

XI Черенковские чтения

«Новые методы в экспериментальной ядерной физике»

ФОТОЯДЕРНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОБНАРУЖЕНИЯ СКРЫТЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

Е.Е.Журавлев, А.И.Карев, С.Н.Черепня (ФИАН)

Л.З.Джилавян (ИЯИ РАН)

В.Б.Лопатко (ГНЦ РФ ТРИНИТИ)

В.В.Ханкин, В.И.Шведун (НИИ ЯФ МГУ)

Москва, ФИАН

17 апреля 2018 г.

Актуальность

Разработки новых технологий
поиска ВВ

СОЦИАЛЬНОЗНАЧИМЫЕ ЗАДАЧИ, РЕШАЕМЫЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРИБОРОВ ПОИСКА СВВ



Основные требования к средствам досмотра багажа авиапассажиров:

US Department of Transportation
Agency

European Aviation Safety

1. Должны обеспечивать досмотр 100% багажа;
2. Должны обеспечивать высокую надежность обнаружения ВВ;
3. Время для досмотра должно составлять несколько секунд.

Существующие технологии досмотра багажа:

1. Рентгеновские интроскопы
2. Специально обученные собаки
3. Детекторы следов ВВ (микрочастицы и пары)
4. ЯКР-детекторы
5. Нейтронные технологии
6. Метод быстрых меченых нейтронов

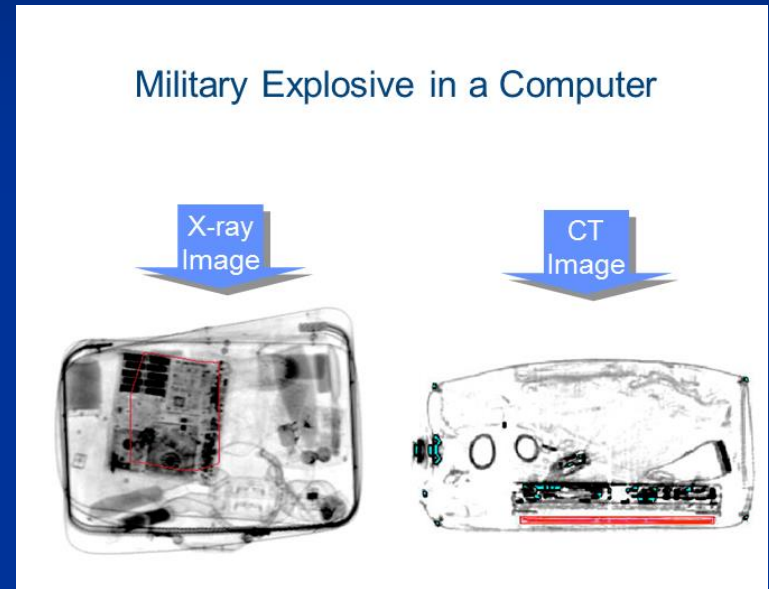
СОВРЕМЕННЫЕ ИНТРОСКОПЫ ПОЗВОЛЯЮТ:

1. Построить 3D – изображение объекта;
2. Оценить его состав;
3. Оценить плотность;
- 4 Оценить массу объекта.



CTX9800DSi (Morpho Detection Inc.)
до 1800 ед.баг./ч. \$1.5М.

В мире более 2000 CTX томографов



ТОМОГРАФ НЕ РЕАГИРУЕТ НА ВВ. Надежность обнаружения не определена.
Решение принимает оператор.

В результате запрещено провозить жидкость и сложная электроника
досматривается вручную. **НУЖНЫ НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

ГУМАНИТАРНОЕ РАЗМИНИРОВАНИЕ

В Чечне от мин пострадали 3000 человек (800 детей)
МО РФ разминировало 23.000 га.

Стандарты ООН для гуманитарного разминирования
– удаление 40 г. ВВ с глубины до 20 см с вероятностью 99.6%

Методики поиска и уничтожения мин:

ручной метод

индукционные приборы

собаки

бойковые тралы

подповерхностные радары

ЯКР –детекторы

тепловизоры

нейтронные технологии

Новая техника саперов



Дистанционно управляемый
бойковый трал



Машина дистанционного
разминирования «Листва»



Защитный костюм сапера



Старая ручная технология

ФОТОЯДЕРНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ВВ

ФОТОЯДЕРНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПОИСКА ВВ

$^{14}\text{N}(\gamma, 2n)^{12}\text{N}$ порог 30,6 МэВ

распад $^{12}\text{N} \Rightarrow ^{12}\text{C} + e^+ + \nu$ ($t_{1/2}=11.0$ мс) $E_{\gamma}(\text{вых})$ до 17 МэВ

$^{13}\text{C}(\gamma, p)^{12}\text{B}$ порог 17,5 МэВ

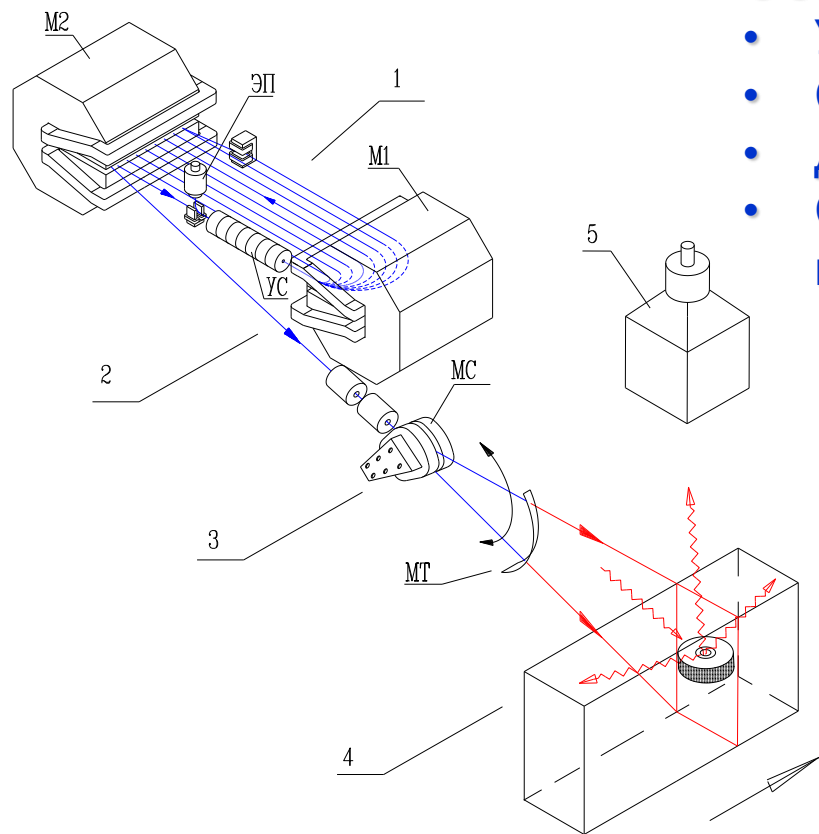
распад $^{12}\text{B} \Rightarrow ^{12}\text{C} + e^- + \nu$ ($t_{1/2}=20.2$ мс) $E_{\gamma}(\text{вых})$ до 13 МэВ

$^{13}\text{N}(\gamma, 2p)^{12}\text{B}$ порог 25.1 МэВ

распад $^{12}\text{B} \Rightarrow ^{12}\text{C} + e^- + \nu$ ($t_{1/2}=20$ мс) $E_{\gamma}(\text{вых})$ до 13 МэВ

Тротил	$\text{CH}_3\text{C}_6\text{H}_2(\text{NO}_2)_3$
Тетрил	$\text{C}_6\text{H}_2(\text{NO}_2)_4\text{NCH}_3$
Гексоген	$\text{N}_3(\text{NO}_2)_3(\text{CH}_2)_3$
Октоген	$\text{N}_4(\text{NO}_2)_4(\text{CH}_2)_4$
ТЭН	$\text{C}_5\text{H}_8\text{N}_4\text{O}_{12}$

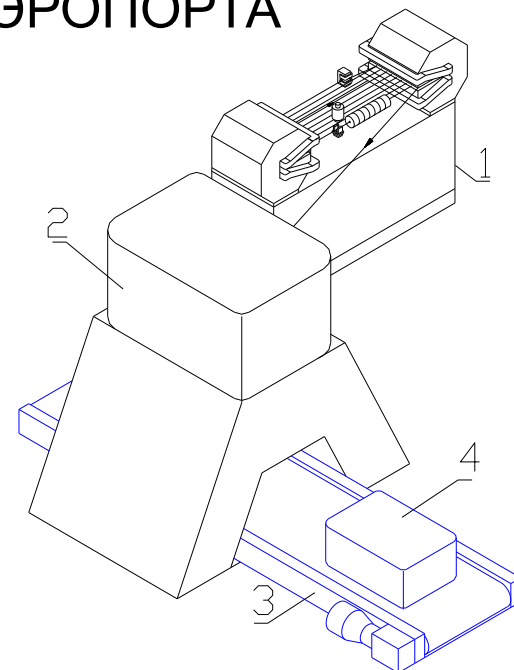
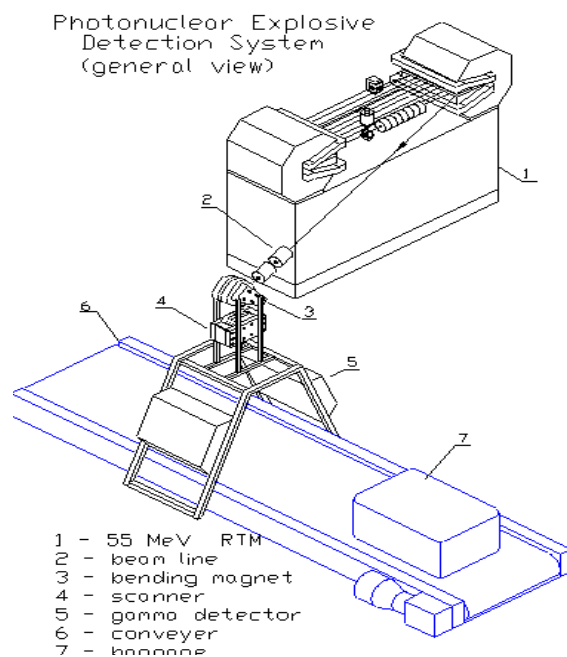
СХЕМА ФОТОЯДЕРНОГО ДЕТЕКТОРА ВВ



ОСНОВНЫЕ УЗЛЫ ДЕТЕКТОРА ВВ

- Ускоритель электронов
- Система сканирования
- Детектор вторичного излучения
- Система построения и обработки временного спектра

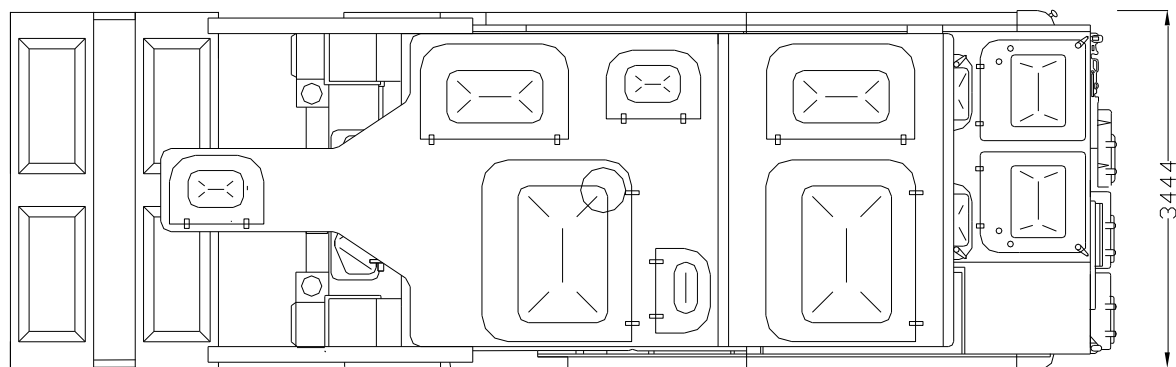
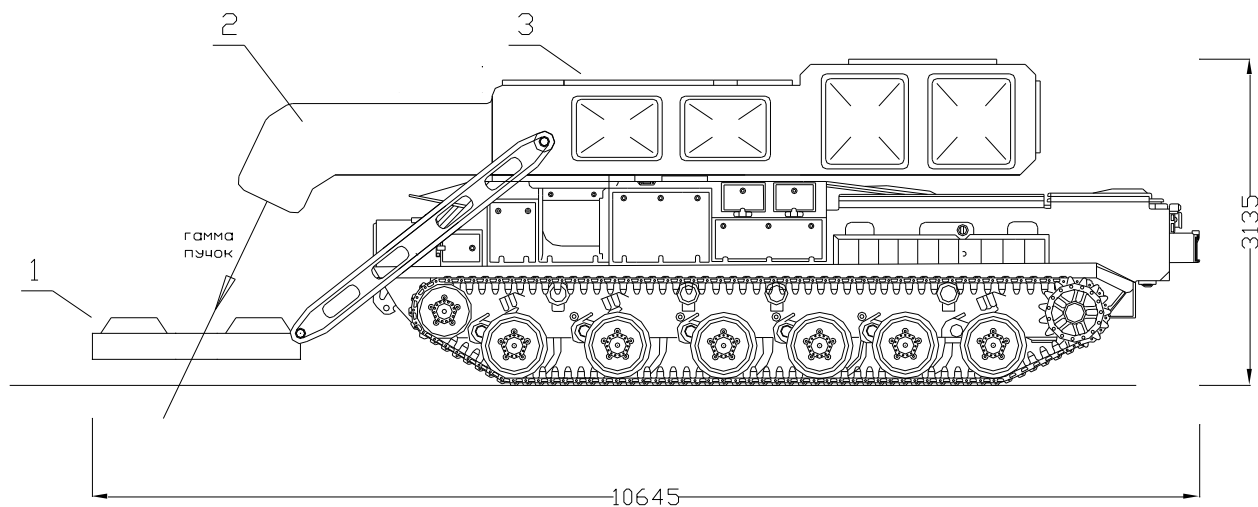
СТАЦИОНАРНЫЙ ДЕТЕКТОР СВВ ДЛЯ АЭРОПОРТА



Расчетные характеристики
(при условии подавления фона)

- Чувствительность – до 10 г. ВВ
- Прямое обнаружение ВВ
- Быстродействие – до 2000 ед.б./ч
- Отсутствует «человеческий» фактор

МОБИЛЬНЫЙ ДВВ НА ГУСЕНИЧНОМ ШАССИ (рабочее положение)



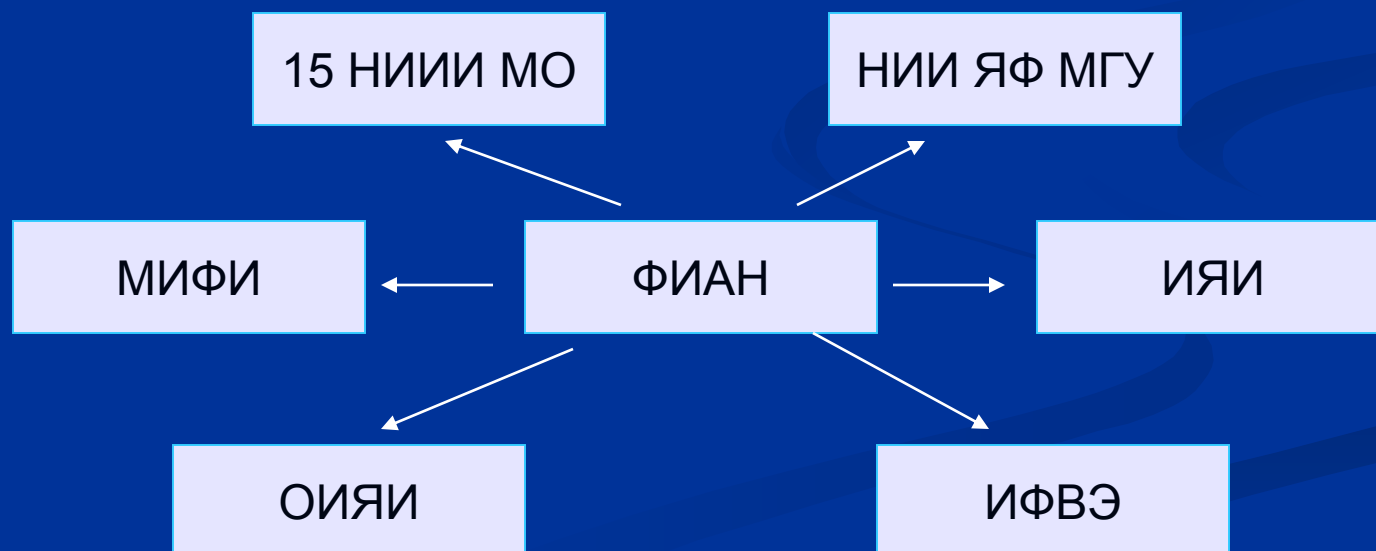
- 1-гамма-детектор
- 2-электропровод
с магнитами
сканирования
- 3-поворотная башня

**Обнаружение 40 г
ТНТ на глубине 25
см в грунте и на 40
см в воде**

СОЗДАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ФОТОЯДЕРНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ОБНАРУЖЕНИЯ ВВ

Контракт ФИАН с Ливерморской национальной лабораторией (США)

ФИАН СОЗДАЕТ КОЛЛАБОРАЦИЮ



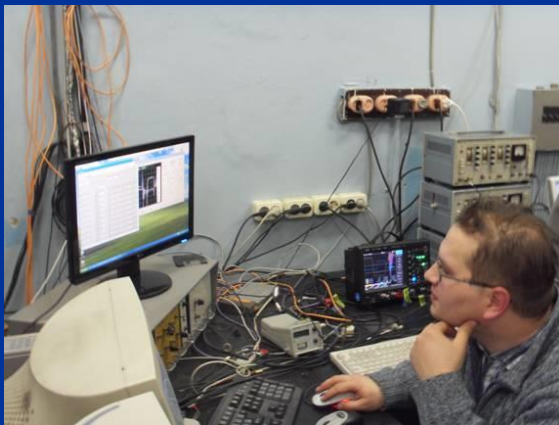
РАЗРАБОТАНО И ИЗГОТОВЛЕНО:



Разрезной микротрон на энергию 55 МэВ



Черенковский водяной счетчик
Фронтальная площадь - 0.5 м^2
Объем – 250 л
4 ФЭУ R5912 Hamamatsu (Япония)



Электроника в стандарте VME
фирмы CAEN (Италия)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ФОТОЯДЕРНОГО ДЕТЕКТИРОВАНИЯ СВЧ



ОСНОВНЫЕ
РЕЗУЛЬТАТЫ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ БАГАЖА, ДОСМОТРЕННОГО ФОТОЯДЕРНЫМ ДЕТЕКТОРОМ ВВ

ИМИТАЦИЯ СОДЕРЖИМОГО БАГАЖА

Объемные материалы:

Хлопчатобумажная ткань, вискоза – целлюлоза ($C_6H_{10}O_5$); шерсть (белок C,O,N,S); полиэстер, нейлон (C,H,N,O); дерматин (ткань х/б + нитроцеллюлоза).

Отдельные предметы:

Очки, часы, фотоаппарат, обувь, бумага, ювелирное золото и серебро.

Металлы:

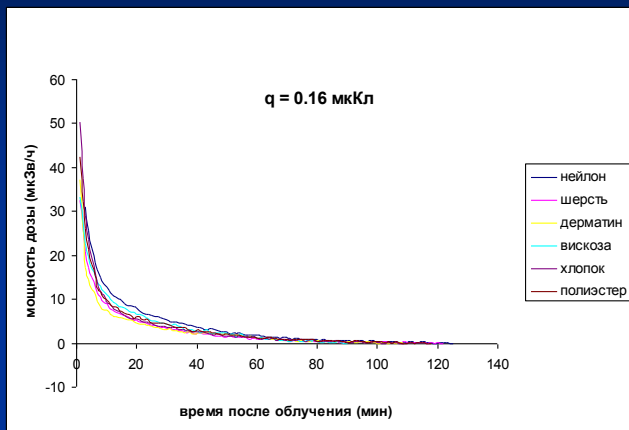
Сталь; медь, дюраль.

Условия облучения имитируют режим поиска 40 г ТНТ.

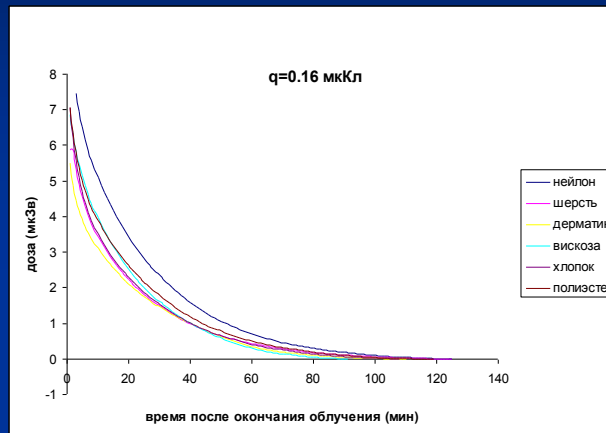
Диаметр зоны облучения – 80 мм.

На радиатор падает 10^{12} электронов с энергией 55 МэВ.

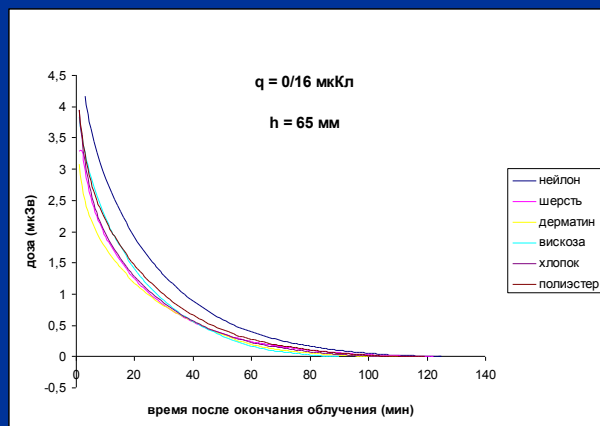
Мощность дозы и доза на поверхности багажа (M=20 кг)



Мощность дозы (мкЗв/ч) на поверхности багажа



Доза на поверхности багажа за время от конца защитной паузы до практически полного распада радионуклидов



Доза на расстоянии 65 мм от поверхности багажа за время от конца защитной паузы до практически полного распада радионуклидов



Выводы

Выполненная экспериментальная оценка радиационной опасности досмотренного багажа:

- Не выявила существенных факторов радиационной опасности для пассажиров. Через 2 минуты после досмотра и за сколь угодно длительный промежуток времени доза излучения от наведенной активности не превышает 10 мкЗв. После 60-минутной паузы – доза не превысит 0.7 мкЗв.

(Доза облучения при перелете Москва-Петербург – 5 мкЗв, Нью-Йорк – Лондон – 35 мкЗв, Гонконг-Лондон – 50 мкЗв)

- Максимальная доза техногенного облучения персонала аэропорта не превышает значений оговоренных в НРБ.

Результаты исследования подтверждены актом ФГУП
Всероссийский научно-исследовательский институт физико-
технических и радиотехнических измерений (ВНИИФТРИ).

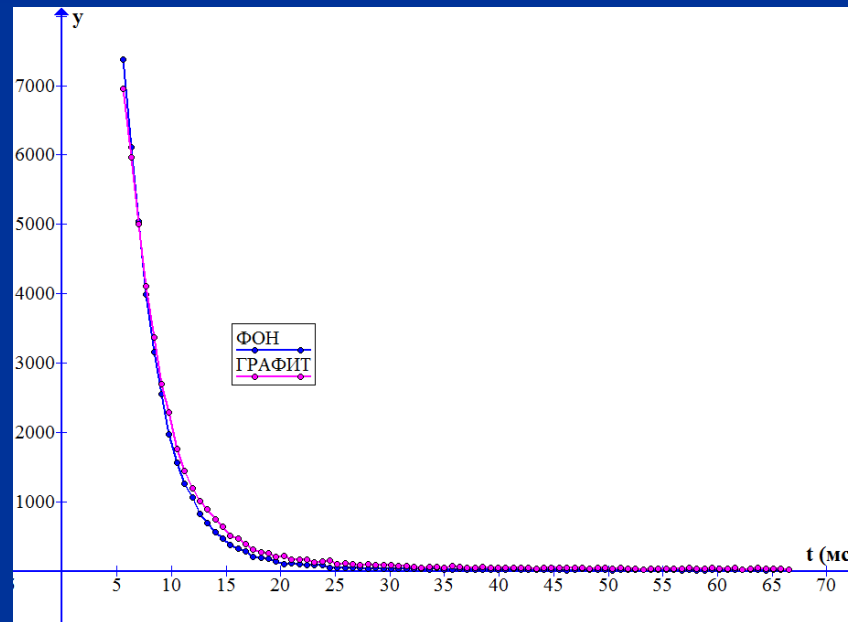
ВЫДЕЛЕНИЕ ПОЛЕЗНОГО СИГНАЛА ОТ ОБЛУЧЕННОГО ОБРАЗЦА

ПОЛЕЗНЫЕ СИГНАЛЫ:

$^{14}\text{N}(\gamma, 2n)^{12}\text{N}$ распад $^{12}\text{N} \Rightarrow ^{12}\text{C} + e^+ + \nu$ ($T_{1/2} = 11.0$ мс)

$^{13}\text{C}(\gamma, p)^{12}\text{B}$ распад $^{12}\text{B} \Rightarrow ^{12}\text{C} + e^- + \nu$ ($T_{1/2} = 20.2$ мс)

$^{13}\text{N}(\gamma, 2p)^{12}\text{B}$ распад $^{12}\text{B} \Rightarrow ^{12}\text{C} + e^- + \nu$ ($T_{1/2} = 20.2$ мс)



Спектры фоновых сигналов и
сигналов при облучении графита
($T_{1/2} = 2.27$ мс)

ГЕНЕРАЦИЯ ФОТОНЕЙТРОНОВ

Фотонейтроны образуются за счет гамма- n реакций.

При энергии электронов 55 МэВ на 50-100 электронов рождается 1 фотонейтрон.

Фотонейтроны рождаются с энергией около 2 МэВ, угловое распределение – изотропно.

Фотонейтроны попадают в стены зала, в них тормозятся, поглощаются и частью отражаются.

Так в зале формируется нейтронное облако, энергия частиц и их плотность со временем уменьшается.

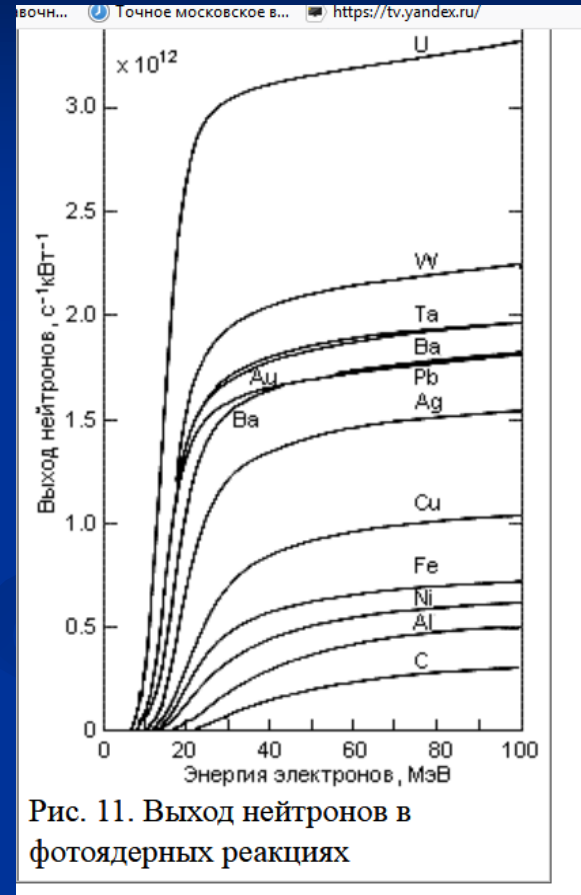


Рис. 11. Выход нейтронов в фотоядерных реакциях

ПРОЦЕДУРА ВЫЧИТАНИЯ ФОНА НА МОДЕЛИ

Пусть фон описывается как $F=10000 \cdot \exp(-0.3465 \cdot t)$ $0.3465 \Rightarrow T_{1/2}=2$ мс

Пусть сигнал описывается как $S=300 \cdot \exp(-0.03465 \cdot t)$ $0.03465 \Rightarrow T_{1/2}=20$ мс

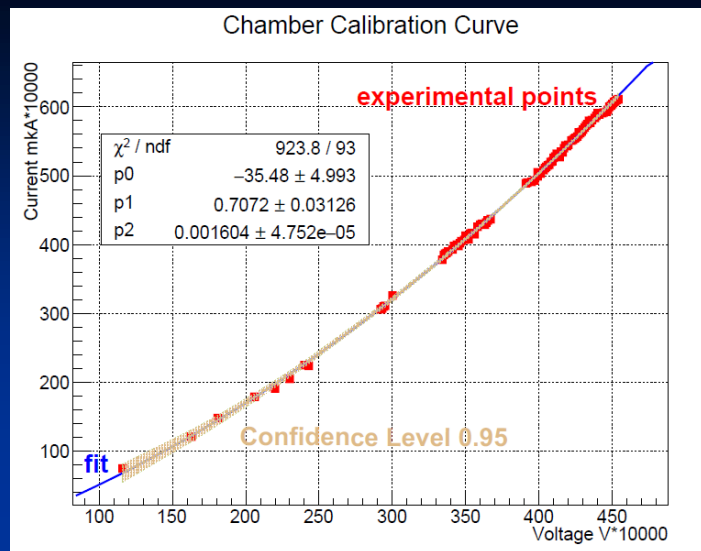
Результат вычитания из наблюдаемого спектра фоновых сигналов запишем как

$$R = F + S - k \cdot F,$$

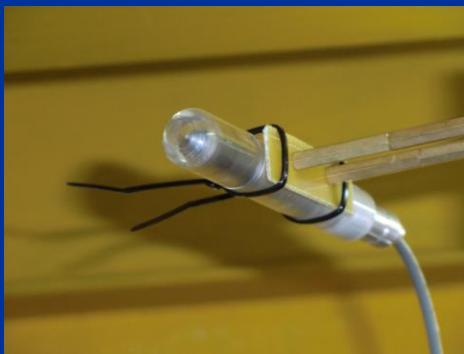
где k связан с точностью нормировки фонового спектра и при абсолютной точности $k=1$.

k	$T_{1/2}(\text{мс})$	R^2
0.990	8.50	0.9804
0.995	15.1	0.9913
0.999	18.8	0.9994
1.000	20.0	0.9999
1.005	31.3	0.9482
1.010	86.3	0.3299

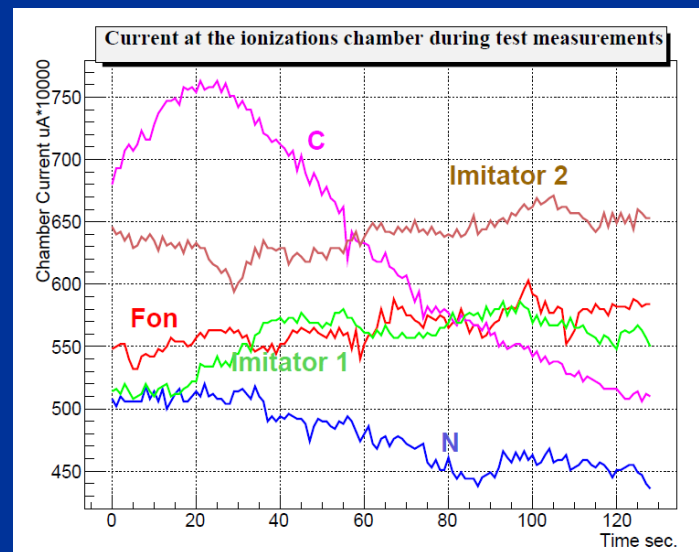
R^2 – коэффициент
детерминации



Калибровка ионизационной камеры

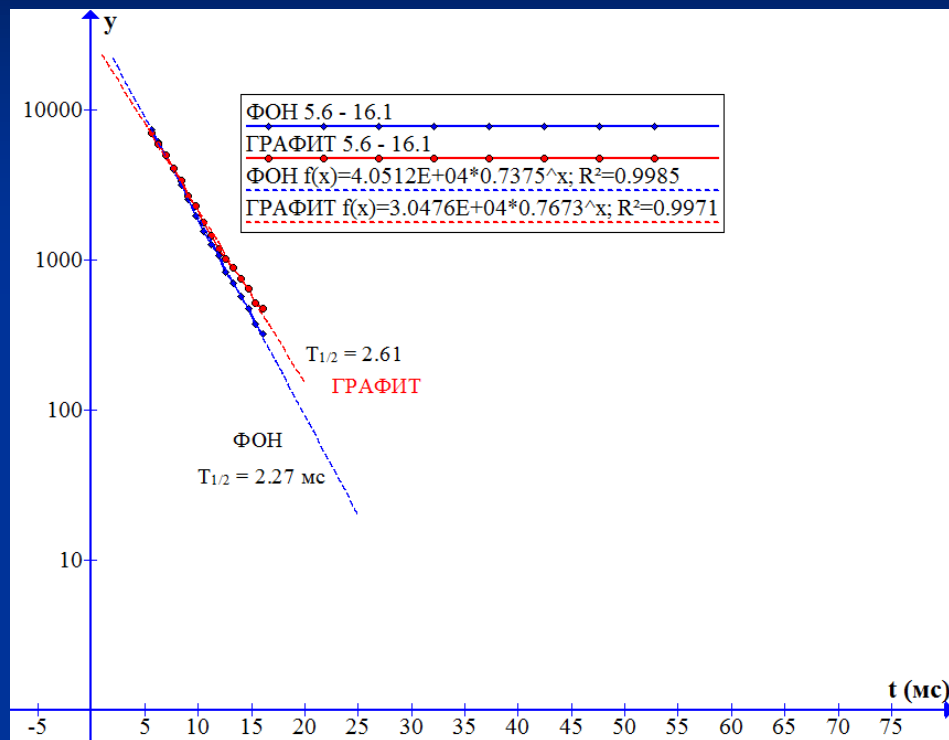


Ионизационная камера БМК 0.6 см³



Ток микротрона во время измерений

ВЛИЯНИЕ ПОЛЕЗНОГО СИГНАЛА НА РЕЗУЛЬТИРУЮЩИЙ СПЕКТР



Появление в результирующем спектре малой, но более «медленной» составляющей приводит к уменьшению скорости спада интенсивности.

Предположим, что:

1. Временные характеристики фона не зависят от тока микротрона;
- 2.. Изменение временного спектра связано с влиянием сигналов от распадов изотопа $^{12}\text{В}$ при облучении углерода.

Результирующий спектр описывается суммой двух экспонент

$N_{\text{ф}} * \exp(-0.304*t)$ и $N_{\text{в}} * \exp(-0.0343*t)$,
с $T_{1/2}$ для фона 2.27 мс и $T_{1/2}$ для сигналов от распадов $^{12}\text{В}$ равным 20.2 мс.

Составляем уравнения для начала и конца выделенного участка спектров

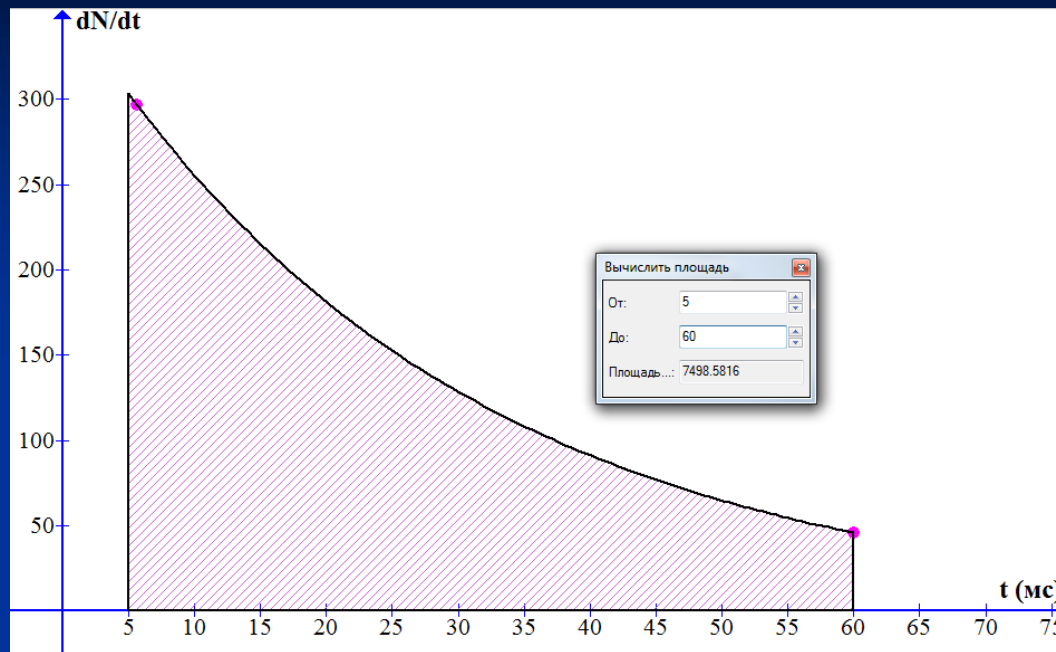
$$N_{\text{ф}} * \exp(-0.3044*5.6) + N_{\text{в}} * \exp(-0.0343*5.6) = 6961$$

$$N_{\text{ф}} * \exp(-0.3044*16.1) + N_{\text{в}} * \exp(-0.0343*16.1) = 480$$

Получаем:

Сигналы от распадов $^{12}\text{В}$	$N_{\text{в}}(t) = 360 * \exp(-0.0343*t)$	$T_{1/2} = 2.27 \text{ мс}$
-------------------------------------	---	-----------------------------

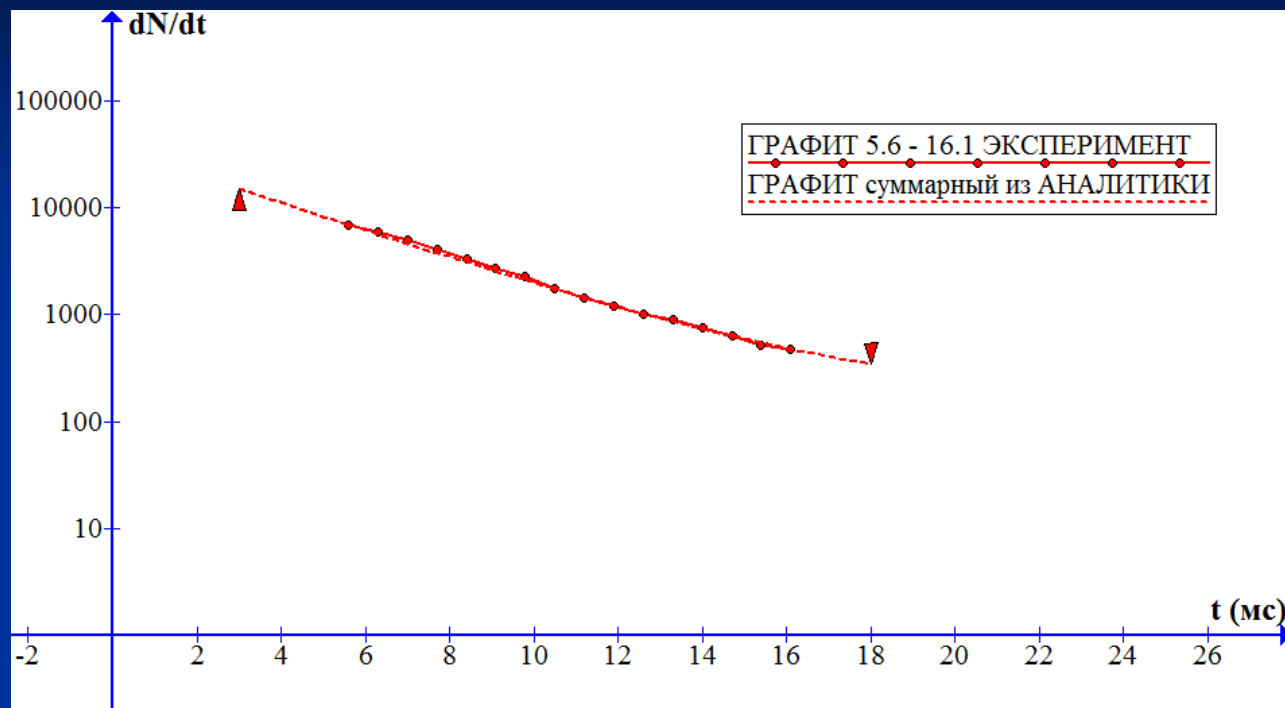
Фоновые сигналы	$N_{\text{ф}}(t) = 36600 * \exp(-0.3044*t)$	$T_{1/2} = 20.2 \text{ мс}$
-----------------	---	-----------------------------



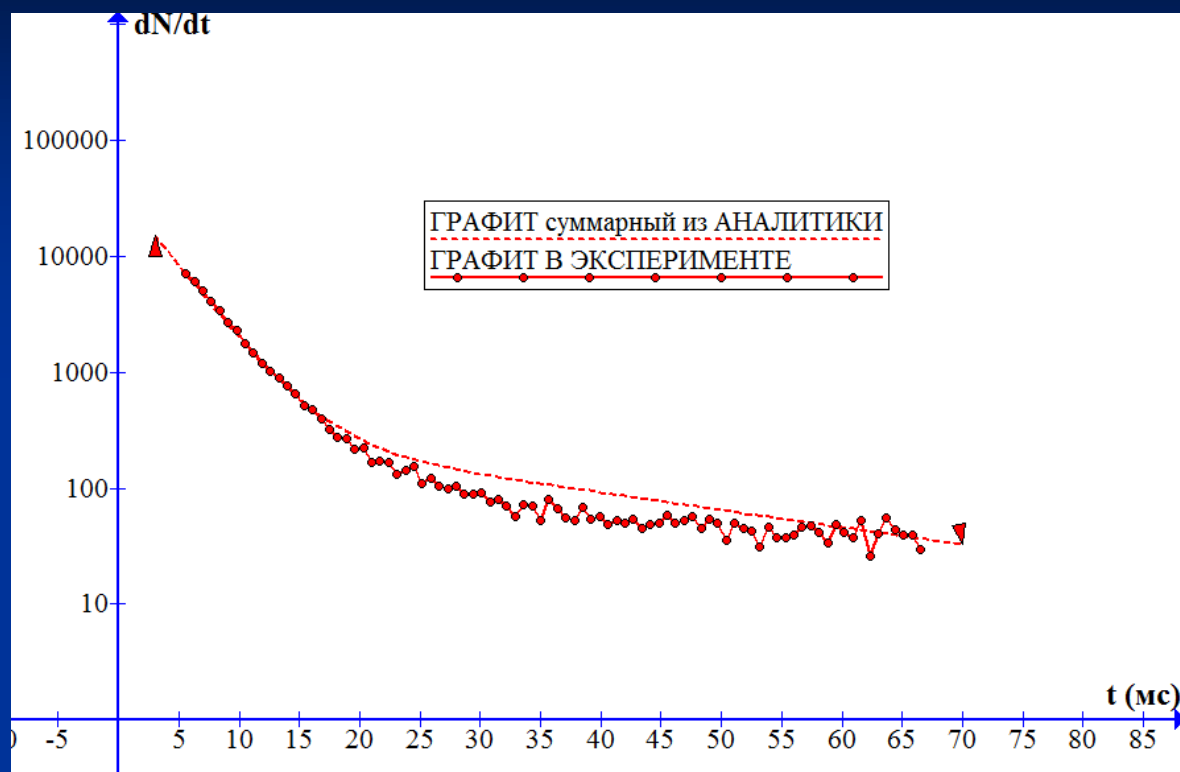
Временной спектр сигналов от распадов изотопа ^{12}B .

Расчетное число полезных зарегистрированных событий в интервале от 5.0 до 60.0 мс равно 7500.

(В эксперименте в этом интервале полное число зарегистрированных событий 33 800. Т.е. «полезных» событий 22%.)



Начальные участки экспериментального и полученного аналитически спектров сигналов при облучении графита.



Экспериментальный и полученный аналитически спектры сигналов при облучении графита.

ВЫВОДЫ

1. В условиях сильной зашумленности выявлено появление полезных сигналов;
2. Оценены количественные характеристики фона и полезных сигналов;
3. Определены основные направления дальнейшей работы – улучшение фоновых условий, совершенствование метрики электронного пучка, разработка алгоритмов обработки экспериментальных данных.

СПАСИБО
ЗА
ВНИМАНИЕ