



ВНИИА  
РОСАТОМ

# **Активный нейтронный метод контроля содержания ядерно-опасных делящихся нуклидов в упаковках негетерогенных радиоактивных отходов**

В.Ф. Батяев, С.Г. Беличенко, М.Д. Каретников, АД. Мазницын, А.Ю. Пресняков

# Актуальность работы



При передаче упаковок РАО на захоронение необходимо подтверждать их соответствие установленным критериям по содержанию **ядерно-опасных делящихся нуклидов (ЯОДН)** -  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$

п. 65 НП-093-14: Соответствие РАО критериям приемлемости для захоронения подтверждается экспериментальными (инструментальными) и (или) расчетными методами при условии, что они основаны на результатах предварительных прямых и (или) косвенных измерений значений контролируемых параметров технологического процесса.

## Большое число уже накопленных упаковок РАО (в т.ч. контейнеров типа НЗК)



- Вскрытие упаковки без последующей перетарки невозможно
- Неполная информация в паспортах на упаковки
- Неизвестно распределение материала внутри упаковки

## РАО, образующиеся при ВЭ ЯРОО

- Значительная неоднородность материала
- Непостоянство радионуклидного состава



# Почему недостаточно гамма-спектрометрии для контроля ЯОДН в упаковках РАО?

Низкая интенсивность  
гамма-излучения

$^{235}\text{U}$ :  $E_\gamma = 185,7$  кэВ,  $I_\gamma = 43\%$  / мг

$^{239}\text{Pu}$ :  $E_\gamma = 413,7$  кэВ,  $I_\gamma = 34\%$  / мг

Ослабление гамма-  
излучения  
биологической защитой  
контейнера

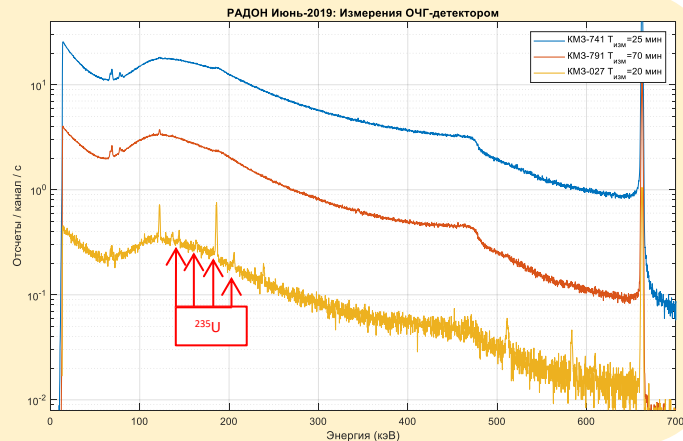
Влияние фона гамма-  
излучения от других  
радионуклидов  
(например, от  $^{137}\text{Cs}$ )

Самопоглощение  
гамма-излучения  
материалом РАО

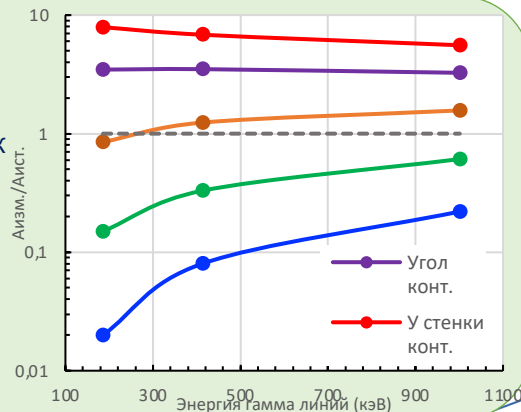
Гамма-спектры от  
упаковки РАО с  
различным  
содержанием  $^{137}\text{Cs}$

Высокие  
значения  
минимально  
й  
измеряемой  
массы ЯОДН

При неверном учете  
неоднородности РАО  
внутри упаковки ошибки  
измерений содержания  
ЯОДН могут достигать  
сотен процентов



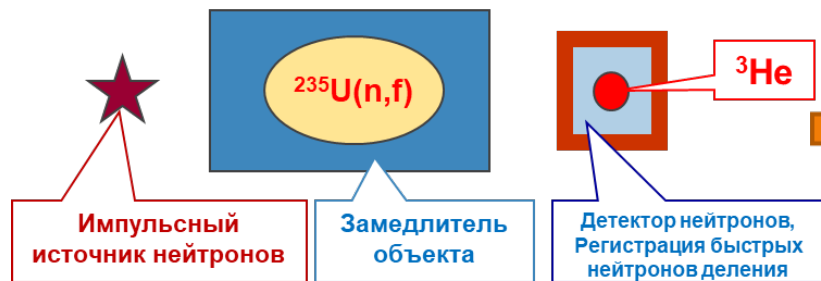
Ошибки гамма-  
спектрометрических  
измерений при  
неравномерном  
распределении ЯОДН  
внутри контейнера НЗК



# Метод измерений содержания ЯОДН в упаковках РАО разработан на основе активного нейтронного метода

Схема обнаружения ЯОДН активным нейтронным методом  
(метод дифференциального затухания)

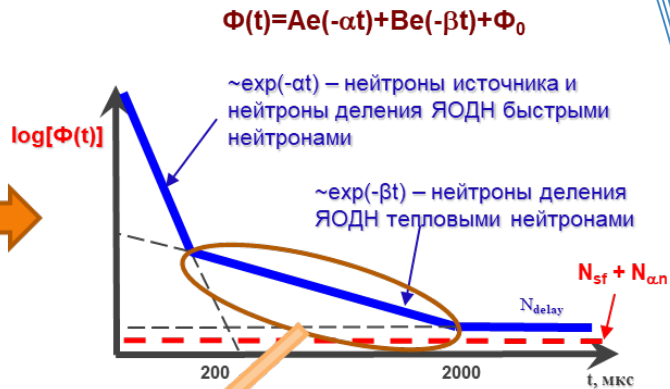
Временная зависимость отклика детектора нейтронов между импульсами ИНГ



Импульсный нейтронный генератор или шаффлер

Материал РАО и стенка контейнера

Область регистрации быстрых нейтронов деления ЯОДН в измеряемом объекте



Расчет массы ЯОДН в измеряемом объекте



# Мировой опыт:

## Комплекс CHICADE в СЕА (Кадараш, Франция)



Горячая камера для резки контейнеров с РАО



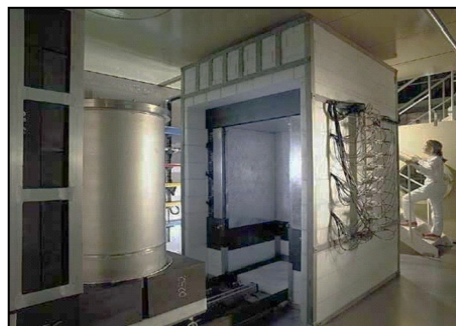
Установка для определения содержания ЯОДН с помощью фотонейтронов



Горячая камера для выбуривания образцов РАО



Установка с линейным ускорителем для «просвечивания» упаковок РАО

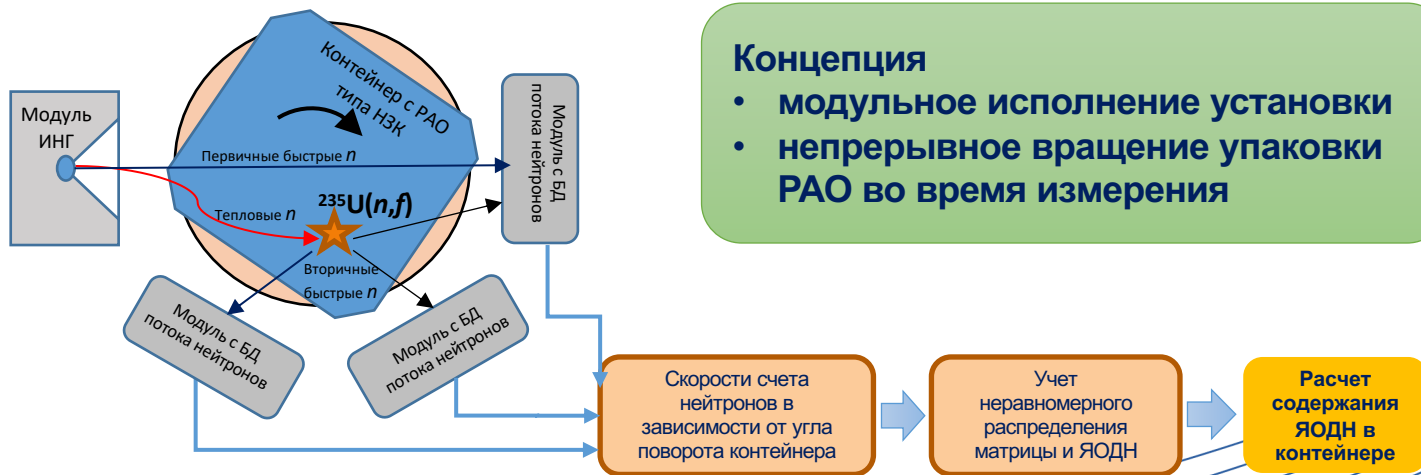


Установка для определения содержания ЯОДМ с помощью нейтронов от НГ

Pérot B., Jallu F., Passard Ch., Gueton O., Alline J.-P., Loubet L., Estre N., Simon E., Carasco C., Roure Ch., Boucher L., Lamotte H., Comte J., Bertaux M., Lyoussi A., Fichet P., and Carrel F. The characterization of radioactive waste: a critical review of techniques implemented or under development at CEA, France. EPJ Nuclear Sci. Technol. 4, 3 (2018)

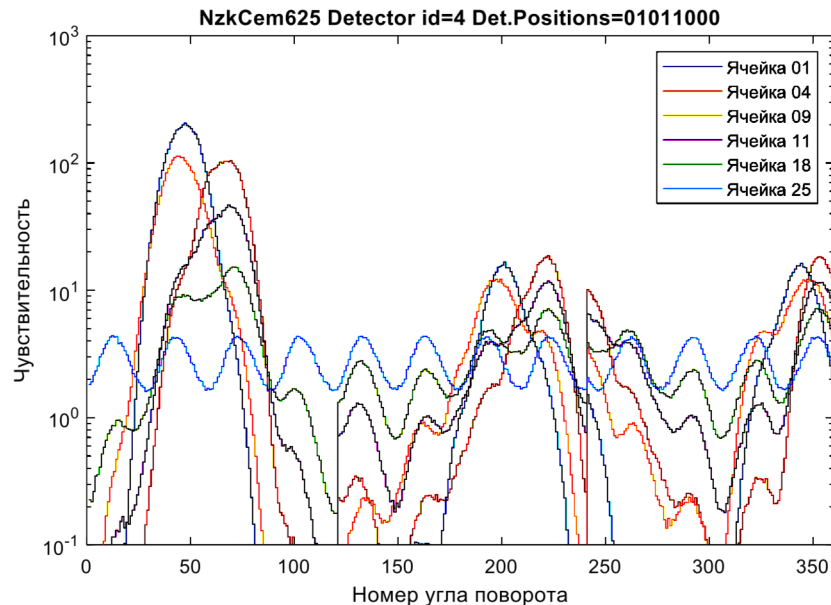
# Установка для измерений содержания ЯОДН в упаковках негомогенных РАО

Метод измерений содержания ЯОДН основан на сочетании нейтронной томографии упаковки РАО и определения угловых зависимостей потоков вторичных нейтронов деления ЯОДН от угла поворота упаковки РАО при ее непрерывном вращении с последующим их учетом при расчете содержания ЯОДН.



# Угловые спектры скоростей счета нейтронов

Угловые зависимости чувствительности на 10 г ЯОДН, размещенного в различных ячейках контейнера НЗК с цементной матрицей, при использовании трех модулей регистрации нейтронов



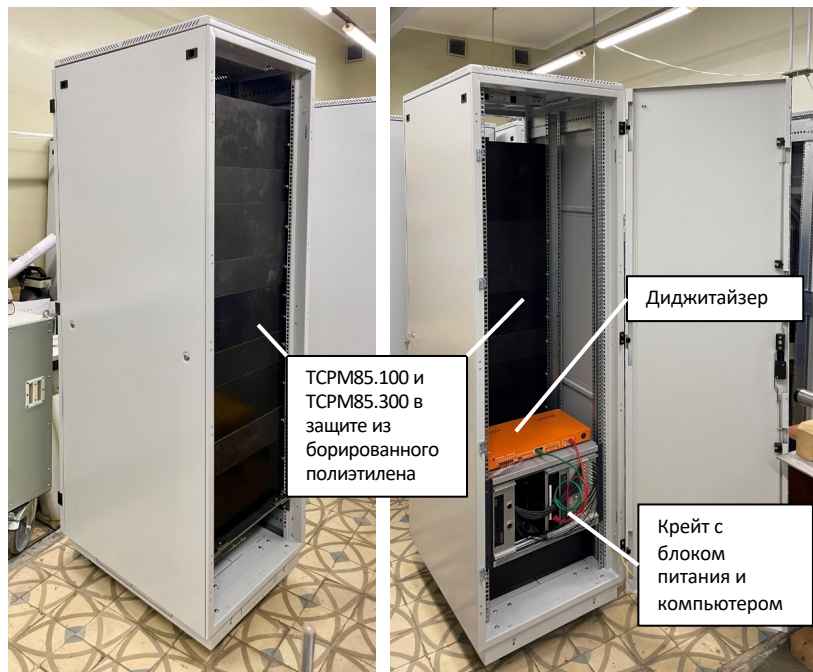
**Угловая зависимость откликов детекторов нейтронов от упаковки РАО описывается как система линейных уравнений откликов от  $N$  ячеек**

$$\varphi_{exp}(\alpha) = \sum_{i=1}^N \omega_i \cdot \varphi_i(\alpha),$$

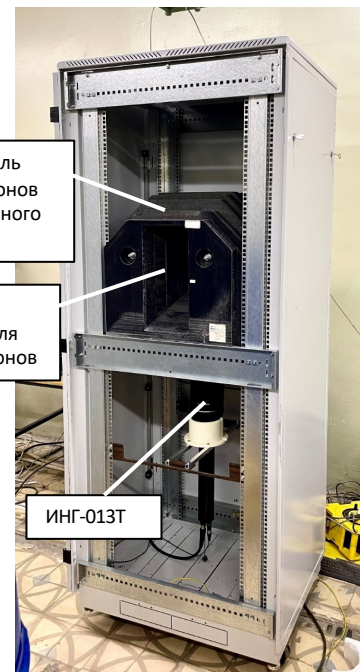
$$M_{ЯОДН} = M_0 \cdot \sum_{i=1}^N \omega_i$$



## Модули установки



**Модуль регистрации нейтронов**



**Модуль ИНГ**



# Образцы-имитаторы содержания ЯОДН в упаковках РАО



Железобетонный контейнер  
типа НЗК-РАДОН,  
объем 1,5 м<sup>3</sup>

Образцы-  
имитаторы  
содержания  
ЯОДН в упаковках  
РАО



Металлический контейнер  
типа КМЗ,  
объем 3,1 м<sup>3</sup>

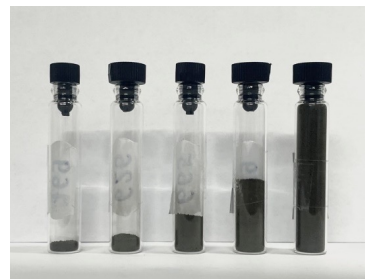
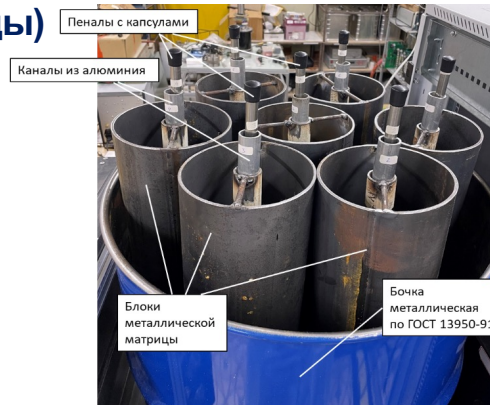
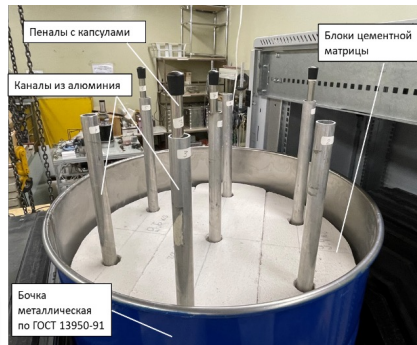
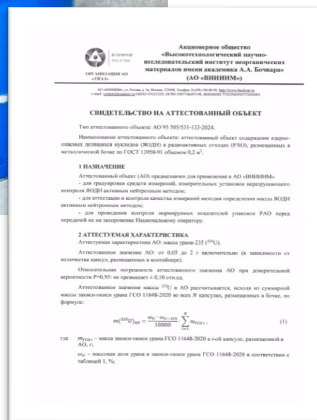
- На основе ГСО массовой доли <sup>235</sup>U
- Содержание ЯОДН от 0,05 до 50 г
- Три типа матрицы: органические соединения, цементный компанд, металл
- Матричные материалы - в виде отдельных блоков с возможностью имитации равномерного и неравномерного заполнения контейнера



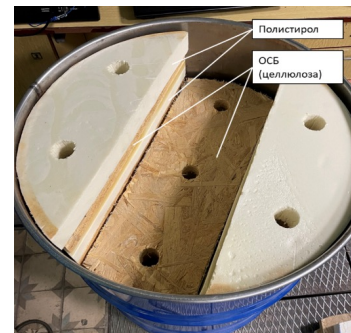
Бочка объемом  
0,2 м<sup>3</sup>

# Аттестованный объект содержания ЯОДН в РАО, размещенных в металлической бочке объемом 0,2 м<sup>3</sup>

тип АО 95В 505/531-133-2024  
(цементная, органическая и металлическая матрицы)

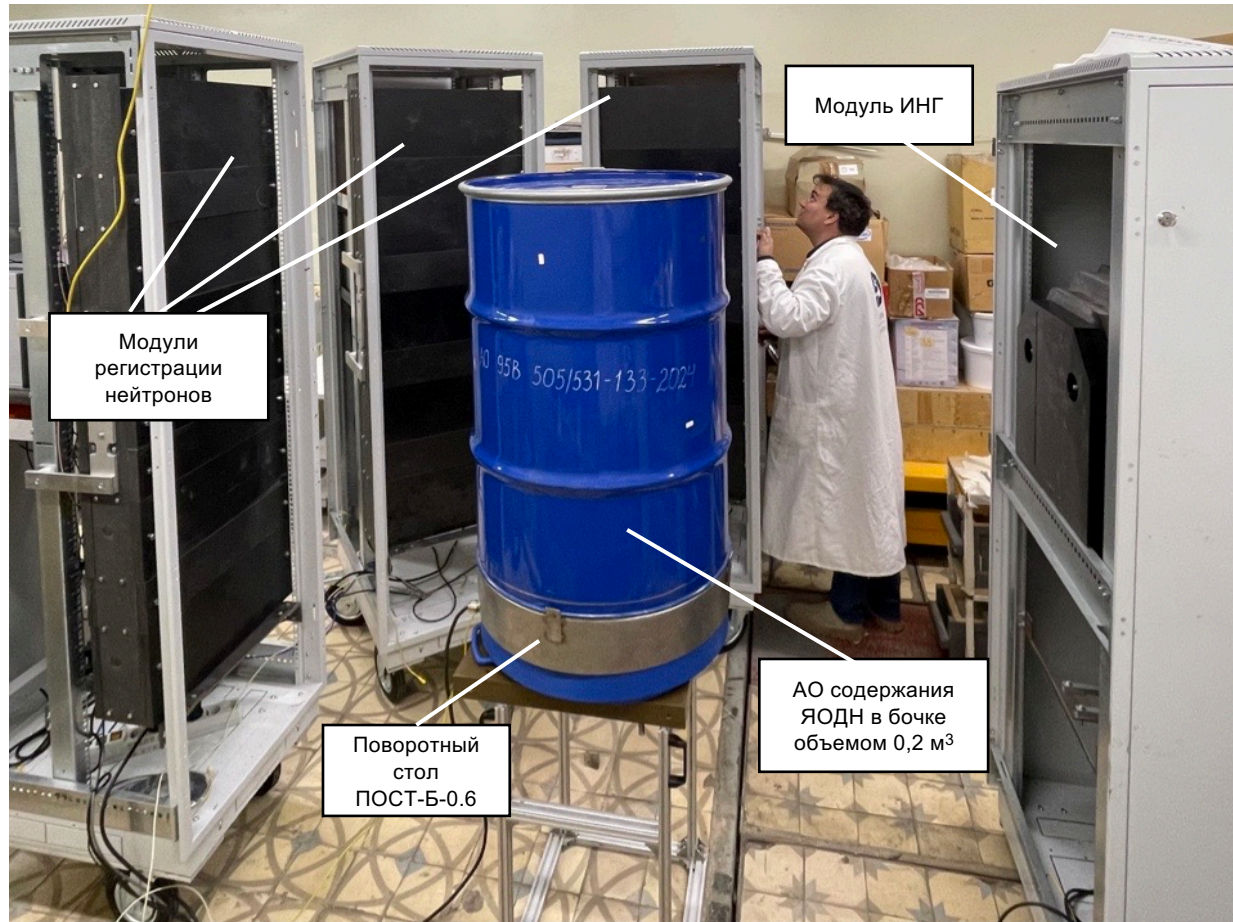


Капсулы с ГСО 11648-2020

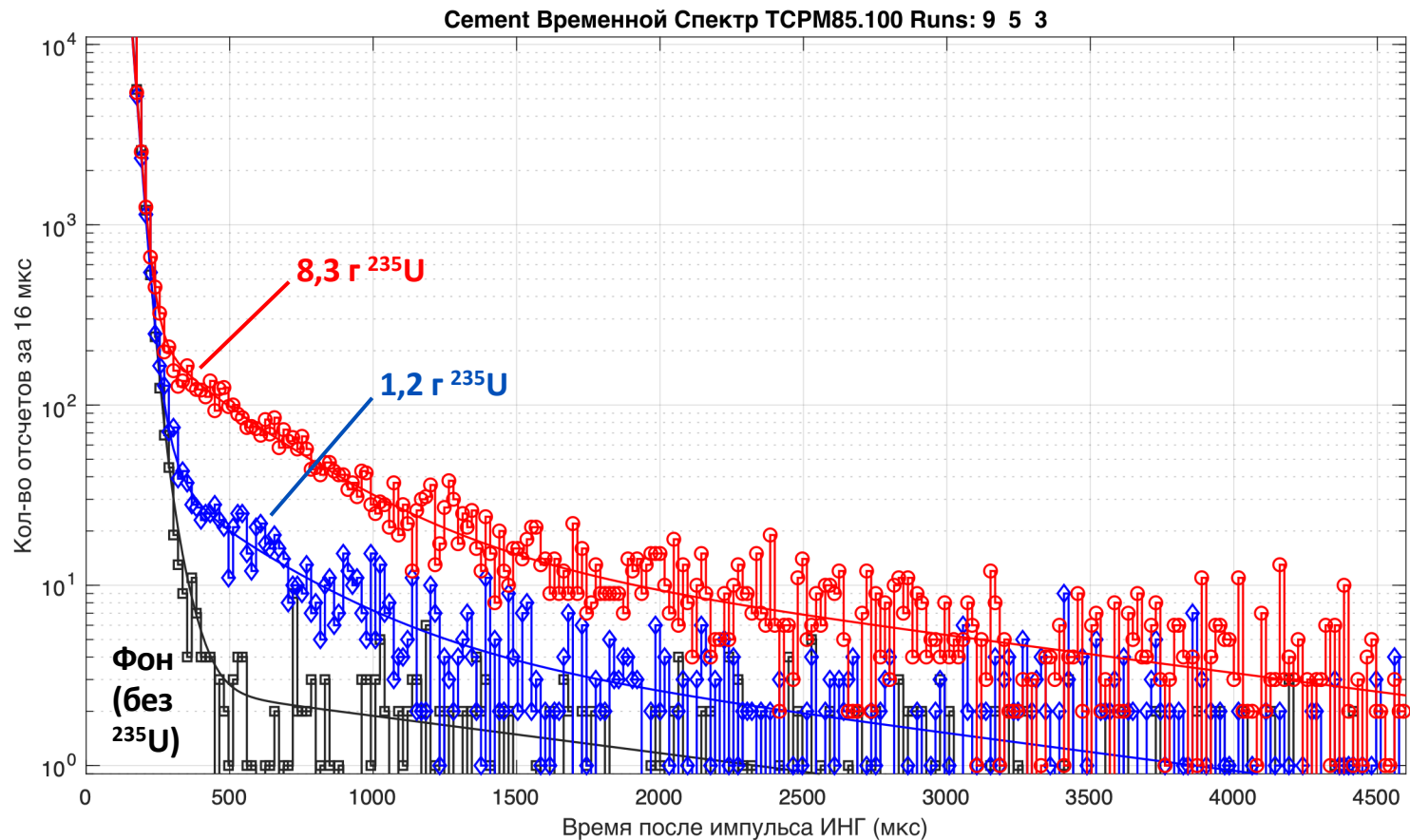




# Испытания установки



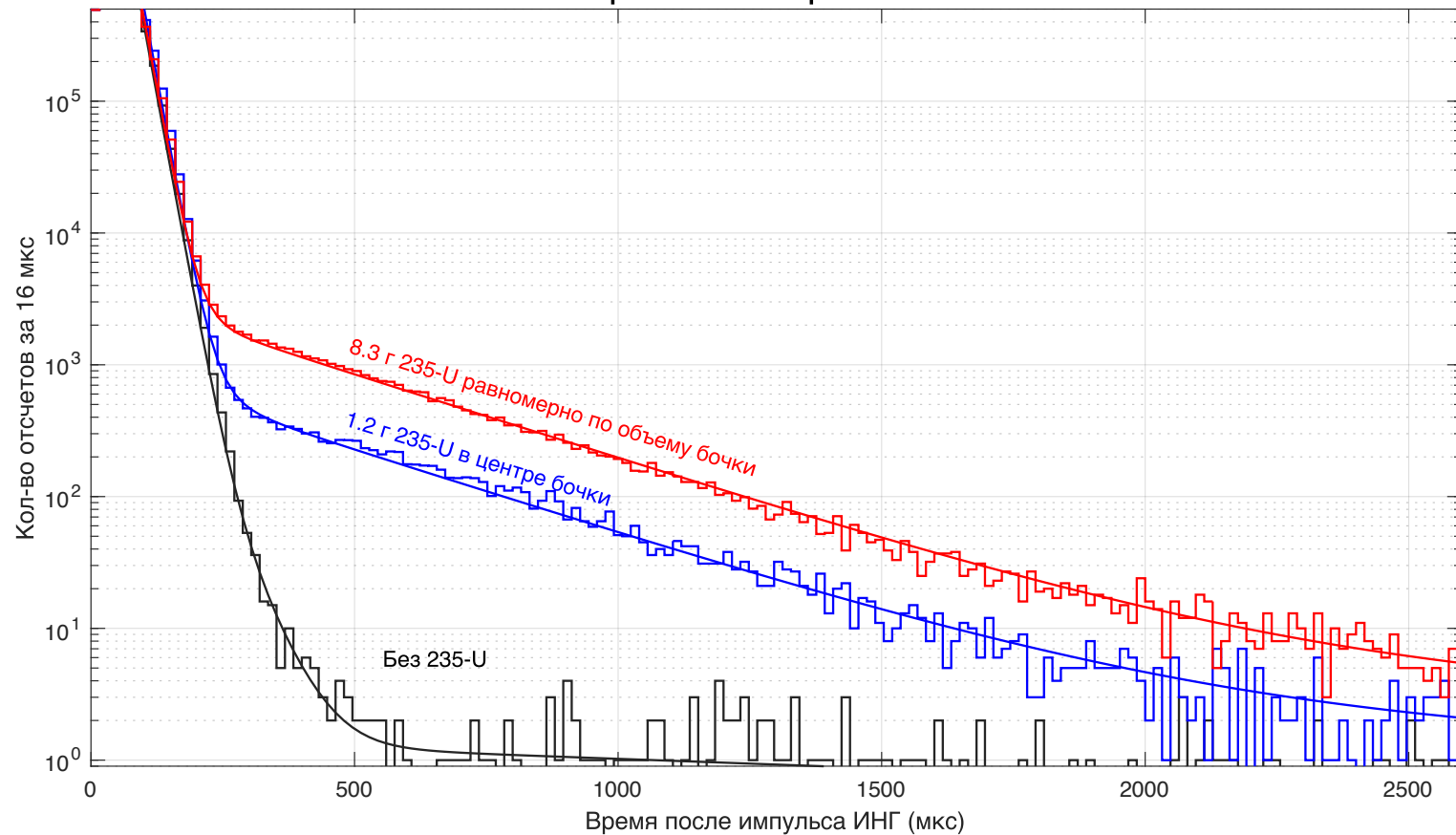
# Временные спектры отклика детекторов при различном содержании ЯОДН



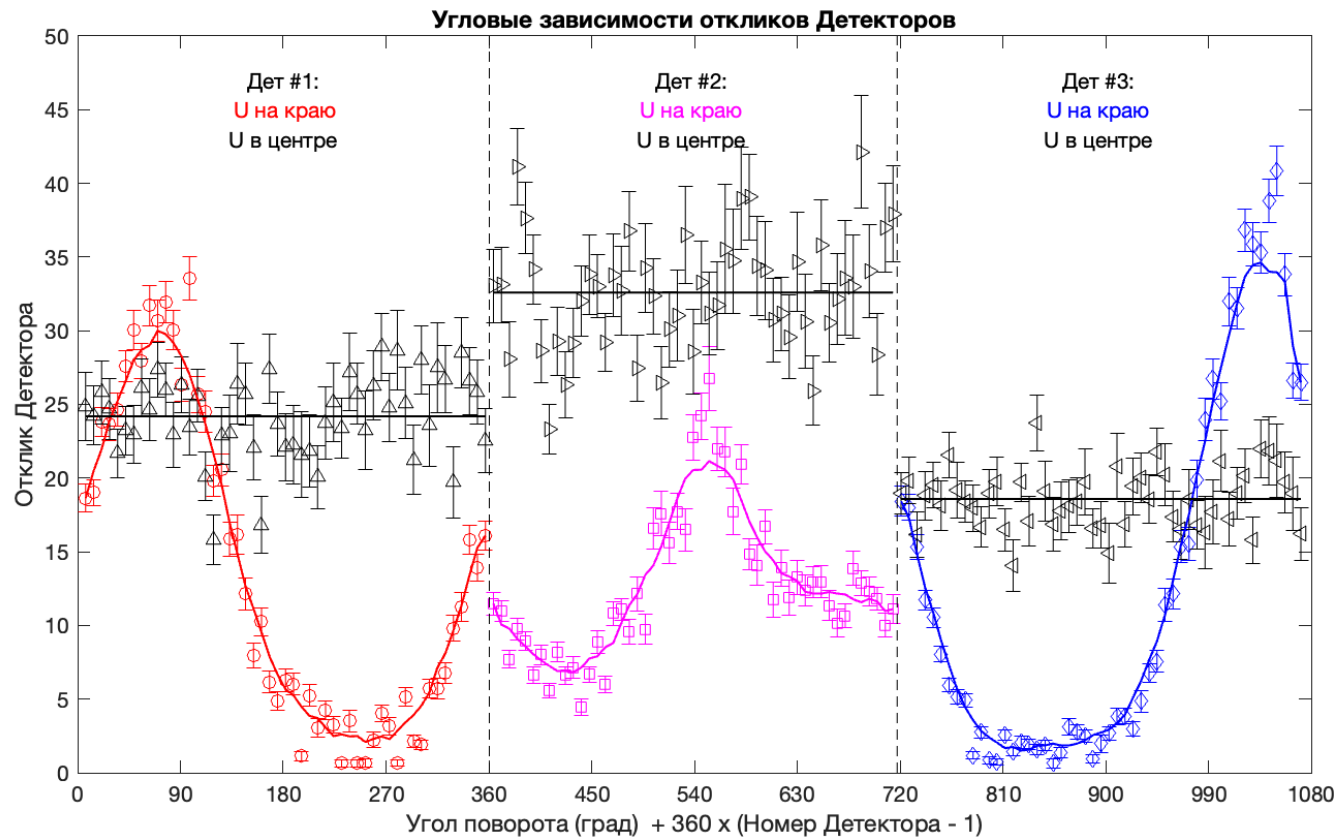


# Временные спектры отклика детекторов при различном содержании ЯОДН

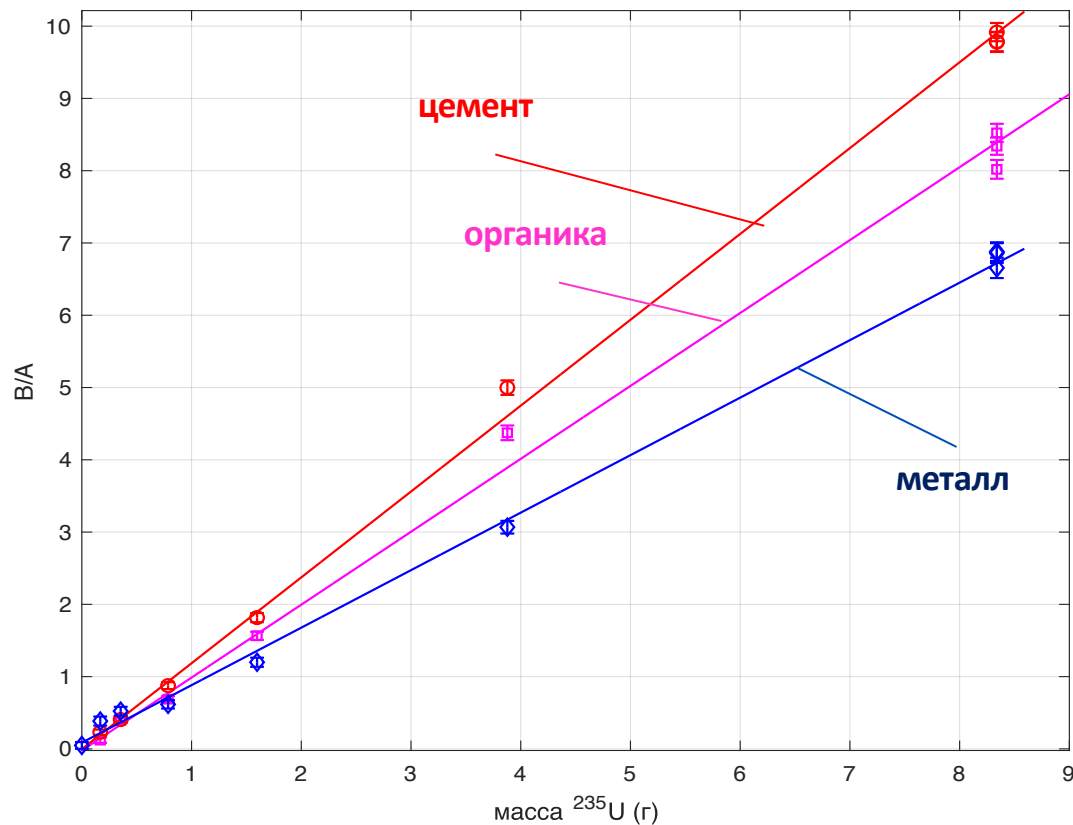
Cement-Crest Временной Спектр TCPM85.100 Runs: 1 6 2



# Зависимость откликов детекторов от угла поворота бочек при различных расположениях ЯОДН внутри бочек



# Зависимость откликов модулей регистрации нейтронов от содержания ЯОДН в упаковке РАО



При длительности измерения 100 с

Матрица	СКО, %	МДМ ЯОДН, г
Цемент	4	0,04
Органика	5	0,05
Металл	10	0,05

## Целевые характеристики метода

Типы контролируемых упаковок РАО	контейнеры типа КМЗ, НЗК, ЖЗК, ЖБУ, КРАД-1,36, бочки по ГОСТ 13950-91 объемом 0,1 и 0,2 м <sup>3</sup>
Длительность измерения одной упаковки РАО	не более 30 мин
МДМ ЯОДН в упаковке РАО	не более 0,05 г для упаковки типа бочка не более 0,5 г для контейнеров большого объема
Нижний предел измерений содержания ЯОДН в упаковке РАО	не более 1 г для упаковки типа бочка не более 10 г для контейнеров большого объема
Статистическая погрешность измерений содержания ЯОДН	не более 30%
Дополнительная погрешность измерений, обусловленная неоднородностью содержания материала РАО и ЯОДН в упаковке	не более 60%
Условия окружающей среды: <ul style="list-style-type: none"><li>• температура окружающего воздуха</li><li>• влажность окружающего воздуха</li></ul>	от плюс 10 до плюс 30°С до 70% при температуре плюс 25°С
Электропитание от источника переменного тока	частота 50±2,5 Гц напряжением (230±14 и 380±14) В
Управление установкой	дистанционно с расстояния не менее 15 м



# Спасибо за внимание!

Батяев Вячеслав Феликсович  
Нач НИЛ в составе НИО, ФГУП «ВНИИА»  
к.ф.-м.н, [vfbatyaev@vniia.ru](mailto:vfbatyaev@vniia.ru)  
+7(499) 730 1282 доб 1486  
+7(916) 043 1272