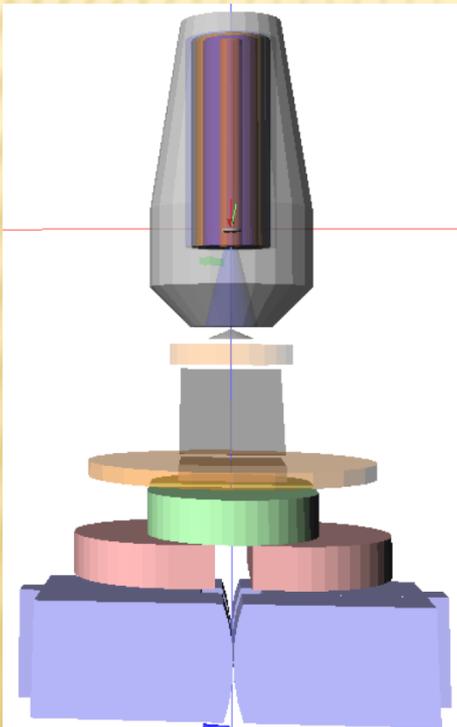


ИСПЫТАНИЯ УСКОРИТЕЛЯ ДЛЯ КОМПЛЕКСА ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ «ОНИКС»

Д. Юров, НИИЯФ МГУ, ЛЭУ МГУ

Комплекс лучевой терапии «Оникс»

Комплекс предназначен для стереотаксической и дистанционной лучевой терапии злокачественных и доброкачественных новообразований различной этиологии при использовании пучка тормозного излучения с номинальной энергией 6 МэВ, а также для получения диагностических проекционных изображений, с целью точного позиционирования облучаемого объема при использовании тормозного излучения номинальной энергией 2.5 МэВ.



Для создания требуемых дозных полей в области расположения опухоли используется устройство формирования пучка, состоящее из шторок коллиматора и многолепесткового коллиматора (МЛК), позволяющее формировать поля различных форм и размеров. При этом максимальный размер поля пучка в области расположения опухоли может достигать (40×40) см², а минимальный $(0,5 \times 0,5)$ см². Для формирования однородных дозных полей используется выравнивающий фильтр.

Программа испытаний ускорителя

Параметр	Значение
Номинальная энергия	6 МэВ
d_{\max} , без выравнивающего фильтра	$1,5 \pm 0,2$ см
PDD_{10} , без выравнивающего фильтра	$63,8 \pm 0,9\%$
$TPR_{20,10}$, без выравнивающего фильтра	$0,634 \pm 0,010$
Номинальная низкая энергия	2,5 МэВ
Диапазон регулирования мощности дозы в режиме высокой энергии (на расстоянии 1 м на глубине максимальной поглощенной дозы)	1 – 10 Гр/мин
Диапазон регулирования мощности дозы в режиме низкой энергии	0,01 – 0,5 Гр/мин
Максимальная частота повторений в режиме высокой энергии	400 Гц
Максимальная частота повторений в режиме низкой энергии	400 Гц
Стабильность высокой энергии	$\pm 3\%$
Стабильность низкой энергии	$\pm 3\%$
Стабильность мощности дозы при высокой энергии	$\pm 10\%$
Стабильность мощности дозы при низкой энергии	$\pm 10\%$
Время выхода излучения в стабильный режим	$< 0,1$ с
Время прекращения излучения	< 10 мс
Размер фокусного пятна	< 2 мм
Утечки излучения вне плоскости пациента на расстоянии 1 м от ускорителя относительно мощности дозы поля 10×10 см.	0,5%
Утечки излучения в плоскости пациента на расстоянии 1 м от мишени и круге радиусом 2 м относительно мощности дозы поля 10×10 см.	Максимум 0,2%; в среднем 0,1%
Время непрерывной работы при максимальной мощности дозы и энергии, минимальное	30 мин

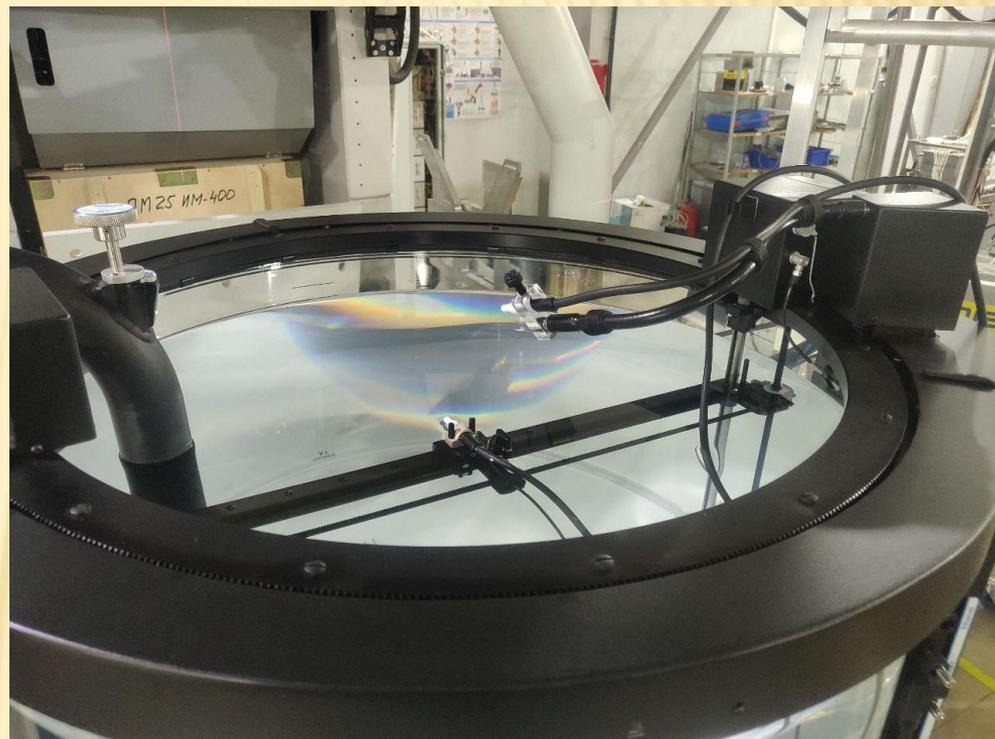
Измерения энергии пучка

Измерения энергии – косвенные, по характеристикам тормозного излучения (ТИ).
 Последние зависят также от геометрии мишенного узла, а также от фильтра
 мягкого ТИ.

	<i>Varian</i>		<i>Elekta</i>		<i>Siemens</i>			
	6 FFF	10 FFF	6 FFF	10 FFF	7 UF	11 UF	14 UF	17 UF
Nominal energy (MV)								
Bremsstrahlung target material	Tungsten		Tungsten		Tungsten			
Approximate mean electron energy on target (MeV)	6.2	10.5	7	10.5	8.9	14.4	16.4	18.3
Filtration	0.8 mm Brass		2mm Stainless steel		1.27 mm Al			
d_{\max} (cm)	1.5	2.3	1.7	2.4	1.9	2.7	3.0	3.3
Dose at 10 cm depth (%)	64.2	71.7	67.5	73.0	68.5	74.5	76.5	78.0
Dose 10 cm from central axis (40×40 cm ² field), at d_{\max} (%)	77	60	70 ^a	59 ^a	68	57	-	-
Maximum dose rate on beam axis at d_{\max} (cGy/min)	1400	2400	1400	2200	2000	2000	2000	2000
Dose per pulse on beam axis at d_{\max} (cGy/pulse)	0.08	0.13	0.06	0.09/0.14 ^b	0.13	0.13	0.13	0.13

Ying Xiao et al., Flattening filter-free accelerators: a report from the AAPM Therapy Emerging Technology Assessment Work Group, J Applied Clin Med Phys, Vol. 16, №3, 2015

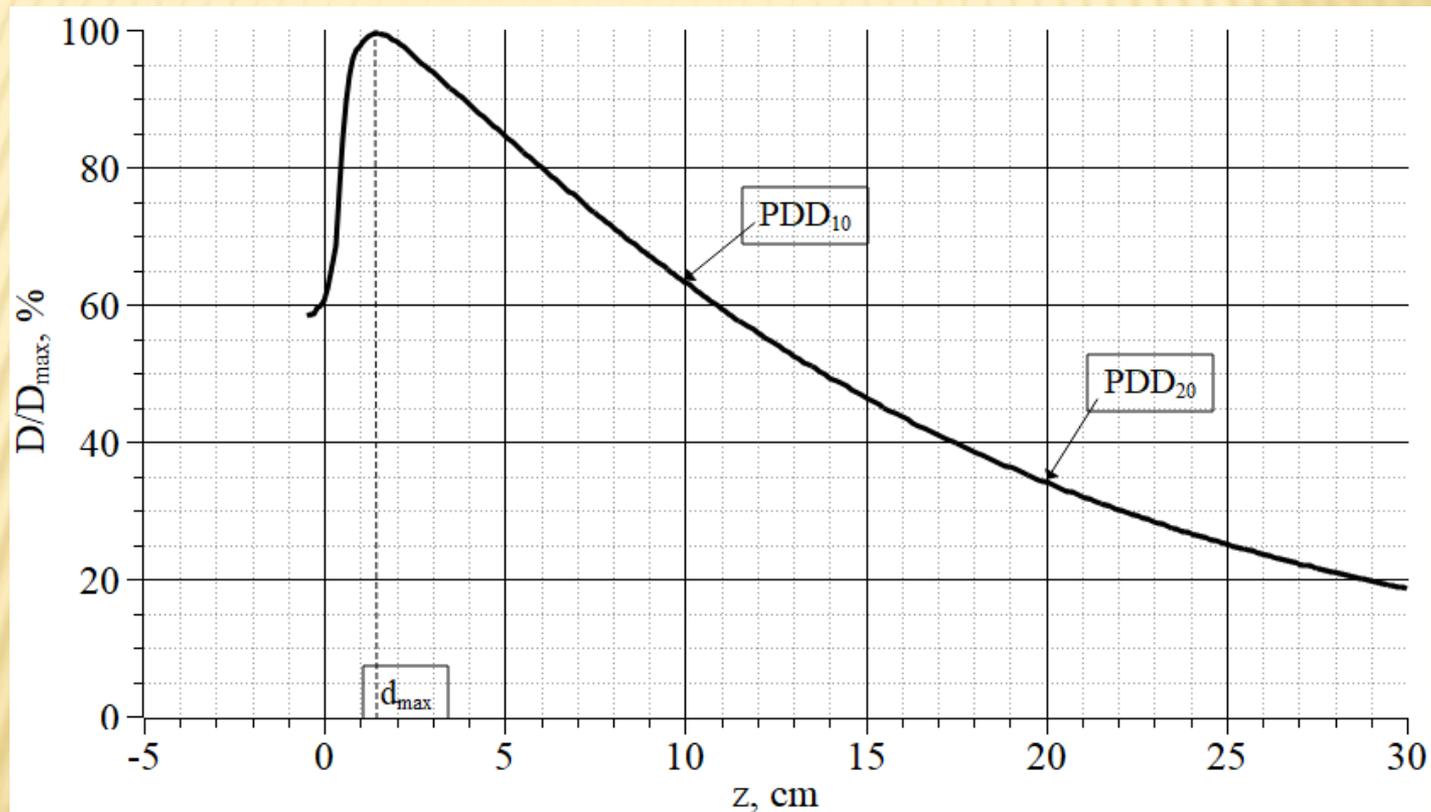
Измерения энергии пучка



Водный фантом (анализатор дозового поля)
3D Scan с программным обеспечением SNC
Dosymetry

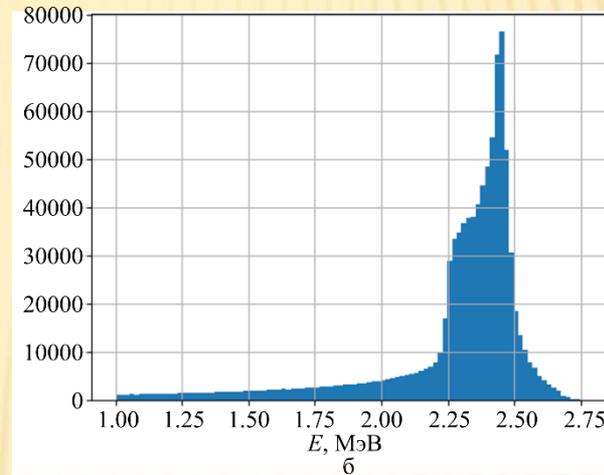
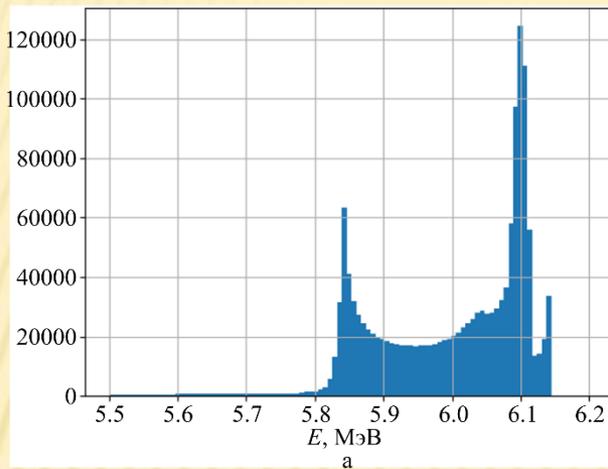
Измерения энергии пучка

Глубинно-дозовые кривые позволяют определить все характеристики ТИ, связанные с энергией пучка и входящие в программу испытаний.



$$TPR_{20,10} = 1,2661 \cdot \frac{PDD_{20}}{PDD_{10}} - 0,0595$$

Измерения энергии пучка

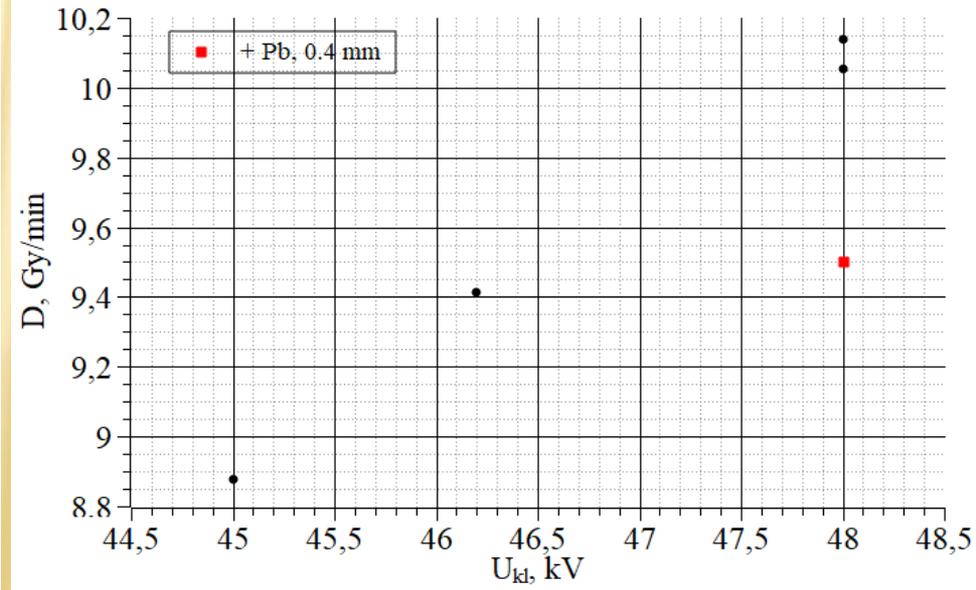
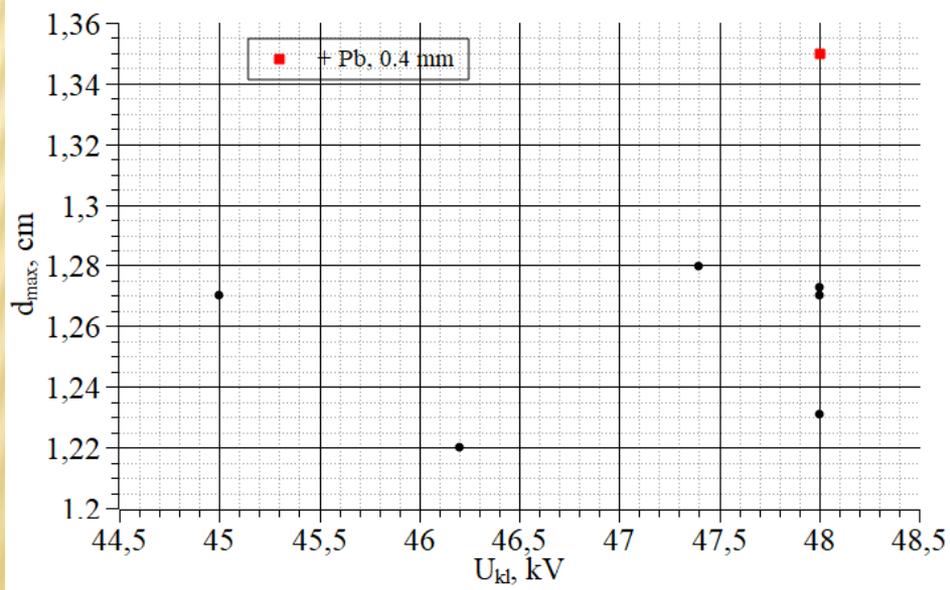
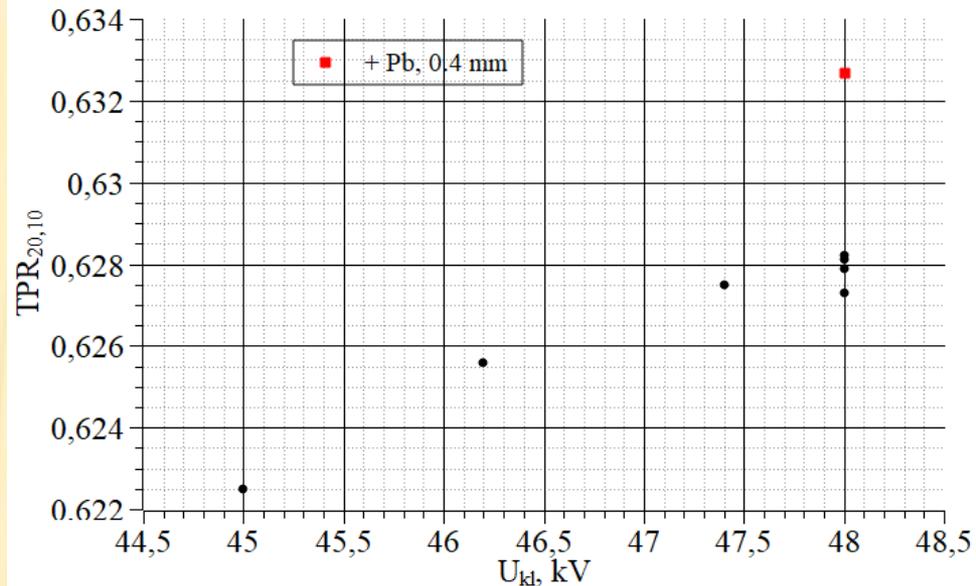
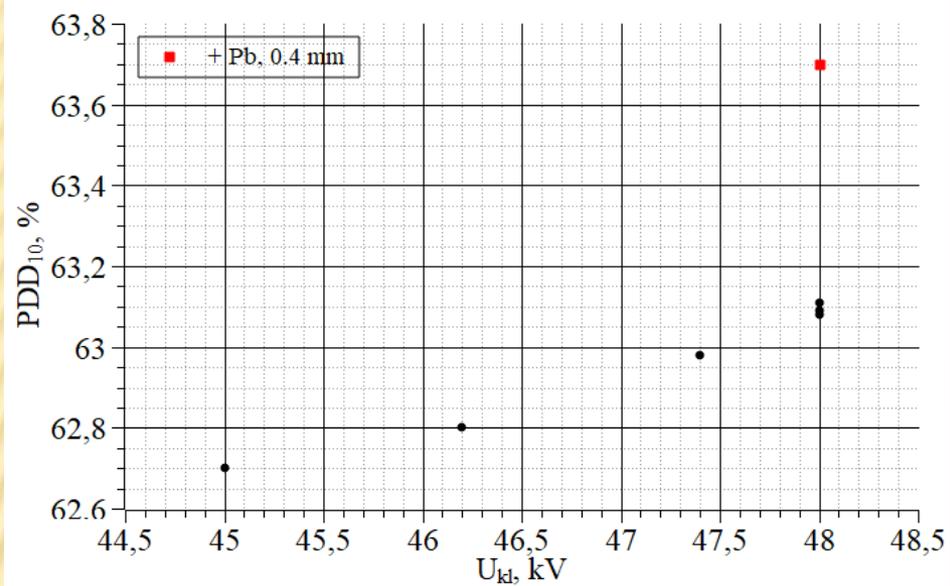


$$E = \frac{1}{1 + \beta} \left\{ \sqrt{4\beta Z_e P_{kl}} - I_{gun} K_{capt} Z_e \right\} \quad D \approx 0.33 E^3 I_{gun} K_{capt} f_{rep} \tau_I k$$

$$\beta = 1.5; Z_e = 19.4 \text{ МОм}; P_{kl} = 3.0 \text{ МВт}; I_{gun} = 200 \text{ мА}; K_{capt} = 0.8; f_{rep} = 400 \text{ Гц}; \tau_I = 2.0 \text{ мкс}$$

$$P_{kl} \sim U_{kl}^{5/2}$$

Измерения энергии пучка



Измерения энергии пучка, стабильность энергии

3 серии измерений с 30 минутными перерывами между ними. Внутри серии два измерения, разделенные 10 минутами. Внутри серии излучение не прерывается.

«6 МэВ»

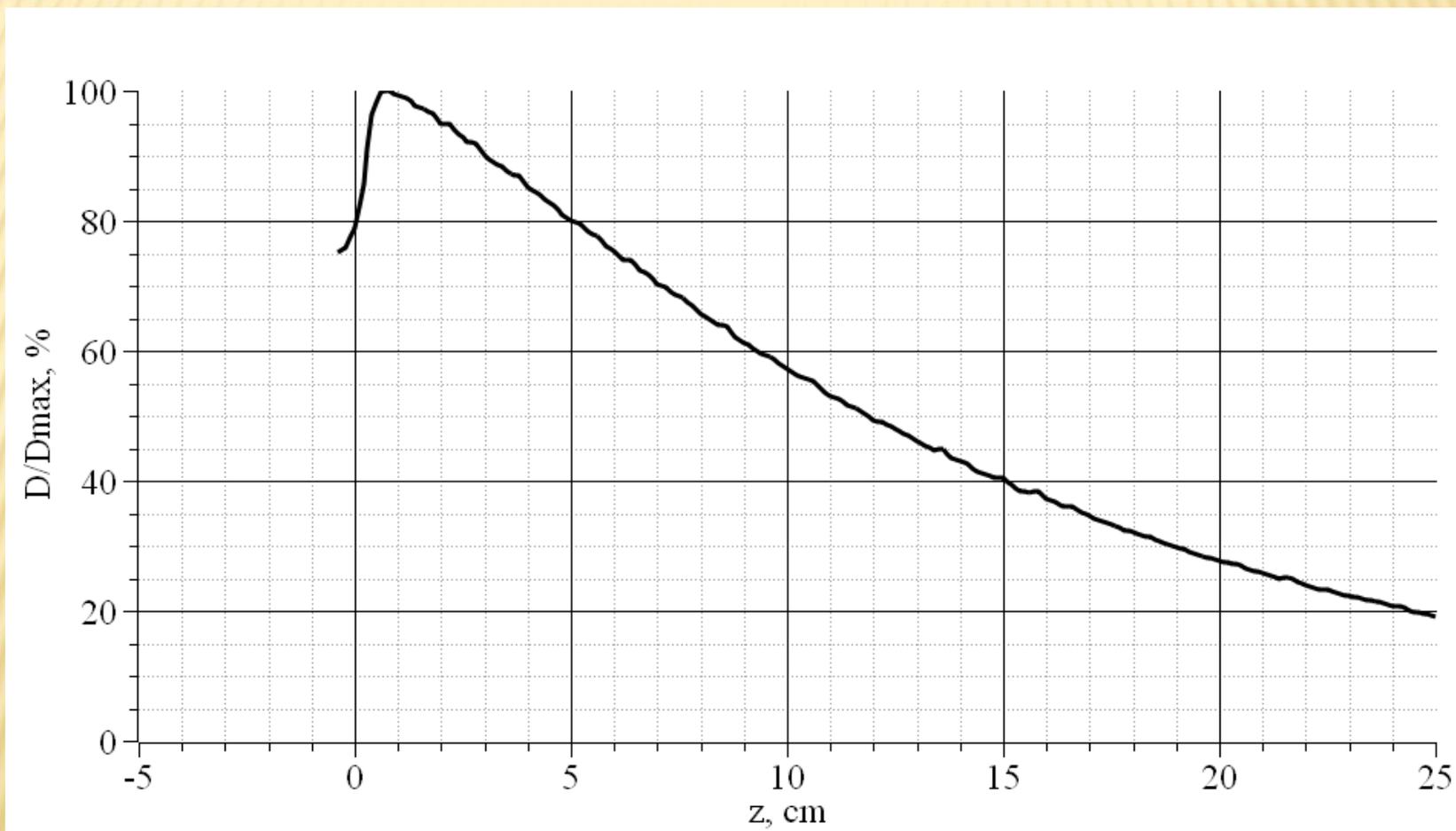
Требования: $TPR_{20,10} = 0,634 \pm 0,010$; $PDD_{10} = 63,8 \pm 0,9\%$; $d_{max} = 1,5 \pm 0,2$ см

	Первое измерение		Отклонение, %	Второе измерение		Отклонение, %	Третье измерение		Отклонение, %	Отклонение в начале и в конце работы, %
PDD10, %	63,44	63,43	-0,02	63,44	63,5	0,09	63,51	63,5	-0,02	0,11
TPR20,10	0,6293	0,629	-0,05	0,6294	0,6286	-0,13	0,6294	0,629	-0,06	0,01
dmax, см	1,4	1,4	0,00	1,4	1,4	0,00	1,403	1,404	0,07	0,30

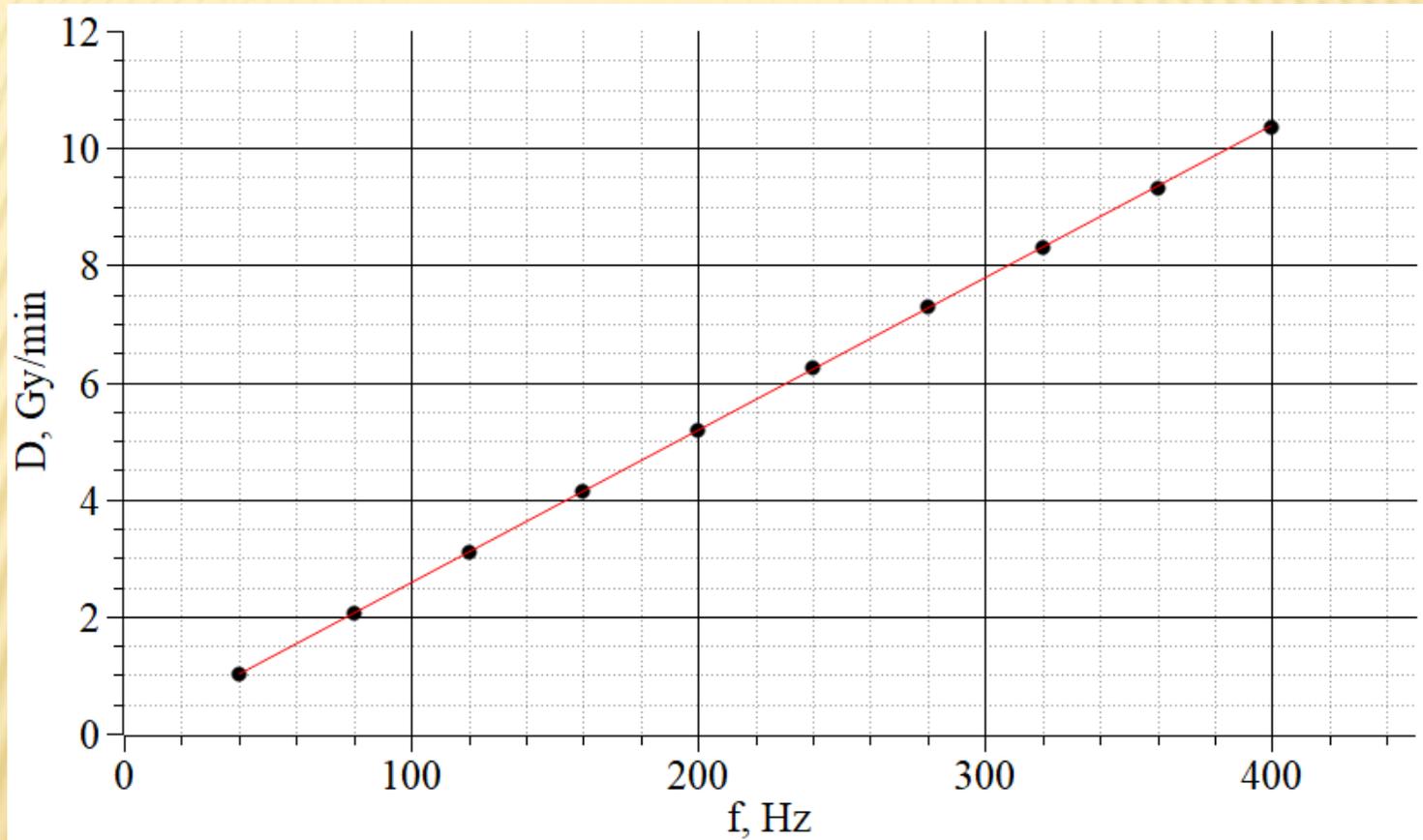
«2,5 МэВ»

	Первое измерение		Отклонение, %	Второе измерение		Отклонение, %	Третье измерение		Отклонение, %	Отклонение в начале и в конце работы, %
PDD10, %	57,1	57,44	0,60	57,36	57,29	-0,12	57,33	57,25	-0,14	0,03
TPR20,10	0,5548	0,5541	-0,13	0,5563	0,5576	0,23	0,5571	0,5561	-0,18	0,39
dmax, см	0,786	0,8555	8,07	0,8225	0,785	-4,78	0,791	0,786	-0,64	-4,04

Измерения энергии пучка, «2,5 МэВ»

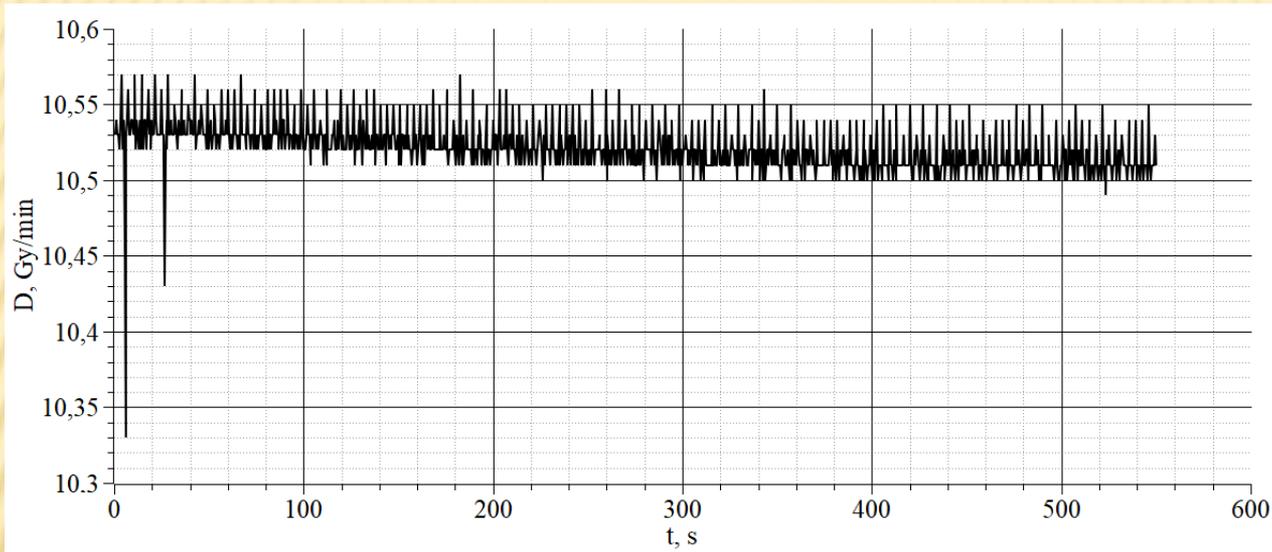


Измерения мощности дозы ТИ

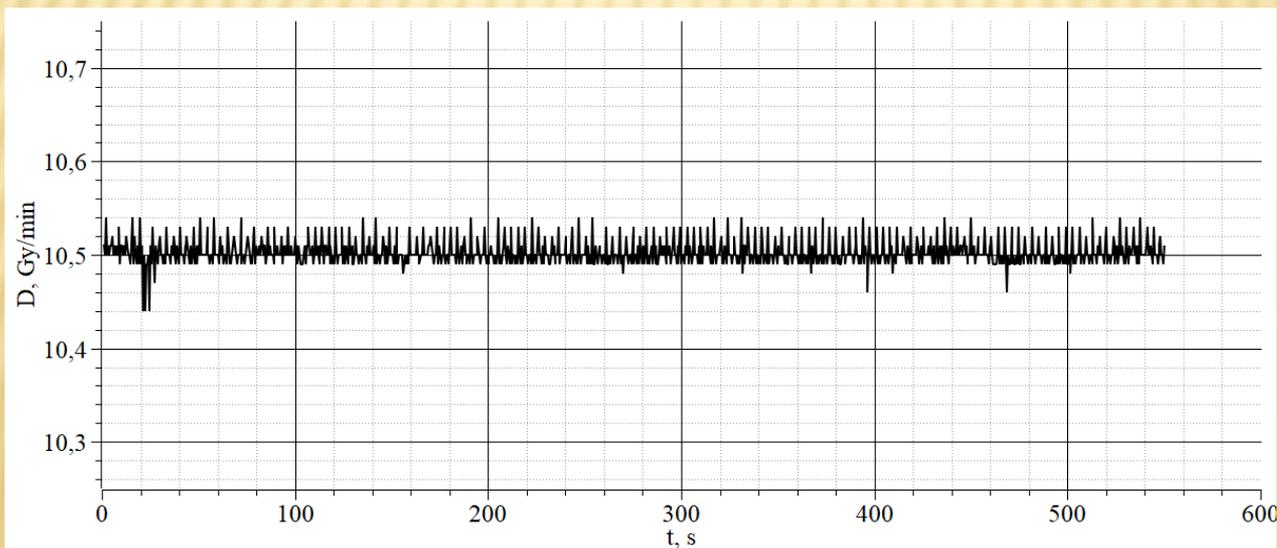


Стабильность мощности дозы ТИ

«6 МэВ»



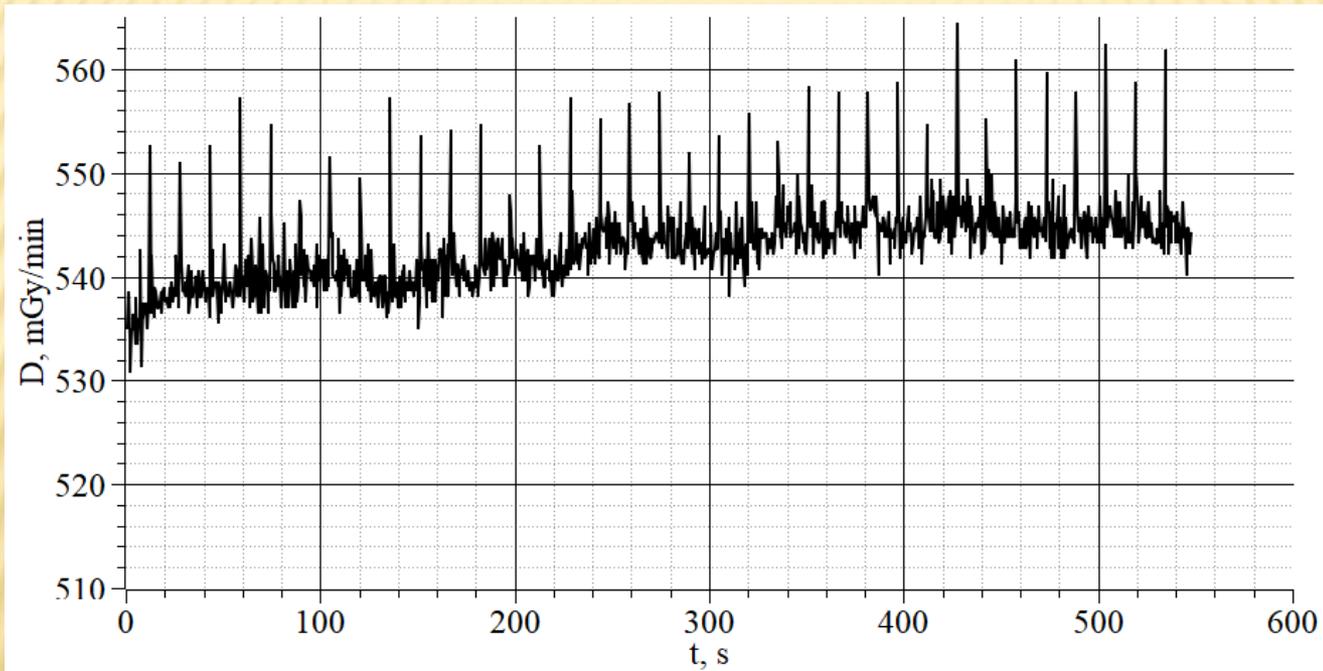
$$\bar{D} = 10,521 \text{ Гр/мин}$$
$$S = 0,016 \text{ Гр/мин}$$



$$\bar{D} = 10,503 \text{ Гр/мин}$$
$$S = 0,013 \text{ Гр/мин}$$

Стабильность мощности дозы ТИ

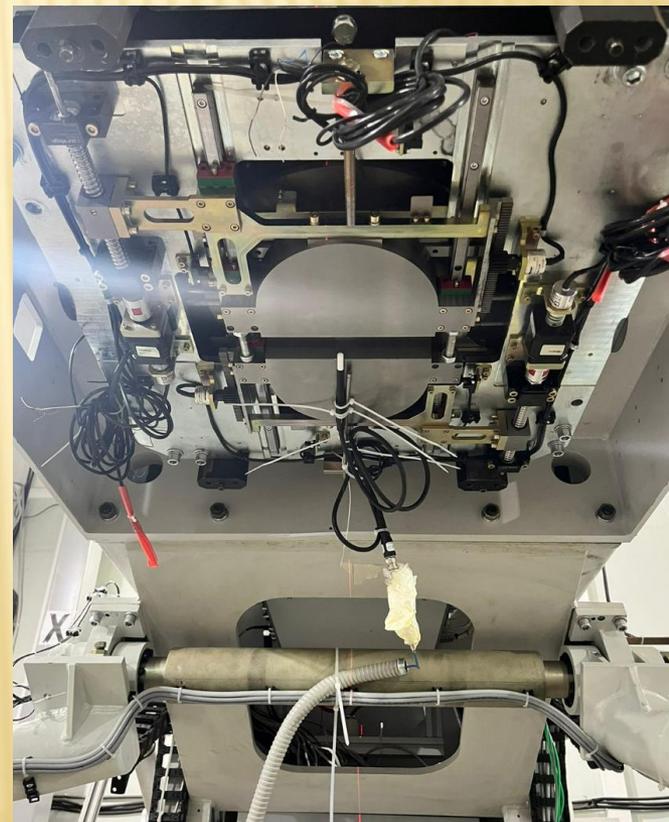
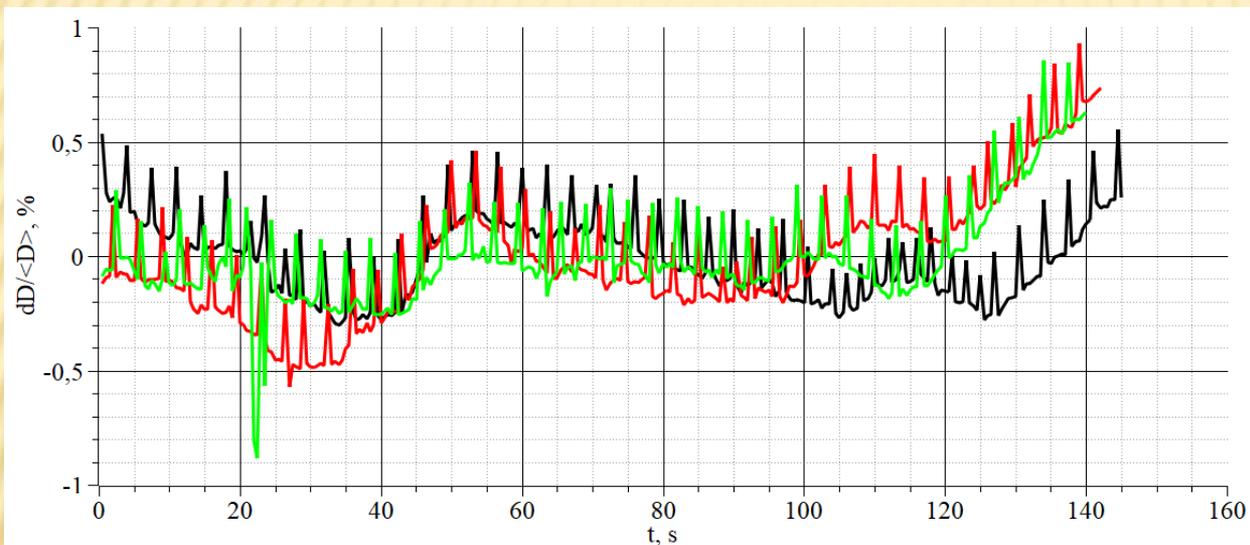
«2,5 МэВ»



$$\bar{D} = 542,87 \text{ мГр/мин}$$
$$S = 3,92 \text{ Гр/мин}$$

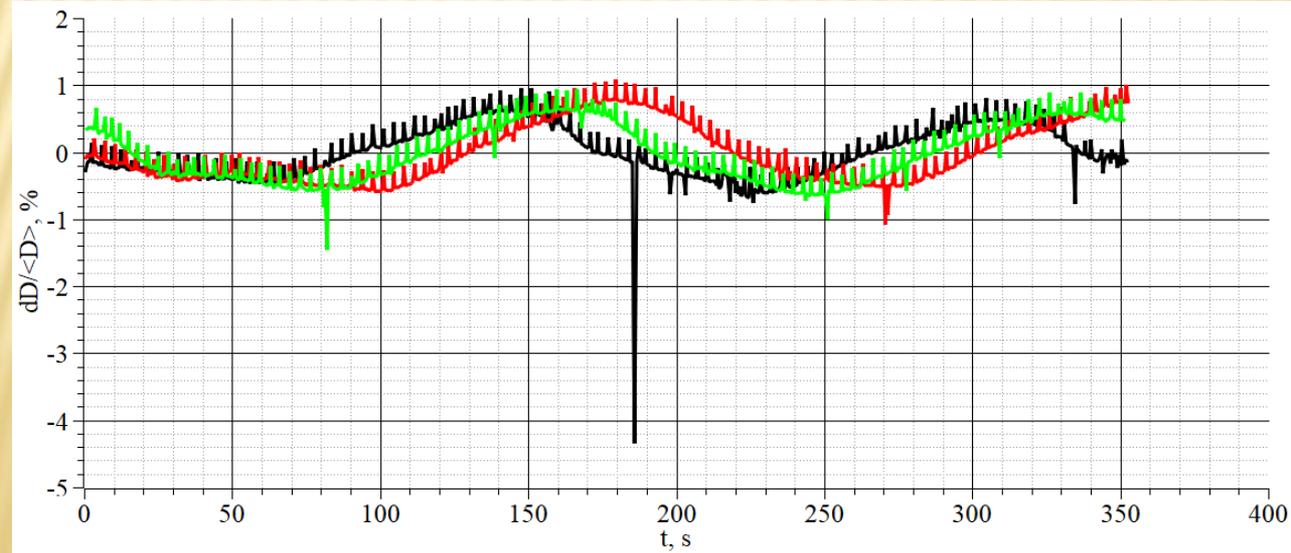
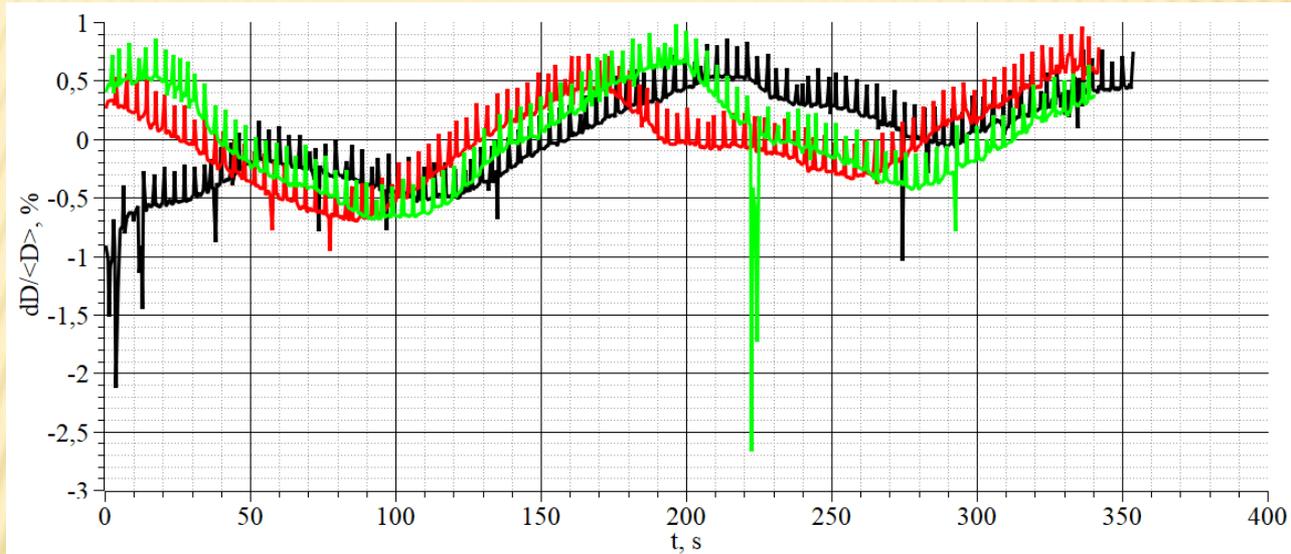
Стабильность мощности дозы ТИ с вращением гантри

Скорость вращения: 6 градусов/с

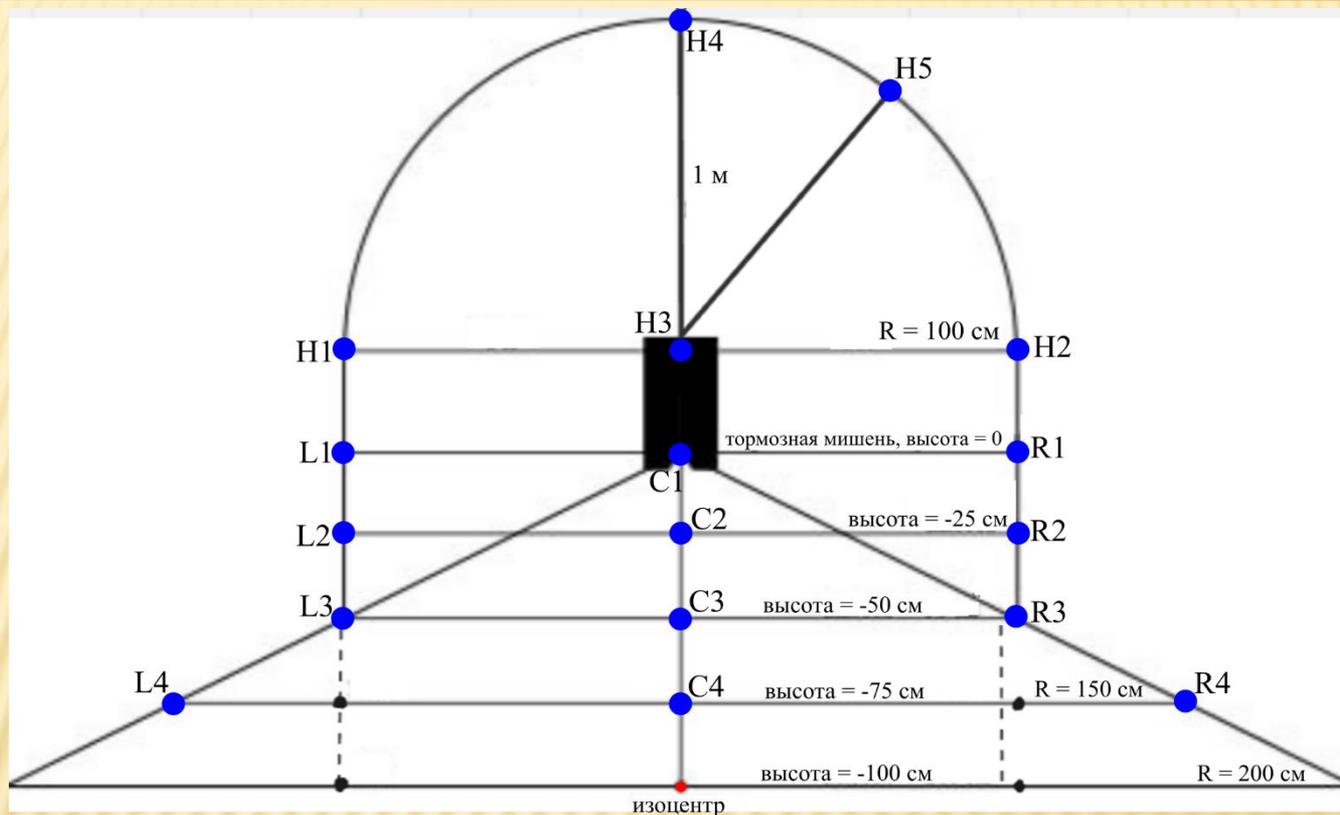


Стабильность мощности дозы ТИ с вращением гантри

Скорость вращения: 1 градус/с



Утечки вне плоскости пациента

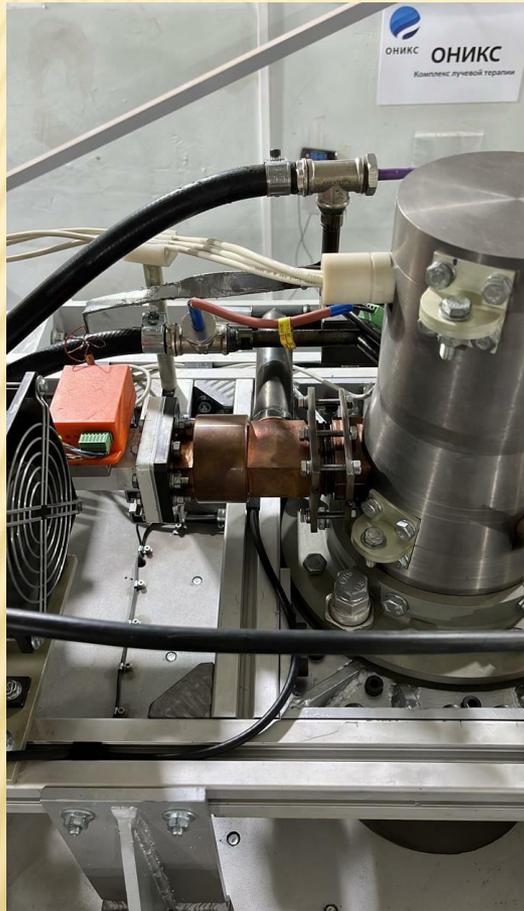


R1	R2	R3	R4	L1	L2	L3	L4	C1	C2	C3	C4
0,0099%	0,121%	0,035%	0,014%	0,11%	0,0096%	0,035%	0,016%	0,0071%	0,007%	0,003%	0,0015%

H1	H2	H3	H4	H5
0,134%	0,164%	0,24%	0,113%	0,13%

Требования: не более 0,5%

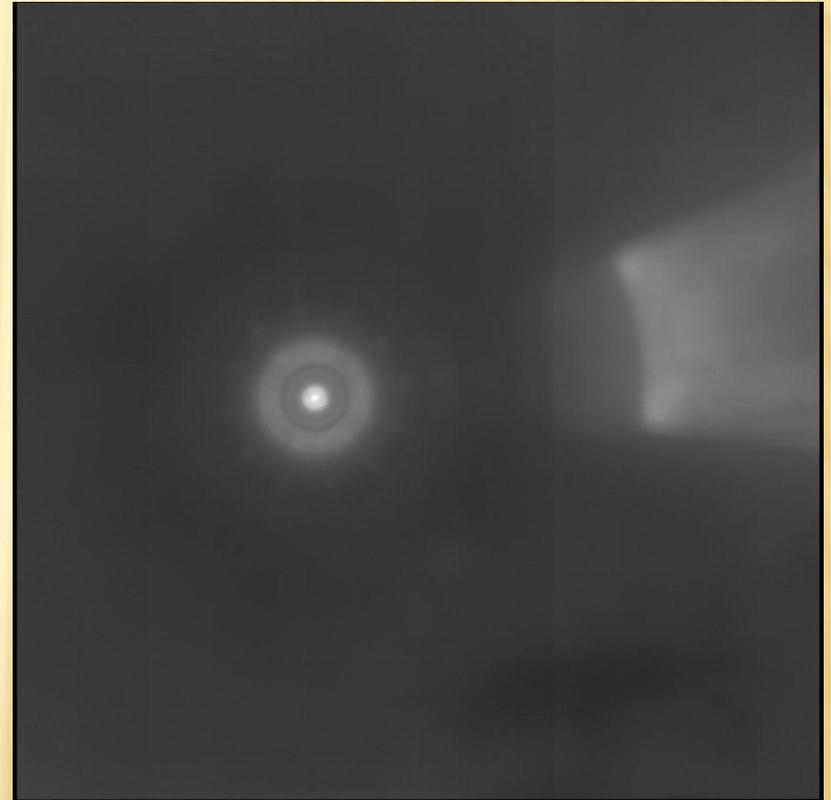
Утечки вне плоскости пациента



Для определения точек с максимальным уровнем утечек использовался матричный детектор на основе сцинтиляторов (МВ-панель) «Марк» от ООО «ПРОДИС.НДТ»



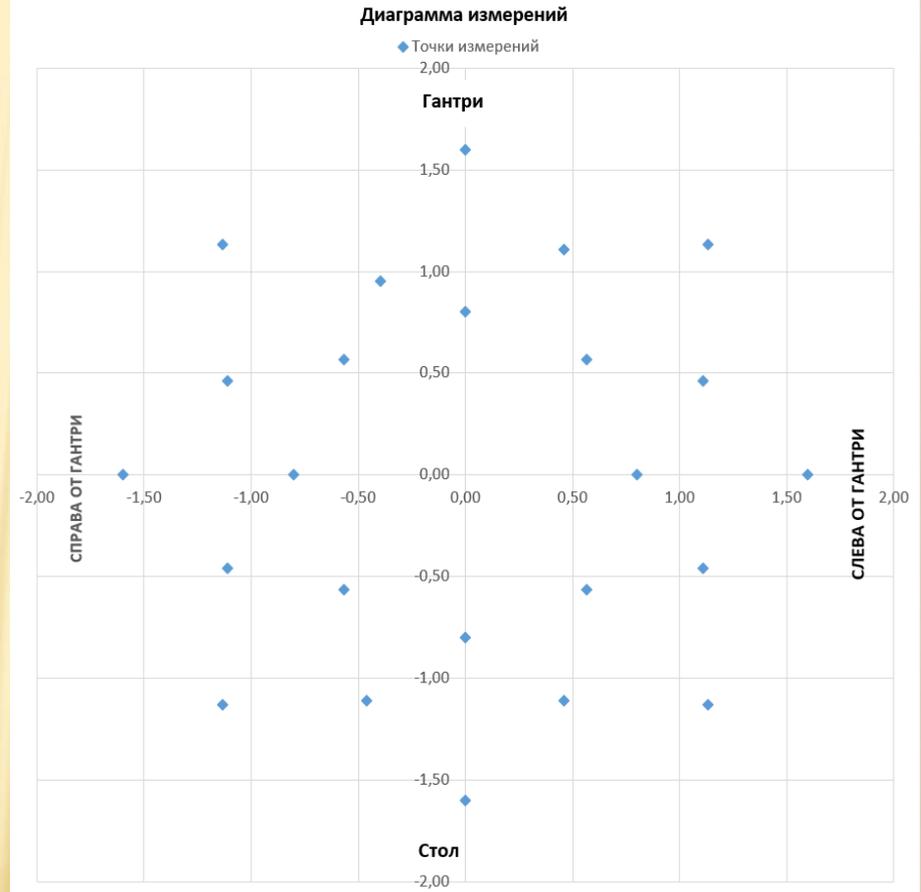
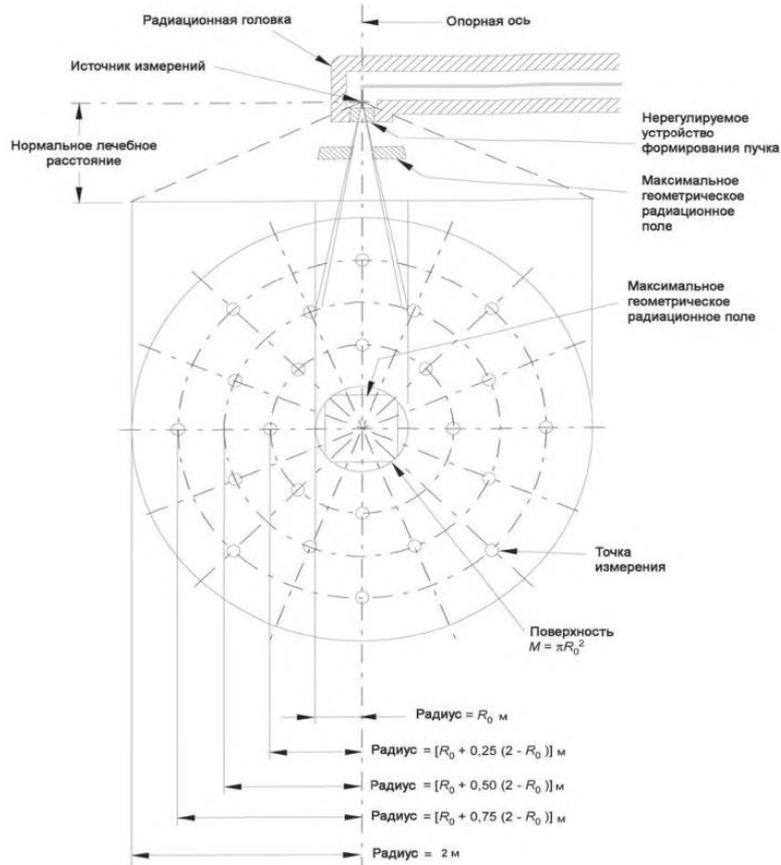
Утечки вне плоскости пациента



Утечки вне плоскости пациента



Утечки в плоскости пациента



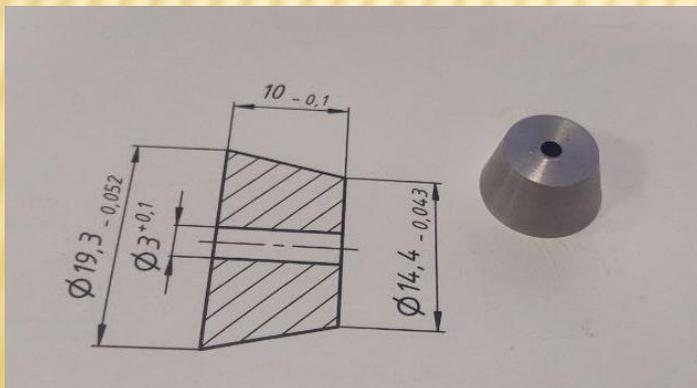
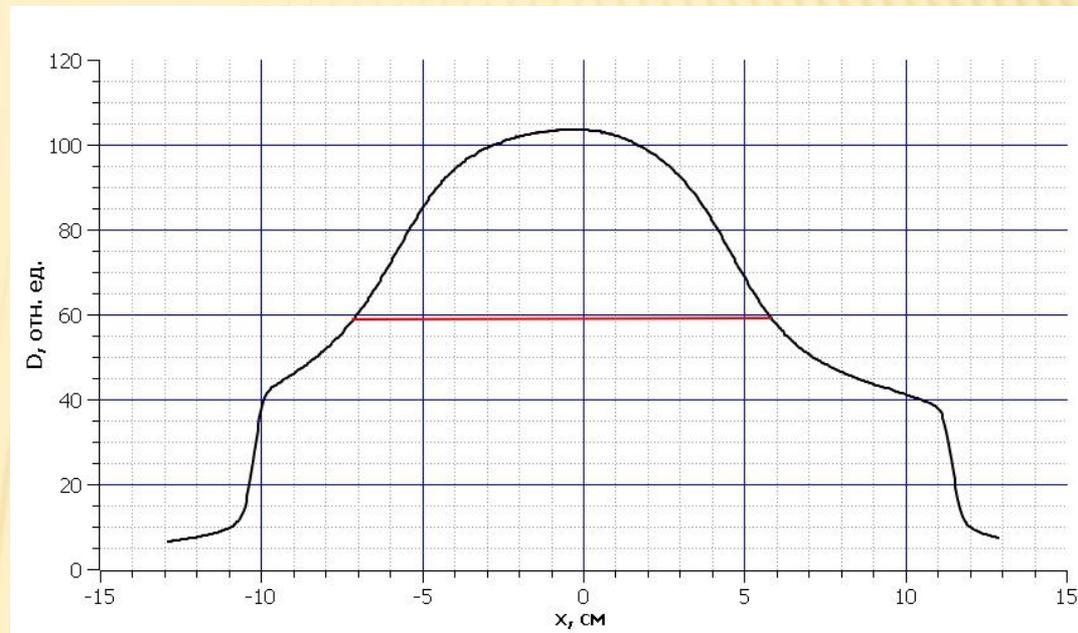
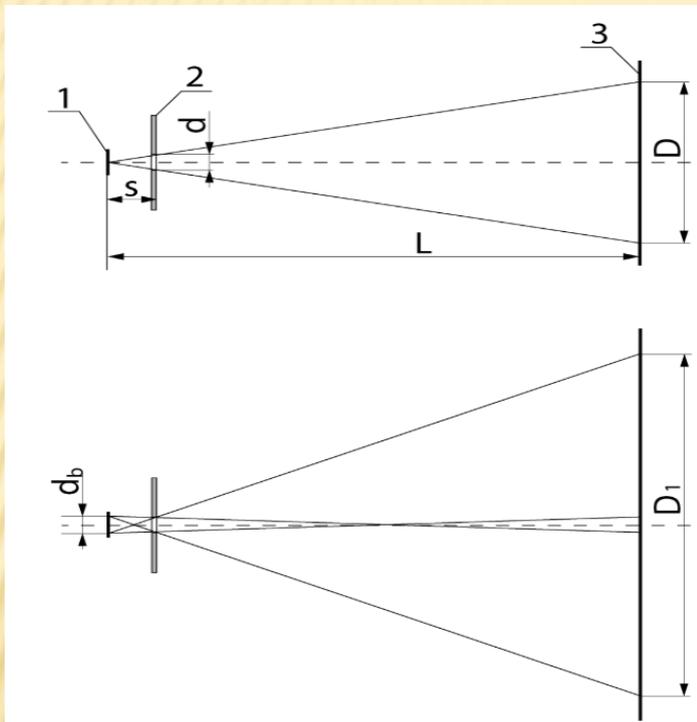
Требования: максимум не более 0,2%, в среднем не более 0,1%

Утечки в плоскости пациента

Точка	R(радиус)	Угол (градус)	Ср.мощность дозы Гр/мин	Утечка, %
1	0,80	0,0	0,0027	0,027%
2	1,60	0,0	недоступно	недоступно
3	1,20	22,5	0,0006	0,006%
4	0,80	45,0	0,0026	0,026%
5	1,60	45,0	0,0004	0,004%
6	1,20	67,5	0,0013	0,013%
7	0,80	90,0	0,0021	0,021%
8	1,60	90,0	0,0008	0,008%
9	1,20	112,5	0,0012	0,012%
10	0,80	135,0	0,0023	0,023%
11	1,60	135,0	0,0006	0,006%
12	1,20	157,5	0,0015	0,015%
13	0,80	180,0	0,0026	0,026%
14	1,60	180,0	0,0008	0,008%
15	1,20	202,5	0,0016	0,016%
16	0,80	225,0	0,0018	0,018%
17	1,60	225,0	0,0007	0,007%
18	1,20	247,5	0,0012	0,012%
19	0,80	270,0	0,0024	0,024%
20	1,60	270,0	0,0009	0,009%
21	1,20	292,5	0,0011	0,011%
22	0,80	315,0	0,0027	0,027%
23	1,60	315,0	0,0005	0,005%

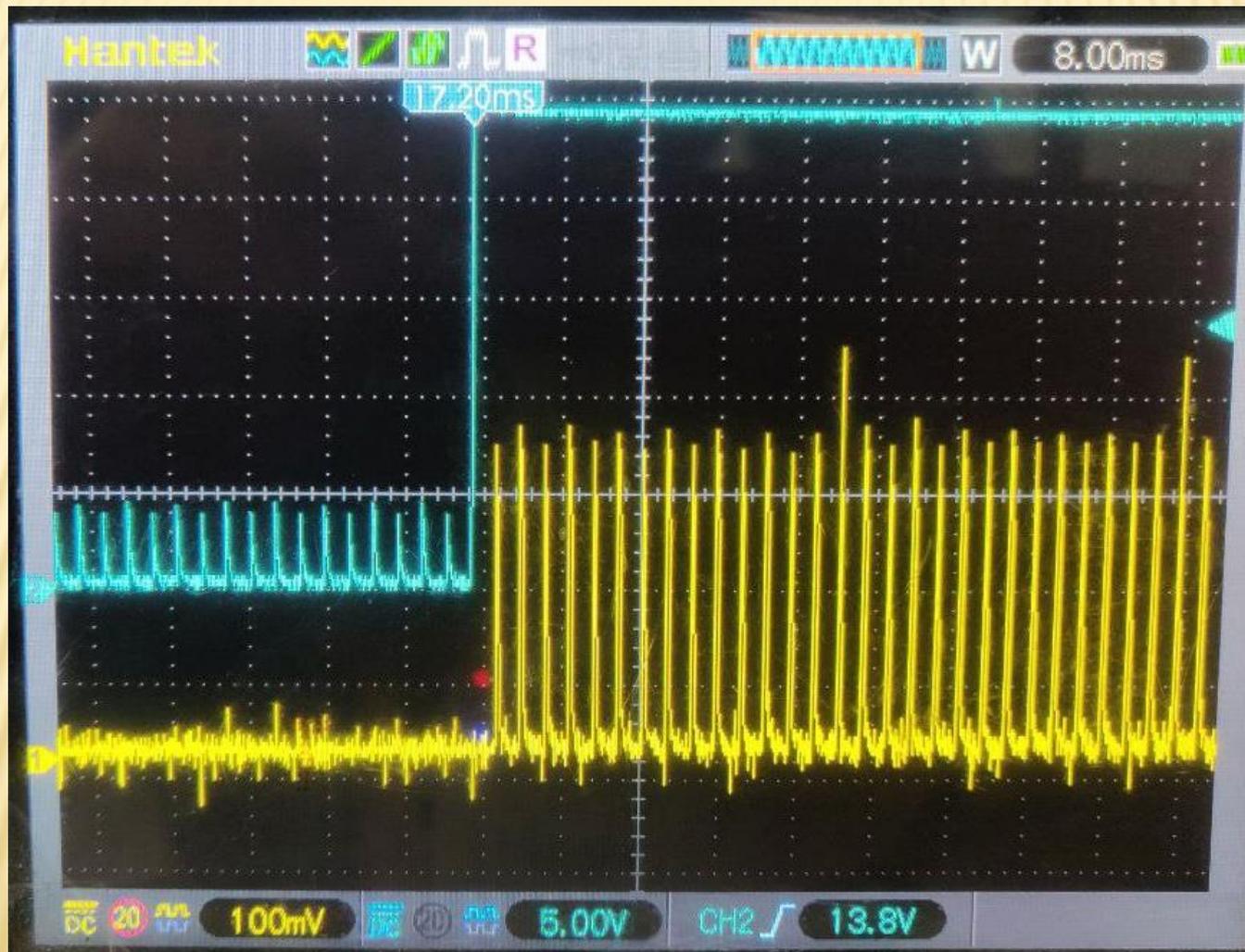
Спасибо за внимание!

Размер фокусного пятна



$$d_b = \frac{\frac{s}{L}D_1 - d}{1 - \frac{s}{L}} = 0,95 \text{ мм}$$

Время выхода излучения на стабильный режим



Время прекращения излучения

