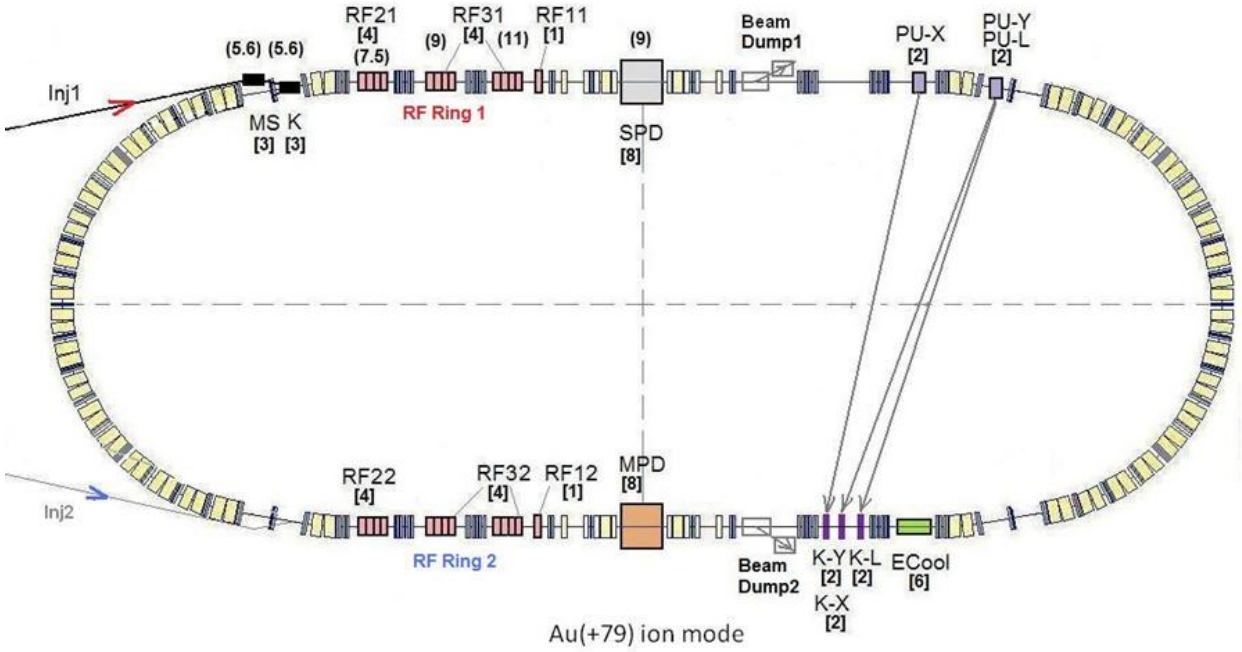
Исследование угловых колебаний «балкона» в зале MPD NICA при помощи интерферометрического прецизионного лазерного инклинометра

И.В. Бедняков, К.С. Бунятов, В.В. Глаголев, М.В. Ляблин, Ю.В. Клемешов, А.В. Краснопёров, А.М. Кузькин, Р.В. Ни, А.А. Плужников, К.В. Поляков, С.Н.Шилов

Введение

- Для проведения техногенного мониторинга физических установок в ОИЯИ в течение ряда лет совершенствуется конструкция Прецизионного Лазерного Инклинометра.
- При помощи одной из последних модификаций Интерференционного Прецизионного Лазерного Инклинометра (ИПЛИ) проведены измерения угловых колебаний в зале MPD NICA на так называемом «балконе» - выступающей площадки кольца коллайдера NICA в зал MPD, на которой расположен последний магнитооптический элемент коллайдера перед выводом пучка в установку MPD.
- В докладе обсуждается влияние поверхностных сейсмических волн и температурно-индуцированных деформаций на угловые колебания «балкона» в зале MPD установки NICA.

Постановка эксперимента



Принципиальная схема коллайдера NICA

- В ОИЯИ начиная с 2006г. развивается проект коллайдера NICA.
- В экспериментальных залах MPD и SPD часть зоны подготовки пучка выходят на специально изготовленные балконы

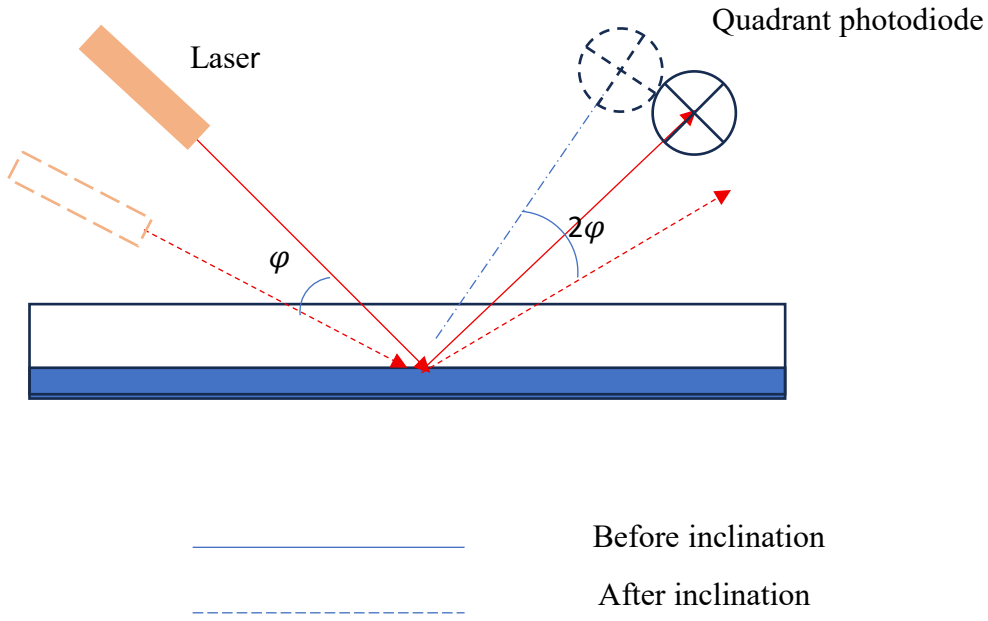
Постановка эксперимента 2



Расположение «балконов» в зале MPD

- В экспериментальных залах MPD и SPD крайние к детекторам элементы коллайдера расположены на специально изготовленных «балконах» A и B
- Угловая стабильность оснований балконов важна для получения высокой светимости коллайдера NICA.
- При прохождении сейсмических волн балконы могут возбуждаться на собственных частотах, что влияет на положение пучков частиц в коллайдере;
- При перемещении детектора по рельсам из зоны обслуживания в зону проведения эксперимента происходит деформация бетонного пола, которая передается и на «балкон»;
- В течение суток в силу изменения температуры окружающей среды деформируются конструкции здания, что приводит к наклону «балконов» и может оказать влияние на проведение пучков коллайдера.

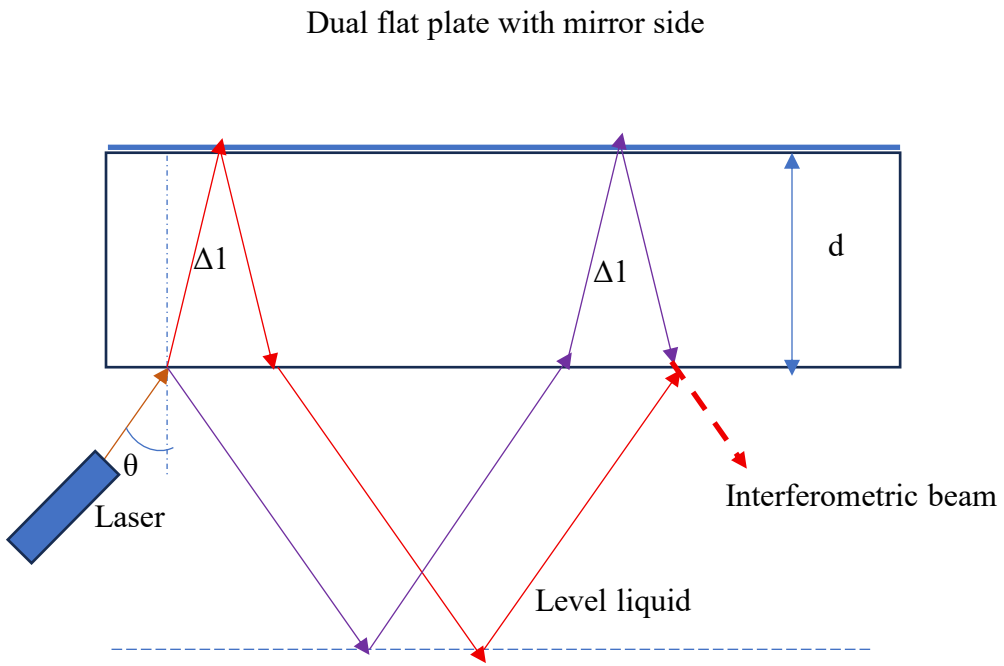
Метод измерения угловых наклонов земной поверхности Прецизионный Лазерный Инклинометр



Метод Прецизионного Лазерного Наклономера

- В качестве репера используется свойство горизонтальности поверхности жидкости. Отраженный от поверхности лазерный луч испытывает изменение углового положения на 2φ при наклоне земной поверхности на φ
- Для стабилизации поверхности жидкости используется относительно тонкий слой жидкости, который гасит поверхностные волны и обеспечивает требуемое качество горизонтальной поверхности;

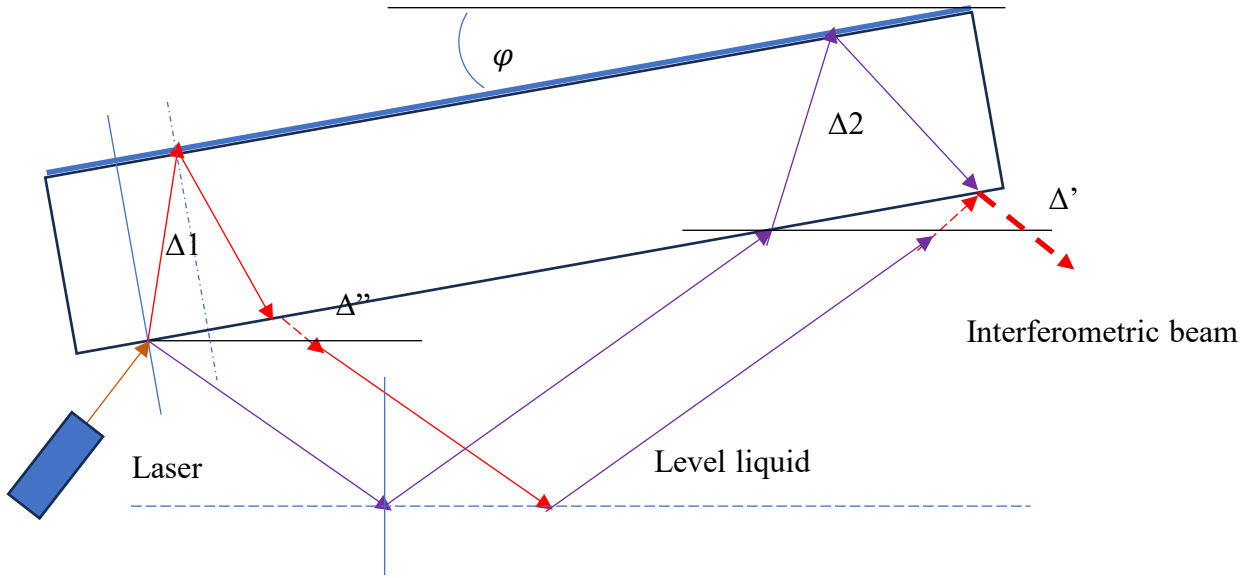
Интерферометрический прецизионный лазерный Инклинометр



Интерферометрический Прецизионный Лазерный Инклинометр

- В ОИЯИ был запатентован новый интерферометр для измерения углов наклона.
- На его основе был создан ИПЛИ
- Для организации измерения наклона земной поверхности используется плоскопараллельная пластинка с зеркальным металлическим напылением Лазер закреплён на основании, на котором также крепится к ПП пластинке.
- Лазерный луч направляется под углом θ к поверхности ПП пластинки. После его отражения два лазерных луча направляются на поверхность жидкости. Отраженные от поверхности жидкости лазерные лучи направляются на ПП пластинку, где они соединяются и образуют интерферометрический луч.

Схема работы ИПЛИ

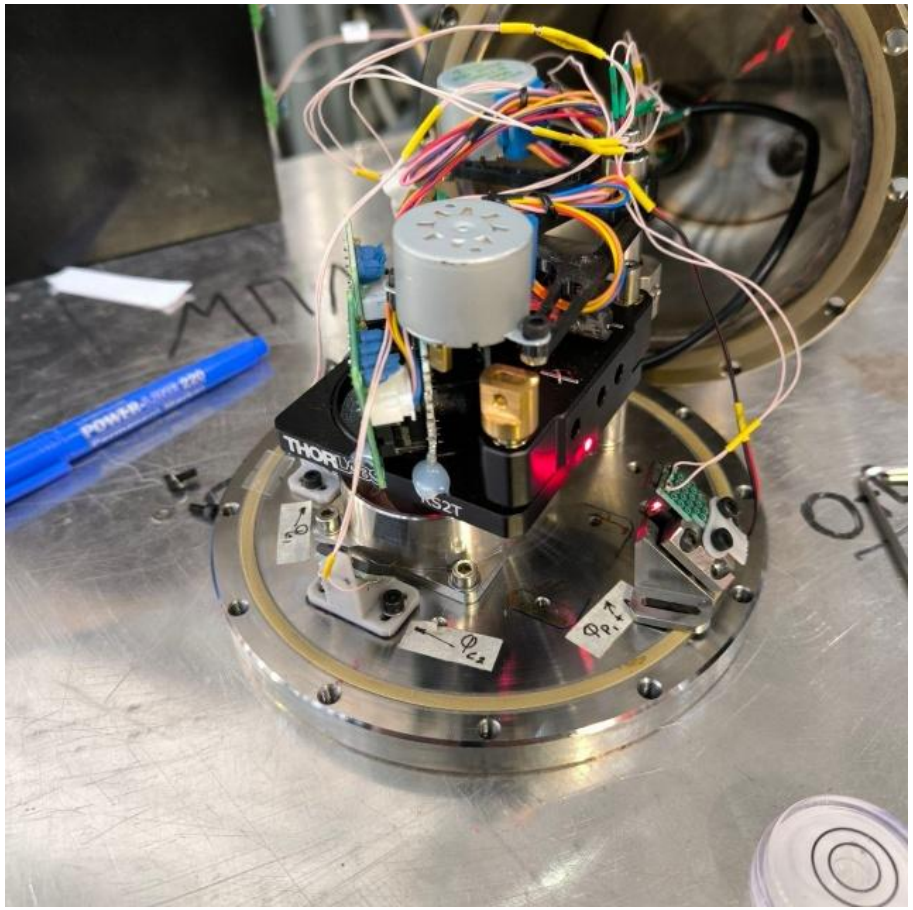


- Разность оптических длин плеч интерферометра определяется формулой

$$\delta = (\Delta_2 - \Delta_1) - (\Delta'' + \Delta')$$

- При условии $\delta=\lambda/2$ и $\varphi \ll 1$ получим величину $\Delta\varphi$ угла наклона, при котором интерференционная картина изменяется от минимума до максимума
- $$\Delta\boldsymbol{\varphi} = \frac{\boldsymbol{\lambda}}{\boldsymbol{8d}} \frac{(\boldsymbol{n^2 - sin\theta^2})^{\boldsymbol{1,5}}}{(\boldsymbol{n^2-1})\boldsymbol{tan\theta sin\theta^2}}$$
- , где d-толщина ПП пластинки, λ- длина волны лазерного излучения и n-показатель преломления стекла ПП пластинки.

Схема работы ИПЛИ 2



Преимущества интерферометрического метода:

- Независимость показаний от «блуждания» входного лазерного луча,
- Пониженная чувствительность от изменения температуры (оптические плечи не зависят от изменения уровня жидкости от температуры),
- Настраиваемый в зависимости от метрологической задачи диапазон измерения угла наклона.
- Относительно предыдущей версии инклинометра МПЛИ в ИПЛИ вдвое уменьшено количество информационных каналов (4канала), что существенно упростило измерительную систему и уменьшило габариты прибора.

Технические характеристики ИПЛИ

- Габариты ИПЛИ составляют диаметр 120-150мм, высота 200мм, вес 2кг.
- Инструментальная точность измерения, достигает~1нрад.
- В качестве лазера использован одномодовый полупроводниковый лазер с мощностью 30мвт .
- Диапазон измерения инклинометра в зависимости от угла наклона лазерного луча к ПП пластинке может варьироваться от 10 до 200мкрад.
- Для $\theta=60^0$ он составил $\Delta\varphi \approx 120$ мкрад. Это позволило регистрировать эффекты температурно-индуцированных деформаций в течение длительного времени (две недели).

Эксперименты на «балконе» MPD



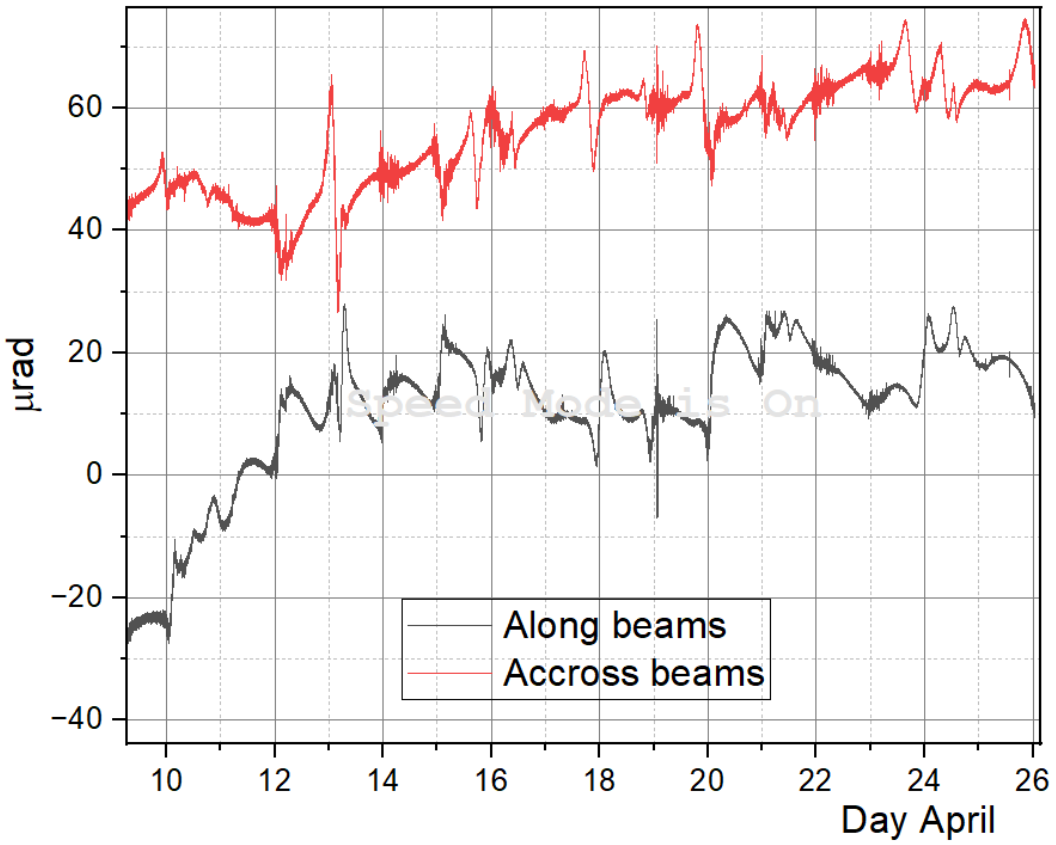
Расположение точки наблюдения
за угловыми смещениями поверхности балкона

- Расположение ИПЛИ выбрано из соображения регистрации максимальных угловых наклонов балкона.
- Поскольку на балконе расположены квадрупольные электромагнитные линзы для окончательной фокусировки пучка, угловое движение балкона приводит к угловому смещению линз, что приводит к смещению фокусов пучков частиц.
- Это обстоятельство влияет на взаимное движение сфокусированных пучков частиц на NICA.

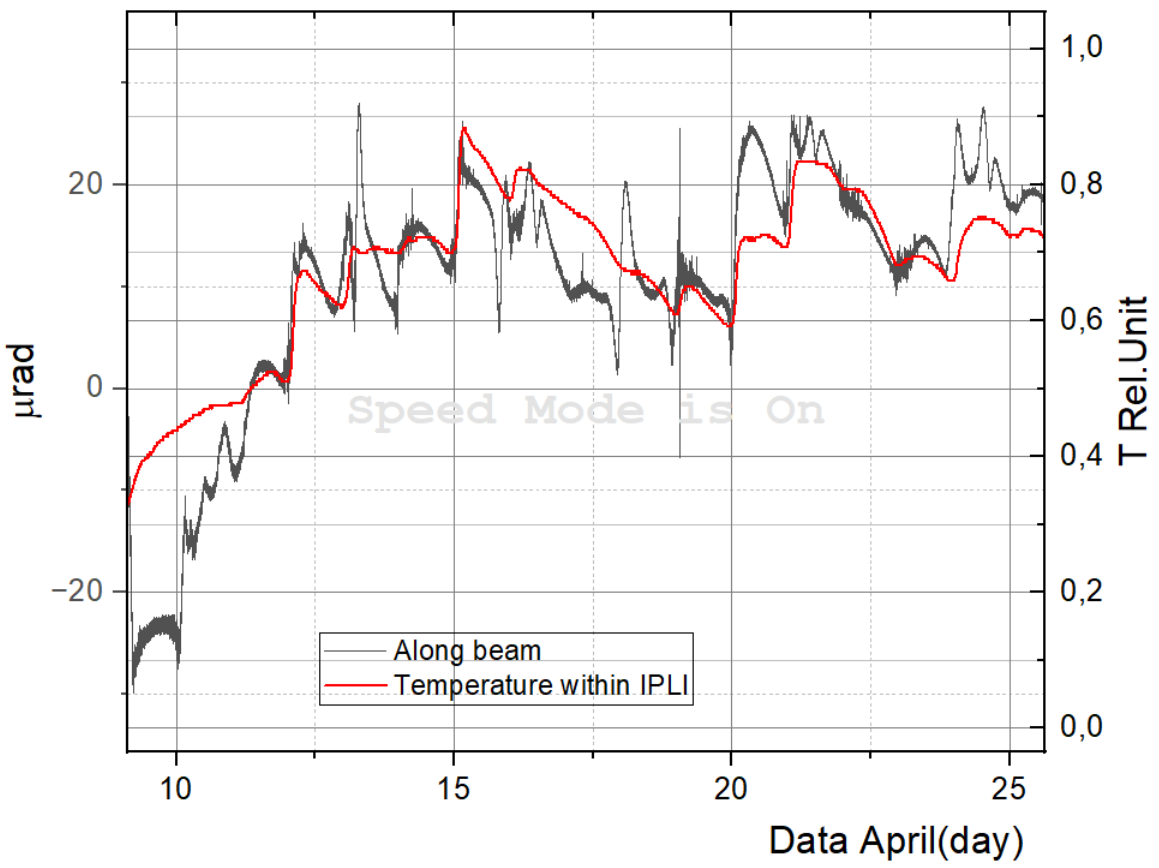


Вид двух ИПЛИ установленных на балконе B зала MPD

Определение суточных наклонов балкона вследствие температурно-наведённых деформаций



Зависимость углов наклона балкона вдоль
и поперёк пучка частиц за период с 9 по 26апреля

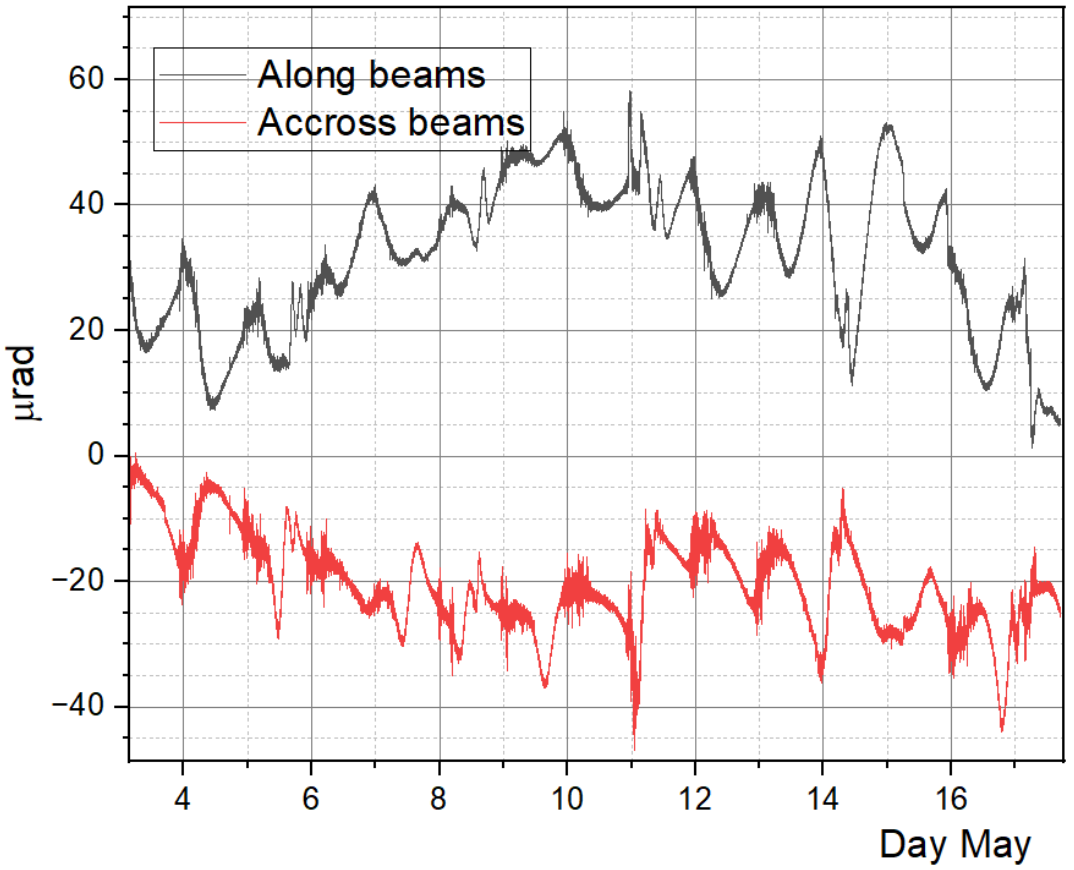


Изменение температуры инклинометра
за период апрельских измерений

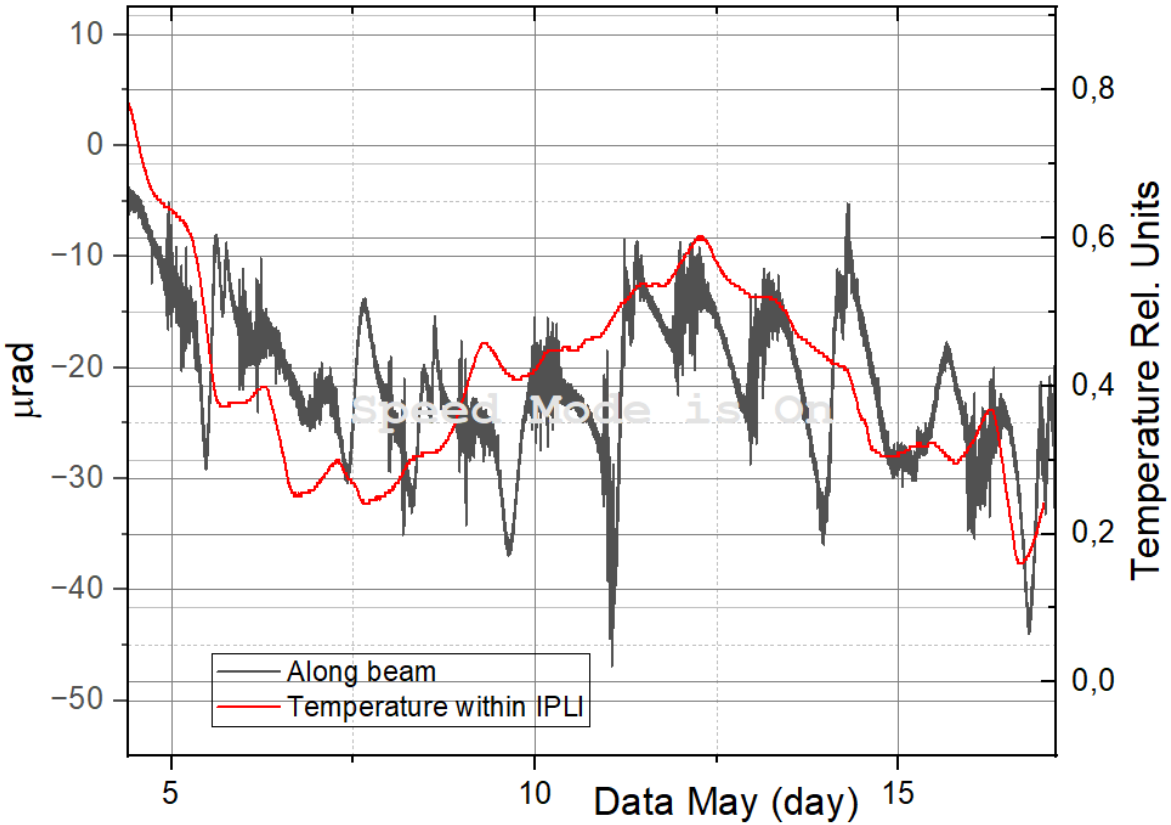
- В настоящее время измерения на балконах MPD проводятся на постоянной основе. Из общего массива информации были определены два участка с длительностью измерения около двух недель в апреле и мае 2026г.
- На рисунках показаны графики зависимости угла наклона балкона вдоль и поперёк пучков NICA за 16,9суток

(с 9 по 26апреля) и соответствующие графики изменения температуры ИПЛИ

Определение суточных наклонов балкона вследствие температурно-наведённых деформаций 2



Зависимость углов наклона балкона вдоль
и поперёк пучка частиц за период с 3 по 18мая



Изменение температуры в инклинометре
за период майских измерений

- Из данных представленных на рисунках видна корреляция между изменением температуры и данными инклинометров в направлении пучков частиц.

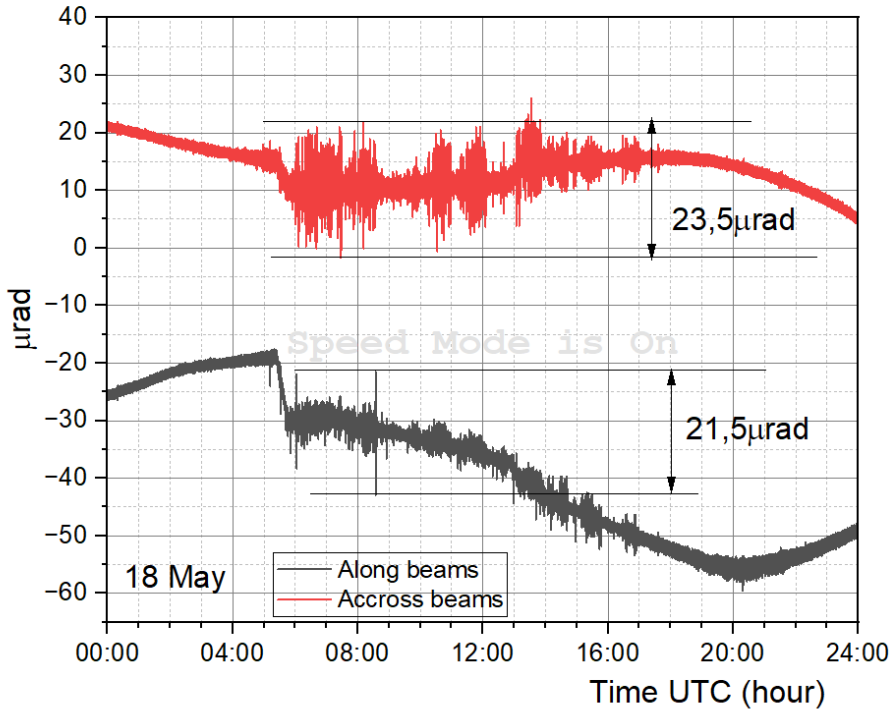
Статистический анализ суточных вариаций углов наклона «балкона» вдоль и поперёк пучков частиц

Апрель 2026г.						
	Вдоль пучков частиц			Поперёк пучков частиц		
	Среднее значение	Минимальное значение	Максимальное значение	Среднее значение	Минимальное значение	Максимальное значение
Отклонение (мкрад)	10,3±6,3	1,8	23,9	11,3±7,3	1,3	37,7
Время отклонения(час)	7,9±6	2,2	31,6	8,2±6,8	1,5	35

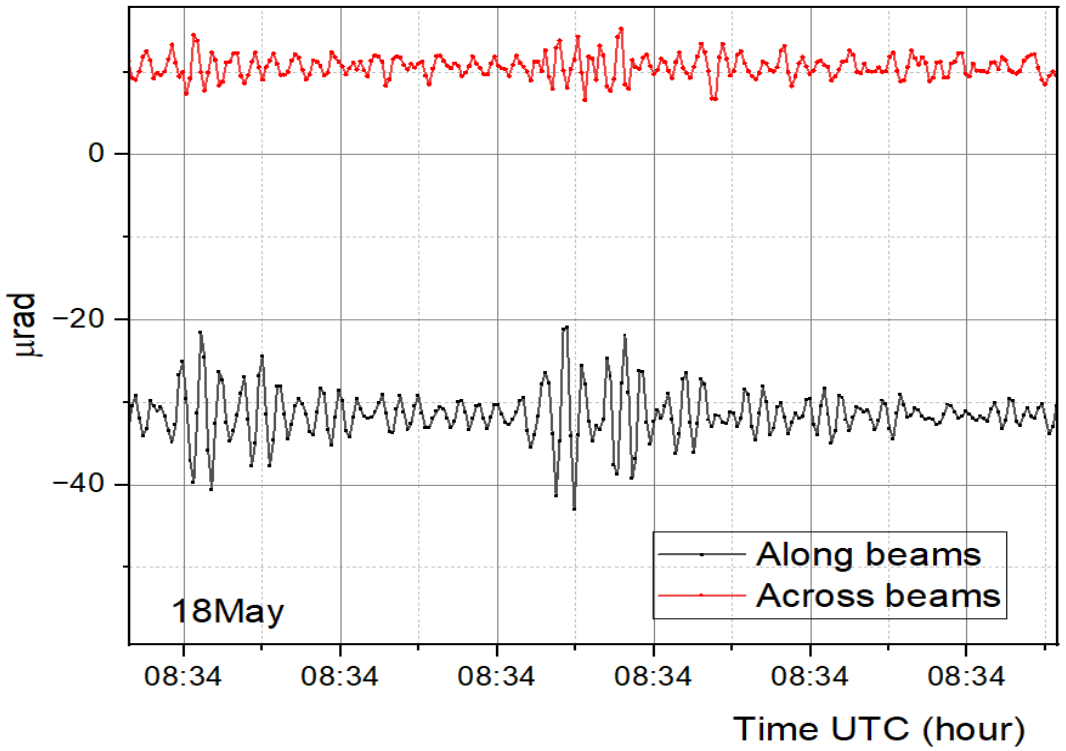
Май 2026г.						
	Вдоль пучков частиц			Поперёк пучков частиц		
	Среднее значение	Минимальное значение	Максимальное значение	Среднее значение	Минимальное значение	Максимальное значение
Отклонение (мкрад)	15,8±8,6	2,3	39,4	15,6±7,5	4,7	36
Время отклонения(час)	9,0±4,9	0,5	31,6	9,2±7,4	1,2	27

- Средние значения угла изменения наклона балкона с апреля по май увеличились с 10мкрад до 16мкрад.
- В апреле и мае наблюдалась максимальная величина углового отклонения вдоль пучка ~40мкрад.

Измерение индустриальных шумов



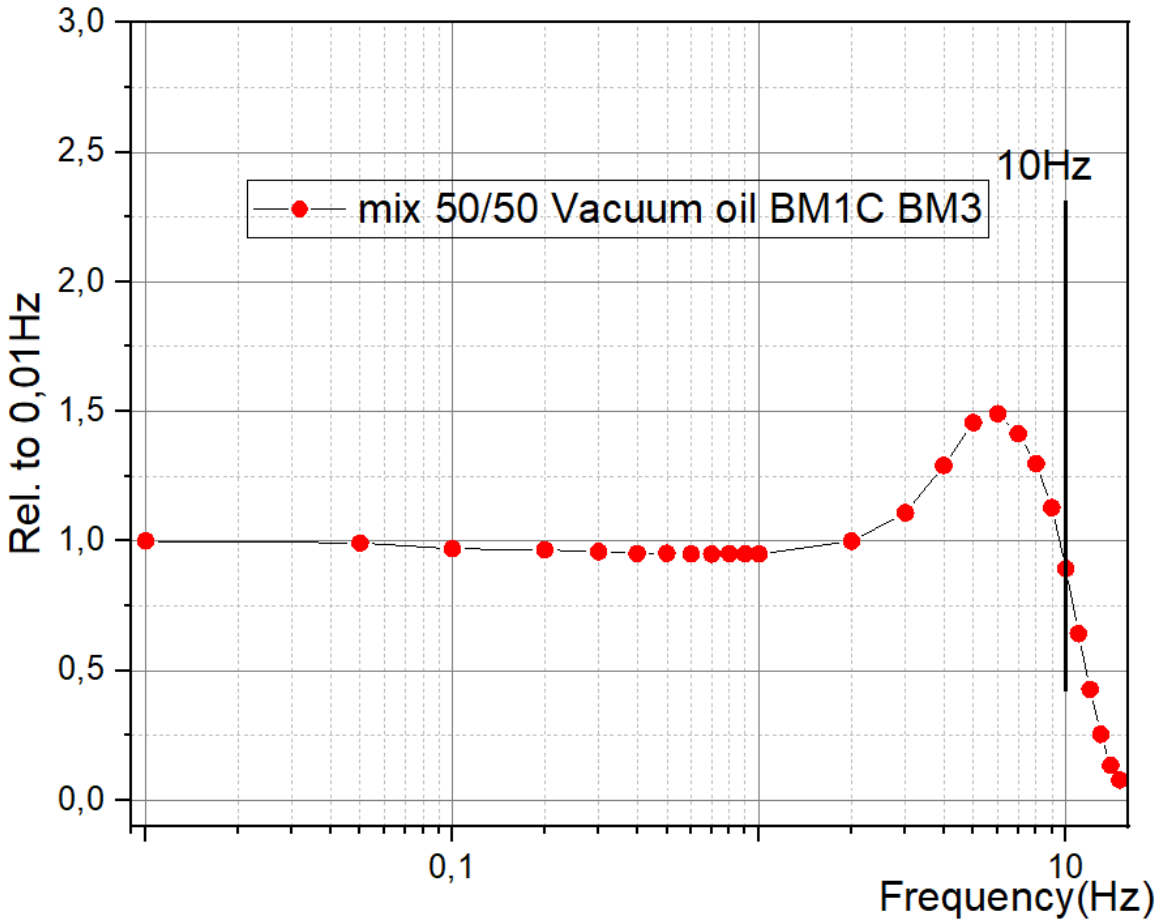
Индустриальный микросейсмических шум



Прохождение поверхностных волн через балкон вдоль и поперёк пучков частиц

- Другой эффект, приводящий к наклону балкона -индустриальный микросейсмический шум. Он представляет собой поверхностную сейсмическую волну в диапазоне частот 1-10Гц.
- В частотном диапазоне 1-10Гц наблюдаются интенсивные наклоны земной поверхности, связанные с работой инженерных систем, вакуумных насосов, компрессоров и других механических устройств.
- индустриальный шум представляет собой синусоидально-подобные наклоны земной поверхности при прохождении поверхностных волн. Основная интенсивность индустриального шума совпадает с рабочим временем 8- 18часов.

Определение размаха индустриальных шумов с учётом АЧХ ИПЛИ

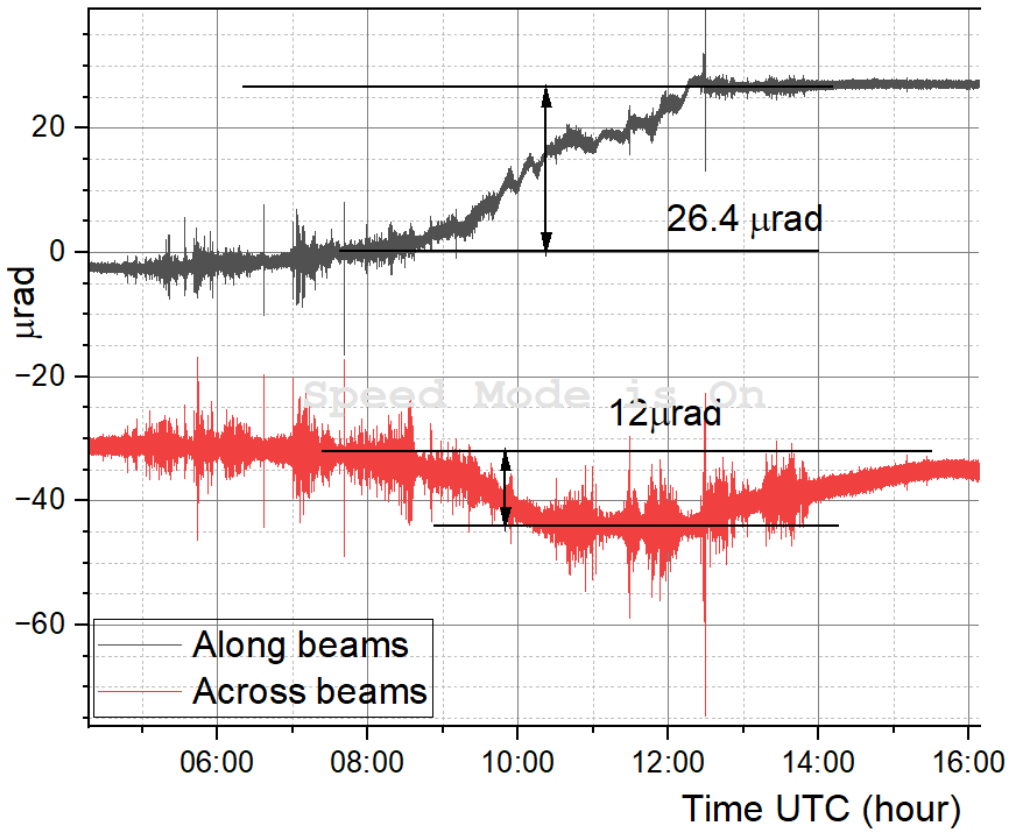


- В АЧХ ИПЛИ в районе 4-15Гц наблюдается усиление сигнала относительно низкочастотных колебаний с фактором 1,5.
- С учётом АЧХ ИПЛИ можно окончательно оценить размах микросейсмических колебаний в области частот 4-10Гц ≈*15мкрад*

АЧХ ИПЛИ для смеси двух вакуумных масел 50% на 50%

ВМ1 и ВМ3используемого в ИПЛИ

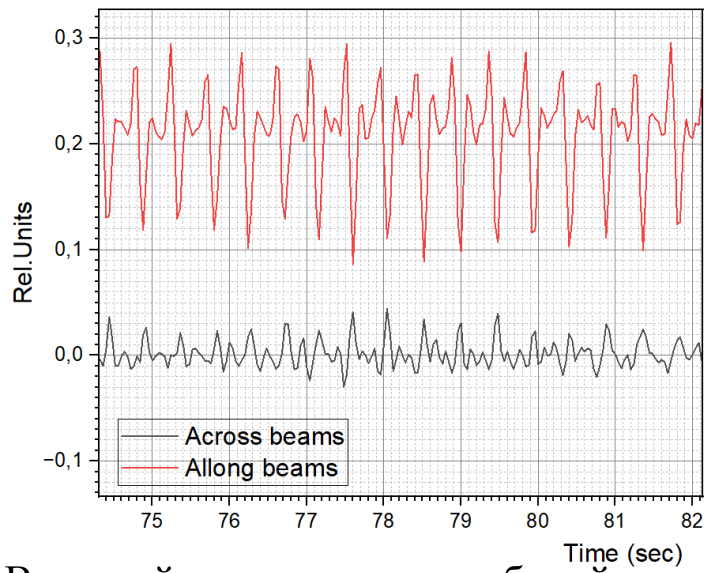
Наблюдение перемещения детектора MPD в зоне балкона



Процесс наклона балкона
при перемещении детектора MPD

- 3-го апреля 2026г. детектор MPD был перемещён из зоны обслуживания в зону пучка. На рисунке показан процесс наклона балкона по мере перемещения детектора MPD.
- В результате перемещения детектора MPD изменение угла наклона балкона составило 26,4 мкрад вдоль пучка и 12мкрад поперёк пучка.

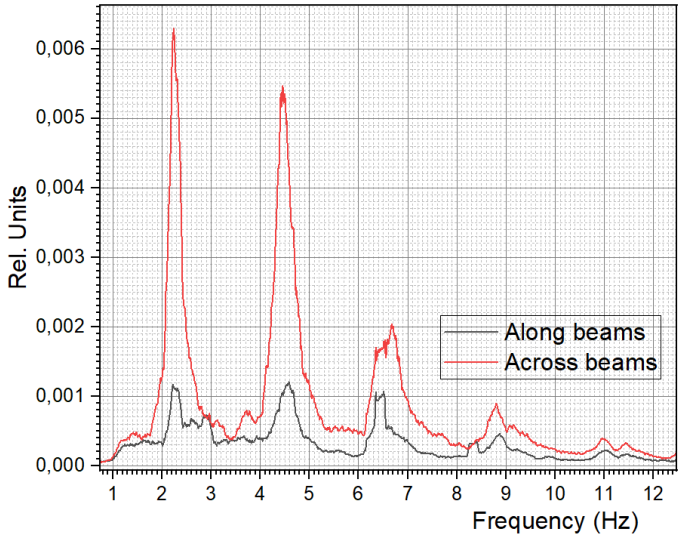
Измерение собственных частот колебания балкона в зале MPD



Внешний вид угловых колебаний балкона на собственных частотах

- Как упругий элемент конструкции здания балкон MPD имеет свои собственные частоты колебания.
- *Для регистрации собственных частот создавалось широкополосное возбуждение колебаний балкона при помощи одновременных прыжков нескольких человек.*

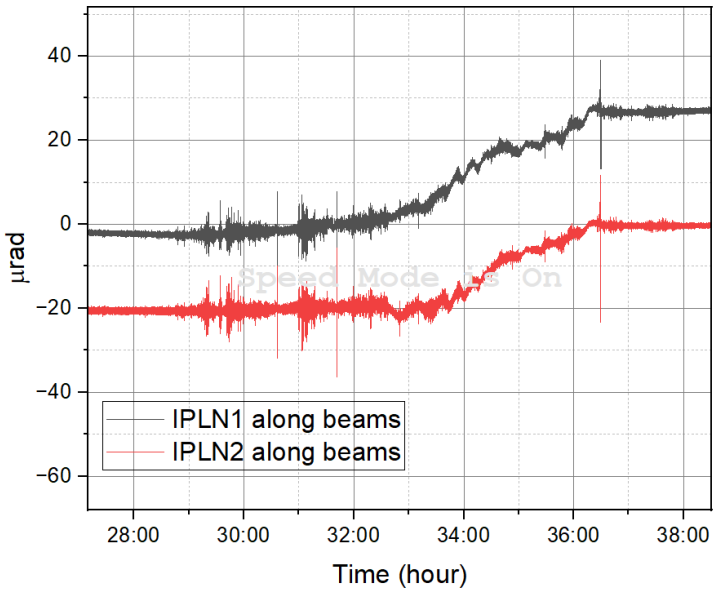
- Обращает внимание значительная подавленность ~ 3раз колебаний балкона поперёк пучка частиц.
- наблюдается практически полная идентичность частот в колебаниях балкона вдоль и поперёк пучка. С учётом АЧХ ИПЛИ компоненты на частотах более 4Гц имеют более низкое значение. В таблице показаны собственные частоты колебания балкона и их относительные амплитуды с учётом АЧХ жидкости



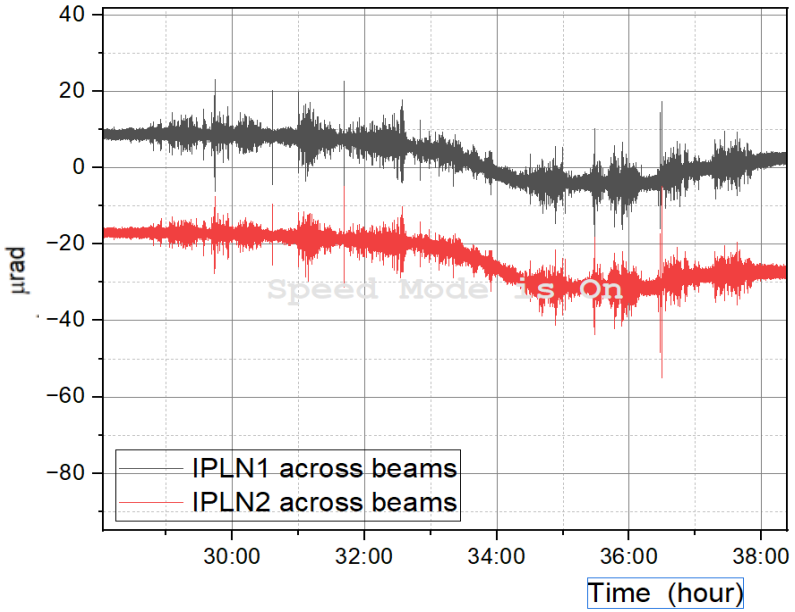
Фурье анализ колебании балкона на собственных частотах

Собственный частоты балкона						
Частота Гц	**2,2**	**4,4**	**6,7**	**8,8**	**11**	
Относительная величина	**1**	**0,9**	**0,3**	**0,1**	**0,1**	

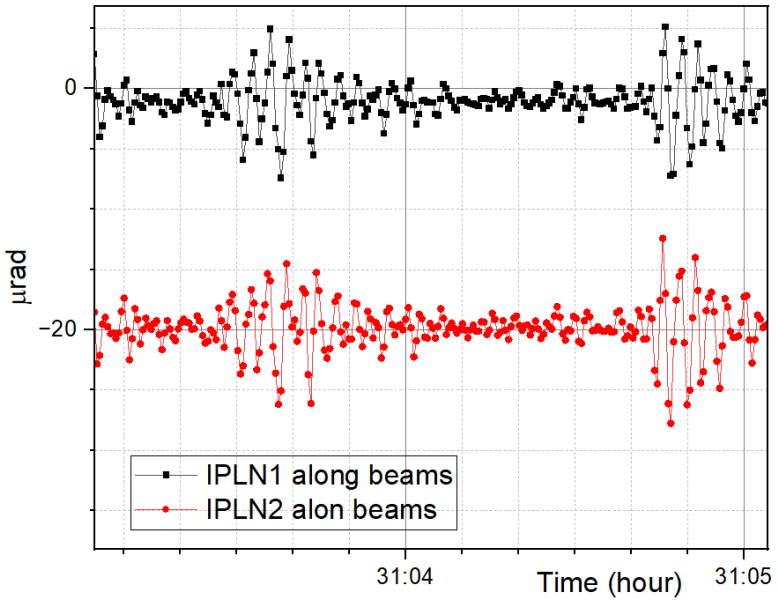
Точность измерения ИПЛИ



Измерения двух ИПЛИ вдоль пучка
во время подвижки детектора MPD



Измерения двух ИПЛИ поперёк пучка
во время подвижки детектора MPD



Измерения двух ИПЛИ вдоль пучка
во время подвижки детектора MPD за 10сек.

- Измерения углового наклона балкона во время подвижки детектора MPD, произведённые двумя ИПЛИ. Направления измерения двух ИПЛИ совпадают. Время измерения 10 часов.
- Были проведены корреляционные измерения на основе данных с рисунков. Величина совпадения составила 0,43 и 0,51.

Перспективы повышения точности измерения с помощью температурно-стабилизированного ИПЛИ

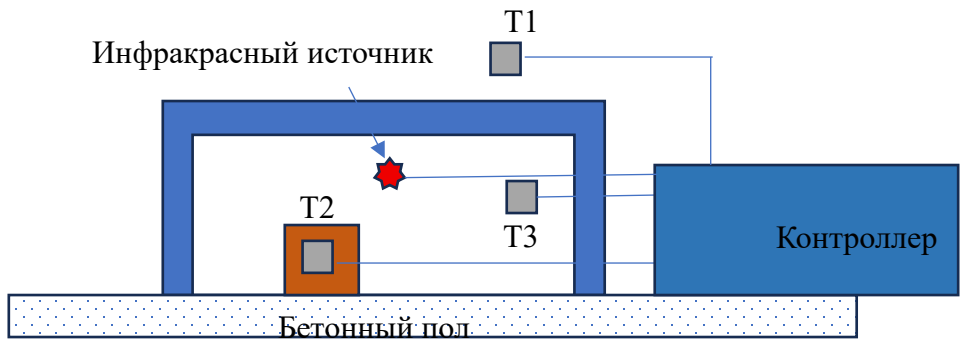
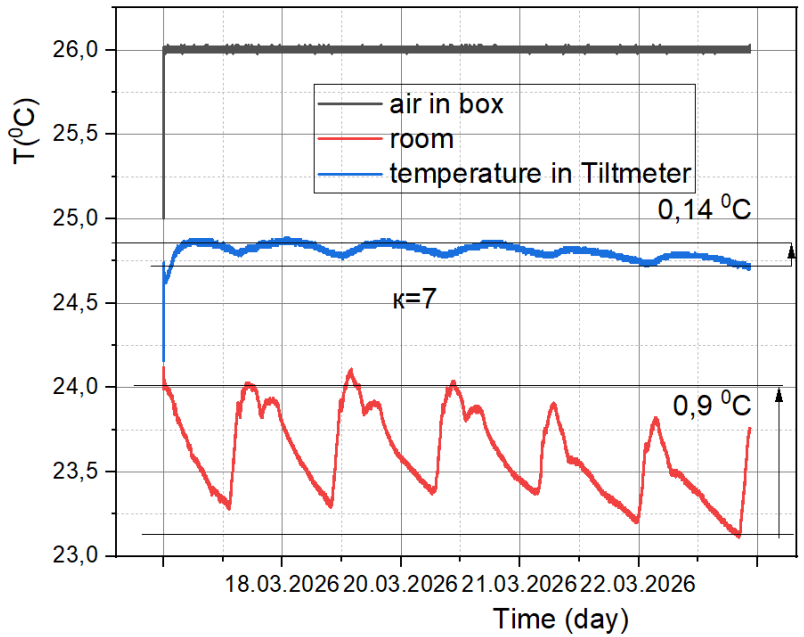


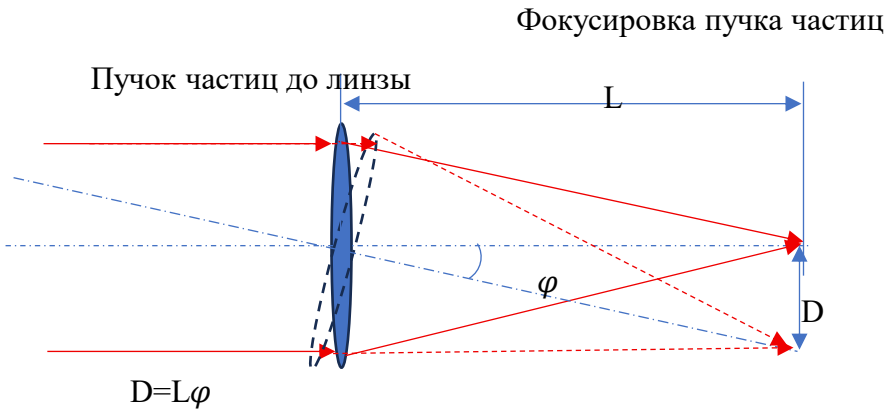
Схема температурной стабилизации наклономера



Изменение температуры ИПЛИ внутри бокса по сравнению с температурой окружающей среды и температуры воздуха внутри бокса.

- Температура внутри бокса поддерживается примерно на 5 градусов выше температуры окружающего воздуха и при помощи контроллера и нагревательного элемента стабилизируется на уровне 10^{-2} ^{0}C.
- температурная стабилизация воздуха в боксе помогает стабилизировать температуру ИПЛИ более чем в 7 раз. Этот фактор позволяет уменьшить температурно-индуцированные шумы в ИПЛИ и повысить точность измерения физических наклонов земной поверхности.
- Перспективным представляется изготовление чувствительных элементов ИПЛИ из инвара - специального сплава железа и никеля сплав 36Н с низким коэффициентом линейного расширения ($1{,}2 \cdot 10^{-6}$ 1/^{0}C) Уменьшенный в 10раз относительно нержавеющей стали коэффициент линейного расширения инвара уменьшает также градиентные деформации конструкции ИПЛИ ,что вероятно приведет к уменьшению его температурной зависимости.

Актуальность измерения углов наклона на коллайдере NICA 2



Угловое смещение пучка при наклоне линзы

- При наклоне линзы наблюдается угловое смещение фокуса вследствие явления «бокового фокуса».
- показано два положения пучков частиц -стационарное, при котором наблюдается соосное с линзой фокусировка пучка и при наклоне линзы угловое смещение фокуса пучка частиц.
- смещение фокуса частиц происходит по формуле

$$D = L\varphi$$

Оценочное смещение пучка при наклоне ~30 мкрад на длине 5 м ~150мкм при диаметре пучка 800 мкм.

Выводы

- Представлена последняя версия ПЛИ -Интерферометрический Прецизионный Лазерный Инклинометр.
- Низкочастотные колебания возникают из-за деформации конструкций здания с периодом день-ночь вследствие изменения температуры окружающей среды. Определены основные характеристики этих колебаний Среднее значение размаха угловых колебаний составило величину 11±6 мкрад в апреле и 16±8 мкрад в мае. Максимальная величина отклонения по направлению вдоль пучка ~40мкрад
- Высокочастотные колебания возникают от индустриальных источников. Они сосредоточены в области частот 1-10 Гц. Главным образом присутствуют в рабочий период (8 -18ч). Величина этих колебаний достигает15 мкрад.
- Определены собственные частоты балкона в зале MPD. При внешнем широкополосном возбуждении балкона его собственные частоты составляют 2,2 Гц и кратные основной частоте гармоники.
- Величина углового наклона балкона при перемещении детектора MPD из зоны обслуживания в зону проведения экспериментов составила 21мкрад вдоль пучков частиц и 12мкрад в поперечном направлении.

Спасибо за внимание