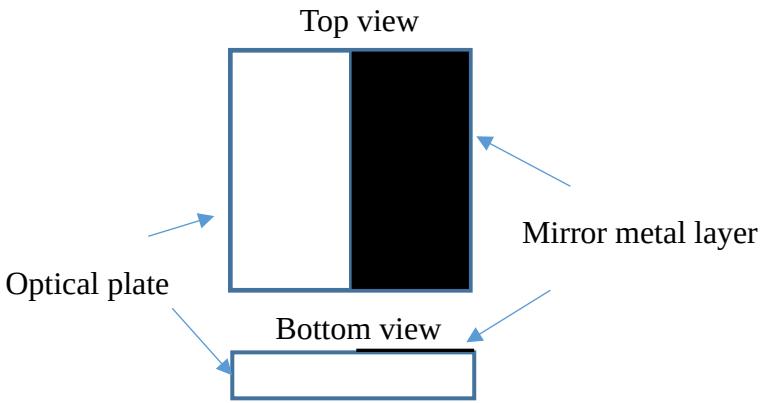


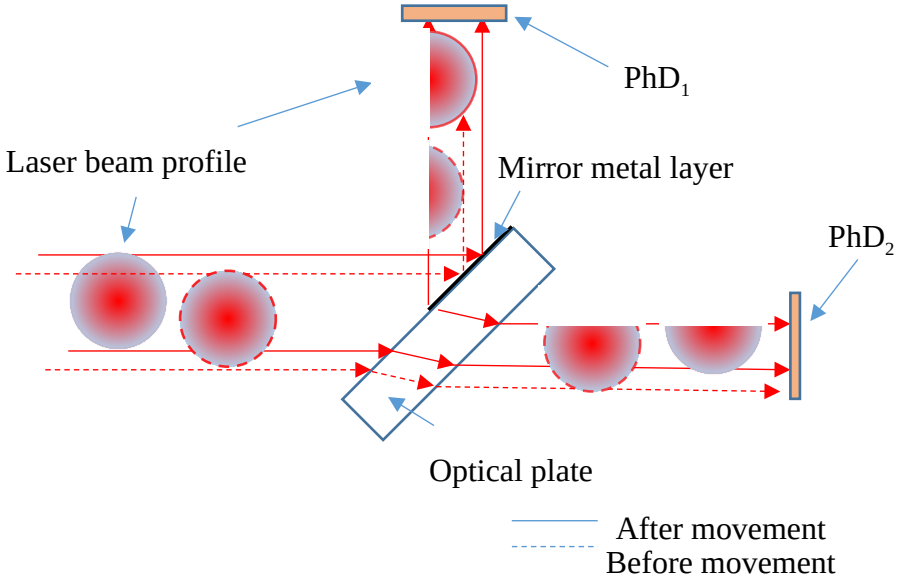
ГГО, Гарни, Армения
Аветик Есаян, «Ширак Технолоджис»

Облачное хранение данных
Удаленные контроль и настройка ППЛИ
Web-интерфейс


The Nanoradian
Precision Laser Inclinometer
Volume 1
CERN
The Nanoradian
Precision Laser Inclinometer
Volume 2
CERN

Метод делительных пластин





Смещение луча относительно границы отражающего слоя можно оценить из разницы сигналов с фотоприемников U1 и U2

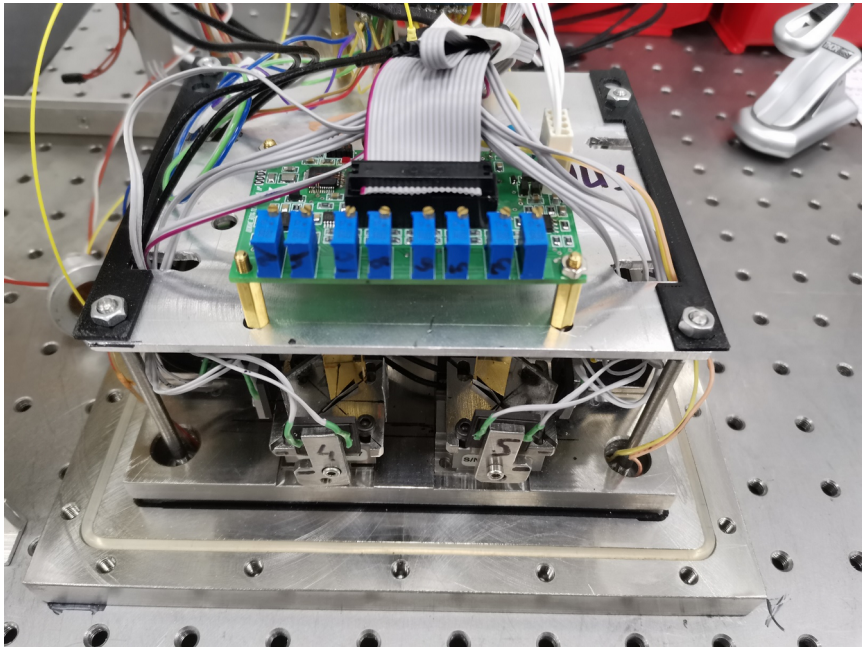
R = (U1-U2)/(U1+U2)

В зависимости от ориентации пластины измеряются вертикальные или горизонтальные смещения

Малогабаритный ПЛИ

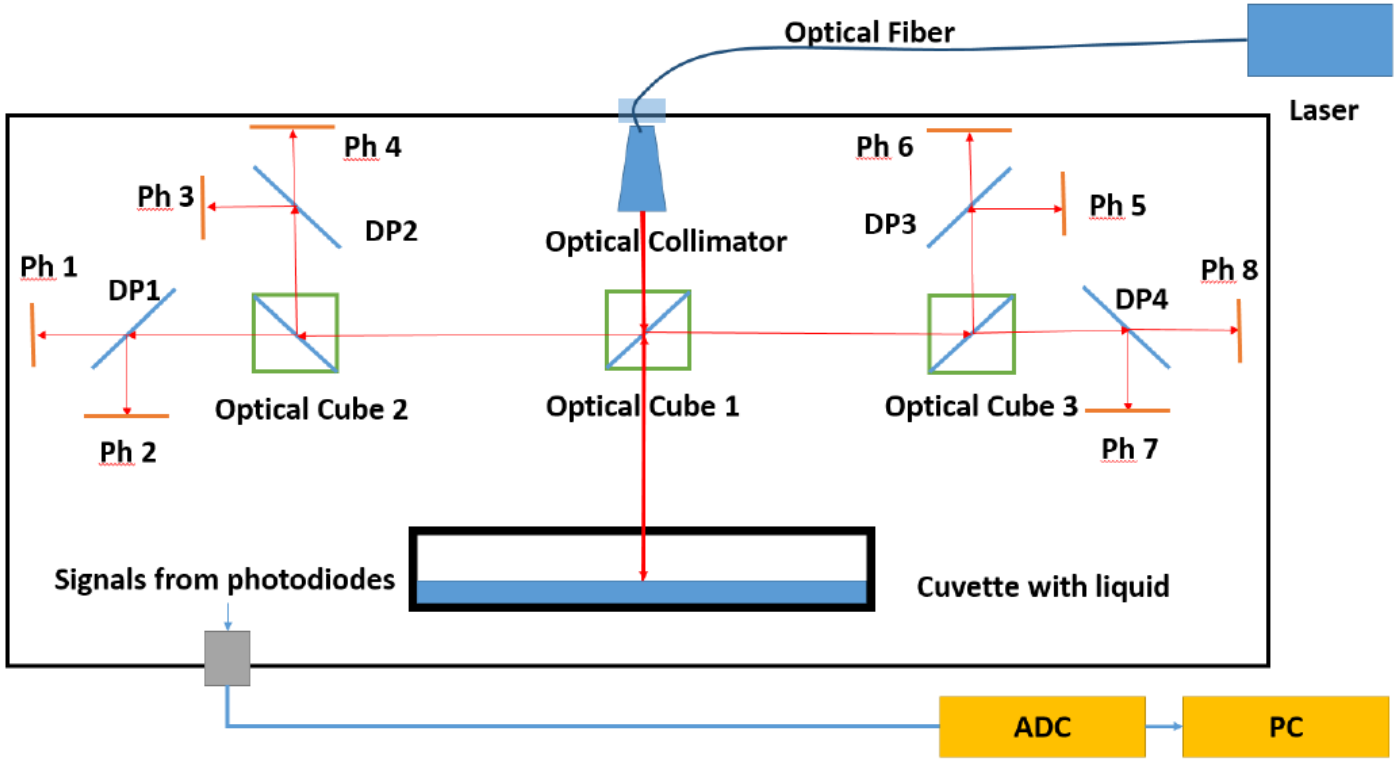


D = 28 см



20x20x20 см

Схема МПЛИ



- Два луча
  сигнальный и опорный
- 4 делительные пластины
- 8 фотоприёмников
  8 каналов регистрации
- 2 модуля АЦП
  DT9824 или DT8824
  или плата сбора данных
- 4 пьезо-позиционера
  делительных пластин
  и контроллер
- ПК

ГГО, Гарни, Армения (2021 г)



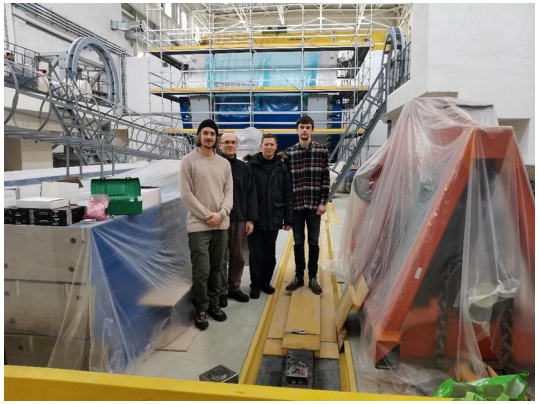
КФ ФИЦ ЕГС РАН (2022 и 2023 гг)



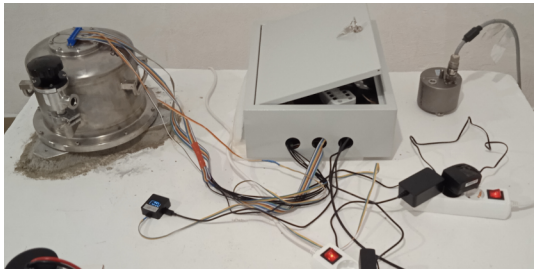


Зал эксперимента MPD NICA, ОИЯИ (2022-2025 гг)





ГО «Нарочь» ЦГМ НАН Белоруси





Метрологическая лаборатория ЛЯП

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ЦЕНТР ГЕОФИЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА НАН БЕЛАРУСИ»

УДК 350.8.05+551.243.8

УТВЕРЖДАЮ
Директор Центра
геофизического мониторинга
НАН Беларуси

_____ Г.А. Аронов
«__» _____ 2025 г.

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

по теме:
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПО ДАННЫМ РЕГИСТРАЦИИ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ ПРИБОРОМ МПЛИ И ШИРОКОПОЛОСНОЙ СЕЙСМОМЕТРИЧЕСКОЙ АППАРАТУРОЙ В СТАЦИОНАРНЫХ УСЛОВИЯХ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ «НАРОЧЬ» В БЕЛАРУСИ

Руководитель НИР,
глав. науч. сотр.,
д. физ.-мат. наук _____ А.Г. Аронов

Минск 2025

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе проведения НИР по сравнительному анализу регистрации сейсмических событий малогабаритным прецизионным лазерным инклинометром МПЛИ и широкополосной сейсмометрической станцией исполнитель выполнил следующее:

– подготовил исходную информацию и принял участие в создании программного обеспечения для приема данных с сети МПЛИ в формате MiniSEED, онлайн контроля и визуализации зарегистрированной информации;

– обеспечил техническое обслуживание МПЛИ, его работоспособность и сохранность;

– подготовил базу данных и каталог представительных сейсмических событий, составленный по результатам совместно зарегистрированных сейсмических событий сейсмометрической аппаратурой и МПЛИ, установленными в подземном бункере геофизической обсерватории «Нарочь»;

– провел сравнительный анализ по данным регистрации сейсмических событий прибором МПЛИ и широкополосной сейсмометрической аппаратурой.

Несмотря на меньшее количество зарегистрированных событий МПЛИ по сравнению с сейсмометрической станцией (266 из общего числа 5160 за период с 24.10.2023 по 31.08.2025), проведенный анализ выявил ряд особенностей и возможных перспектив использования МПЛИ, в том числе:

– МПЛИ эффективно фиксирует региональные события с магнитудой $M \geq 4.0$ и телесейсмические события с магнитудой $M \geq 6.2$;

– отмечается общее сходство в волновых и спектральных характеристиках зарегистрированных событий;

– наблюдаются общие закономерности в спектрах, в том числе увеличение уровня колебаний на определенных частотах для событий в отдельных сейсмоактивных регионах;

– отмечается, что МПЛИ зарегистрировал колебания на частоте около 2.4 Гц для ряда далеких событий (Япония, Аляска, Камчатка и др.), которые не были зарегистрированы сейсмометрической станцией. Возможно, это объясняется более высокой чувствительностью МПЛИ к определенным частотным компонентам для телесейсмических (далеких) событий.

В целом, полученные результаты свидетельствуют о необходимости дальнейшего накопления данных для анализа разрешающей способности МПЛИ в регистрации сейсмических событий. При этом, вы целях повышения точности и информативности данных, получаемых МПЛИ, необходимо подготовить амплитудно-частотную характеристику прибора, что позволит корректно проводить обработку регистрируемых событий, интерпретацию волновых и спектральных характеристик событий, исключить влияние собственных шумов прибора.

Проведенный этап исследований разрешающей способности МПЛИ свидетельствует о возможности применения данного прибора в системах мониторинга сейсмической активности в дополнение к традиционным сейсмическим сетям.

Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2025. Т. 51. №2. С. 85 - 101. ISSN 2079-6641

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

https://doi.org/10.26117/2079-6641-2025-51-2-85-101

Научная статья

Полный текст на русском языке

УДК 550.34.038.8

Регистрация микросейсмических явлений в г. Петропавловске-Камчатском при помощи прецизионного лазерного инклинометра

Р. И. Израпил[1], И. В. Бедняков[2], В. В. Глаголев[2], Р. В. Ни[2], А. А. Плужников[2], К. В. Поляков[2], М. В. Ляблин[2], А. М. Красноперов[2], А. М. Кузькин[2], Ю. В. Клемешов[2], Р. И. Паровик[3], В. Е. Глухов[4]*

[1] Камчатский государственный университет имени Витуса Беринга, 683032, г. Петропавловск-Камчатский, ул. Пограничная, 4, Россия

[2] Международная межправительственная организация Объединенный институт ядерных исследований, 141980, г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, 6, Московская область, Россия

[3] ФГБУН Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, 684034, с. Паратунка, ул. Мирная, 7, Россия

[4] Камчатский филиал ФГБУН Федерального исследовательского центра "Единая геофизическая служба РАН", 683006, г. Петропавловск-Камчатский, ул. Пийпа, 9, Россия

Аннотация. Показаны основные принципы работы малогабаритного прецизионного лазерного инклинометра (МПЛИ), а также его принципиальная схема. Представлены предварительные результаты годовых измерений наклонов земной поверхности при помощи МПЛИ в районе города Петропавловск-Камчатский. Продемонстрирована работа прибора по регистрации основных микросейсмических явлений: землетрясений, первичных микросейсмов от океана, индустриальных шумов, угловых деформаций поверхности Земли от Луны и Солнца, свободные колебания поверхности Земли. На основании полученных результатов делается вывод о возможности создания сети из МПЛИ для регистрации изменения ландшафта поверхности Земли за длительный период, который составляет не менее одного года.

Ключевые слова: инклинометр, г. Петропавловск-Камчатский, прецизионный лазерный инклинометр, землетрясение, первичный микросейсм, индустриальные шумы

«Вестник КРАУНЦ (Камчатской региональной ассоциации Учебно-научный центр). Физико-математические науки»

Результаты измерений МПЛИ

Регистрация землетрясений На рис. 5 представлен внешний вид типичного землетрясения, зарегистрированного МПЛИ.

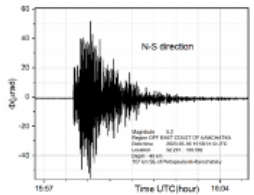


Рис. 5. Внешний вид землетрясения, зарегистрированного МПЛИ на Камчатке 06.05.2023
Figure 5. External view of the earthquake recorded by SSPLI in Kamchatka on 06.05.2023

Как видно из рис. 5, все компоненты землетрясения отчетливо зарегистрированы в диапазоне частот 10^{-3}-10 Гц. Такие сигналы являются типичными и встречаются также в исследовании геоакустической эмиссии [17].

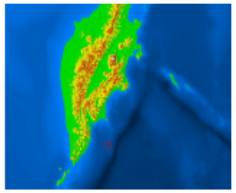


Рис. 6. Место произошедшего землетрясения 06.05.2023 г
Figure 6. The location of the earthquake that occurred on 06.05.2023

На рис. 6 показано место произошедшего землетрясения [11].

Регистрация сигналов первичного микросейсма При помощи МПЛИ зарегистрирован сигнал первичного микросейсма в частотном диапазоне от 10^{-2}-1 Гц. Источник первичного микросейсма – волнение на поверхности океана во время прохождения шторма.

При волнении поверхности океана возникает резонансное возбуждение стоячих волн между поверхностью и дном океана. Стоячая волна оказывает давление на дно океана и деформирует его. Возникающая волна деформации

формирует поверхностную волну, которая выходит на поверхность материка и распространяется по нему. Данный микросейсмический феномен является повсеместным и регистрируется на значительном удалении от океана [13, 14, 14, 15].

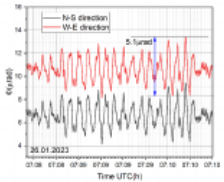


Рис. 7. Запись сигналов от первичного микросейсма
Figure 7. Recording signals from primary microseism

На рис. 7 показан внешний вид зарегистрированного МПЛИ первичного микросейсма.

Регистрация низкочастотных микросейсмических сигналов В области 10^{-5}-10^{-2} Гц зарегистрирован целый ряд квазипериодических микросейсмических сигналов. Это деформация земной поверхности от Луны и Солнца – твёрдые приливы.

На рис. 8 показана запись сигналов с МПЛИ за 18-20 апреля 2023 года.

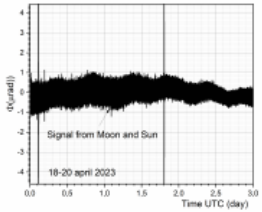


Рис. 8. Запись сигналов с МПЛИ 18-20 апреля 2023
Figure 8. Recording signals from SSPLI April 18-20, 2023

Отчетливо видны сигналы твёрдых приливов с периодом приблизительно в 12 часов, связанные с Луной и Солнцем.

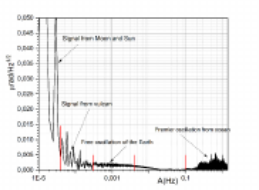


Рис. 9. Общий вид сигналов Фурье-анализа, данных представленных на Рис. 8 в диапазоне частот 10^{-5}-10 Гц

Figure 9. General view of the Fourier analysis signals, data presented in Figure 8 in the frequency range 10^{-5}-10 Гц

На рис. 9 показан общий вид Фурье-анализа сигналов, представленных на рисунке рис. 8 в диапазоне частот 10^{-5}-10 Гц. Наблюдаются сигналы твёрдых приливов от Луны и Солнца $\approx$ 160 нрад, предположительно сигналы от активности вулкана с амплитудой примерно в 2-3 раз меньше, около 50 нрад и предположительно, свободные колебания поверхности Земли, которые соответствуют амплитуде около 5-10 нрад, также сигнал первичных микросейсмических колебаний океана в диапазоне 10^{-1}-1 Гц.

Индустриальные шумы В области частот 1-10 Гц регистрируются колебания земной поверхности вызванными антропогенными факторами.

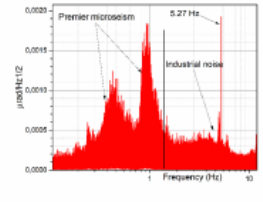


Рис. 10. Фурье-анализ индустриальных шумов в области частот 1-10 Гц

Figure 10. Fourier analysis of industrial noise in the frequency range of 1-10 Hz

На рис. 10 показан Фурье-анализ угловых колебаний поверхности Земли, соответствующий индустриальным шумам.

Сейсмокамера, в которой расположен МПЛИ находится в городской черте. МПЛИ регистрирует также деформацию земной поверхности при приближении массивных объектов. На рис. 11 показан момент прибытия и отбытия такого объекта (автофургон).

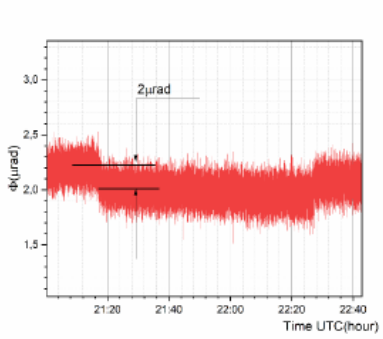


Рис. 11. Регистрация приезда и отъезда массивного объекта (автофургона) вблизи сейсмокамеры с МПЛИ

Figure 11. Registration of arrival and departure of a massive object (van) near a seismic chamber with SSPLI

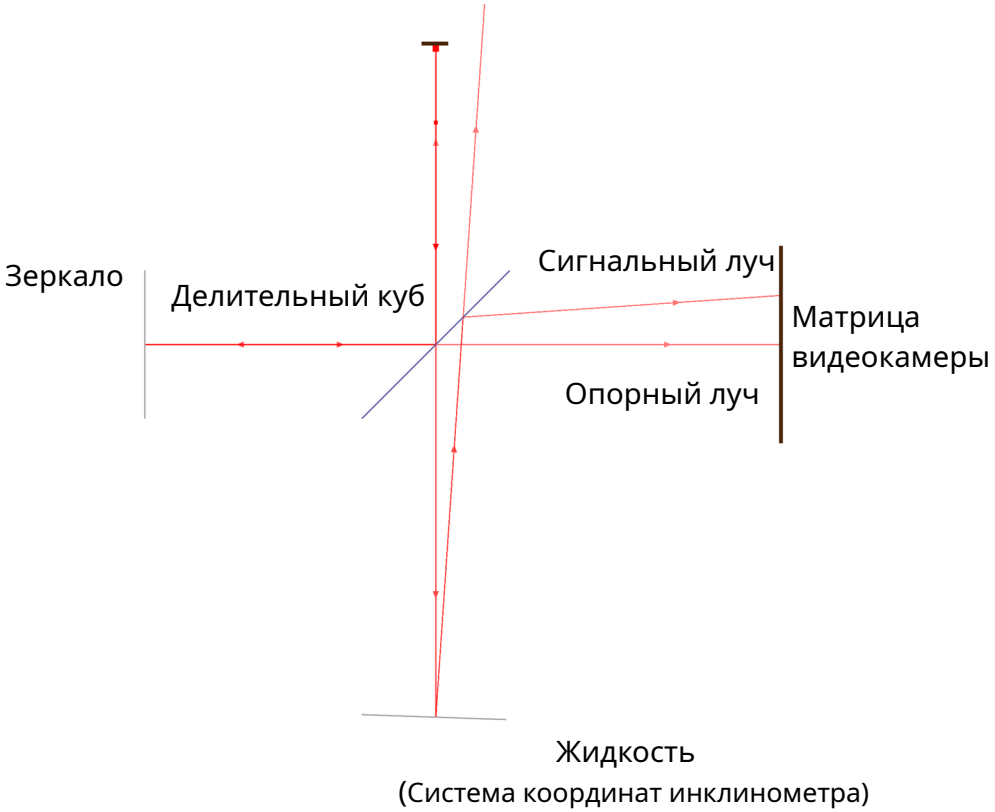
Как видно из рис. 11, наблюдается деформационный наклон земной поверхности с величиной $\approx$ 2 мкрад.

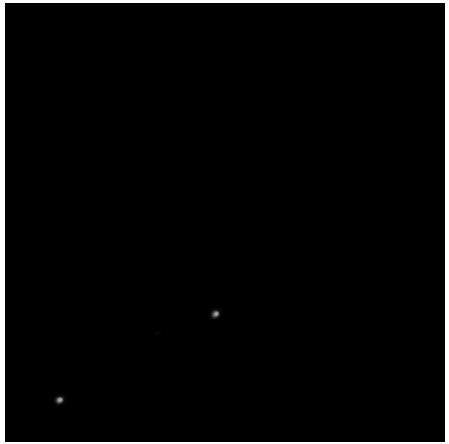
Длительные измерения углов наклона поверхности Земли Важным применением МПЛИ является регистрация длительного изменения ландшафта поверхности Земли. Для наблюдения за долговременным изменением ландшафта требуется измерение изменения углов наклона в течение длительного периода, составляющего время более 3х лет. МПЛИ, который мы использовали для работы на Камчатке демонстрирует автономность около 1 года. Столь длительный период наблюдений даёт возможность проанализировать угловые движения земной поверхности в более широком частотном диапазоне [12]. Проанализируем данные наблюдения МПЛИ за годовой период его работы в г. Петропавловск-Камчатский.

Наблюдение микросейсмических изменений наклонов земной поверхности в низкочастотной области спектра.

На рис. 12 показано изменение углового положения земной поверхности с 08 декабря 2022 года по 4 декабря 2023 года.

Схема «матричного» инклинометра





«Прямое» измерение координатных смещений луча
Масштаб задан размерами пикселя

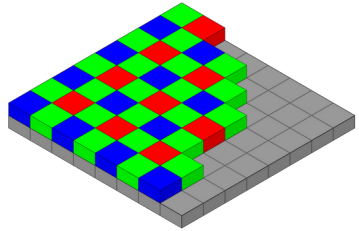
Один сенсор для регистрации X и Y смещений

Отсутствие механический позиционеров

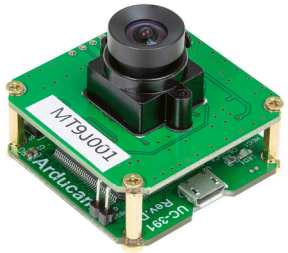
Большой динамический диапазон

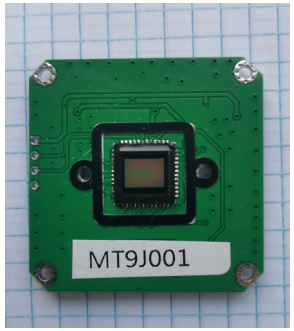
Выбор видеокамеры

- ~~Web-камера~~
- Монохромная матрица — оттенки серого — ~~RGB Байер~~
- Покадровый доступ к «сырым» данным с наибольшим разрешением АЦП
- Минимальный размер пикселя
- Настройка области захвата, выдержки, усиления матрицы



CMOS MT9J001 Монохромный сенсор с USB2 интерфейсом Arducam



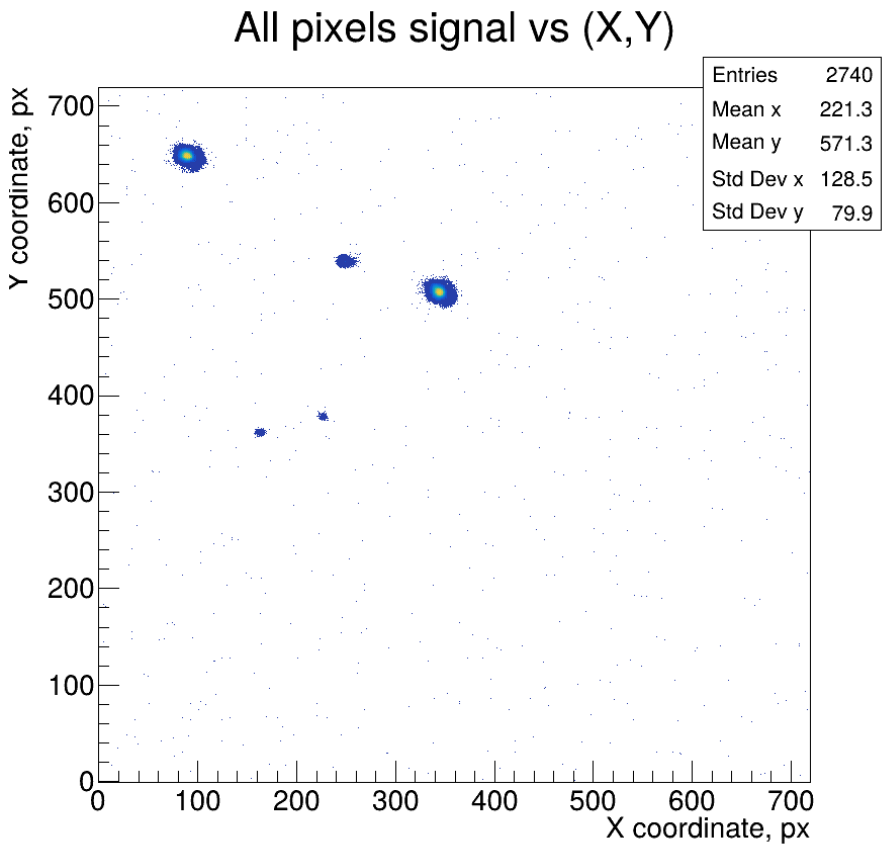


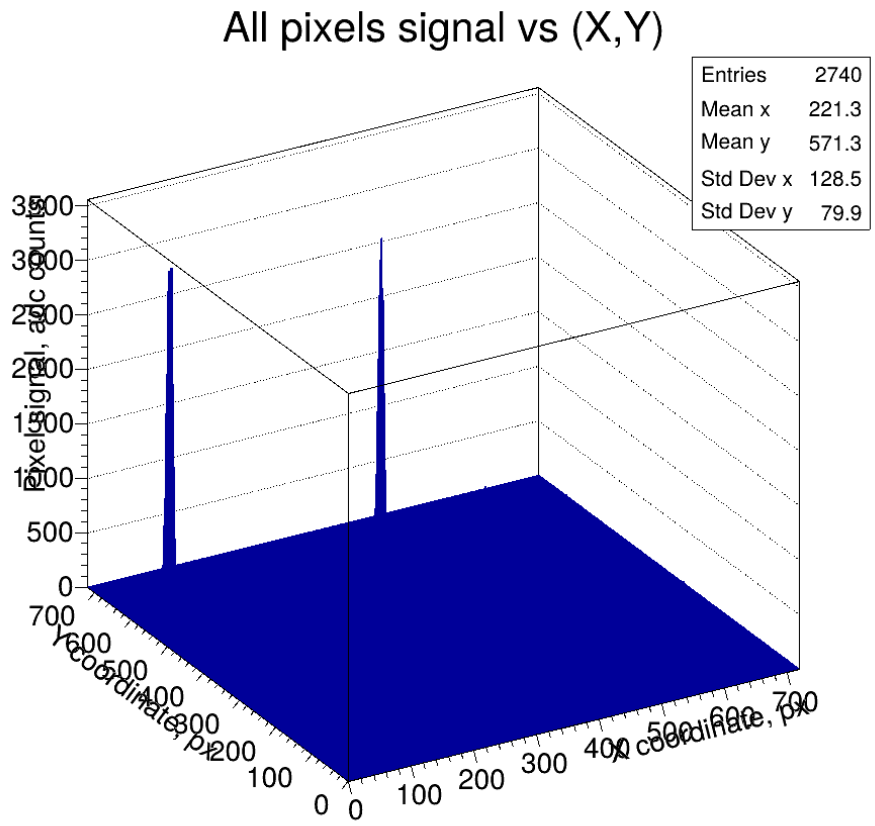
Физический размер 1/2,3" - 6.16x4.62мм

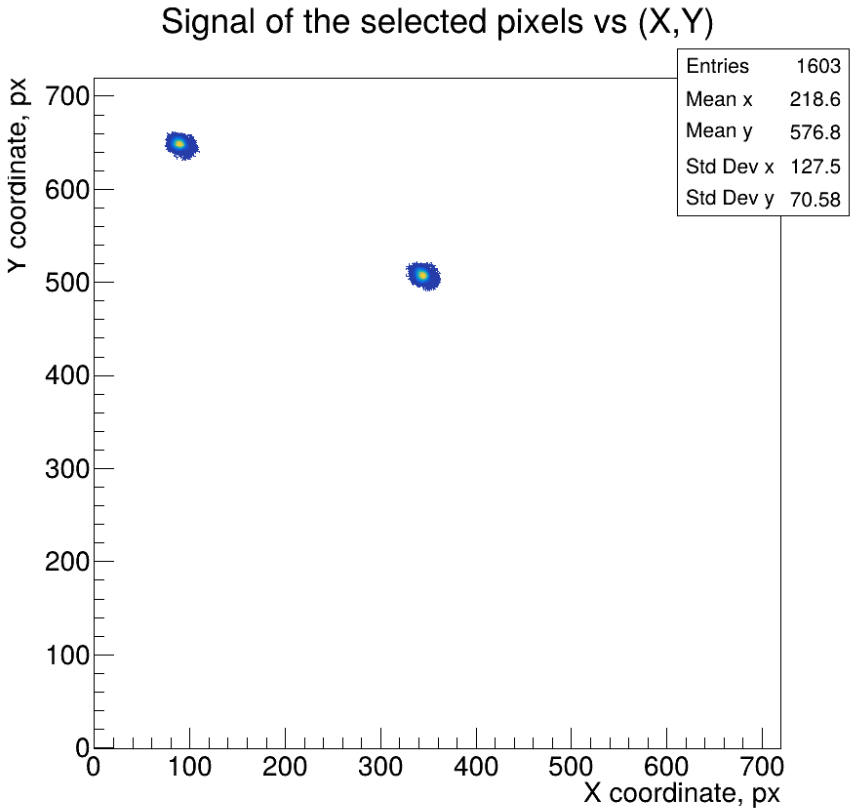
Размер матрицы 3856 x 2764 (10MP) @ 7.5 fps
Размер пикселя 1.67 x 1.67 мкм
Разрешение АЦП — 12 бит

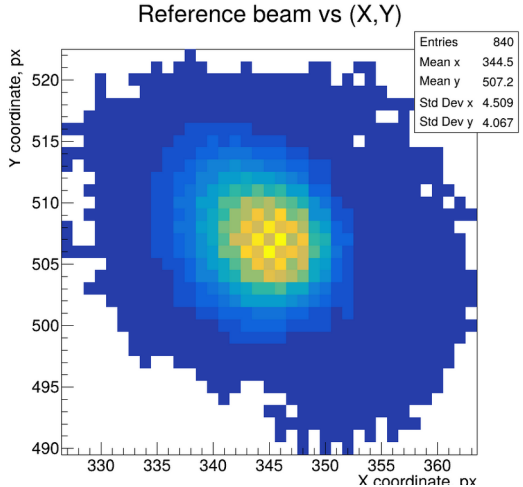
720 x 720 @ 37.5 fps

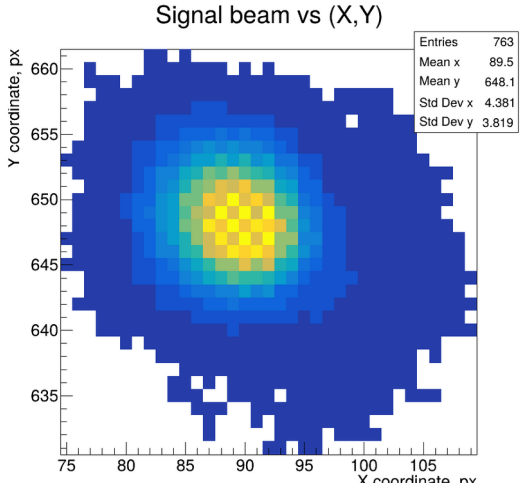


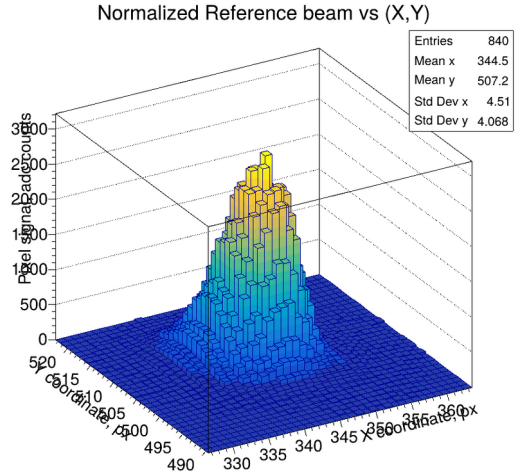

All pixels signal vs (X,Y)
Entries 2740
Mean x 221.3
Mean y 571.3
Std Dev x 128.5
Std Dev y 79.9
Y coordinate, px
X coordinate, px
0
100
200
300
400
500
600
700

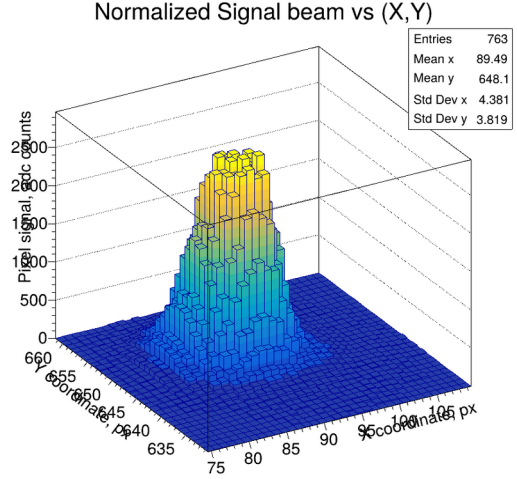

All pixels signal vs (X,Y)
Entries 2740
Mean x 221.3
Mean y 571.3
Std Dev x 128.5
Std Dev y 79.9
Pixels signal, adc counts
Y coordinate, px
X coordinate, px


Signal of the selected pixels vs (X,Y)
Entries 1603
Mean x 218.6
Mean y 576.8
Std Dev x 127.5
Std Dev y 70.58
Y coordinate, px
X coordinate, px


Reference beam vs (X,Y)
Entries 840
Mean x 344.5
Mean y 507.2
Std Dev x 4.509
Std Dev y 4.067
Y coordinate, px
X coordinate, px

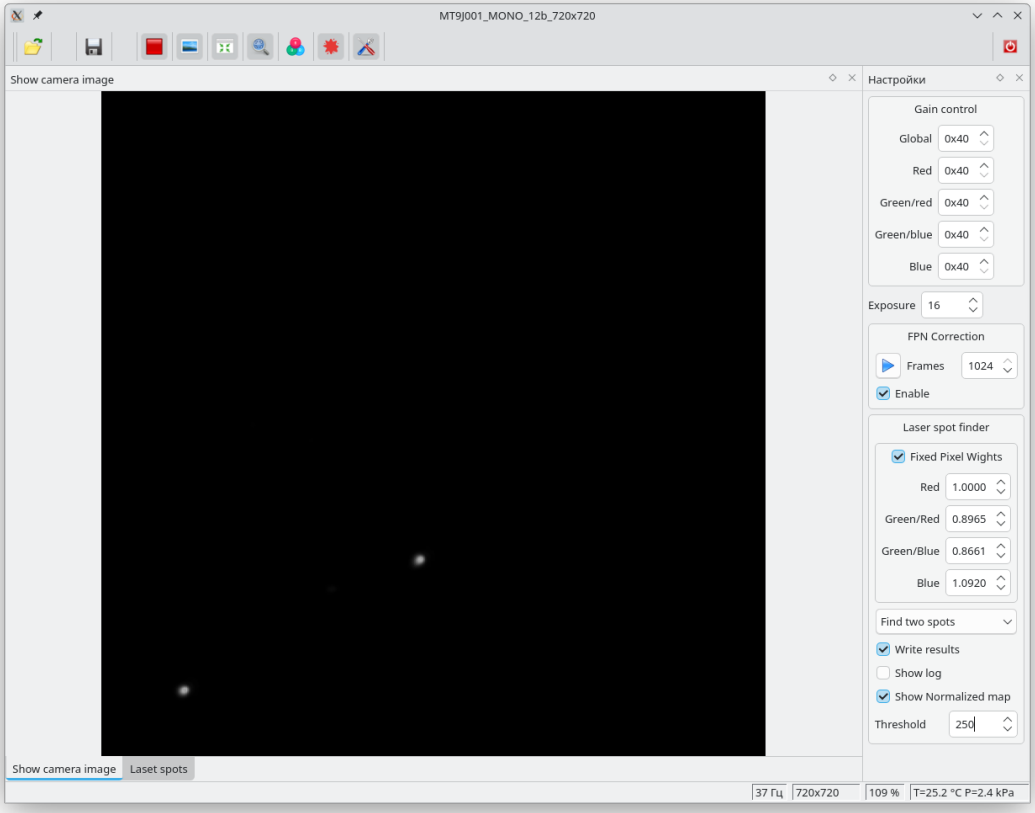

Signal beam vs (X,Y)
Entries 763
Mean x 89.5
Mean y 648.1
Std Dev x 4.381
Std Dev y 3.819
Y coordinate, px
X coordinate, px

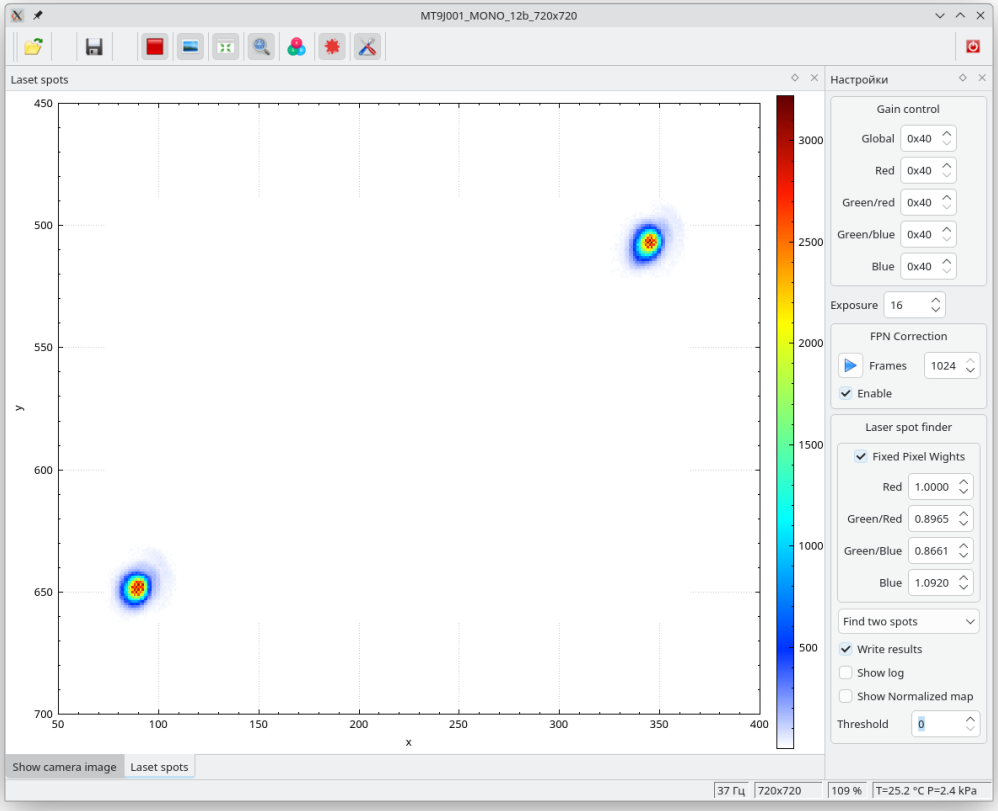

Normalized Reference beam vs (X,Y)
Entries 840
Mean x 344.5
Mean y 507.2
Std Dev x 4.51
Std Dev y 4.068
Pixel signal, adc counts
Y coordinate, px
X coordinate, px


Normalized Signal beam vs (X,Y)
Entries 763
Mean x 89.49
Mean y 648.1
Std Dev x 4.381
Std Dev y 3.819
Pixel signal, adc counts
Y coordinate, px
X coordinate, px

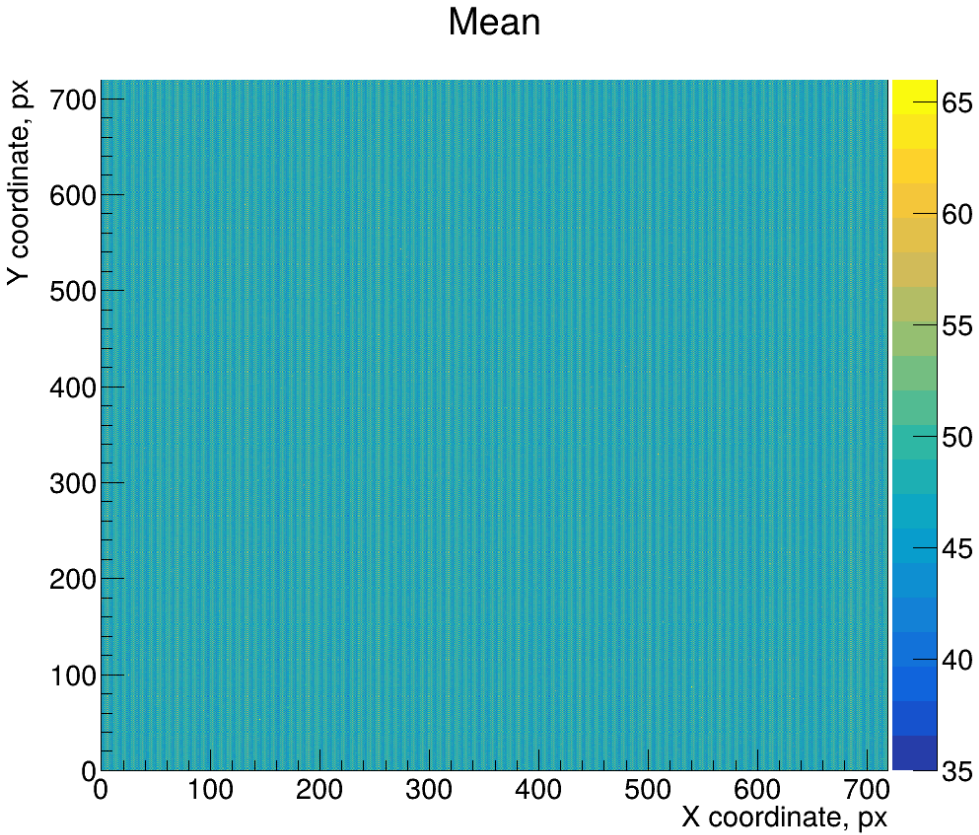
Программное обеспечение

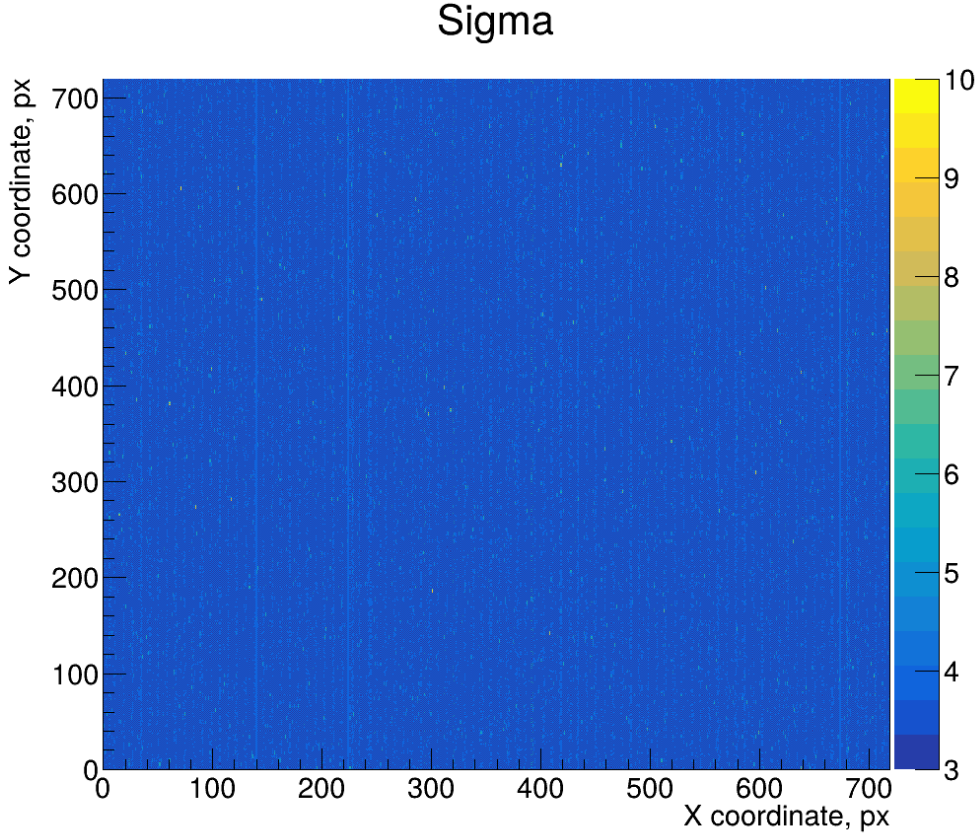
(в режиме реального времени ~37 fps)





При выключенном лазере по заданному количеству кадров для каждого пикселя вычисляется пьедестал (среднее значение и стандартное отклонение)



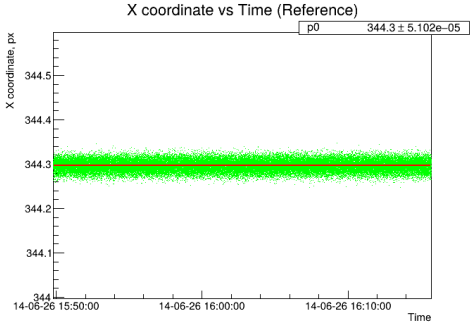


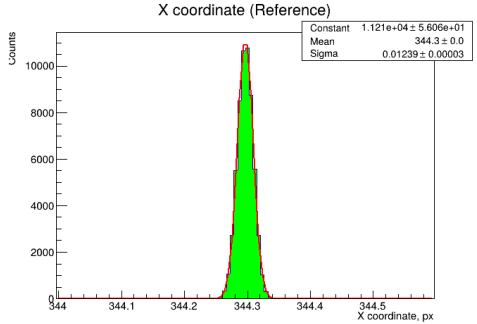
- При обычной работе из сигнала каждого пикселя вычитается пьедестал, результат сравнивается с пороговым значением
- Применение дополнительного порога, если необходимо
- Поиск связанных областей на кадре
- Выбор двух связанных областей с наибольшей площадью - два лазерных пятна — сигнальный и опорный лучи
- Вычисление взвешенных координат центра пятна по координатам пикселя (x_i, y_i) с учетом его засветки I_i (учет профиля луча)

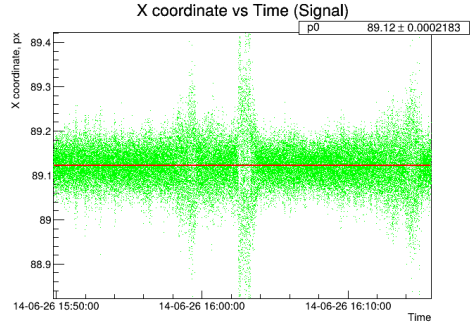
$$X_0 = \frac{\sum x_i * I_i}{\sum I_i} \qquad Y_0 = \frac{\sum y_i * I_i}{\sum I_i}$$

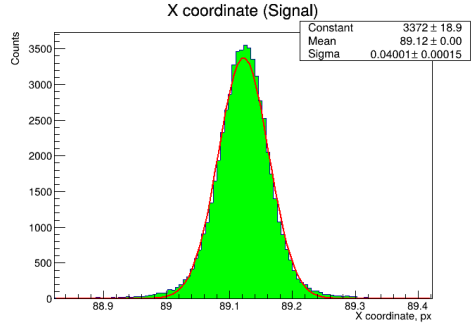
Опорный луч ~ 0.01 пк = ±16 нм (инструментальная точность)

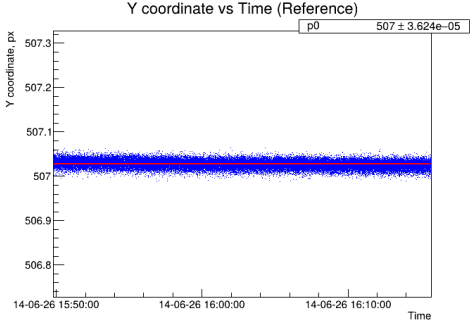
Сигнальный луч ~ 0.05 пк = ±80 нм

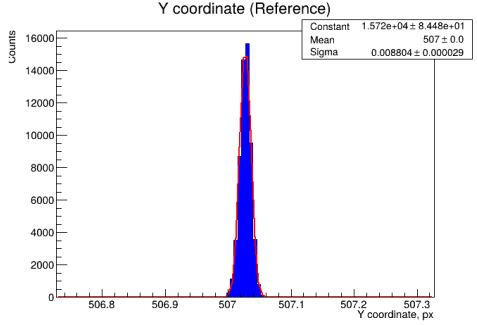


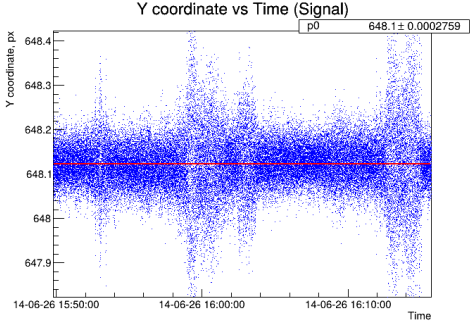


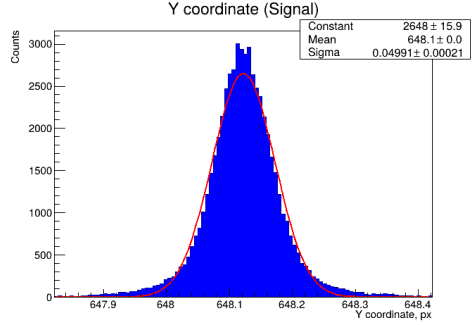




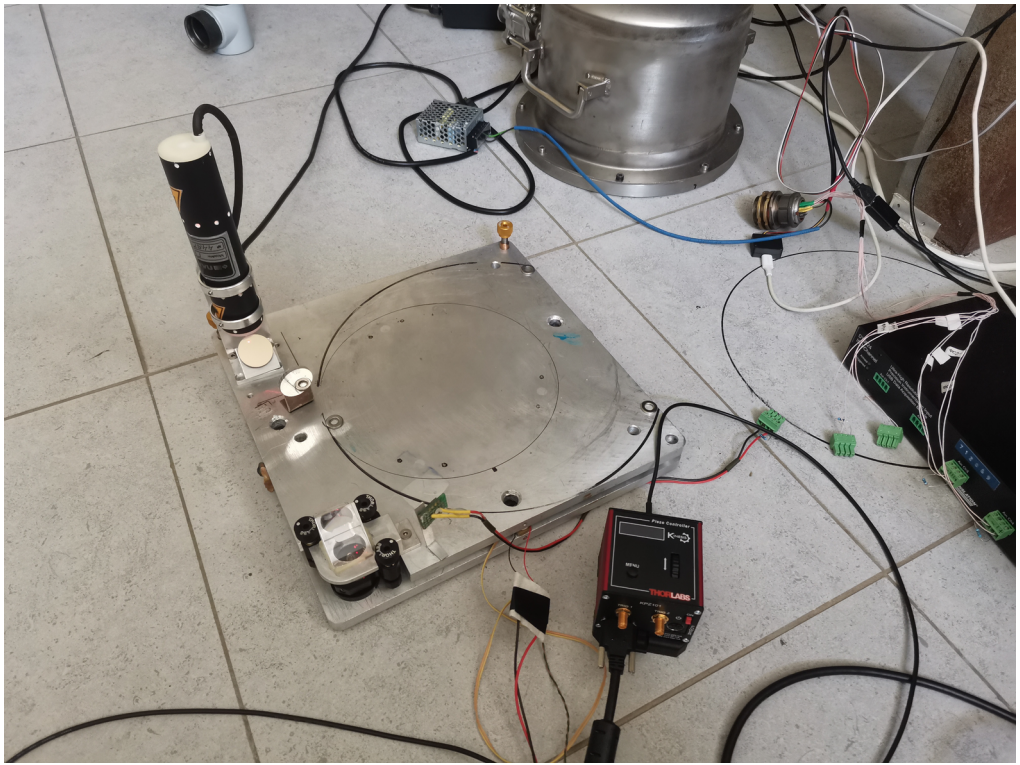


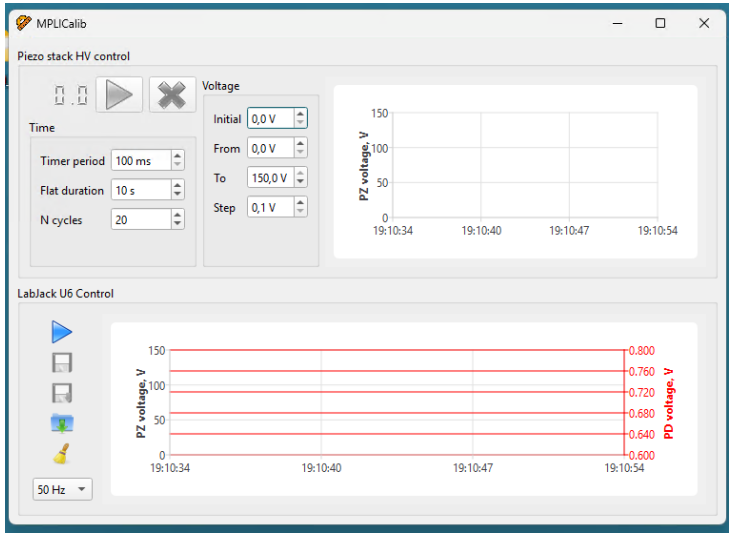






Калибровка ПЛИ

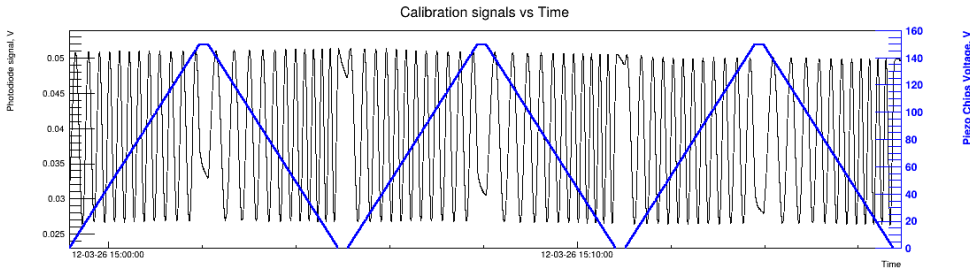


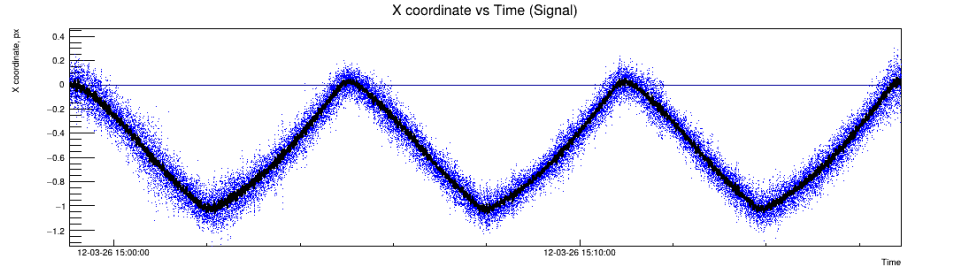


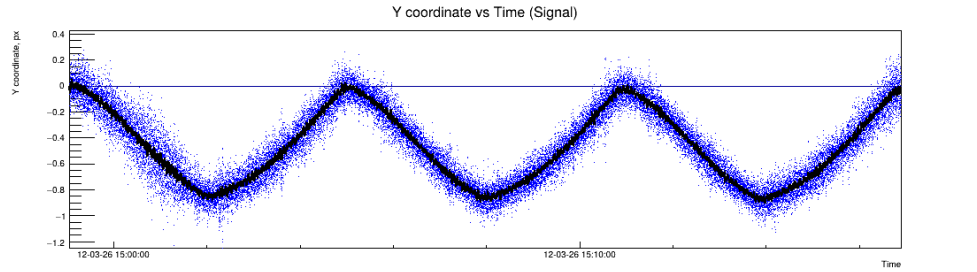
HV ~ 0-150 В

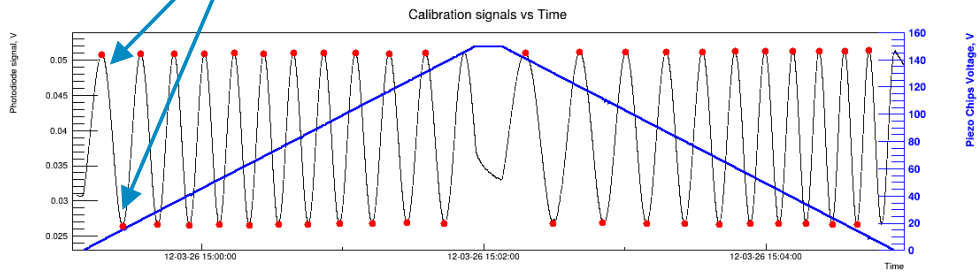
Наклон до 15 мкрад

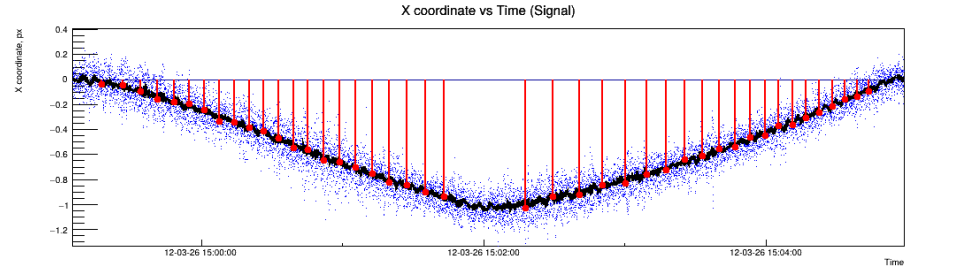
$h = \lambda / 4 = 158\,нм$ $\Delta\Theta = h / L = 633\,нрад$

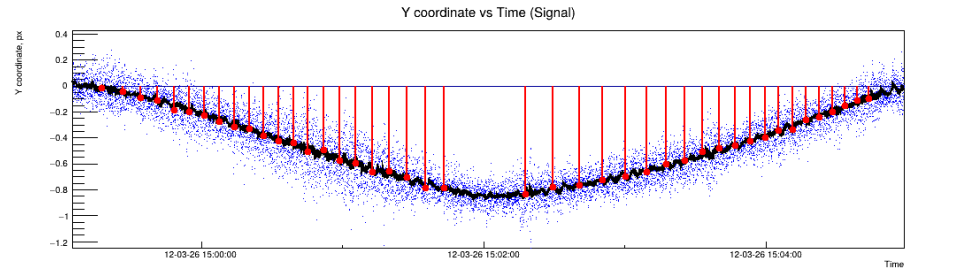


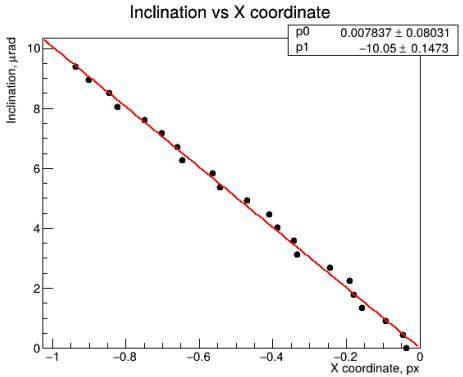


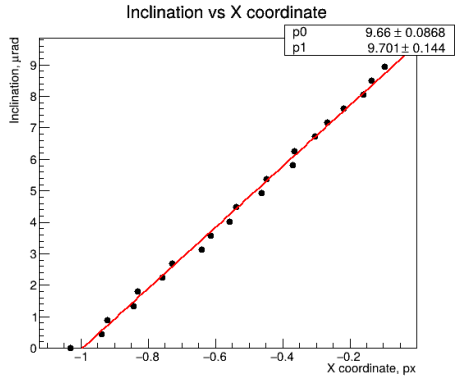


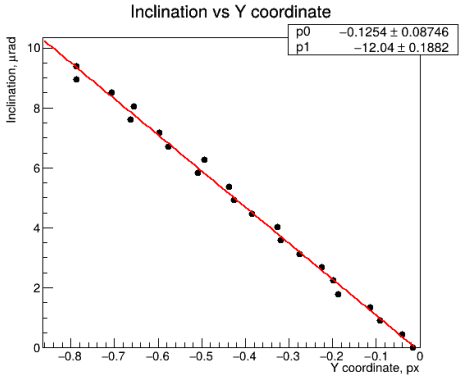


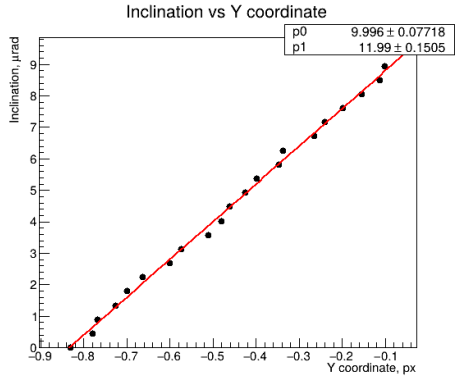


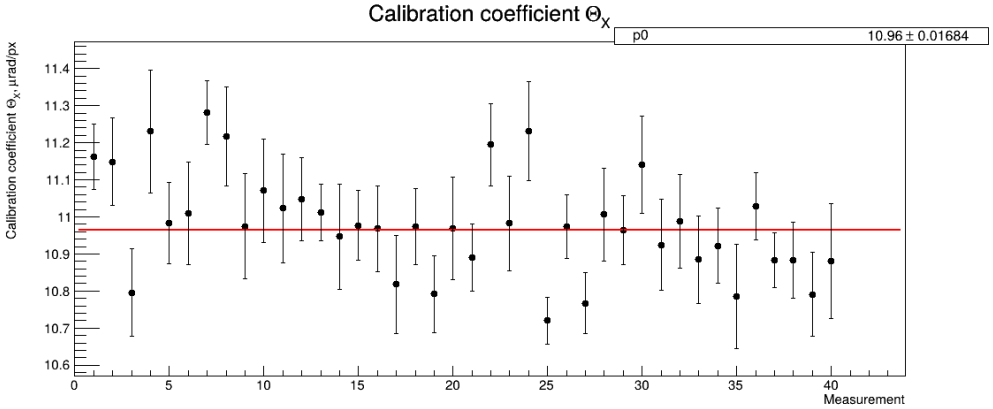


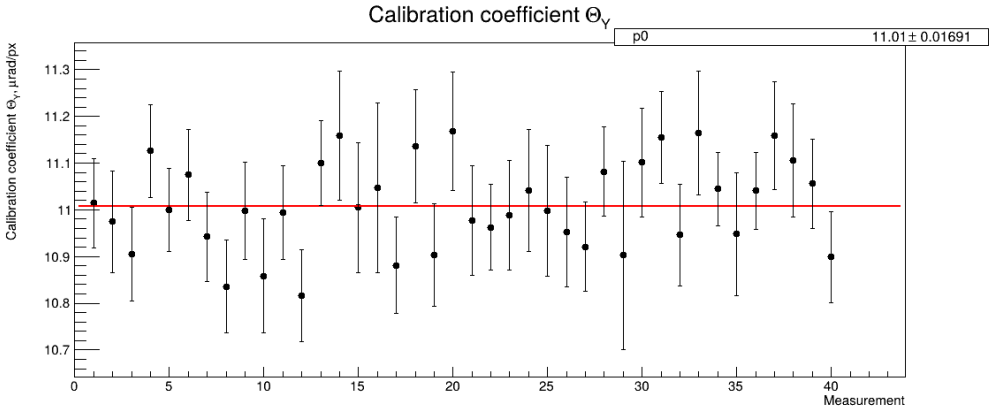

Inclination vs X coordinate
p0 0.007837 ± 0.08031
p1 −10.05 ± 0.1473
Inclination, µrad
X coordinate, px


Inclination vs X coordinate
p0 9.66 ± 0.0868
p1 9.701 ± 0.144
Inclination, µrad
X coordinate, px


Inclination vs Y coordinate
p0 −0.1254 ± 0.08746
p1 −12.04 ± 0.1882
Inclination, µrad
Y coordinate, px


Inclination vs Y coordinate
p0 9.996 ± 0.07718
p1 11.99 ± 0.1505
Inclination, µrad
Y coordinate, px





K = 11 мкрад/пиксель

Чувствительность можно улучшить за счет увеличения расстояния

Инструментальная точность ±110 нрад (опорный луч)

Колебания сигнального луча ±550 нрад

Динамический диапазон ± 4 мрад
(720 x 720 пк)

Чувствительность к индустриальному шуму

Электрички

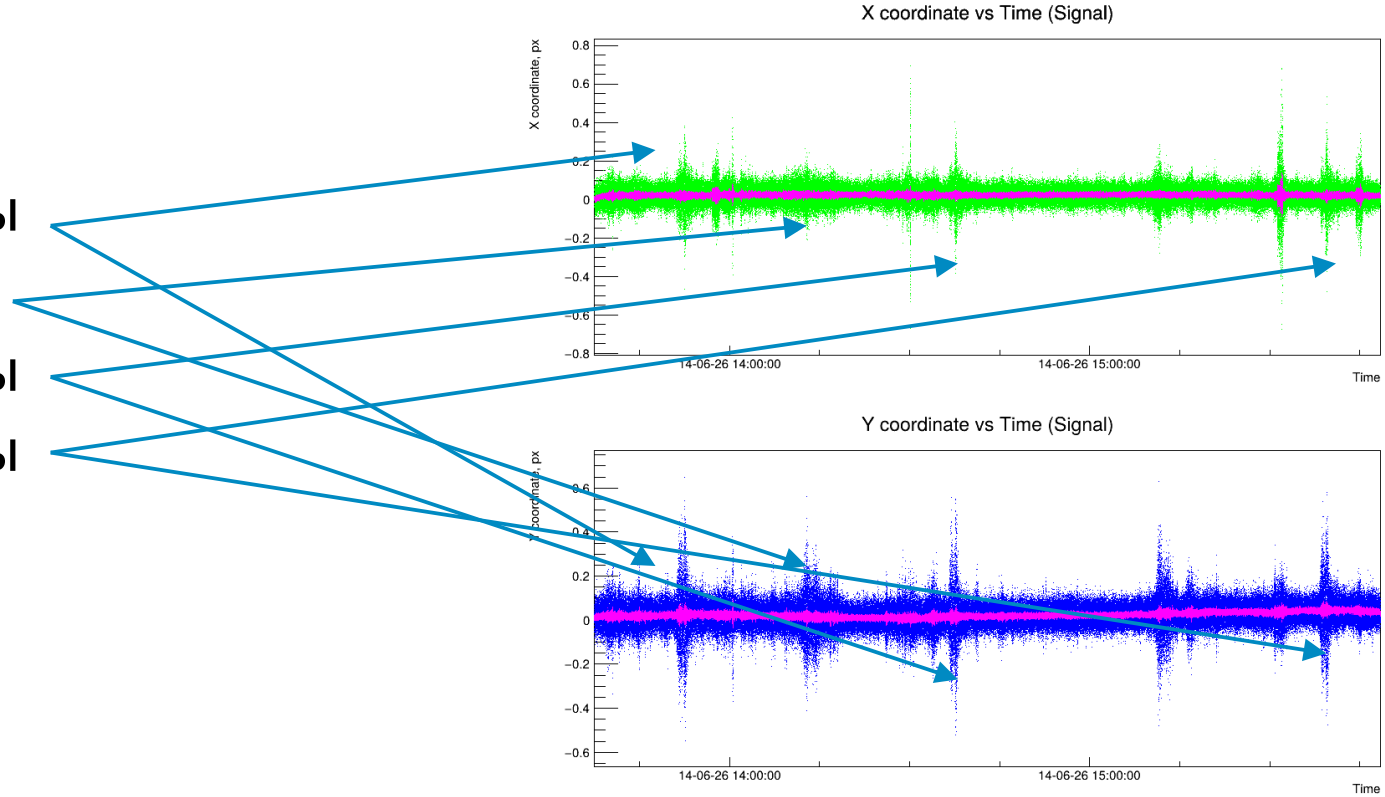
14.06.2026

13:51 из Дубны

14:16 в Дубну

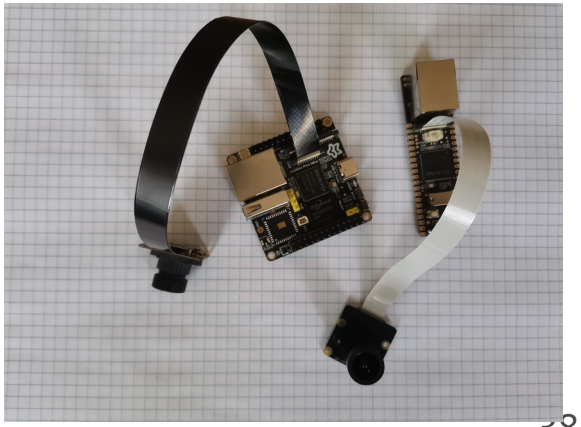
14:36 из Дубны

15:38 из Дубны



Дальнейшее развитие «матричного» инклинометра

- Увеличение чувствительности за счет увеличения размера
- Точность оценки координат пятна лазерного луча зависит от многих факторов: размера пятна, размера пикселя, шумов матрицы, разрядности АЦП, монохромности матрицы, т. п.
- Использование микропроцессорных плат



Выводы

- Работа с ППЛИ - ожидание возобновления сотрудничества с ЦЕРН
- МПЛИ — активное сотрудничество с ГГО (Гарни, Армения), КФ ФИЦ ЕГС РАН (Камчатка) и ГО «Нарочь» (ЦГМ НАН Белоруси)
- В 2025 году сотрудниками ГО «Нарочь» (ЦГМ НАН Белоруси) дана независимая оценка характеристик МПЛИ, проведено сравнение отклика МПЛИ на сейсмические события с сигналами широкополосной сейсмической аппаратуры обсерватории
- Создан прототип лазерного инклинометра на основе видеоматрицы с инструментальной точностью регистрации угловых колебаний ± 110 нрад и динамическим диапазоном ± 4 мрад. Показана чувствительность прибора к сейсмическим шумам индустриального происхождения. Продолжается работа по улучшению его характеристик.

Спасибо за внимание !

Backup

УДК 004.93'1

DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-386-390

Д. В. Леушев*
магистрант
В. В. Булатов*
кандидат технических наук, доцент
В. В. Семенников**
кандидат физико-математических наук, заместитель генерального директора
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*
***АО «Прогрессивные технологии»*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СМЕЩЕНИЯ ЛУЧА ЛАЗЕРА ИНКЛИНОМЕТРА ПО ИЗОБРАЖЕНИЮ, ПОЛУЧЕННОМУ СВЕТОЧУВСТВИТЕЛЬНОЙ МАТРИЦЕЙ

Представлен обзор современных инклинометрических систем. Выявлено, что недостаточно проработана методика оценки угла отклонения с требуемыми метрологическими характеристиками для лазерных инклинометров. На основе выборки изображений, полученных в результате испытаний прототипа лазерного инклинометра, приведена методика оценки смещения луча лазера для определения угла наклона.
Ключевые слова: *лазерный инклинометр, угол наклона, обработка изображений, пороговая фильтрация, оценка точности.*

D. V. Leushev*
Postgraduate Student
V. V. Bulatov*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
V. V. Semennikov**
PhD Sc. Phys.-Math., Deputy General Director
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*
***JSC Progressive Technologies*

DETERMINATION OF THE INCLINOMETER LASER BEAM SHIFT FROM THE IMAGE CAPTURED BY THE LIGHT-SENSITIVE MATRIX

The article presents an overview of modern inclinometric systems. It was revealed that the methodology for estimating the angle of deviation with the required metrological characteristics for laser inclinometers has not been sufficiently developed. Based on a sample of images obtained as a result of testing a prototype laser inclinometer, a method for estimating the displacement of a laser beam to determine the angle of inclination is given.
Keywords: *laser inclinometer, tilt angle, image processing, threshold filtering, accuracy estimation.*

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11) **193 722**(13) **U1**

(51) МПК
G01C 9/20 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) **ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ**

(52) СПК
G01C 9/20 (2019.05)

(21)(22) Заявка: **2019119005, 19.06.2019**

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
19.06.2019

Дата регистрации:
11.11.2019

Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: **19.06.2019**

(45) Опубликовано: **11.11.2019** Бюл. № **32**

Адрес для переписки:
197022, Санкт-Петербург, пр-кт Каменноостровский , 27, кв. 109, Мус В.К.

(72) Автор(ы):
Чуриков Алексей Борисович (RU),
Семенников Василий Васильевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):
Акционерное общество "Металкомп" (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: **US 4332090 A1, 01.06.1982. JP 2002277242 A, 25.09.2002. JP 2017032453 A, 09.02.2017. RU 2554598 C2, 27.06.2015. CN 101975583 A, 16.02.2011.**

(54) **ЛАЗЕРНЫЙ ИНКЛИНОМЕТР**

(57) Реферат:

Полезная модель относится к измерительной технике, а именно к оптическим устройствам для определения углов наклона объектов и может быть использована, например, в строительстве для контроля положения исследуемой плоскости или направляющей контактным способом. Лазерный инклинометр содержит корпус, размещённую внутри него жидкость, источник лазерного излучения, направляемого на поверхность указанной жидкости, двумерную светочувствительную матрицу и блок обработки. Источник лазерного излучения снабжён дифрагирующим элементом, выполненным с кольцевой щелью, размеры которой удовлетворяют условию формирования дифракционной картины Фраунгофера. Блок обработки выполнен с возможностью вычисления углового положения инклинометра на основе дифракционной картины, формируемой при отражении от поверхности жидкости и регистрируемой светочувствительной матрицей. Полезная модель позволяет повысить точность определения углового положения устройства. 5 з.п. ф-лы; 1 ил.

Точность
0.05 уг. сек.
или
0.25 мкм/м

0.24 мкрад