

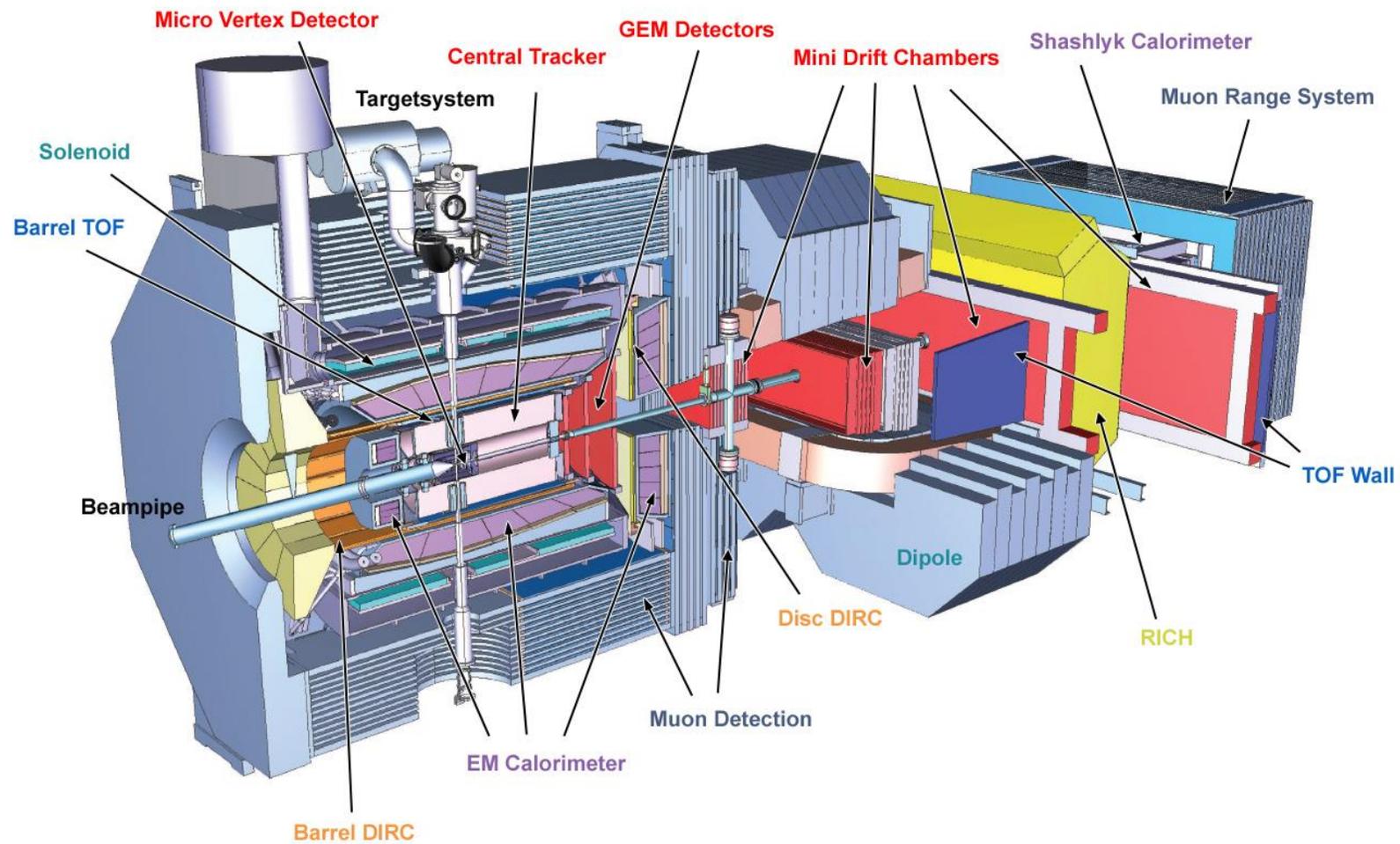
НЕКОТОРЫЕ КОММЕНТАРИИ

к опыту участия в создании
черенковского детектора
DIRC PANDA

В.Х. Додохов
16 февраля 2023 г

План сообщения

- 1. Детектор PANDA
- 2. Детектор DIRC (barrel)
- 3. Принцип работы детектора DIRC
- 4. Концепция DIRC в установке PANDA
 - Кварцевые радиаторы
 - Bar boxes
 - Expansion призмы
 - Фотодетекторы
- 5. Участие в создании DIRC
 - Проблемы
 - Кварц и кварцевые радиаторы
 - Полировка
 - Результаты
 - Стоимость



Установка PANDA со «стандартным» набором детекторов

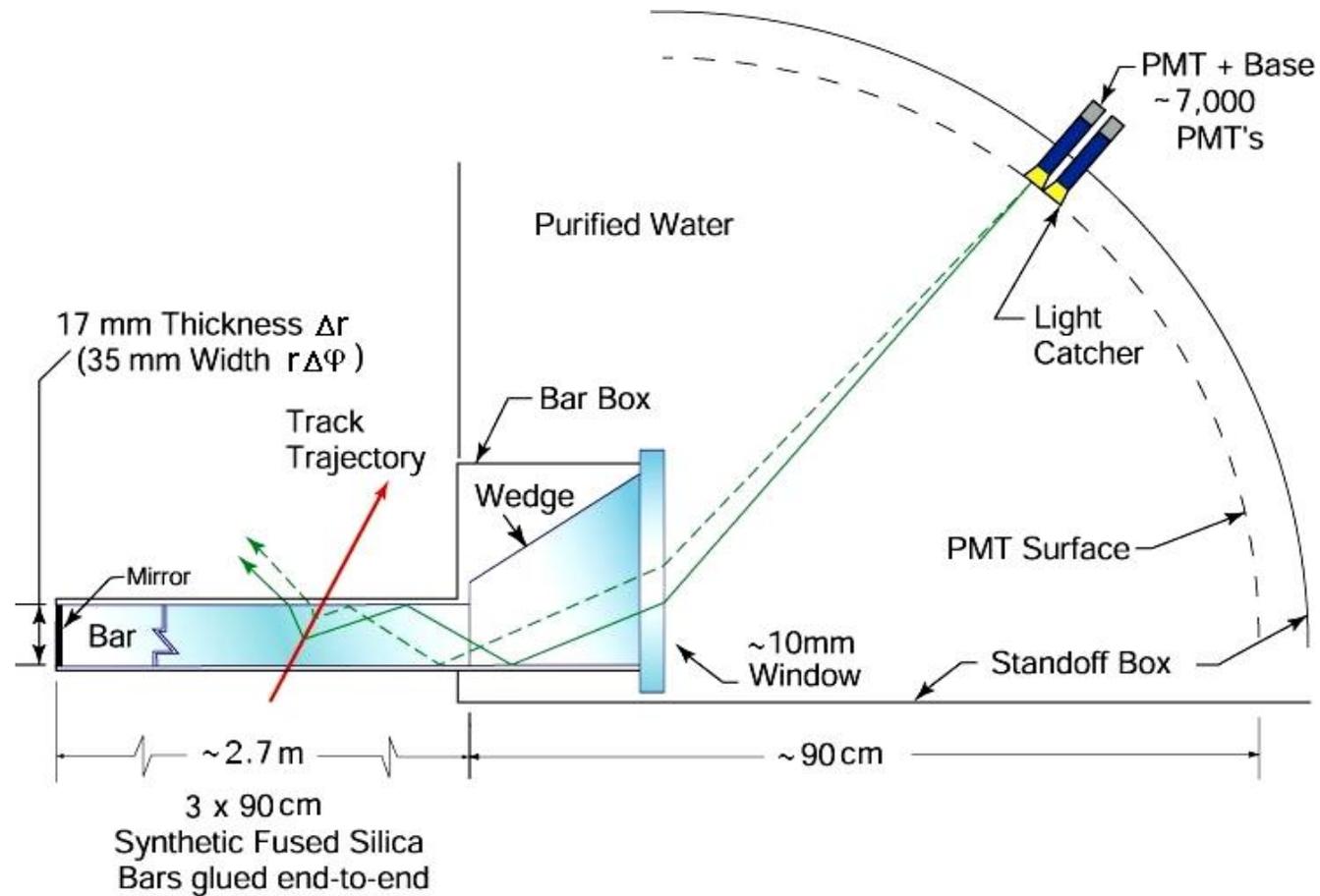


Схема кварцевого радиатора DIRC и области изображения кольца черенковского излучения, которая показывает как разные компоненты для генерации черенковского излучения, его переноса и изображения организованы в VaBar DIRC.

Detection of Internally Reflected Cerenkov Light Imaging

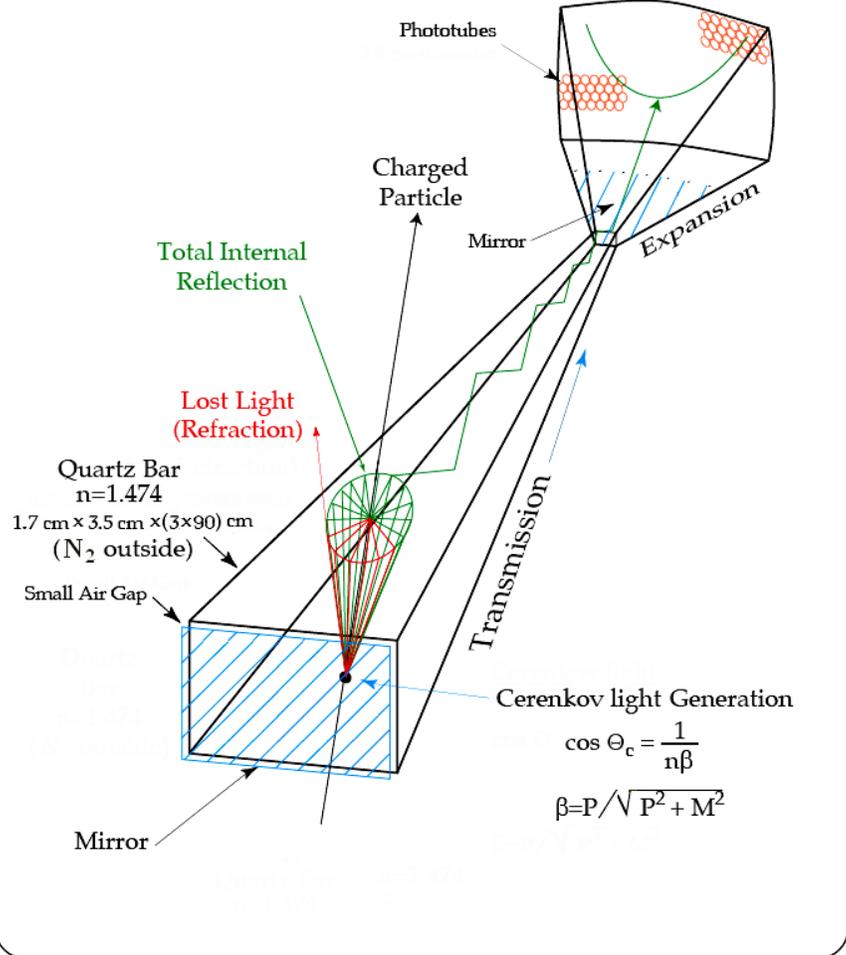


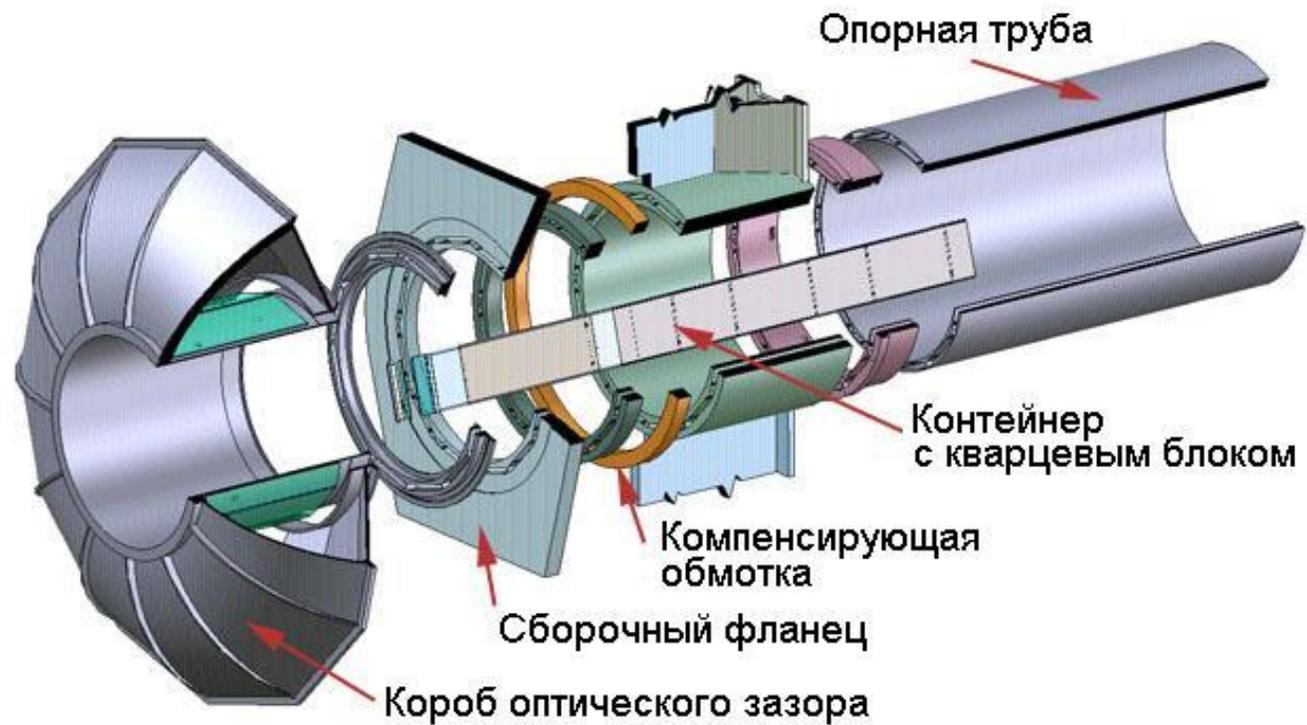
Схема геометрии кварцевого радиатора DIRC и области изображения, которая показывает как появляется черенковское излучение, его перенос, регистрацию и визуализацию.

Черенковское излучение возникает при прохождении частицы через радиатор с коэффициентом преломления n когда ее скорость v больше скорости света в этой среде $v > c/n$.

В данном случае в качестве среды мы имеем кварц с коэффициентом преломления $n = 1.473$ для длины волны 380 nm . При этом фотоны вылетают в конус с углом θ_c определяемым как $\cos \theta_c = 1/(\beta \cdot n(\lambda))$

Используя информацию о скорости частицы с информацией об ее импульсе, которую получают от трекового детектора определяют массу частицы как

$$m = (p/c) \cdot ((n \cdot \cos \theta_c)^2 - 1)^{1/2}$$



Принципиальные узлы механической структуры DIRC

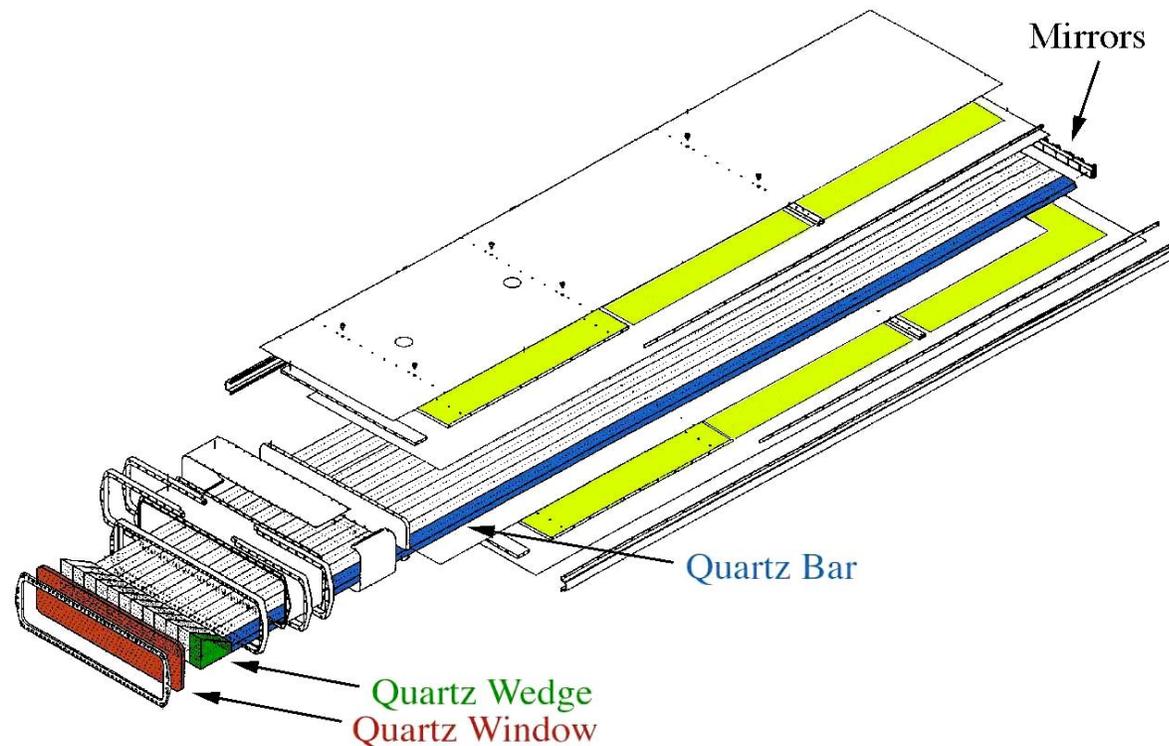
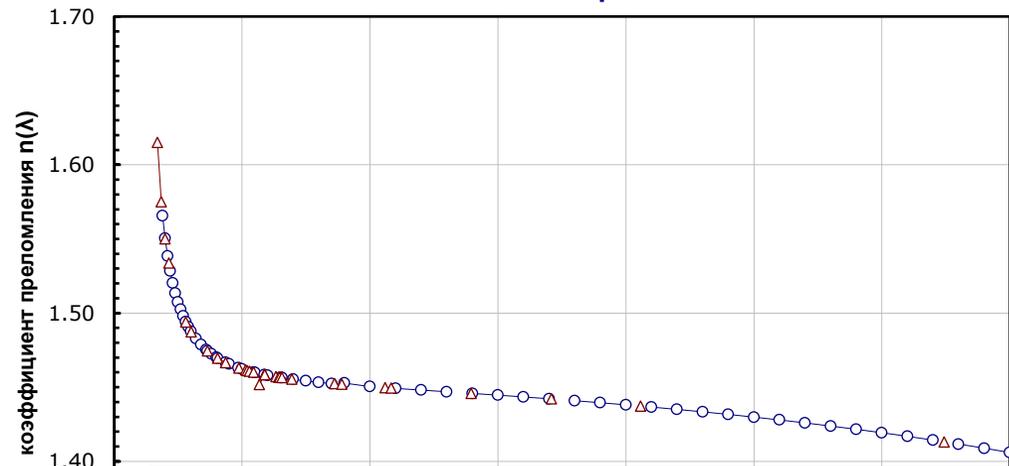
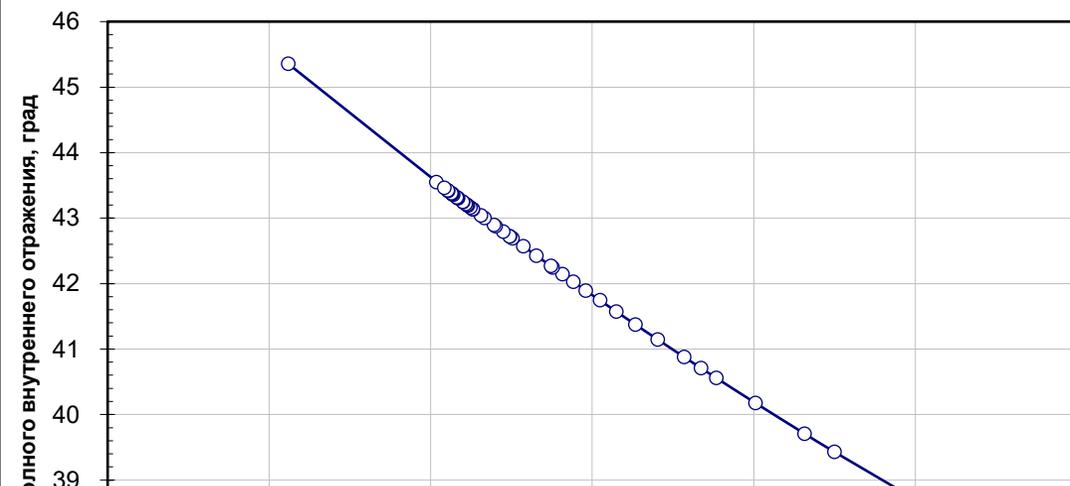


Схема герметичного контейнера для кварцевых радиаторов. Контейнер, который может быть изготовлен из алюминия или усиленного углепластика состоит из активной области с радиаторами, торца с зеркалами и окна на противоположной стороне через которое ЧИ попадает на фотоприемники. Для PANDA DIRC в каждом контейнере предполагалось разместить 12 радиаторов

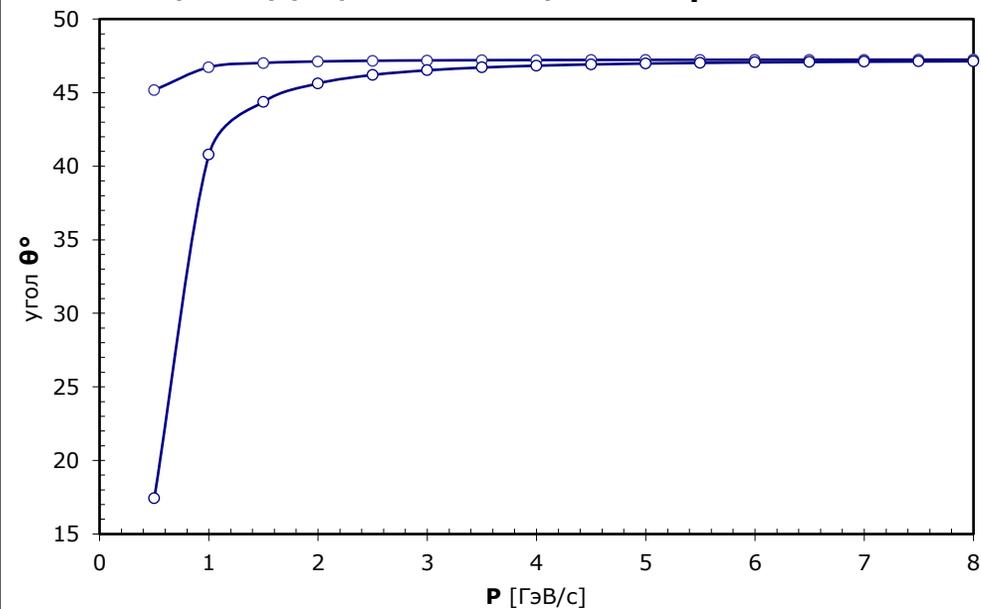
Коэффициент преломления $n(\lambda)$ для кварцевых стекол КУ-1 и Suprasil



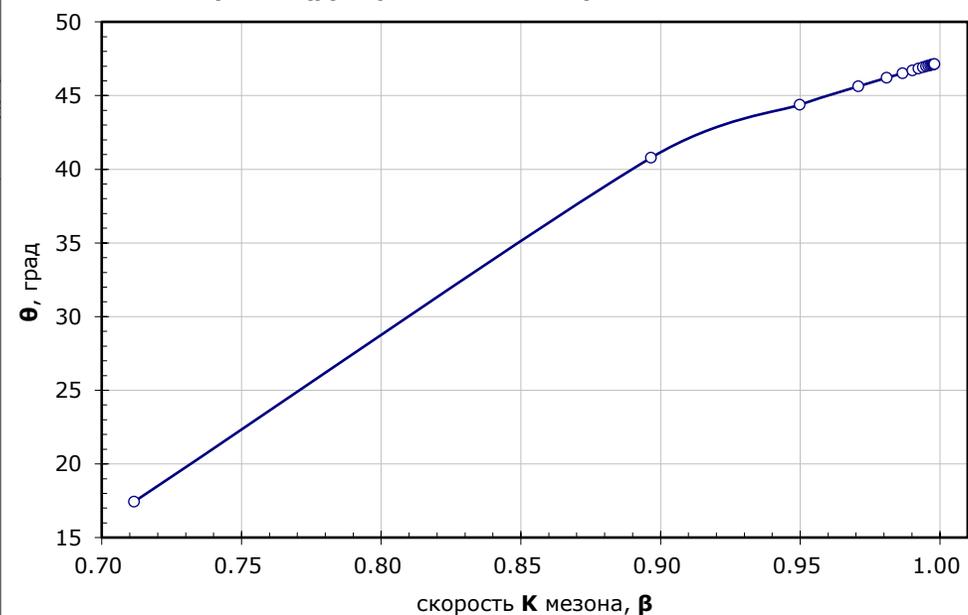
угол полного внутреннего отражения для кварца

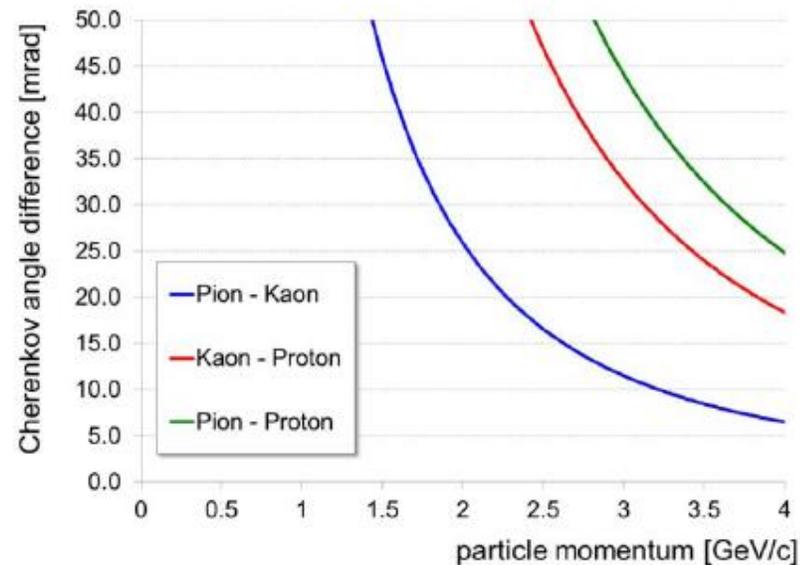
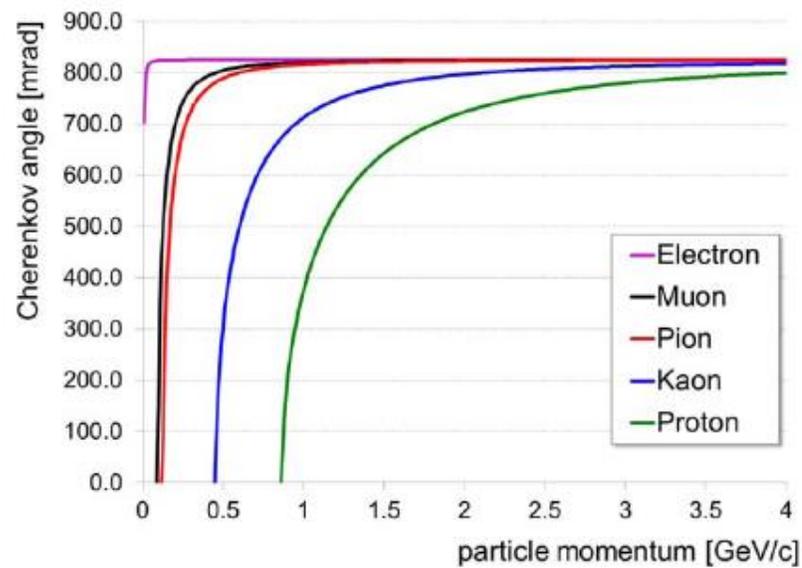


угол $\theta^\circ(\beta)$ черенковского излучения для ρ и K мезона



угол $\theta^\circ(\beta)$ черенковского излучения K мезона





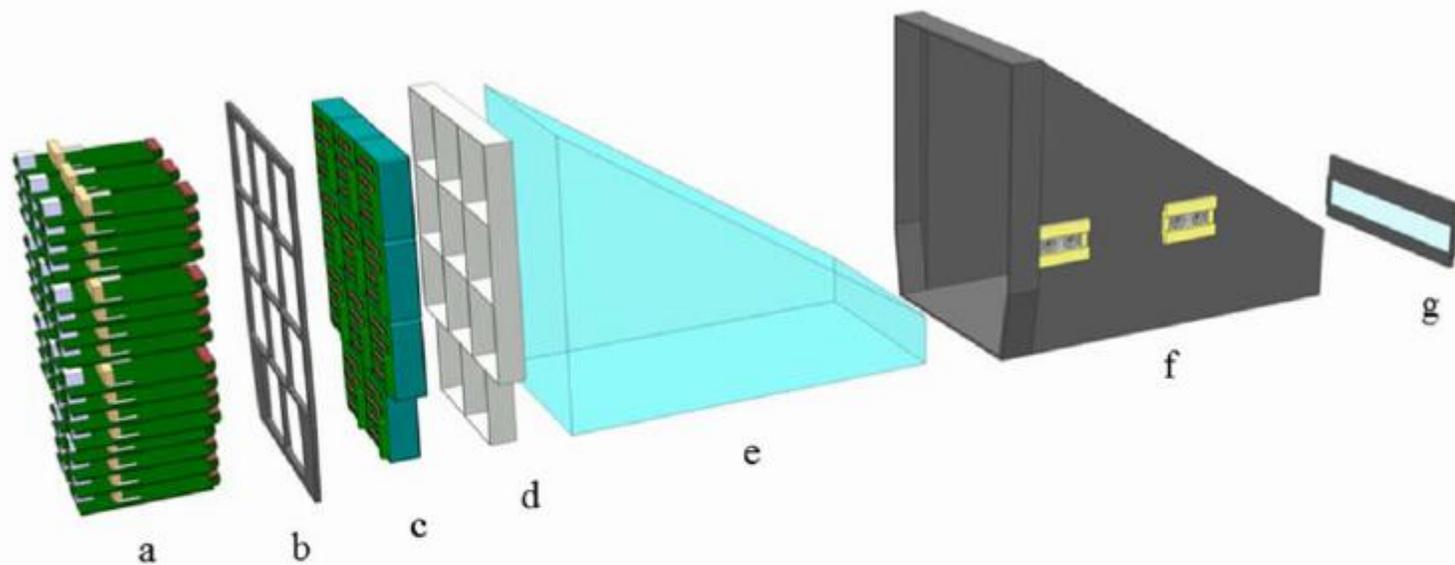
Черенковский угол как функция импульса и различие в величине черенковского угла в синтетическом кварце для разных частиц.

λ , нм		170	380	700
β_{\min}		0.6192	0.6791	0.6871
$P_{p \text{ мин}}$ [МэВ/с]		110	129	132
$P_{k \text{ мин}}$ [МэВ/с]		389	457	467
$P_{p,k}$ PANDA [ГэВ/с]		0.46÷4.2		
$\Theta_{\max} (\beta = 1)$		51°44'	47°13'	46°35'

Если частица влетает перпендикулярно к радиатору ($\phi=0$) то минимальный импульс при котором она может быть зарегистрирована равен 340 МэВ/с ($\beta=0.925$, $\theta=42.77^\circ$)

Table 1. Comparison of Barrel DIRC design parameters.

	BaBar	Belle II TOP	PANDA
Radiator geometry	Narrow bars (35 mm)	Wide plates (450 mm)	Wide bars (53 mm)
Barrel radius	845 mm	1150 mm	476 mm
Bar length	4900 mm (4 × 1225 mm)	2500 mm (2 × 1250 mm)	2400 mm (2 × 1200 mm)
Number of long bars	144 (12 × 12 bars)	16 (16 × 1 plate)	48 (16 × 3 bars)
EV material	Ultrapure water	Fused silica	Fused silica
EV depth	1100 mm	100 mm	300 mm
Focusing	None (pinhole)	Mirror	Lens system
Photon detector	≈11k PMTs	≈8k MCP-PMT pixels	≈11k MCP-PMT pixels
Timing resolution	≈1.7 ns	≈0.1 ns	≈0.1 ns
Pixel size	25 mm diameter	5.6 mm × 5.6 mm	6.5 mm × 6.5 mm
PID goal	3 s.d. π/K to 4 GeV/ c	3 s.d. π/K to 4 GeV/ c	3 s.d. π/K to 3.5 GeV/ c
Time line	Operation 1999–2008	Installation 2016	Installation 2023



Компоненты расширительной зоны: а) FEE, с) MCP PMT, е) кварцевая призма, г) соединяющий фланец



Триплет фокусирующих линз

- Главной статьей расхода в стоимости детектора является производство кварцевых радиаторов и фотоприемников. Оценка делалась в 2016 на основании ответов на запрос в адрес нескольких компаний для общего количества необходимых элементов плюс 10% дополнительно в качестве запасных частей. Рассматривались только квалифицированные фирмы с подтвержденным опытом и/или предварительно произведенной серией прототипов. Этот список включал 4 компании в Европе, США и Японии для производства радиаторов и призм и две компании в США и Японии и, возможно, еще одной в Европе для производства фотодетекторов.
- В 2019 оценка стоимости для базовой конструкции PANDA Barrel DIRC с тремя радиаторами на сектор составляла около **4.1 М€** и **3.6 М€** в зависимости от концепции принятой для детектора (с несколькими узкими радиаторами или одной широкой радиатором-пластиной на сектор). Главным образом эта стоимость обусловлена разницей в производстве радиаторов и линз для этих опций.

C. Schwarz (2005)

Стоимость кварцевого радиатора в геометрии BaBar DIRC:

Стоимость кварцевой заготовки (bulk costs) 1-2 к€

Обработка поверхности 7 к€

ТРЕБОВАНИЯ ПО КАЧЕСТВУ

Следующие требования должны быть исполнены в отношении компонентов для того, чтобы их можно было использовать для PANDA Barrel DIRC:

ОПТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

- Черенковские радиаторы:
 1. Шероховатость поверхности должна быть 10 \AA RMS (1 нм) или лучше для большей части поверхности и 25 \AA (2.5 нм) RMS или лучше для поверхности на торцах радиаторов.
 2. Прямоугольность не должна превышать значение 0.25 mrad для углов между боковыми поверхностями (side-to-face angles) и 0.5 mrad для углов между боковой плоскостью и плоскостью торца (side-to-end and face-to-end angles).
 3. Разнотолщинность вдоль всей длины радиатора должна быть ниже 25 μm .
 4. Длина радиатора с допусками составляет 1200 (+0/-1) mm, толщина 17 (+0/-0.5) mm. В базовой конструкции ширина узкого радиатора равна 53 (+0/-0.5) mm, для широкой пластины ширина пластины составляет 160 (+0/-0.5) mm.
- Для фокусирующих линз фокусная длина (в синтетическом кварце) равна 300 ± 5 mm.
- Расширительный объем (кварцевая призма)
 1. Длина 300 ± 1 mm и ширина 160 (+0/-1) mm
 2. Угол раствора $33^\circ \pm 1^\circ$.

• ФОТОПРИЕМНИКИ

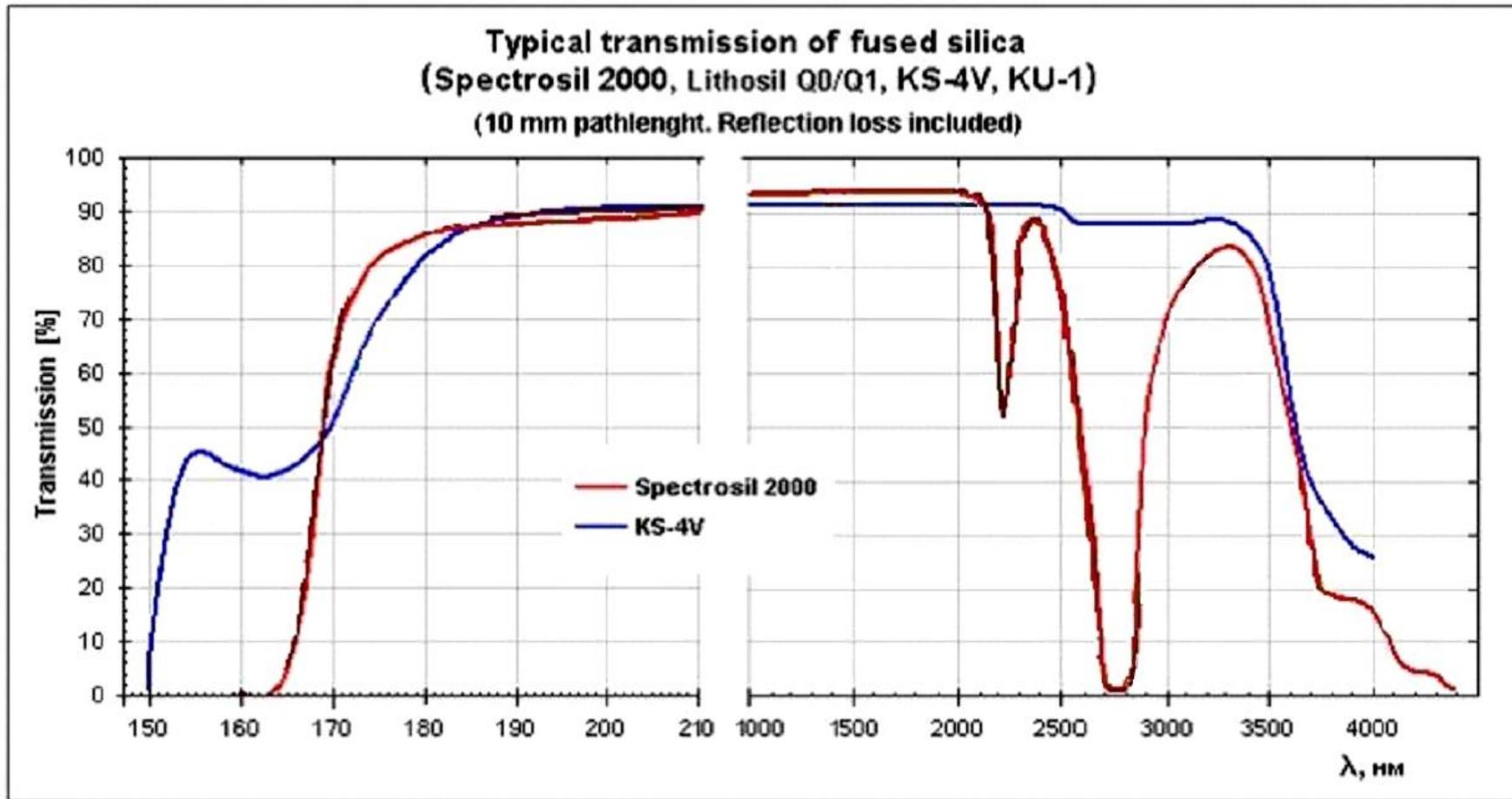
- МСР-РМТ с каналами $\varnothing 10 \mu\text{m}$ с увеличенным временем жизни (выдерживает интегральный заряд на аноде $> 5 \text{ C/cm}^2$).
- Матрица 8×8 пикселей размером $6 \times 6 \text{ mm}^2$ перекрывающая 80% активной области.
- Кварцевое или сапфировое входное окно.
- Квантовая эффективность $QE \approx 22\%$ с однородностью $\pm 0.5\%$ вдоль поверхности анода.
- Средний темновой ток 10 kHz/cm^2 .
- стабильный коэффициент усиления при скорости счета $> 1 \text{ MHz/cm}^2$.
- усиление $> 10^6$ с разбросом между анодными пикселями меньше чем 2.
- Слабые или умеренные наводки между пикселями.

Кварцевое стекло

Для прототипов радиатора были выбраны две марки кварцевого стекла:

Название	Производитель	Описание
KS-4V	Россия	Было заявлено как специальное радиационно стойкое кварцевое стекло
Spectrosil 2000	«Saint-Gobain Quartz»	Было использовано в эксперименте ВаВаг для радиаторов DIRC

Кварцевое стекло



Оптические свойства	KS-4V	Specrosil 2000
Optical homogeneity in product, Δn	$\leq \mathbf{H2}$ ($5 \cdot 10^{-6}$)	H1 ($< 1 \cdot 10^{-5}$)
Bubbles and inclusions per 100 cm ³ of glass, \emptyset of bubbles and inclusions not taken into account	0 class DIN5 8927 $\leq 60 \mu\text{m}$	0 class DIN 58927
Striae (one direction)	none	none
Birefringence/residual strain, nm/cm	≤ 10	≤ 10
Grained inhomogeneity in products and blanks	none	none
Luminescence excited by mercury lamp	none	none
Radiation hardness	max under 10^8 rad, and intensity 400 rad/s	max under 17 krad γ - rays of ^{60}Co

Полировка

В мире существует всего лишь несколько предприятий, которые имеют оборудование и опыт обработки / изготовления оптических изделий таких больших размеров и сложной конфигурации.

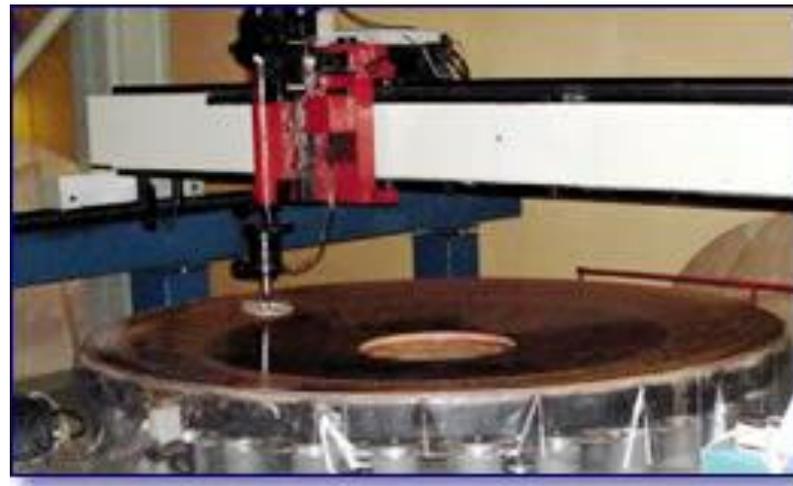
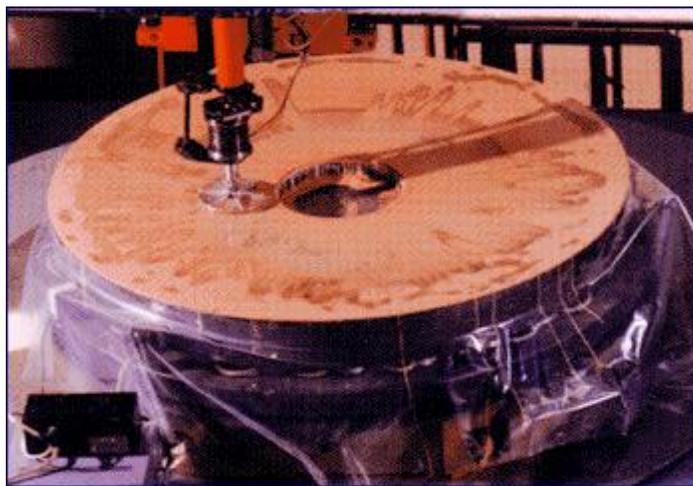
Предприятие	Размеры изделия.
Corning Glass Corporation, USA	8.5 m
Shott Corporation, Germany	8.5 m
LZOS Enterprise, Lytkarino, Russia	6.0 m
Ohara Corporation, Japan	3.0 m

Полировка

Проблемы с которыми мы столкнулись:

- Получить нужную шероховатость / чистоту поверхности (~ 1 nm) для оптической поверхности большого размера – **требует R&D в технологии полировки.**
- Необходимость изготовить радиаторы с острыми кромками (без фасок) что находится в конфликте с оптическими стандартами и противоречит всему опыту специалистов - оптиков – **требует R&D в наработке такого опыта**
- Проблемы с метрологией: как измерять установленные в спецификации допуски в ходе полировки и для готового изделия? – **требует R&D в метрологии**
- Как измерять эти допуски и проводить входной контроль в процессе массового производства?

Процесс полировки на ЛЗОС



Полировка

Было заказано

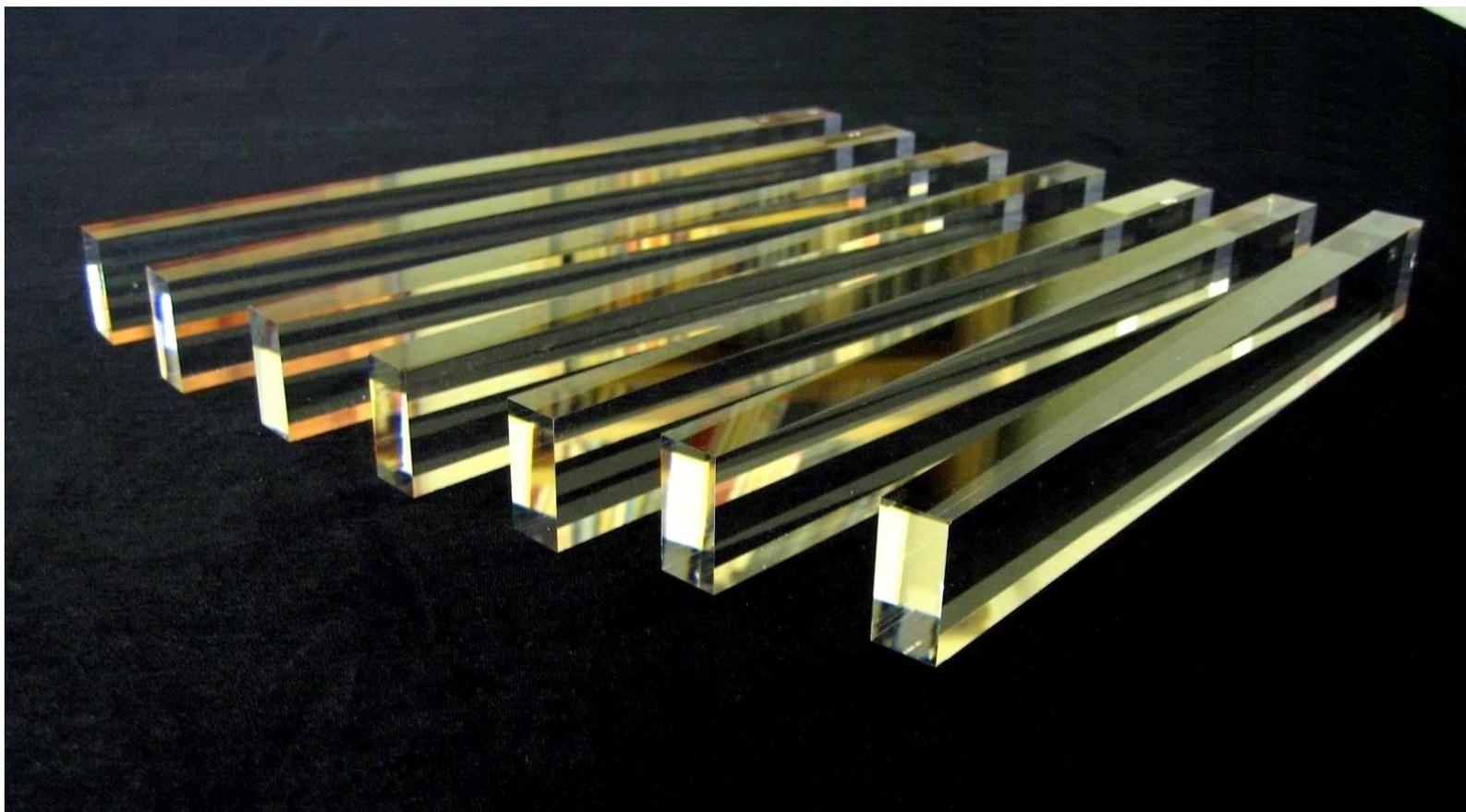
- 10 заготовок размером 20×38×303 mm из **KS-4V** (короткие радиаторы для отработки процедуры полировки, для проверки пропускания излучения, радиационной стойкости, склеивания и, возможно, для изготовления малого прототипа.

и

- 4 заготовки размером 20×38×908 mm из **Spectrosil 2000**, для их полировки на втором этапе производства длинных кварцевых радиаторов соответствующих требованиям PANDA DIRC.

Два плодотворных шага было сделано в коллаборации со специалистами ЛЗОС:

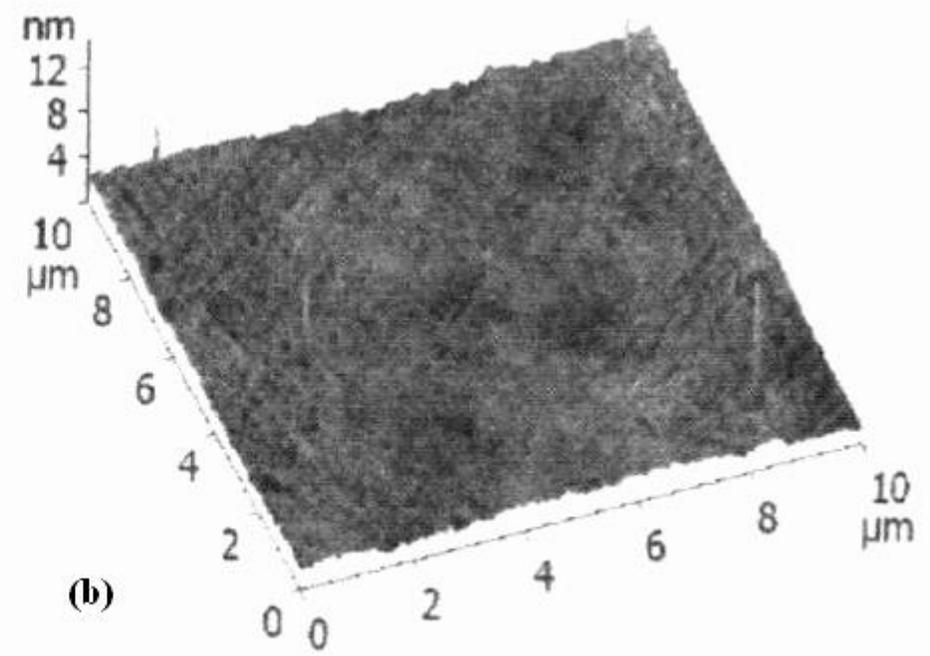
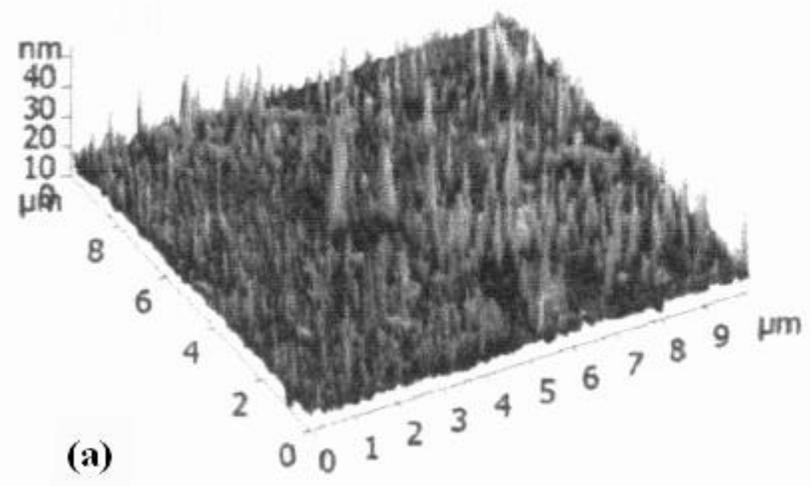
- Полировка 10 коротких радиаторов из стекла **KS-4V** со спецификациями удовлетворяющими требованиям DIRC (шероховатость ≤ 2 nm, высокий класс плоскостности и острые кромки без фасок), в процессе которой была разработана технология полировки и проверки качества изделия из кварцевого стекла.
- Полировка 4-х длинных радиаторов из стекла марки **Spectrosil 2000** с необходимым для PANDA DIRC, результат которой подтвердил возможность использования такой технологии для массового производства радиаторов.



Короткие (300 mm) прототипы кварцевых радиаторов изготовленные в соответствии со спецификациями PANDA DIRC (Кварц: КУ1 (ММЗ), Полировка: ЛЗОС)

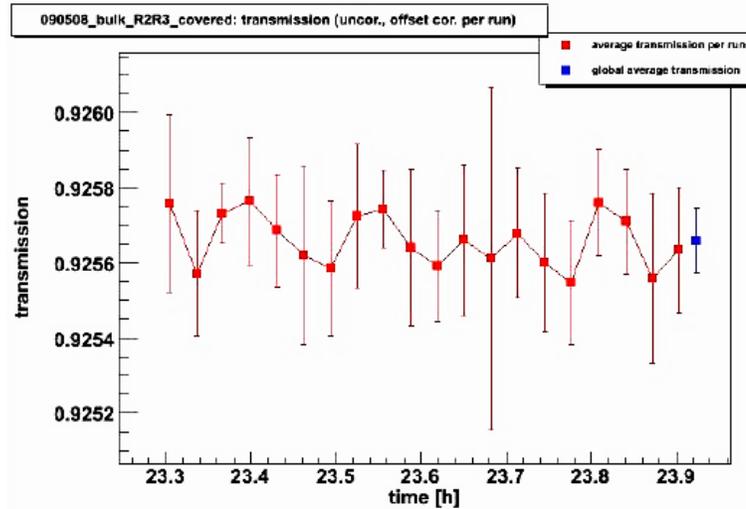


Исследование оптических свойств
прототипов кварцевых радиаторов



300 mm short bars

Preliminary results (Russian)



$$T = 0.9257 \pm 0.0001$$

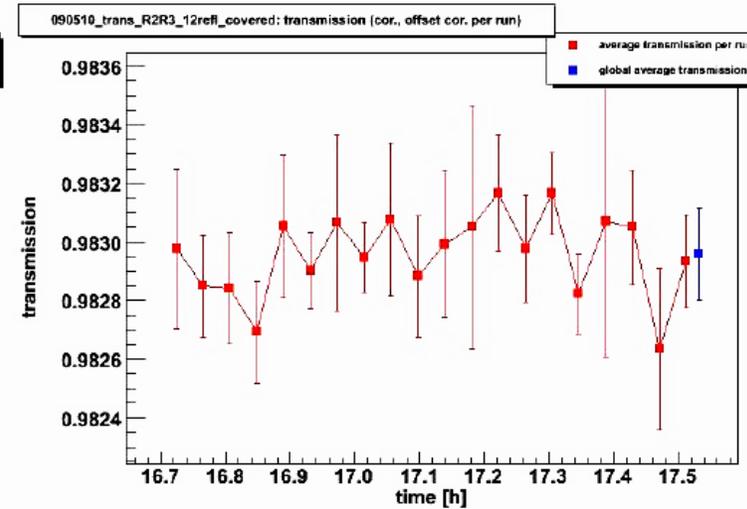
only stat. error

transmittance per m (fresnel corrected):

$$T_{\text{cor}/\text{m}} = 0.9915 \pm 0.0002$$

attenuation length:

$$\Lambda = 117.6 \pm 2.1 \text{ m}$$



$$T = 0.9830 \pm 0.0002$$

only stat. error

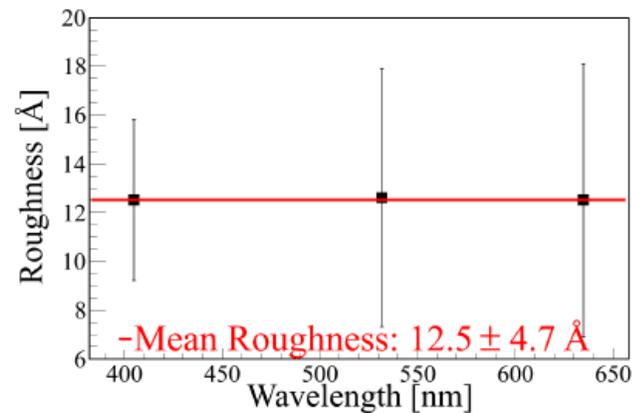
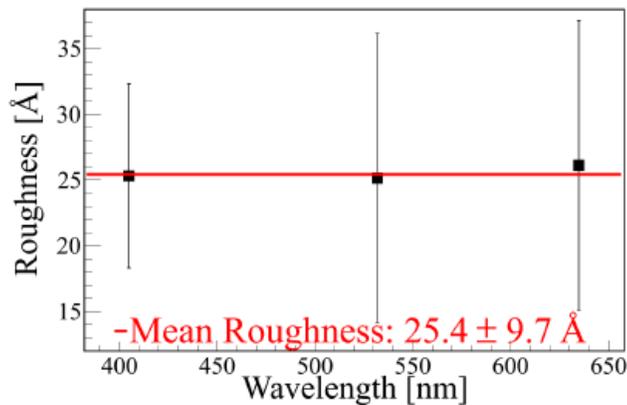
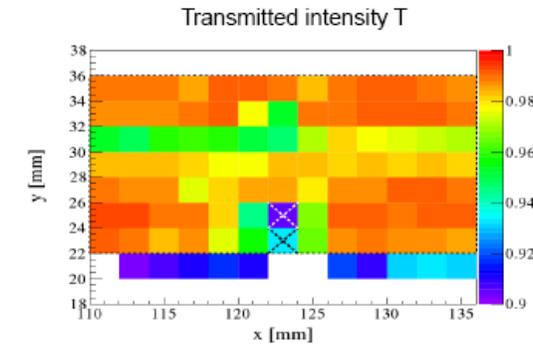
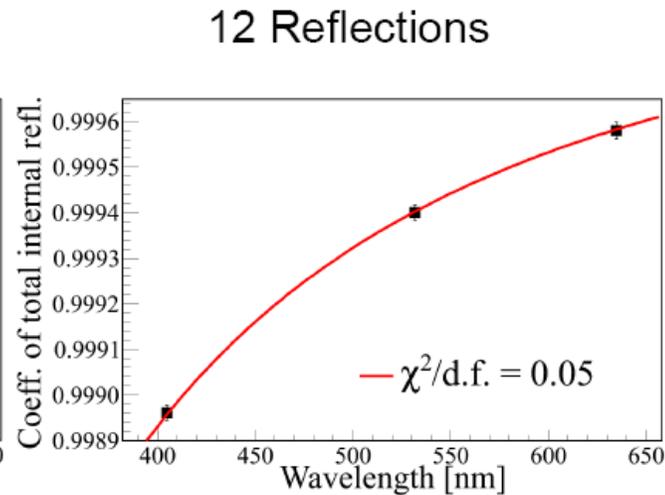
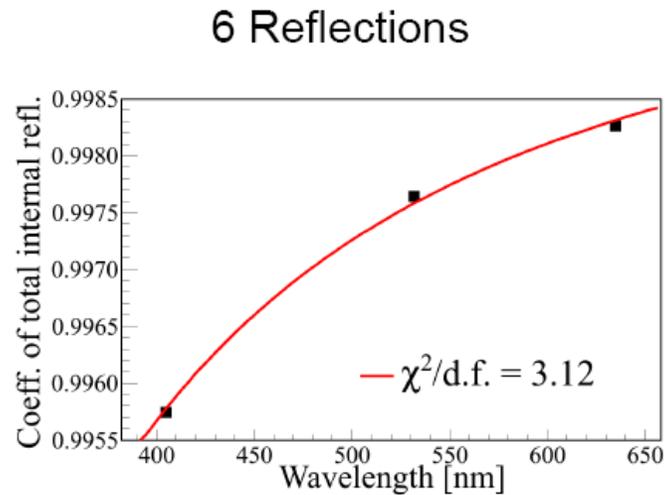
reflection coeff. (12 reflections):

$$R = 0.99915 \pm 0.00002$$

roughness:

$$\sigma = 21.8 \pm 0.3 \text{ \AA}$$

Radiator Quality Test Results: Lytkarino LZOS, 30cm bar

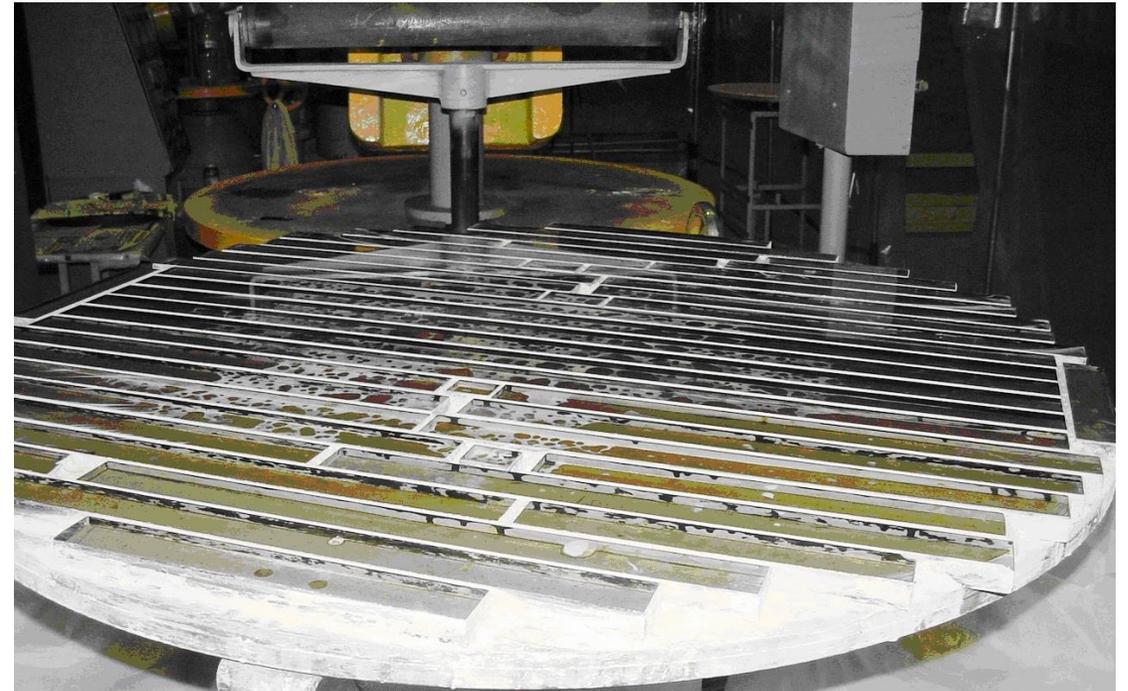
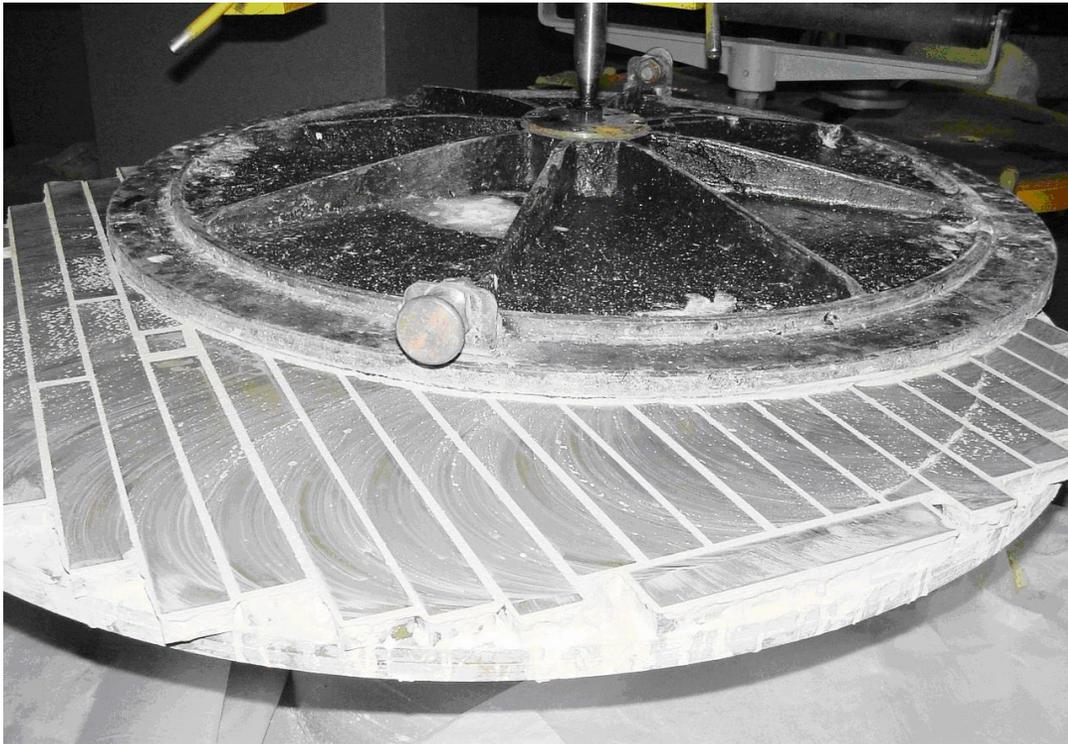


- Results consistent with the specifications.
- *Some bar defects.*
- *Short length of the bar.*
- *New 90cm length prototype bars from LZOS almost done (update on delivery and manufacturer's QA data at April DIRC workshop)*

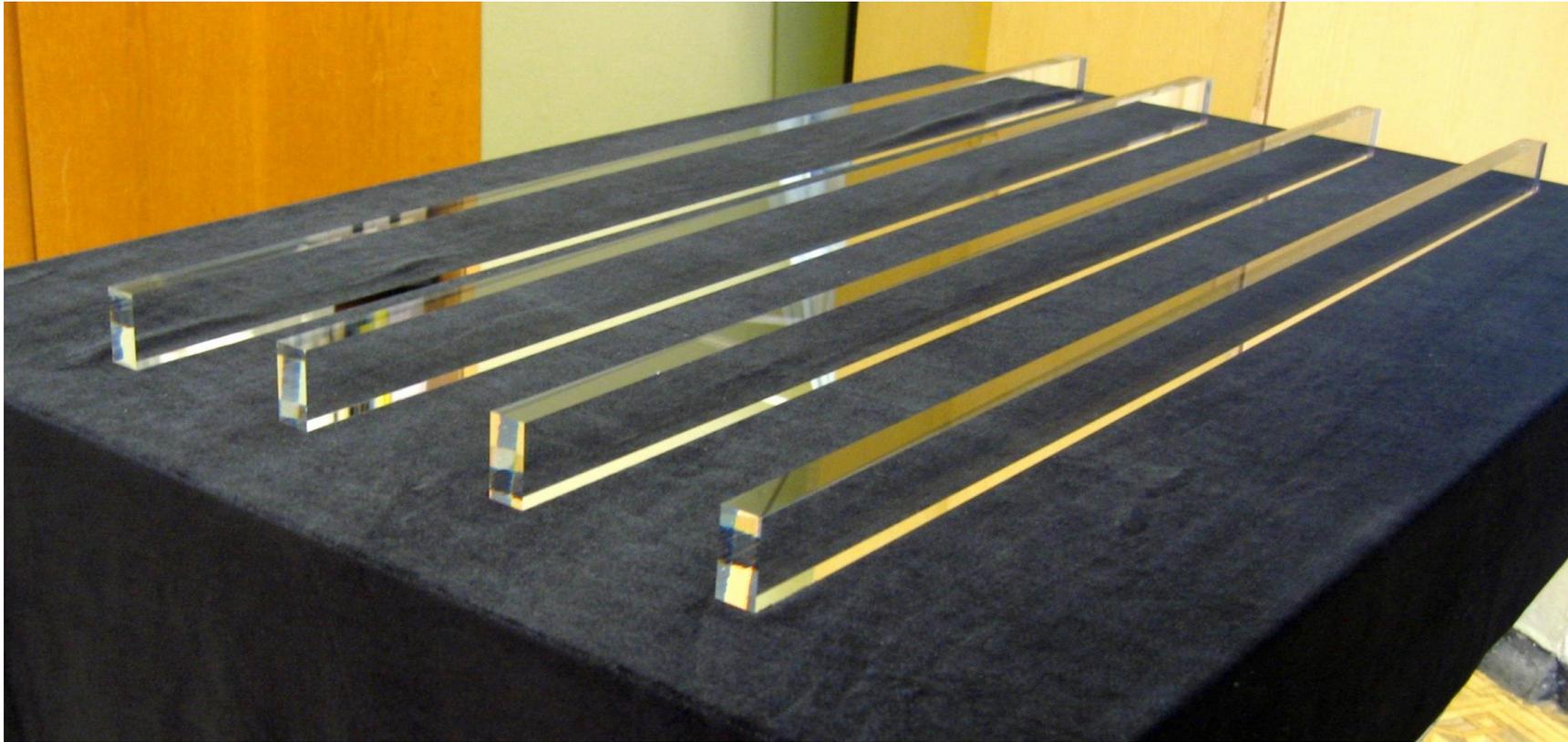
Измерение шероховатости

	$R_{\max}(\text{nm}) \pm \delta R_{\max} \%$	$R_{\text{mean}}(\text{nm}) \pm \delta R_{\text{mean}} \%$	$R_a(\text{nm}) \pm \delta R_a \%$	$R_q(\text{nm}) \pm \delta R_q \%$
Sample 1	189±2.0	0±2.0	8±1.0	6.1±0.4
Sample 2	148±2.0	0±2.0	6.5±0.8	3.7±0.4
Sample 3	72±0.7	0±0.7	0.64±0.8	1.8±0.2
Sample 4	30.1±0.3	0±0.3	0.67±0.08	1.2±0.1
Sample 5	40.3±0.4	0±0.4	0.44±0.05	0.9±0.1
Sample 6	21.2±0.2	0±0.2	0.60±0.08	0.8±0.1
Sample 7	17.4±0.2	0±0.2	0.51±0.06	0.8±0.1
Sample 8	10.8±0.1	0±0.1	0.44±0.05	0.75±0.07
Sample 9	14.5±0.2	0±0.2	0.74±0.03	0.6±0.1

ЛЗОС. Полировка кварцевых радиаторов длиной 900 мм



Кварцевые радиаторы длиной 900 мм



Кварцевые радиаторы длиной 900 mm

Физические размеры

Размеры всех радиаторов соответствовали требуемым допускам и находились в пределах ± 0.5 mm.

№	900^{+0.000}_{-0.500} mm	35^{+0.000}_{-0.500} mm	17^{+0.000}_{-0.500} mm
1	899.5	34.8	16.7
2	899.5	34.8	16.7
3	899.6	34.8	16.7
4	899.6	34.8	16.7

Кварцевые радиаторы длиной 900 mm

Параллельность и плоскостность

- Кромки боковых поверхностей / торцов должны быть параллельны с точностью 0.025 mm.
- Торцевые поверхности должны быть плоскими с точностью 0.1 mm max.
- Боковые поверхности должны быть плоскими с точностью 0.025 mm.
- Допуск на плоскостность боковых поверхностей 0.025 mm в пределах любой площади размером 25×25 mm² area.

№	35×900 mm	17×900 mm	17×35 mm	Newton rings for Ø30 mm
1	0.03	0.03	0.02	1 ~ 0.275 мкм
2	0.03	0.03	0.02	1 ~ 0.275 мкм
3	0.03	0.03	0.02	1 ~ 0.275 мкм
4	0.03	0.03	0.02	1 ~ 0.275 мкм

Измерение шероховатости

- Шероховатость стекол - «свидетелей» была измерена с помощью сканирующего зондового микроскопа «NTEGRA- Prima»
- стекла - «свидетели» размером $10 \times 10 \times 7 \text{ mm}^3$, соответствовали разным поверхностям кварцевых радиаторов и разным этапам полировки.
- Для каждого образца были получены атомно-силовые изображения размером $60 \times 60 \text{ }\mu\text{m}$, $30 \times 30 \text{ }\mu\text{m}$, $10 \times 10 \text{ }\mu\text{m}$ и $5 \times 5 \text{ }\mu\text{m}$.

Образец № 1 Вторая точка.

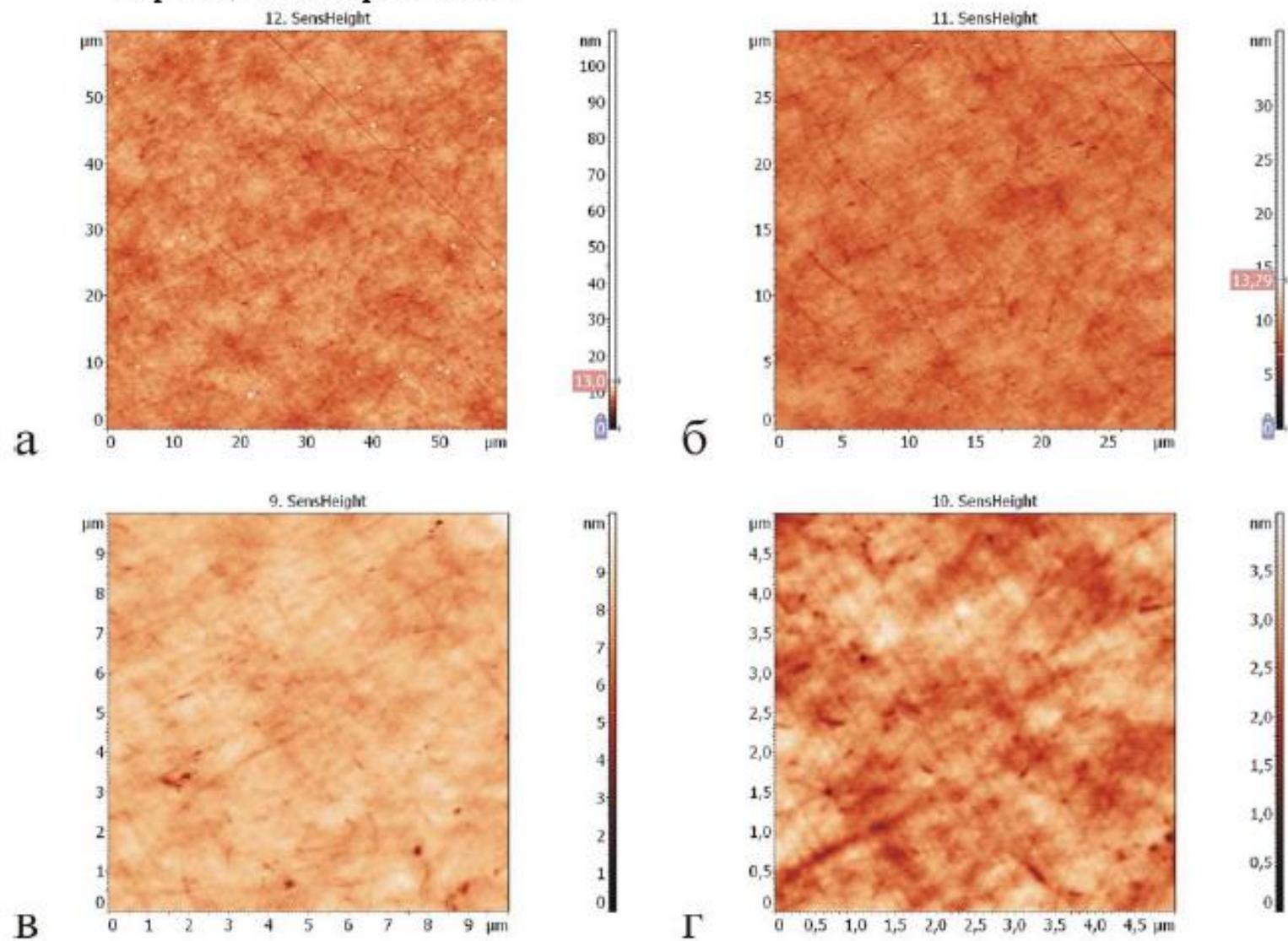
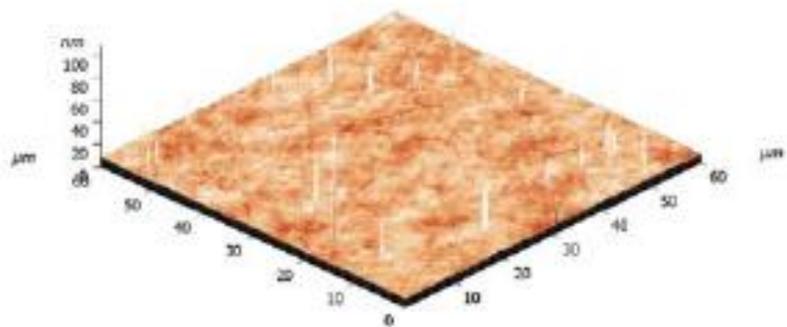
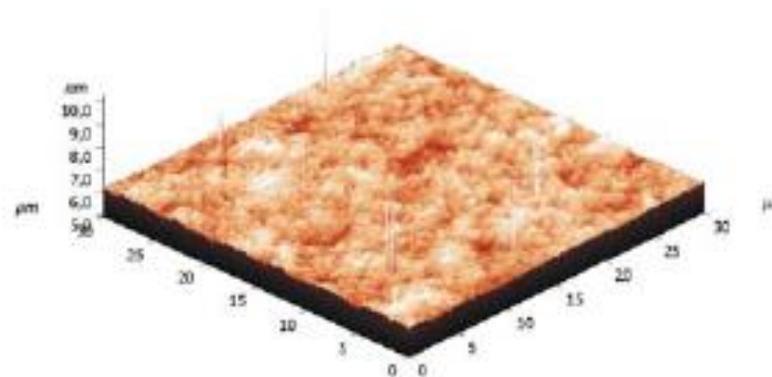


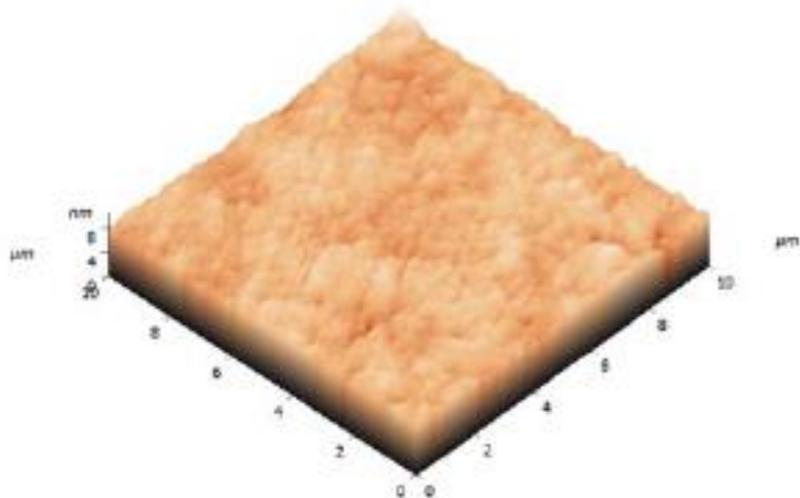
Рис. 3. 2D АСМ изображения поверхности образца №1 во второй точке.



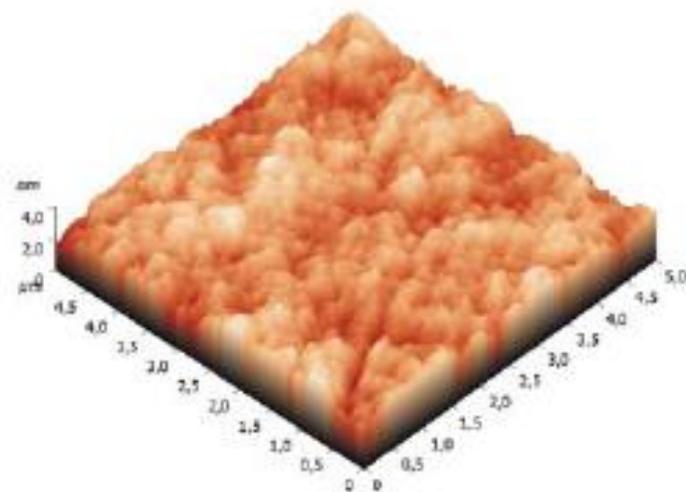
а



б



в



г

Рис. 4. 3D АСМ изображения поверхности образца №1 во второй точке.

Шероховатость поверхности образца №1 в точке 2

Scanned area, μm	Measured surface roughness, nm			
	R_{max}	R_{mean}	R_a	R_q
60×60 мкм	109.435	8.820	0.492	0.839
30×30 мкм	36.916	8.912	0.432	0.583
10×10 мкм	10.544	8.240	0.361	0.469
5×5 мкм	4.084	2.828	0.268	0.338

Кварцевые радиаторы длиной 900 mm

Конечная шероховатость поверхности и чистота

№	35×900 mm, nm	17×900 mm, nm	17×35 mm, nm	P
1	0.472- 0.749	0.790- 0.881	1.510- 0.631	V
2	0.472- 0.749	0.790- 0.881	1.510- 0.631	V
3	0.472- 0.749	0.790- 0.881	0.564- 0.604	V
4	0.472- 0.749	0.790- 0.881	0.564- 0.604	V

МИР СТЕКЛА

Выставка «Мир стекла»

28 февраля – 3 марта

ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР»

123100, Москва, Краснопресненская наб., 14

Тел.: 8 (800) 707-37-99, +7 (499) 795-37-99

E-mail: centr@expocentr.ru

БАСПИК выпускает МКП с каналами 4, 5, 6, 8, 10 мкм различных конфигураций и различных габаритных размеров (18, 25 мм)