



**ATOMTECH**<sup>®</sup>

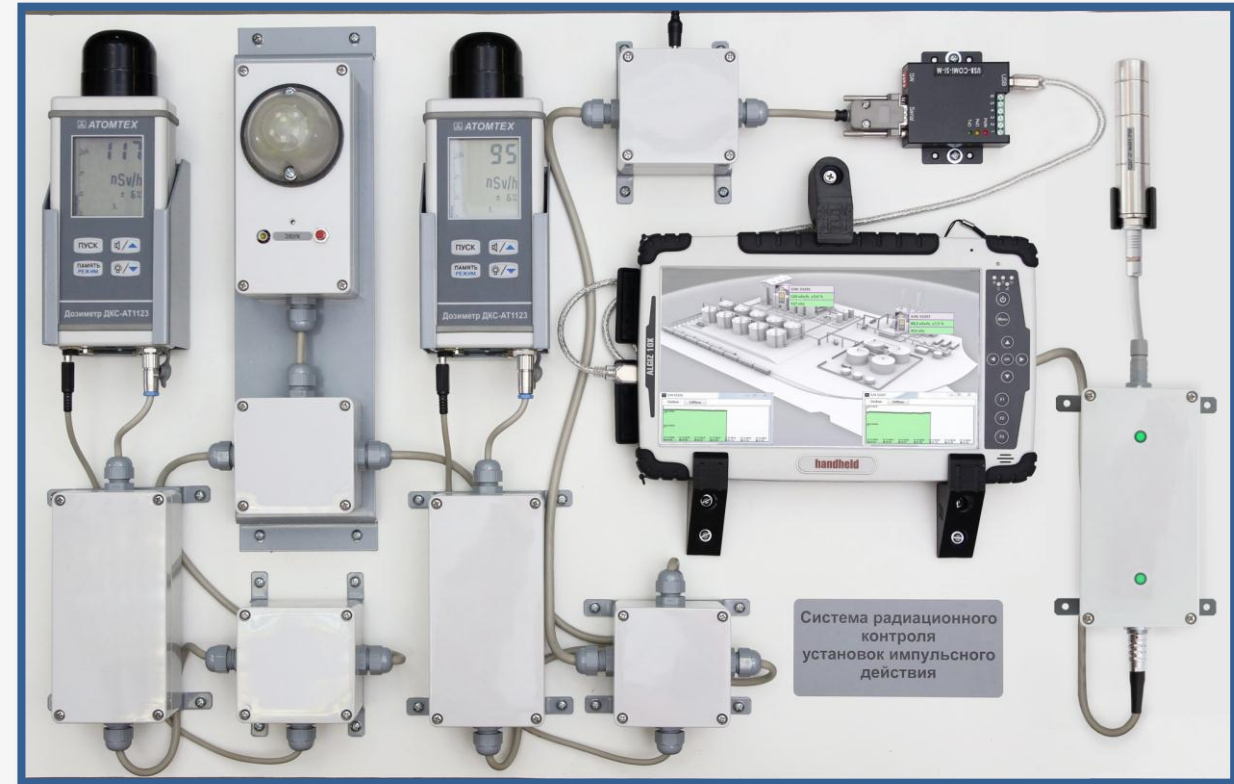
*ПРИБОРЫ И ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ЯДЕРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ  
И РАДИАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ*

**XVI-е Международное совещание  
«Проблемы прикладной спектрометрии и радиометрии»  
им. В.Н. Даниленко  
г. Москва**

**ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ  
МЕДИЦИНСКИХ ЛИНЕЙНЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОНОВ  
В КАЧЕСТВЕ ИСТОЧНИКА ПОЛЯ ИМПУЛЬСНОГО ФОТОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ  
ДЛЯ КАЛИБРОВКИ ДОЗИМЕТРИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

М.А. Богдан, А.Ю. Тараев, А.А. Загороднюк, С.В. Лазаренко  
Научно-производственное унитарное предприятие «АТОМТЕХ»  
Республика Беларусь, г. Минск

- Рост потребности дозиметрического оборудования для работы в полях импульсного излучения
- Необходимость калибровки дозиметрического оборудования в полях импульсного излучения
- Отсутствие исчерпывающих методик, описывающих характеристики эталонных полей импульсного фотонного излучения



**Система радиационного контроля импульсных установок в составе с ДКС-АТ1123 и УДКГ-37**



Основные характеристики импульсного излучения:

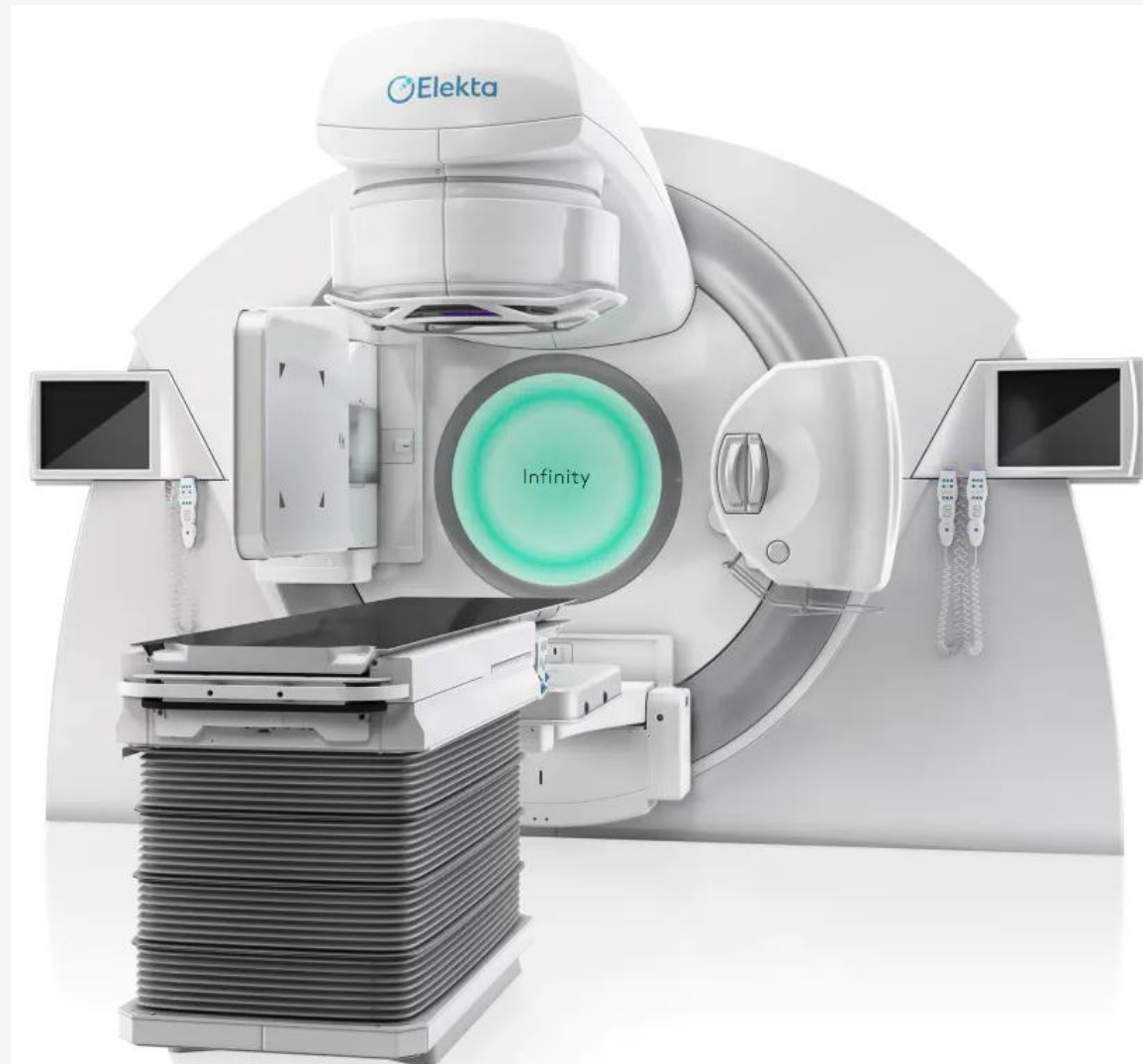
- Вид излучения
- Диапазон энергии
- Длительность импульса
- Частота следования импульсов
- Доза и мощность дозы в импульсе



№	Установки импульсного действия	Минимальная длительность импульса	Максимальная мощность дозы в импульсе	Максимальная доза в импульсе
1	Ангиографы, медицинские рентгеновские аппараты	2 мс	10 Зв/ч	0,1 мЗв
2	<b>Линейные ускорители электронов (LINAC)</b>	<b>3 мкс</b>	<b>250 000 Зв/ч</b> (на расстоянии 1 м)	<b>20 мЗв</b> (на расстоянии 1 м)
3	Ускорители для неразрушающего контроля	3,5 мкс	500 Зв/ч (на расстоянии 1 м)	0,5 мкЗв (на расстоянии 1 м)
4	Рентгеновские трубки для неразрушающего контроля	50 нс	300 000 Зв/ч (на расстоянии 1 м)	единицы мкЗв (на расстоянии 1 м)

Основные преимущества медицинских линейных ускорителей электронов (ЛУЭ):

- Стабильность рабочих характеристик
- Известность параметров ЛУЭ, заявляемых производителями
- Возможность регулировки параметров излучения
- Возможность измерения параметров излучения
- Доступность установок в медицинских учреждениях





**ATOMTEX**<sup>®</sup>

Приборы и технологии для ядерных измерений и радиационного контроля

# Линейные ускорители электронов

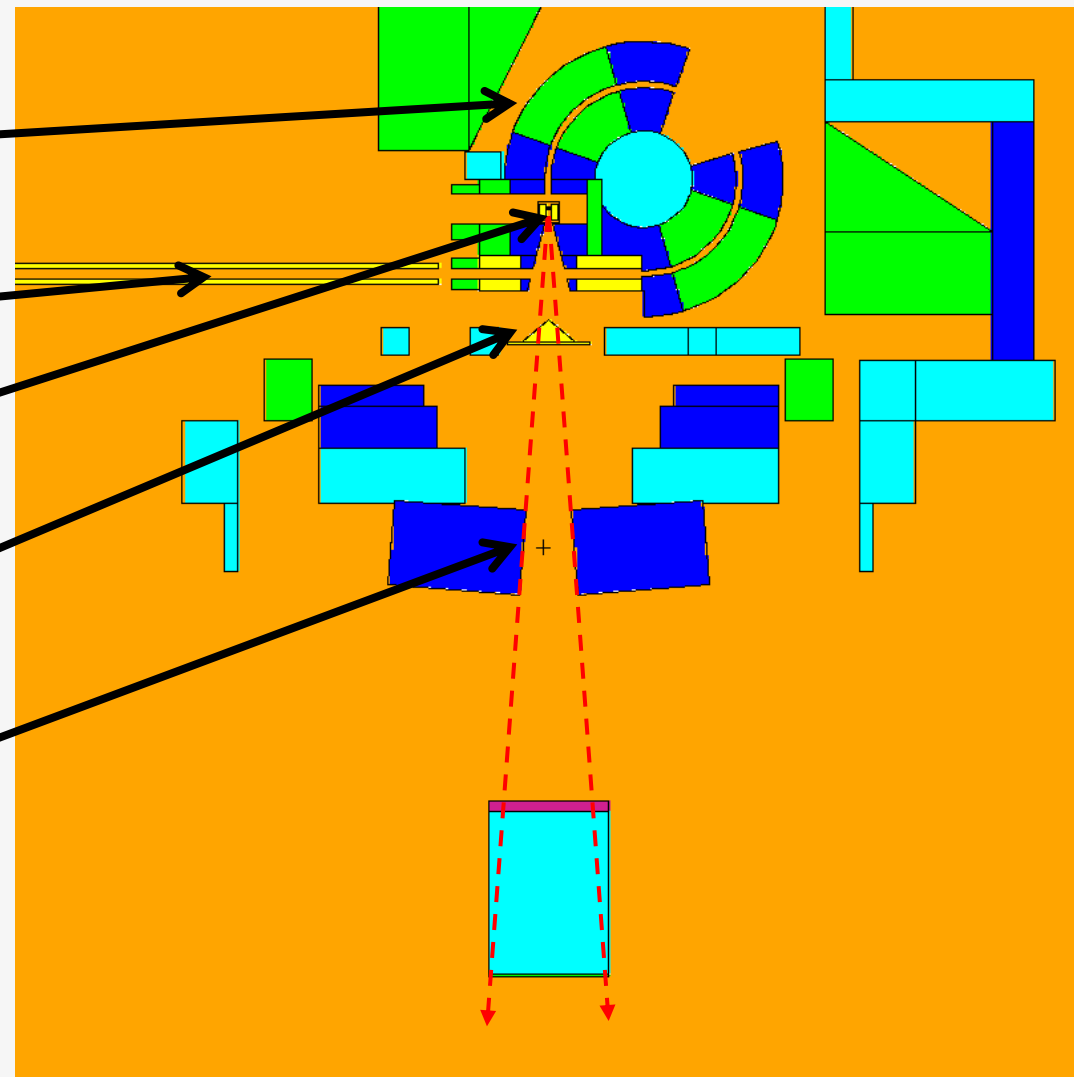
Направляющий магнит

Электронная пушка

Мишень

Сглаживающий фильтр

Вторичный коллиматор



**Параметр МВ (мегавольты)** – выбор номинального значения ускорительного напряжения первичного пучка и сглаживающего фильтра;

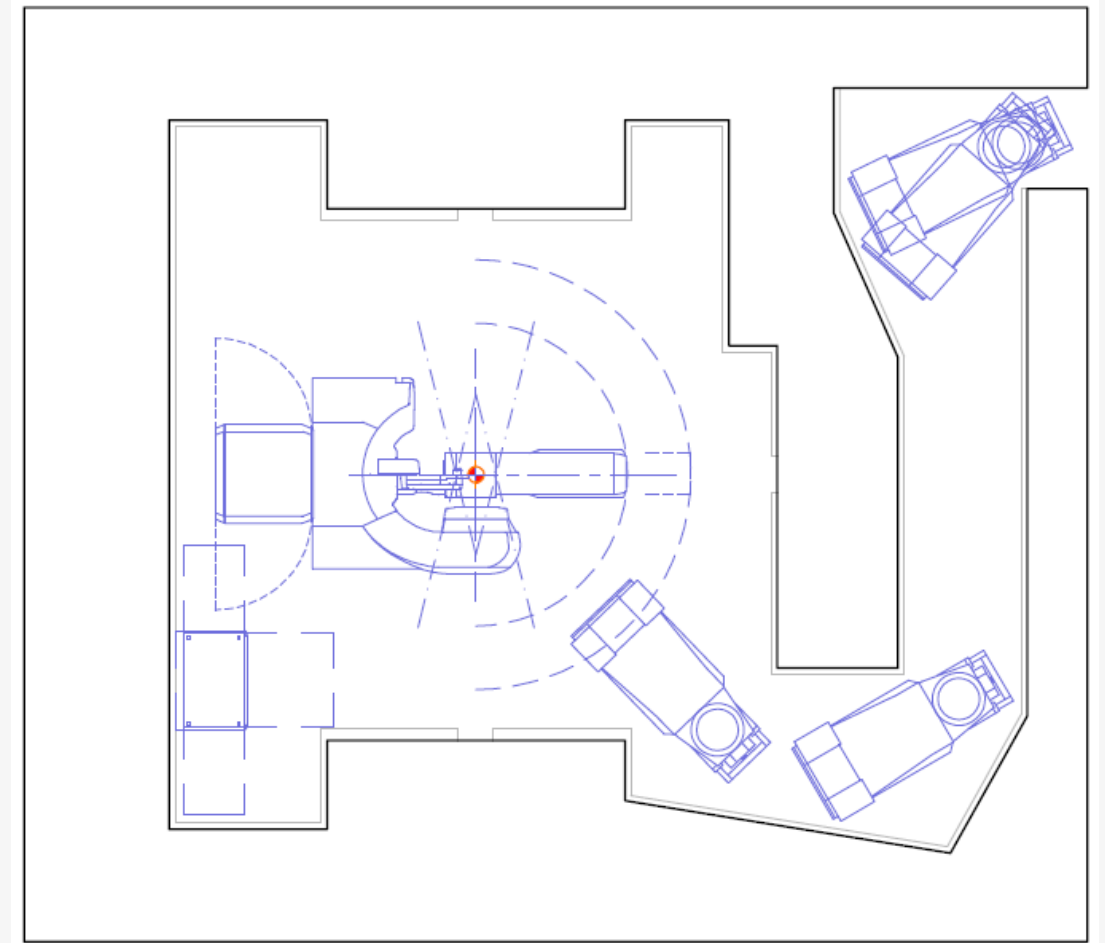
**Параметр МЕ (мониторные единицы)** – выбор отпускаемой мощности дозы в минуту.

1 Мониторная единица - доза, поглощенная на глубине 10 см от поверхности водного фантома, передняя плоскость которого расположена на расстоянии 1 метр от излучателя при его облучении излучением ЛУЭ, выраженная в сантигреях (сГр) и равная 1 сГр.

№	Исследуемые линейные ускорители	Параметр МВ	Параметр МЕ
1	Elekta Infinity	6, 10, 15	40-640
2	Varian VitalBeam	6, 10, 15	5-600
3	Varian Clinac iX	6, 10, 15, 18	100-600

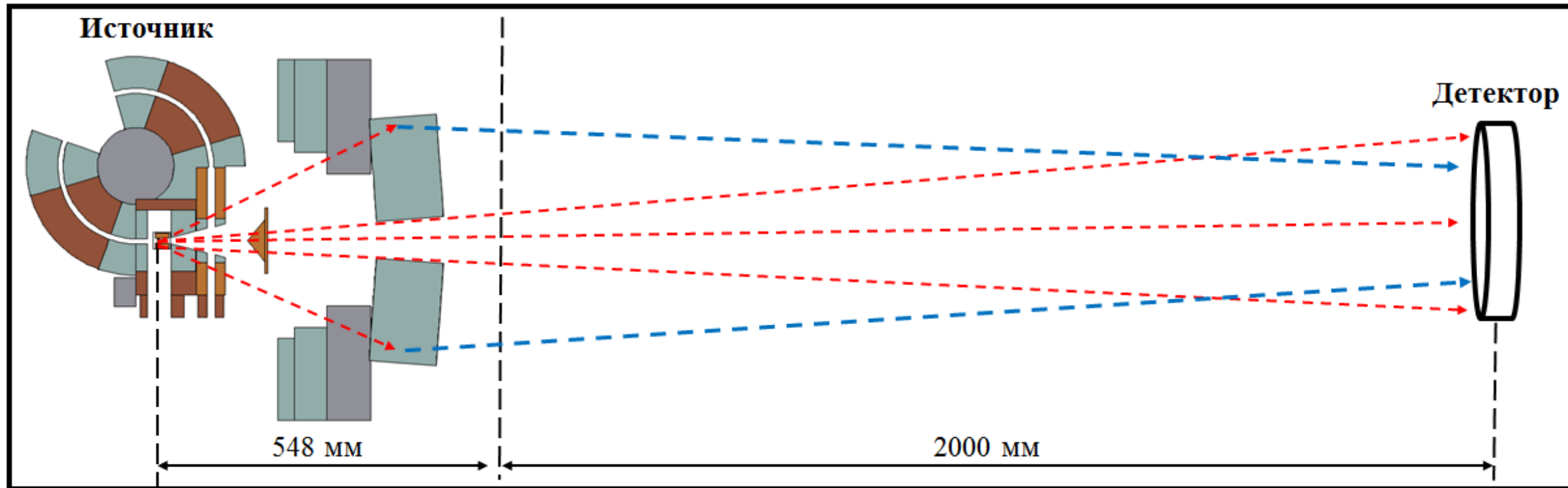
## Исследуемые параметры импульсного излучения ЛУЭ в различных режимах работы:

- Средняя энергия излучения
- Длительность единичного импульса
- Частота следования импульсов
- Мощность дозы в единичном импульсе



Типовой план операторской для  
медицинского ЛУЭ

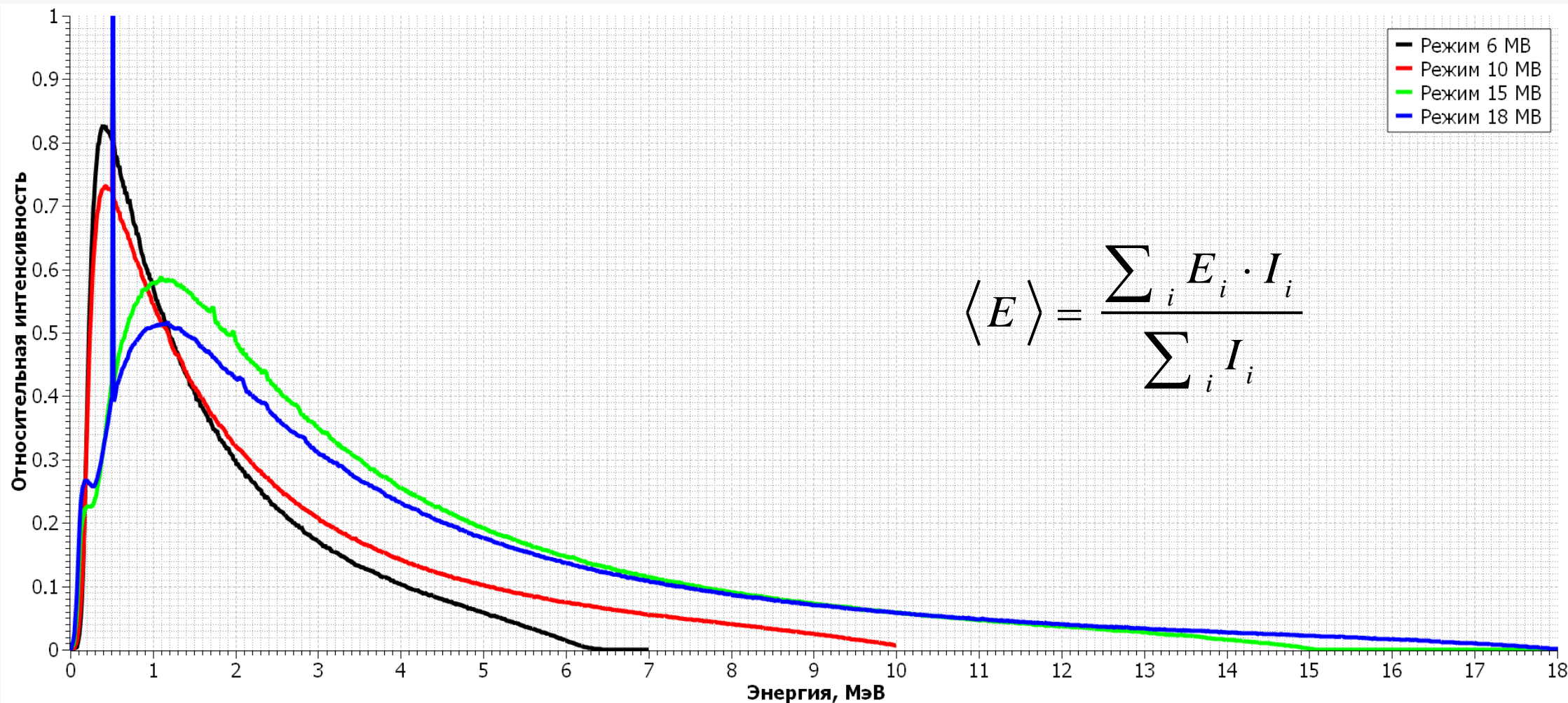
## Монте-Карло моделирование в компьютерной программе Fluka



Типовая модель излучателя ЛУЭ



## Монте-Карло моделирование в компьютерной программе Флука



Спектр фотонного излучения в разных режимах работы ЛУЭ

## Верификация Монте-Карло модели по параметрам:

$z_{\max}$  – положение максимума поглощенной дозы в водном фантоме

$d_{10}$  – относительная величина поглощенной дозы на глубине 10 см в водном фантоме

Модель ЛУЭ	Режим работы							
	6 МВ		10 МВ		15 МВ		18 МВ	
	$z_{\max}$ , см	$d_{10}$ , %	$z_{\max}$ , см	$d_{10}$ , %	$z_{\max}$ , см	$d_{10}$ , %	$z_{\max}$ , см	$d_{10}$ , %
VitalBeam	1,60	67,0	2,40	74,1	2,90	77,4	3,30	80,2
	±0,15	±1,0	±0,15	±1,0	±0,15	±1,0	±0,15	±1,0
Clinac iX	1,60	67,2	2,40	74,1	2,90	77,4	3,30	80,2
	±0,15	±1,0	±0,15	±1,0	±0,15	±1,0	±0,15	±1,0
Elekta Infinity	1,50	67,5	2,10	73,0	2,60	76,5	3,00	78,5
	±0,15	±1,0	±0,15	±1,0	±0,15	±1,0	±0,15	±1,0
Монте-Карло Модель	1,62	66,0	2,20	72,0	2,70	76,5	3,10	80,0
	±0,10	±2,0	±0,15	±2,0	±0,15	±2,0	±0,20	±2,0

Сопоставление паспортных значений  $z_{\max}$  и  $d_{10}$  ЛУЭ с расчетными данными



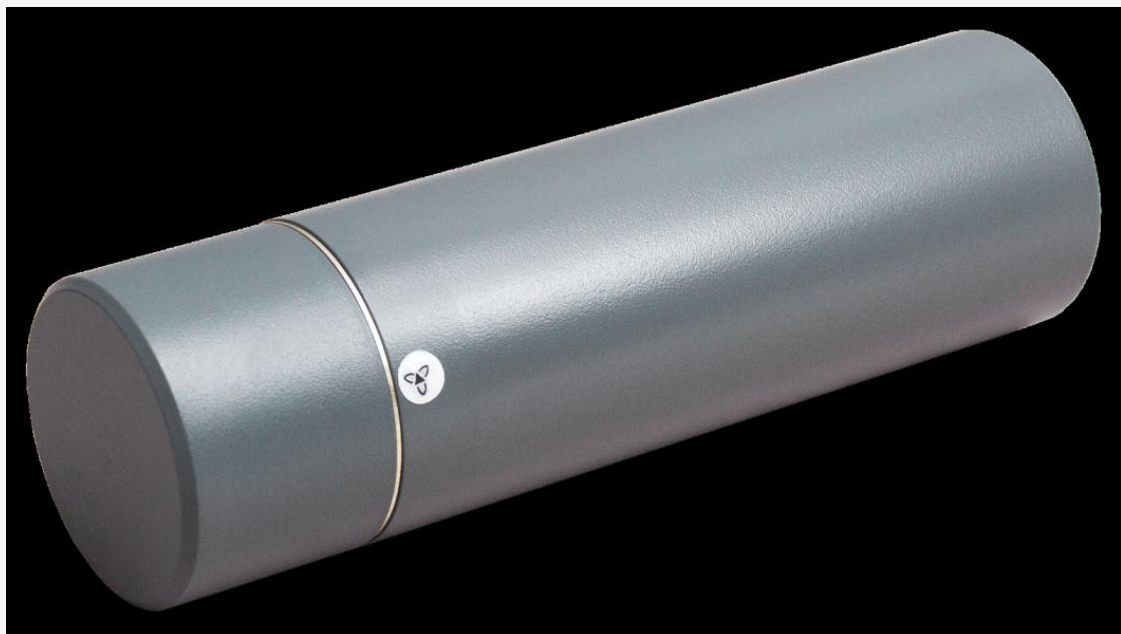
## Результат расчета средней энергии фотонного излучения ЛУЭ, МэВ $\pm 3\sigma$

Параметр 6 МВ	Параметр 10 МВ	Параметр 15 МВ	Параметр 18 МВ
1,712 $\pm$ 26	2,508 $\pm$ 30	3,823 $\pm$ 39	4,217 $\pm$ 44

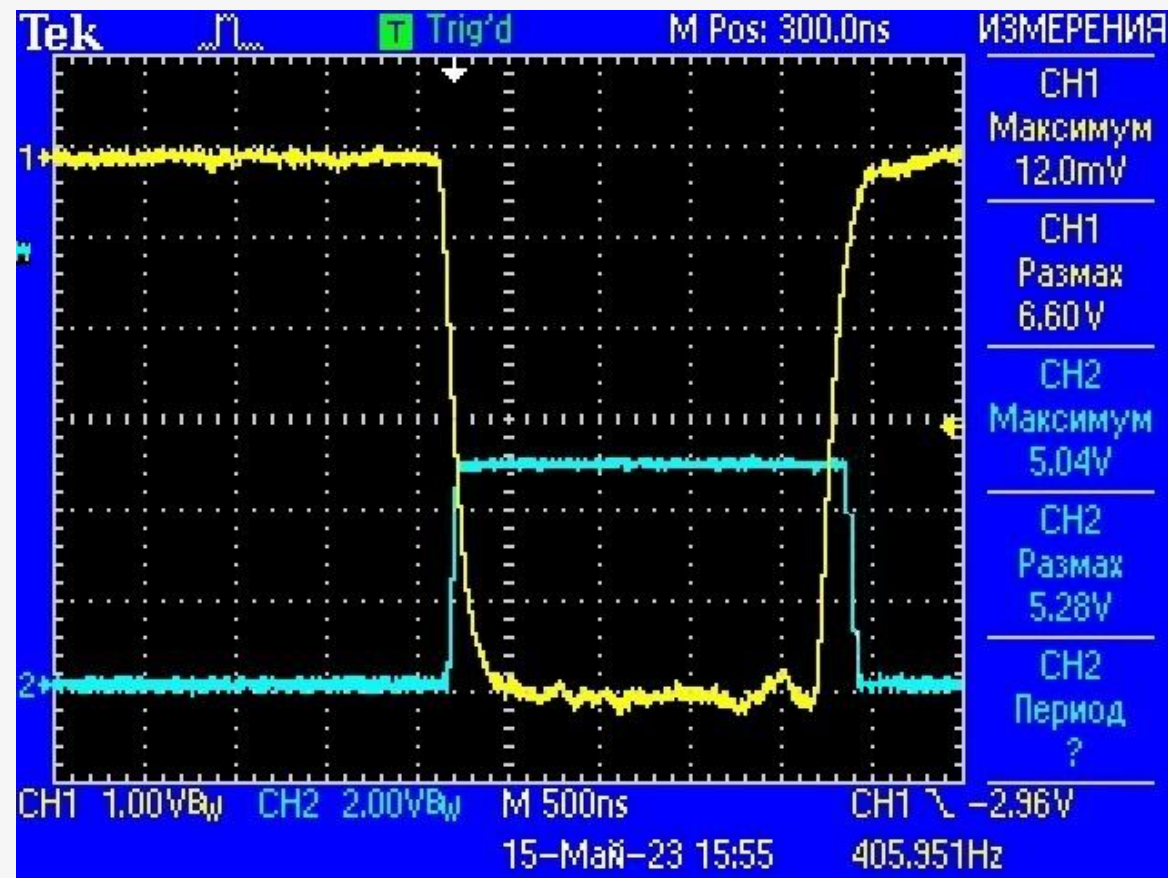
Средняя энергия фотонного излучения ЛУЭ необходима для определения коэффициента перевода кермы в амбиентный эквивалент дозы согласно **ISO 4037-3:2019**

В энергетическом интервале **1,5 МэВ – 4,5 МэВ**  
различие в значениях коэффициентов не превышает **5%**

## БДКГ-206



Возможность измерения:  
частоты импульсов **не менее 5 Гц**;  
длительности импульсов **не менее 500 нс**.



Оциллограмма  
измеряемого импульса (желтый канал) и  
полученного сигнала с компаратора (синий канал)

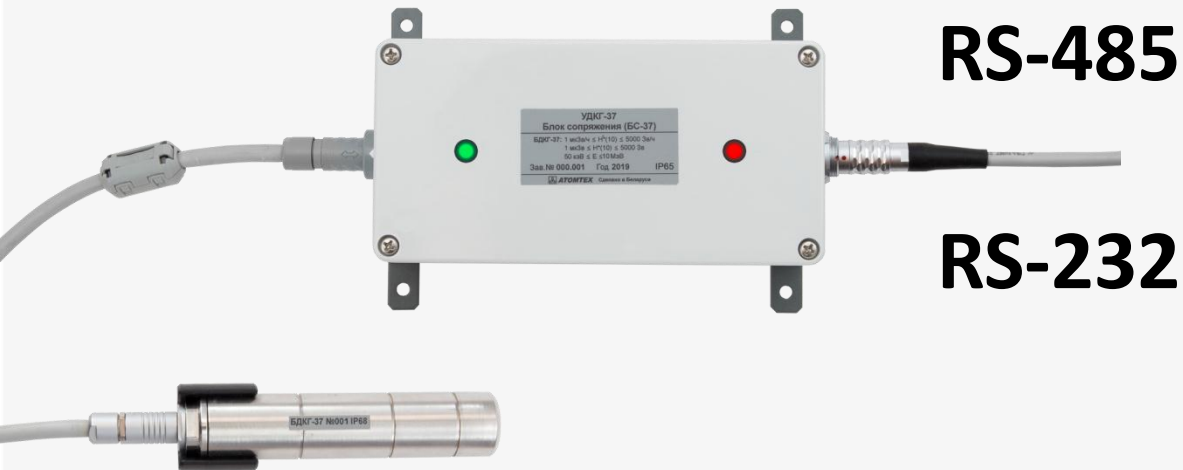


**ATOMTEX**<sup>®</sup>

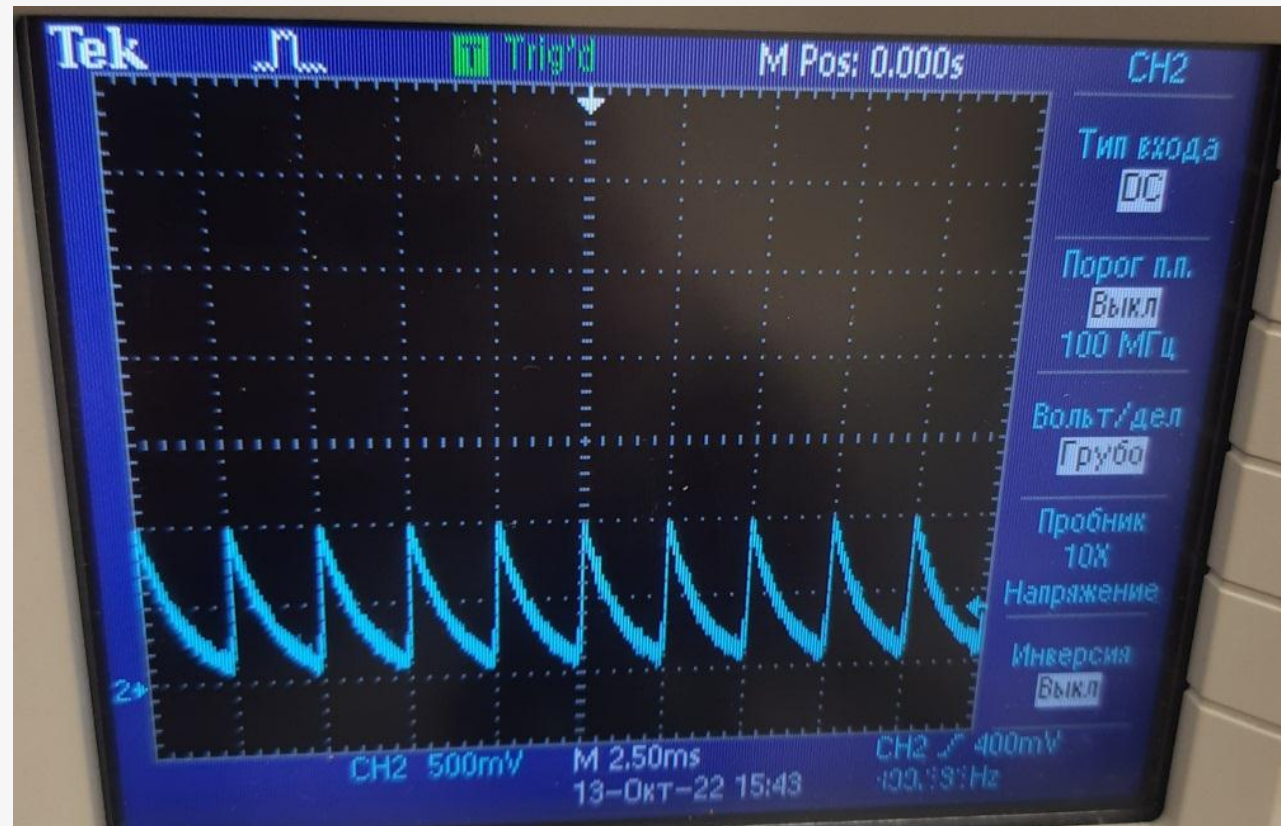
Приборы и технологии для ядерных измерений и радиационного контроля

## Измерение частоты следования импульсов

**УДКГ-37**



Возможность измерения:  
частоты импульсов **не менее 10 Гц**;  
длительности импульсов **не менее 4 мс**.



Осциллограмма частоты следования импульсов  
ЛУЭ Electa Infinity в режиме работы 6МВ, 640 МЕ/мин,  
снятая с помощью устройства детектирования  
гамма-излучения УДКГ-37



Результаты измерения длительности импульса и частоты следования импульсов для ЛУЭ

## Elekta Infinity

Параметр ME	Частота следования импульсов, Гц		
	6 МВ Длительность импульса 1,8±0,2 мкс	10 МВ Длительность импульса 2,1±0,2 мкс	15 МВ Длительность импульса 2,2±0,2 мкс
40	26,5±0,2	12,0±0,1	12,3±0,1
80	51,5±0,5	24,0±0,2	24,5±0,2
160	101,5±1,0	48,0±0,5	49,5±0,5
320	203,0±2,0	96,5±1,0	99,0±1,0
640	405,0±4,0	194±2,0	198,5±2,0

## Varian VitalBeam, Varian Clinac iX

Параметр ME	Частота следования импульсов, Гц		
	6 МВ и 10 МВ (VitalBeam) Длительность импульса 3,3±0,3 мкс	15 МВ (VitalBeam) Длительность импульса 3,4±0,3 мкс	18 МВ (Clinac iX) Длительность импульса 3,4±0,3 мкс
5	3,0±0,1	-	-
10	6,0±0,1	-	-
15	9±0,1	-	-
20	12,0±0,1	6,0±0,1	-
40	23,0±0,2	12,0±0,1	-
60	36,0±0,4	18,0±0,2	-
100	60,0±0,5	30,0±0,3	29,7± 0,3
200	119,0±1,0	60,0±0,5	59,7±0,5
300	179,0±1,5	89,0±1,0	89,6±1,0
400	239,0±2,0	119,0±1,0	119,3±1,0
500	320,0±3,0	149±1,5	149±1,5
600	358,0±4,0	179,0±1,5	179±1,5

**параметр ME задает кратность частоты следования импульсов**

$$\dot{H}_{ИМП}^* (10) = \frac{\dot{H}^* (10)}{f \cdot \tau \cdot 3600}$$

$$\dot{H}^* (10) = K_{AIR} \cdot \alpha(E) \cdot \gamma(E)$$

$\dot{H}^* (10)$  – средняя мощность амбиентного эквивалента дозы, генерируемая ЛУЭ в точке измерения, Зв/ч;

$f$  – частота следования импульсов, Гц;

$\tau$  – длительность импульса, с.

$K_{AIR}$  – мощность кермы в воздухе, Гр/ч;

$\alpha(E)$  – коэффициент перевода кермы в воздухе в амбиентный эквивалент дозы, Зв/Гр;

$\gamma(E)$  – калибровочный коэффициент ИК;

$E$  – средняя энергия фотонного излучения, МэВ

## ДКС-АТ5350/1

### с ионизационными камерами

### ТМ32002 и ТМ30010 + оболочка из ППМА



ЛУЭ	Elekta Infinity						Varian VitalBeam, Varian Clinac iX							
	6		10		15		6		10		15		18	
Параметр МВ	6		10		15		6		10		15		18	
Параметр МЕ	40	640	40	640	40	640	60	600	60	600	60	600	100	600
Средняя мощность дозы, Зв/ч	3,59	61,3	3,17	50,3	3,12	49,4	6,17	61,7	6,33	63,3	6,13	61,4	10	60,4
Мощность дозы в импульсе, Зв/с	22,4		41,1		33,7		14,7		14,8		28,6		27,5	

**параметра МВ** – задает **Мощность дозы в импульсе** на фиксированном расстоянии 2 м

**параметра МЕ** – задает интенсивность излучения, т.е. **среднюю Мощность дозы**



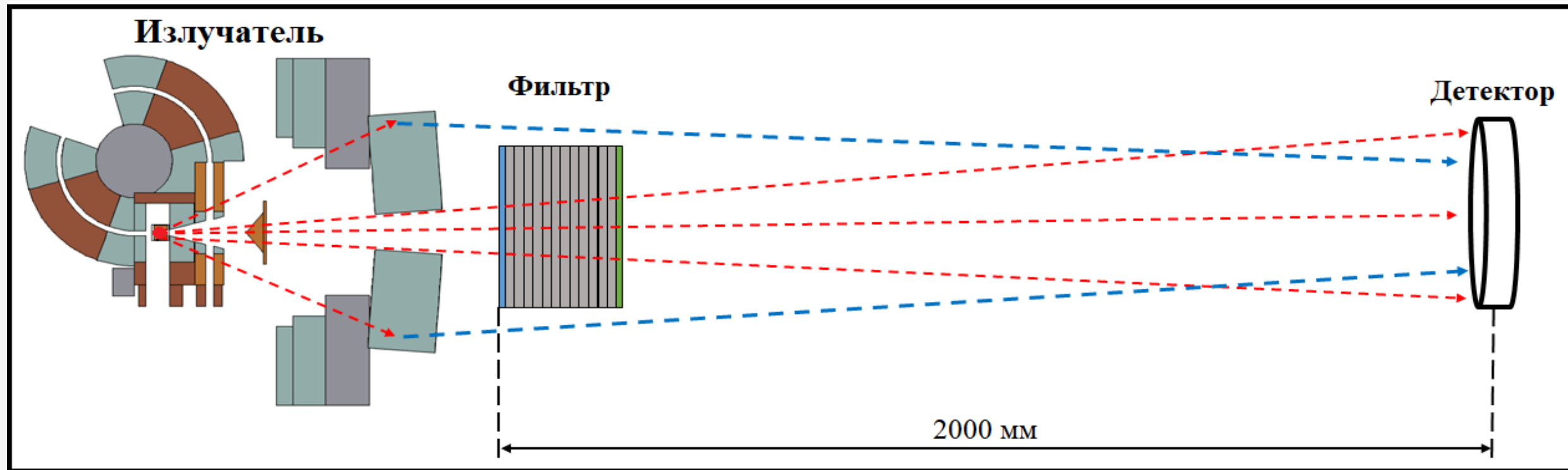
Исследованный параметр ИИ	ЛУЭ	ДКС-АТ1123	УДКГ-37, ДКГ-АТ2533
Средняя энергия излучения	1,7 МэВ – 4,2 МэВ	15 кэВ – 10 МэВ	50 кэВ – 10 МэВ
Длительность единичного импульса	1,8-3,4 мкс	> 10 нс	> 10 нс
Частота следования импульсов	3-400 Гц	> 10 Гц	> 20 Гц
Мощность дозы в единичном импульсе	14,7-41,1 Зв/с	<b>&lt; 1,3 Зв/с</b>	< 5000 Зв/с
Средняя мощность дозы	3,59-63,3 Зв/ч	0,1 мкЗв/ч- 10 Зв/ч	100 мЗв/ч – 5000 Зв/ч

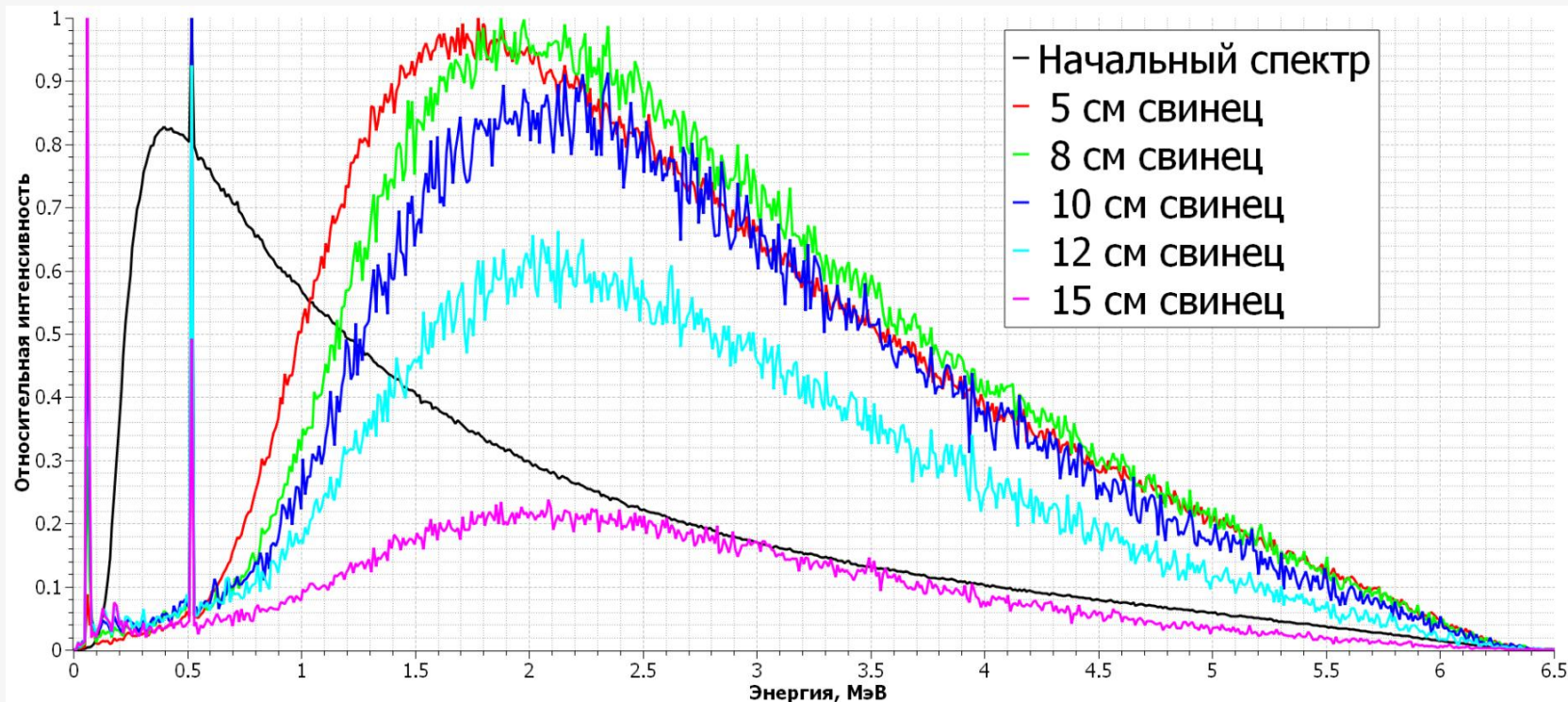
**ЛУЭ ВОЗМОЖНО** использовать в качестве источника поля импульсного фотонного излучения для калибровки дозиметрического оборудования, работоспособного в полях с **ВЫСОКОЙ** мощностью дозы в импульсе





## Расчет и моделирование свинцового фильтра





Влияние толщины фильтра на спектр фотонного излучения для режима 18 МВ

Толщина свинца в фильтре, см	Средняя энергия рентгеновского излучения ЛУЭ, МэВ $\pm 3\sigma$			
	Режим 6 МВ	Режим 10 МВ	Режим 15 МВ	Режим 18 МВ
0	1,712 $\pm$ 26	2,508 $\pm$ 30	3,823 $\pm$ 39	4,217 $\pm$ 44
5	2,643 $\pm$ 167	3,562 $\pm$ 123	4,110 $\pm$ 127	4,355 $\pm$ 139
8	2,730 $\pm$ 270	3,592 $\pm$ 220	3,907 $\pm$ 201	4,072 $\pm$ 195
10	2,727 $\pm$ 434	3,534 $\pm$ 373	3,727 $\pm$ 320	3,852 $\pm$ 281
12	2,686 $\pm$ 449	3,376 $\pm$ 357	3,489 $\pm$ 323	3,586 $\pm$ 273
15	2,486 $\pm$ 470	2,872 $\pm$ 347	2,939 $\pm$ 295	3,084 $\pm$ 231

1. Средняя энергия определяется интенсивностью взаимодействия со свинцом левого и правого края спектра – происходит равномерное сжатие спектра
2. Влияние фотонного излучения, рассеянного на вторичном коллиматоре с ростом толщины фильтра – стремление средней энергии к постоянной величине



**ATOMTEX**<sup>®</sup>

Приборы и технологии для ядерных измерений и радиационного контроля

## Определение кермы в воздухе на ЛУЭ



ЛУЭ		Elekta Infinity						Varian VitalBeam, Varian Clinac iX							
Параметр МВ		6		10		15		6		10		15		18	
Параметр МЕ		40	640	40	640	40	640	60	600	60	600	60	600	100	600
Средняя мощность дозы, Зв/ч	0	3,59	61,3	3,17	50,3	3,12	49,4	6,17	61,7	6,33	63,3	6,13	61,4	10	60,4
	5	0,23	3,85	0,207	3,19	0,212	3,33	0,359	3,46	0,422	4,11	0,422	4,06	0,654	3,92
	8	0,055	0,911	0,049	0,751	0,050	0,789	0,085	0,849	0,100	0,998	0,100	0,994	0,157	0,934
	10	0,021	0,361	0,020	0,310	0,020	0,319	0,034	0,340	0,039	0,399	0,039	0,393	0,063	0,376
	12	0,0087	0,146	0,0082	0,126	0,0083	0,130	0,0143	0,142	0,0162	0,161	0,0162	0,160	0,0273	0,161
	15	0,0026	0,043	0,0026	0,040	0,0026	0,042	0,0049	0,049	0,0052	0,49	0,052	0,052	0,0105	0,063
Мощность дозы в импульсе, Зв/с	0	22,4		41,1		33,7		14,7		14,8		28,6		27,5	
	5	1,418		2,395		2,252		<b>0,845</b>		<b>0,996</b>		1,907		1,789	
	8	<b>0,337</b>		<b>0,573</b>		<b>0,536</b>		<b>0,203</b>		<b>0,239</b>		<b>0,458</b>		<b>0,428</b>	
	10	<b>0,132</b>		<b>0,234</b>		<b>0,216</b>		<b>0,081</b>		<b>0,094</b>		<b>0,181</b>		<b>0,172</b>	
	12	<b>0,054</b>		<b>0,094</b>		<b>0,087</b>		<b>0,033</b>		<b>0,037</b>		<b>0,073</b>		<b>0,074</b>	
	15	<b>0,016</b>		<b>0,029</b>		<b>0,028</b>		<b>0,012</b>		<b>0,011</b>		<b>0,024</b>		<b>0,028</b>	

Исследуемый параметр ИИ	ЛУЭ с набором фильтров толщиной от 8 см	ДКС-АТ1123	УДКГ-37, ДКГ-АТ2533
Средняя энергия излучения	2,4 МэВ – 4,2 МэВ	15 кэВ – 10 МэВ	50 кэВ – 10 МэВ
Длительность единичного импульса	1,8-3,4 мкс	> 10 нс	> 10 нс
Частота следования импульсов	3-400 Гц	> 10 Гц	> 20 Гц
Мощность дозы в единичном импульсе	<b>11 мЗв/с – 0,57 Зв/с</b>	< 1,3 Зв/с	< 5000 Зв/с
Средняя мощность дозы	<b>2,6 мЗв/ч - 0,99 Зв/ч</b>	0,1 мкЗв/ч- 10 Зв/ч	100 мЗв/ч – 5000 Зв/ч

ЛУЭ с набором фильтров толщиной от 8 см **ВОЗМОЖНО** использовать в качестве источника поля импульсного фотонного излучения для калибровки дозиметрического оборудования, работоспособного в полях с **НИЗКОЙ** мощностью дозы в импульсе



## **Особенности полей импульсного излучения линейного ускорителя для калибровки дозиметрического оборудования**

- Характеристики поля ограничиваются режимами работы ЛУЭ, т.е. выбором параметров **МВ** (мощность дозы в импульсе) и **МЕ** (интенсивность излучения регулируется частотой), при этом длительность импульса фиксирована.
- Измерения характеристик поля необходимо проводить для каждого производителя.
- Ограниченность возможности регулировки мощности дозы в импульсе за счет изменения расстояния ввиду особенностей размещения медицинских ЛУЭ.
- Необходимость применения дополнительной фильтрации поля для ограничения мощности дозы в импульсе.

**Возможность эффективного применения ЛУЭ  
в качестве источника поля импульсного излучения  
в широком параметрическом диапазоне**



**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!**

**Республика Беларусь  
220005, Минск, ул. Гикало, 5  
Тел./Факс: +375-17-270-81-42**

**[info@atomtex.com](mailto:info@atomtex.com)  
[www.atomtex.com](http://www.atomtex.com)**