



СНИИП  
РОСАТОМ

# **Автоматизированная спектрометрическая установка контроля инертных газов в выбросах АЭС для автоматизированной системы радиационного контроля**



«Физико-технические интеллектуальные системы» (ФТИС-2023)

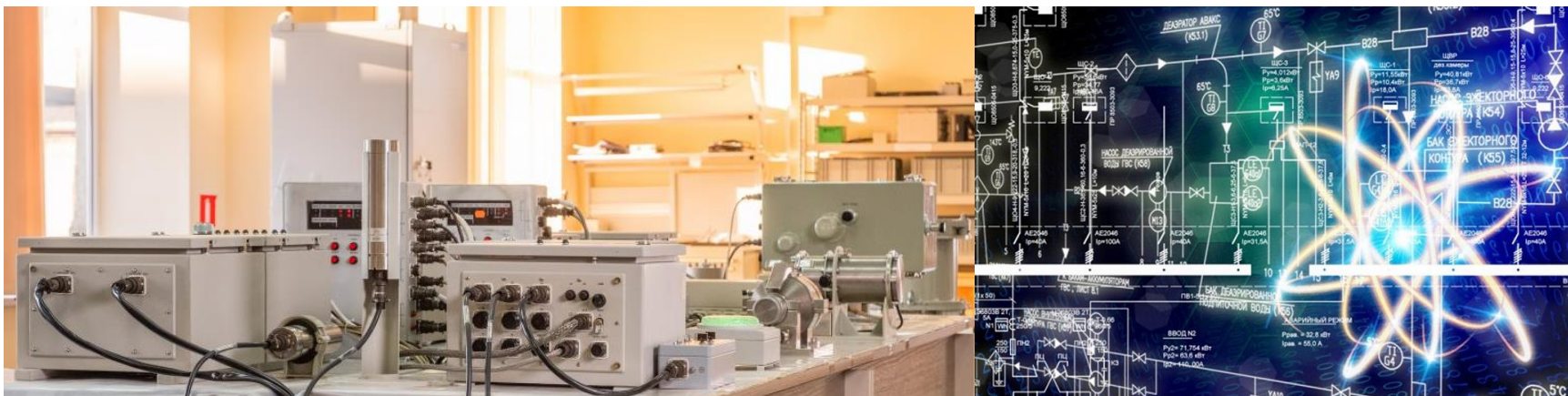
**Дерябина Мария Дмитриевна**

Начальник лаборатории отдела СРК АО «СНИИП»

# Вопрос надежности и безопасности современных АЭС

Ужесточение требований к **радиационному контролю**:

- ✓ Количественное  Увеличение каналов контроля АСРК
  - ✓ Качественное  Повышение требований к метрологическим характеристикам ТС АСРК
- Возрастающий объём и значимость параметров, контролируемых при помощи **спектрометров** из состава АСРК



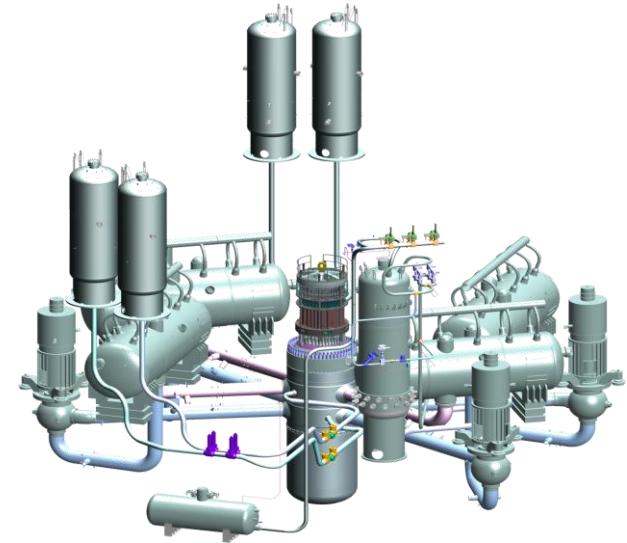
# Задачи спектрометрических каналов контроля АСРК АЭС

## ✓ обеспечение оптимальных и безопасных технологических режимов работы АЭС:

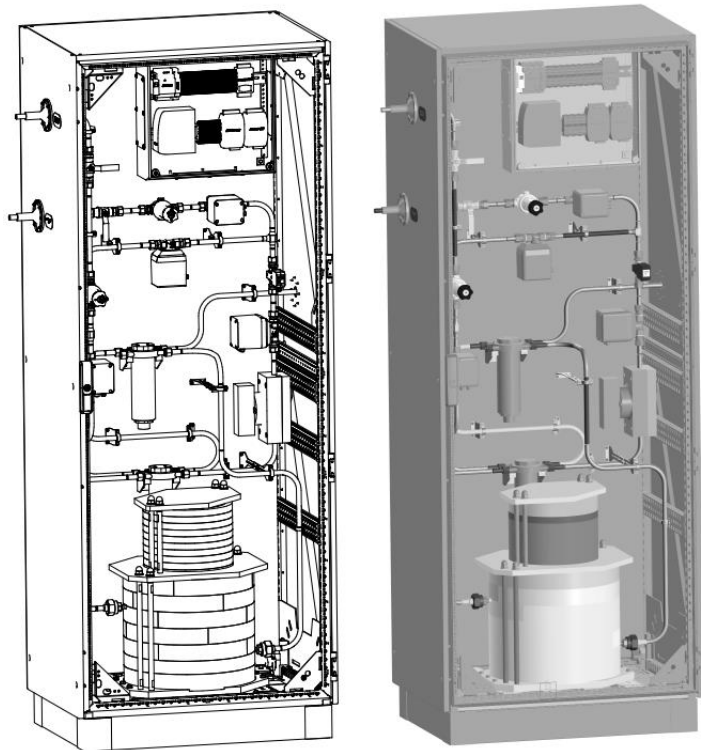
- контроль УА радиоизотопов  $I^{131}$ - $I^{135}$  в теплоносителе
- контроль содержания примесей в теплоносителе
- контроль ОА  $Na^{24}$  в жидких средах
- контроль ОА  $N^{16}$  в остром паре

## ✓ мониторинг воздействия АЭС на окружающую среду

- контроль ОА ИРГ в выбросах АЭС через венттрубу
- контроль ОА изотопов  $I^{131}$ ,  $Cs^{134}$ ,  $Cs^{137}$ ,  $Co^{60}$  и др. в аэрозольной форме в выбросах через венттрубу
- контроль ОА радиоизотопов в сбросах АЭС в водные объекты



# Технологические спектрометры СГГ-01Р и СГГ-02Р

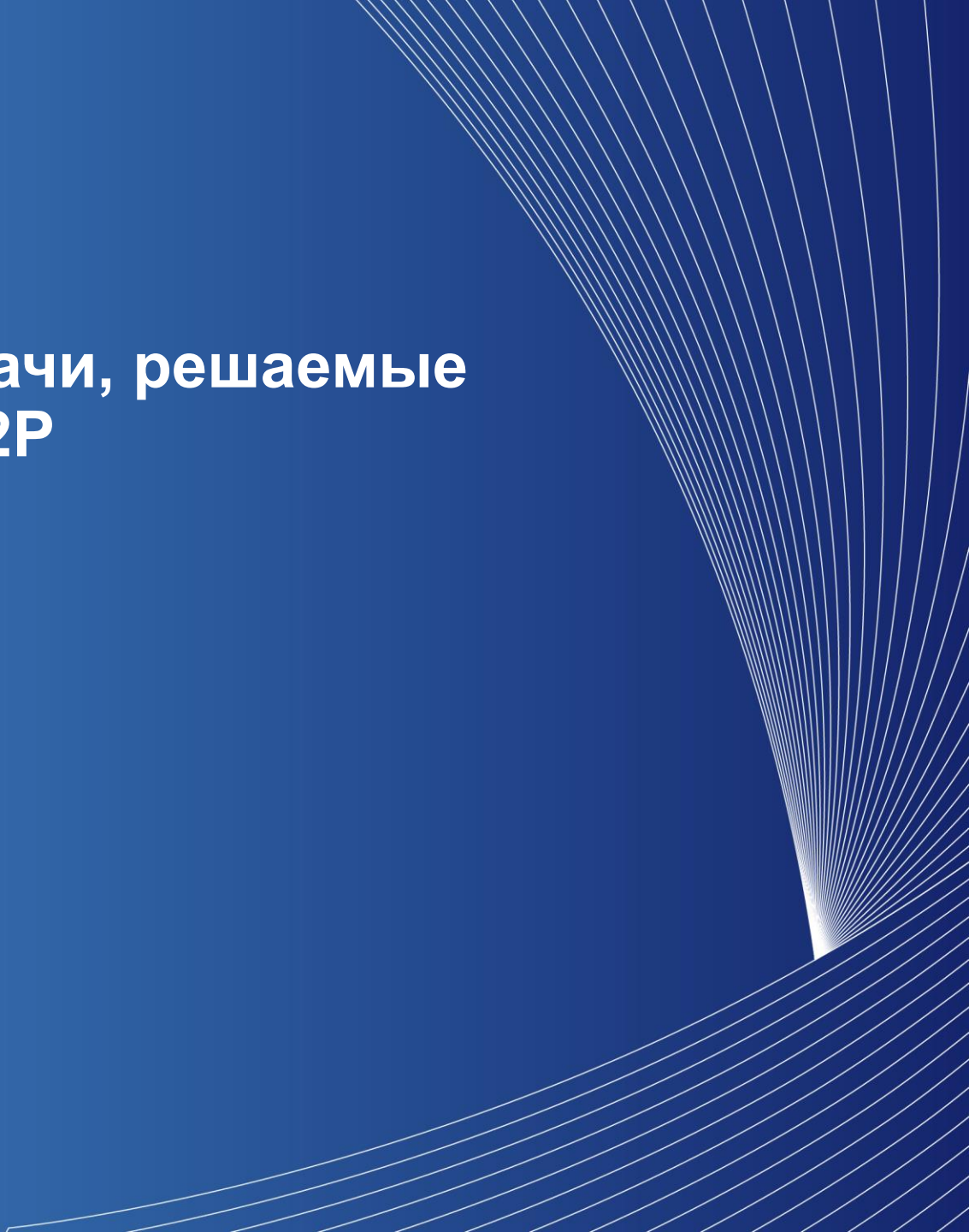


**СГГ-01Р** предназначен для непрерывного автоматизированного измерения объёмной активности реперных радионуклидов  $^{131}\text{I}$ - $^{135}\text{I}$ ,  $^{24}\text{Na}$ ,  $^{42}\text{K}$  и др. в теплоносителе первого контура реактора

**СГГ-02Р** предназначен для непрерывного автоматизированного измерения инертных радиоактивных газов  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{87}\text{Kr}$ ,  $^{88}\text{Kr}$ ,  $^{133}\text{Xe}$  и др. в вентрубе АЭС



# 1. Описание и задачи, решаемые с помощью СГГ-02Р

The background is a solid blue color. On the right side, there is a decorative graphic consisting of numerous thin, white, curved lines that fan out from a single point at the bottom right towards the top right, creating a sense of motion or a stylized wave.

# Технологический спектрометр СГГ-02Р



- **СГГ-02Р** предназначен для непрерывного автоматизированного измерения инертных радиоактивных газов  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{87}\text{Kr}$ ,  $^{88}\text{Kr}$ ,  $^{133}\text{Xe}$  и др. в венттрубе АЭС
- **Аэрозольная** фракция газовой среды **предварительно фильтруется** в тракте пробоподготовки для удаления изотопов **Cs, I, Rb** и активированных продуктов коррозии РУ (**Co, Mn** и др.)

# Задача СГГ-02Р: идентификация состава ИРГ в выбросе АЭС

## Радионуклидный состав газовой фракции в выбросе



### Осколки деления ядер $^{235}\text{U}$ :

- ИРГ  $^{133}\text{Xe}$ ,  $^{135}\text{Xe}$ ,  $^{135\text{m}}\text{Xe}$ ,  $^{138}\text{Xe}$ ,  $^{85\text{m}}\text{Kr}$ ,  $^{87}\text{Kr}$ ,  $^{88}\text{Kr}$  и др.
- Газообразный радиоiod  $^{131}\text{I}$

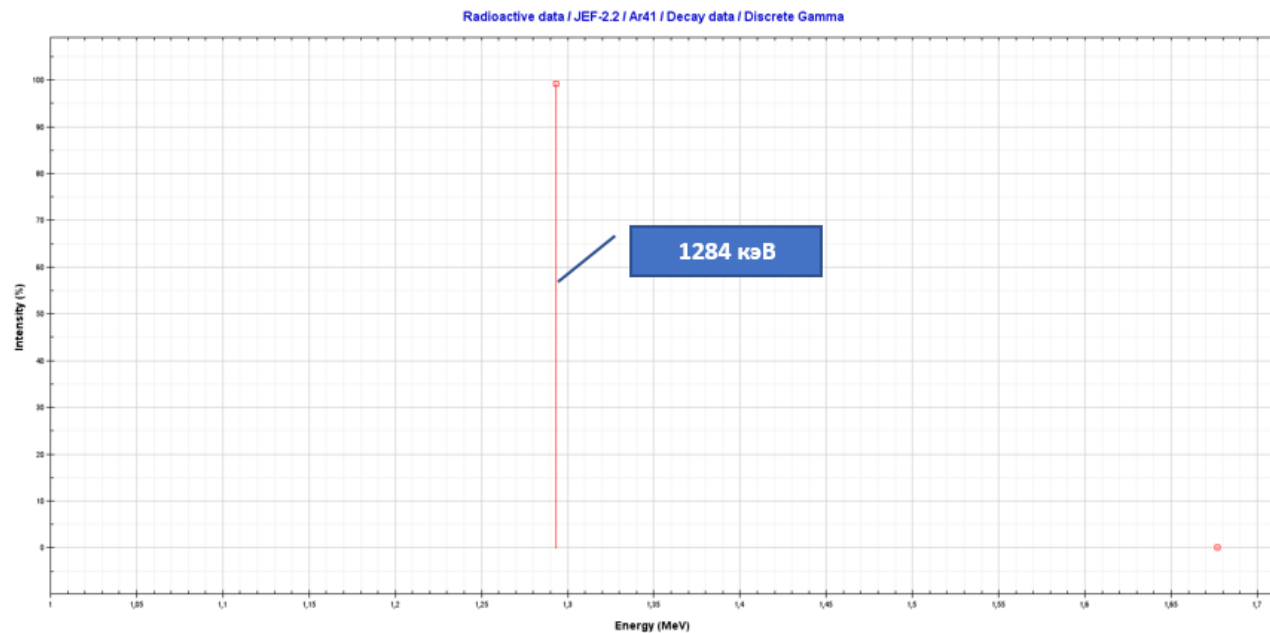
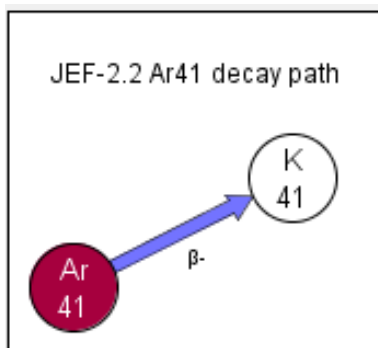
### Продукты активации в РУ:

- Активация газов до  $^{41}\text{Ar}$
- Активация ТПК и  $^{13}\text{C}$  до  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$

АЭС	Сумма, ТБк/год	Доля в выбросе, %							
		$^{41}\text{Ar}$	$^{85\text{m}}\text{Kr}$	$^{87}\text{Kr}$	$^{88}\text{Kr}$	$^{133}\text{Xe}$	$^{135}\text{Xe}$	$^{135\text{m}}\text{Xe}$	$^{138}\text{Xe}$
Ленинградская	382	69,1	1,6	2,3	4,1	17,1	5,4	0,1	0,3
Курская	584	3,4	3,2	1,3	2	59,8	25,5	3,2	1,5
Смоленская	474	21	7	18,8	21,1	14	17,8	—	0,2
Балаковская	9,14	73	—	9,4	7,8	3,1	4,2	1,2	1,4
Калининская	4,49	61,2	—	14,8	24	—	—	—	—
Кольская	35,4	43,2	11	7,5	10,1	—	28,2	—	—
Нововоронежская	11,2	20,2	—	11,9	17,5	44,8	5,6	—	—
Ростовская	11	41,1	0,6	7,2	8,7	26,8	15,7	—	—

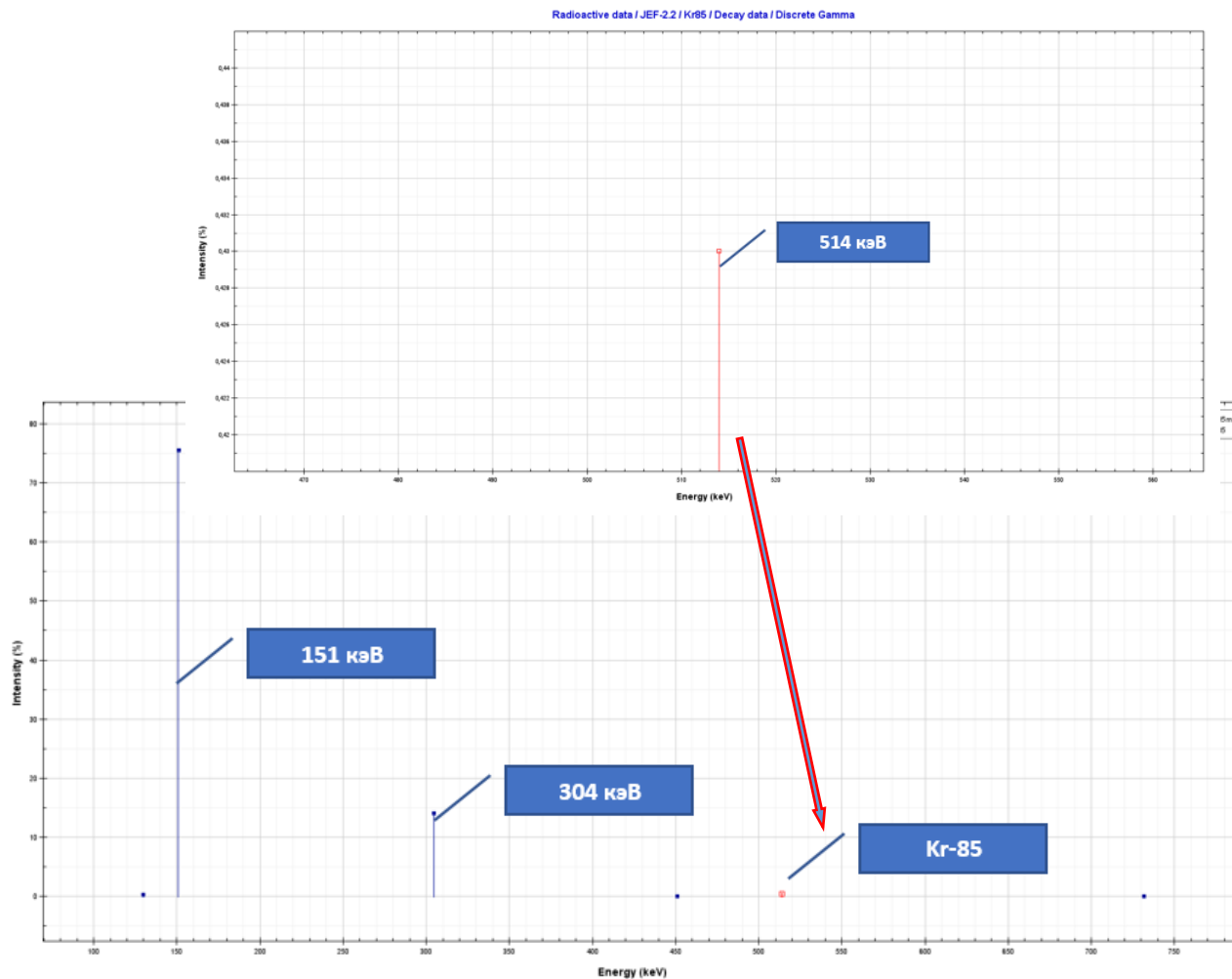
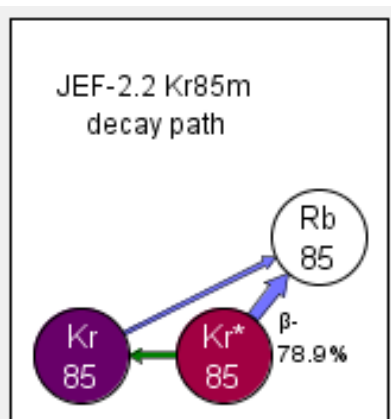
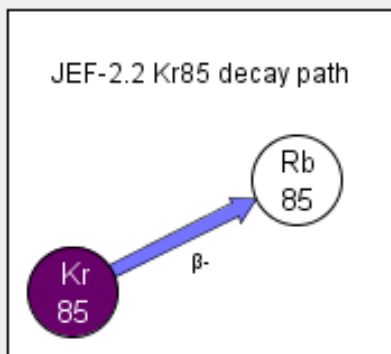
**Примечания.** Прочерк означает, что радионуклид не обнаружен или не вошел в перечень нормируемых для данной АЭС. Относительная погрешность измерения объемной активности каждого изотопа инертных газов составляла от 15 до 35% при доверительной вероятности 0,95.

# Радиоактивные изотопы ИРГ в составе выброса: $^{41}\text{Ar}$

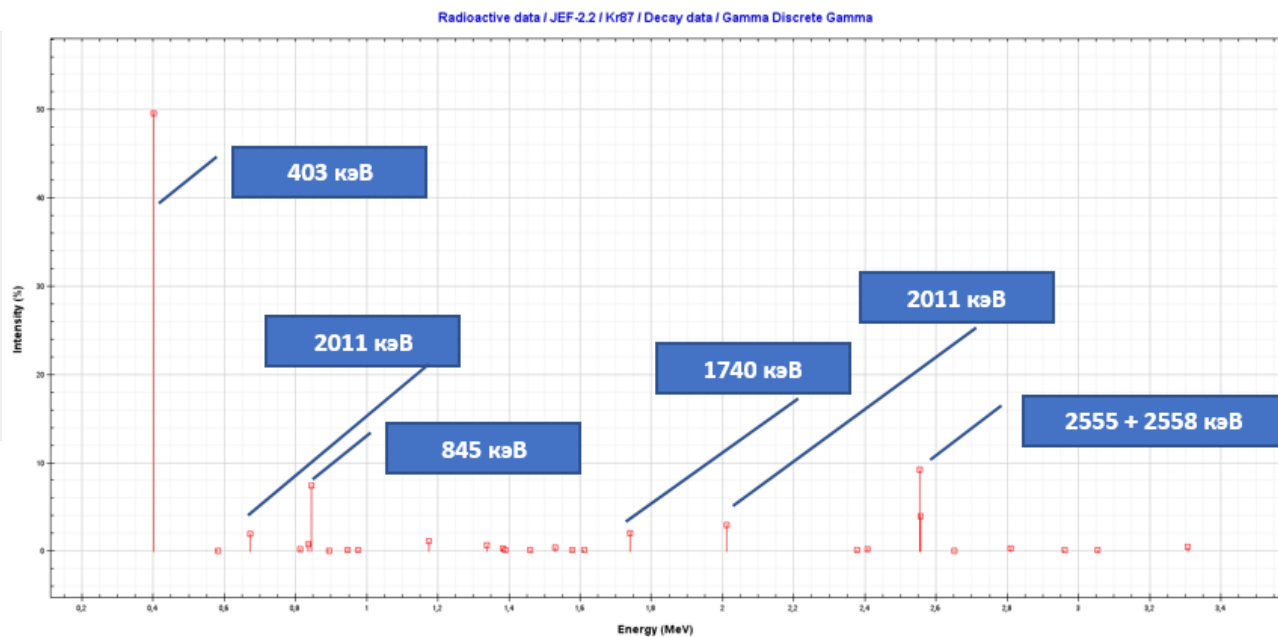
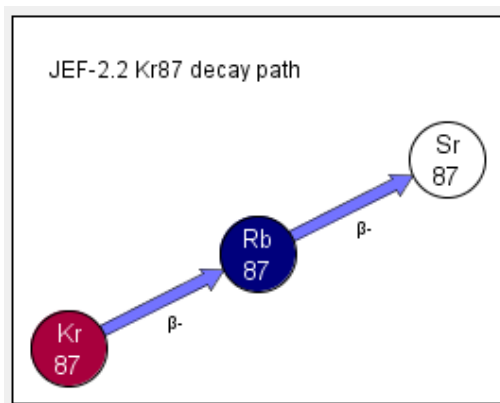




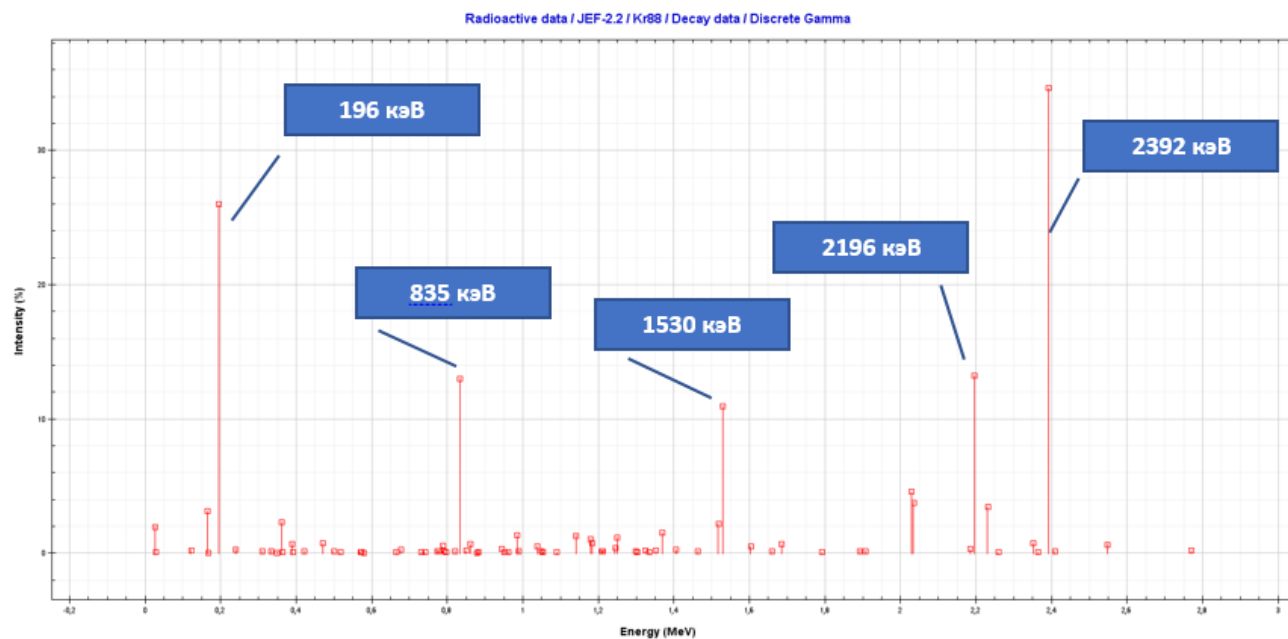
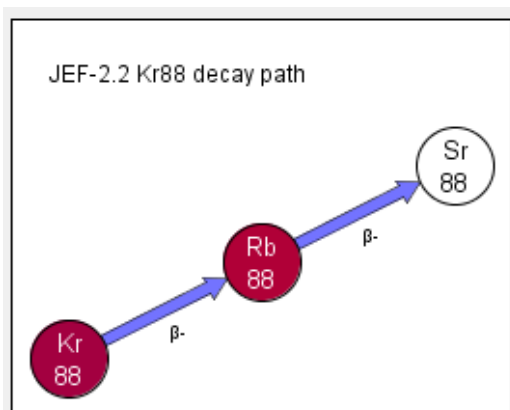
# Радиоактивные изотопы ИРГ в составе выброса: $^{85}\text{Kr}$ , $^{85\text{m}}\text{Kr}$



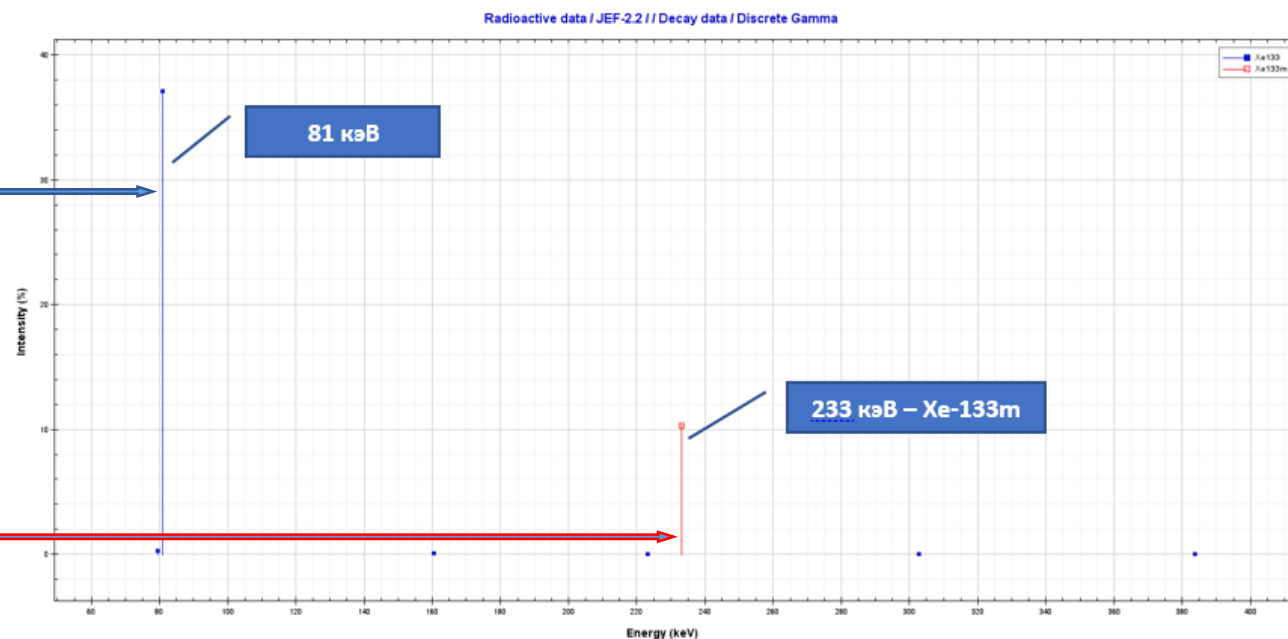
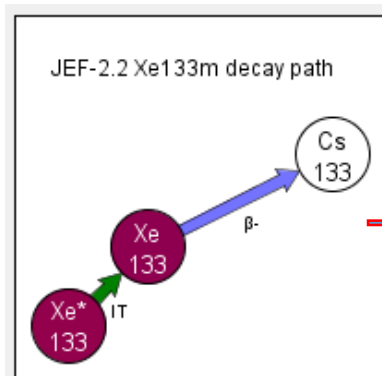
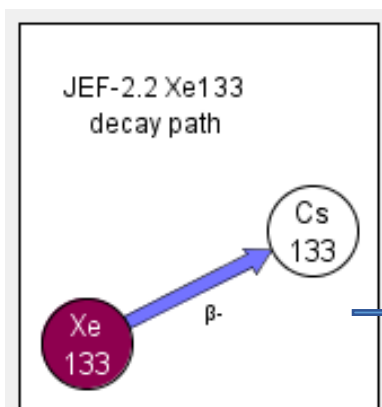
# Радиоактивные изотопы ИРГ в составе выброса: $^{87}\text{Kr}$



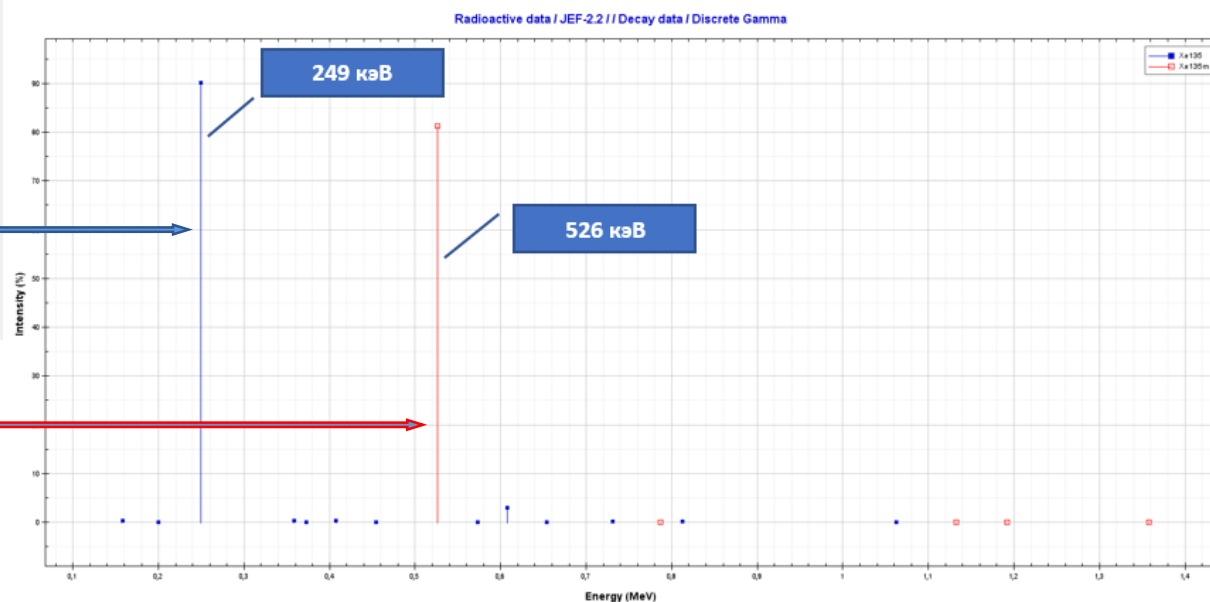
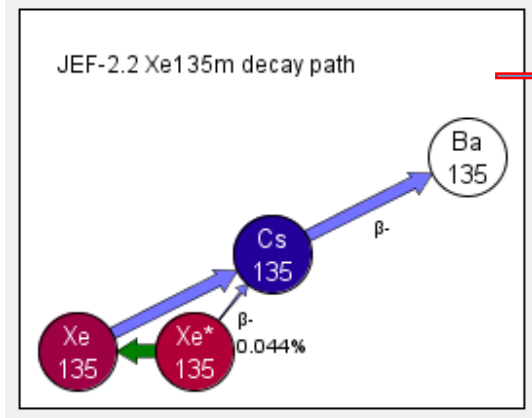
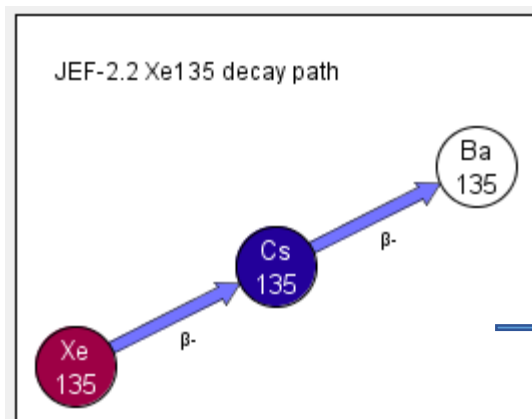
# Радиоактивные изотопы ИРГ в составе выброса: $^{88}\text{Kr}$



# Радиоактивные изотопы ИРГ в составе выброса: $^{133}\text{Xe}$ , $^{133\text{m}}\text{Xe}$

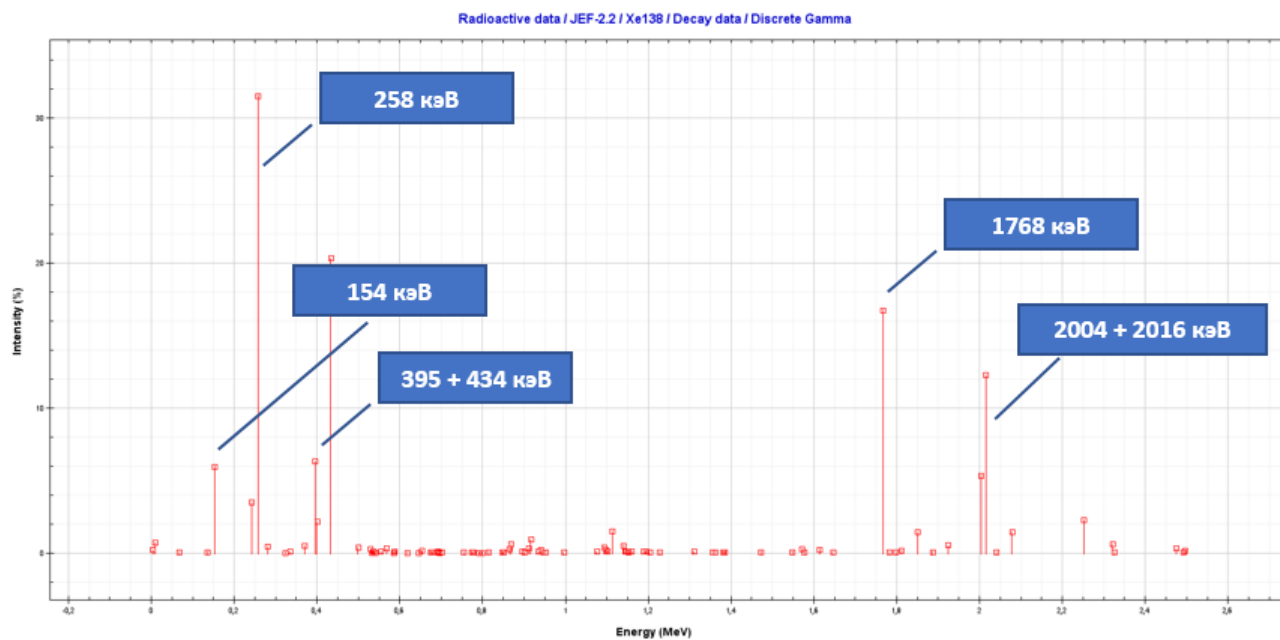
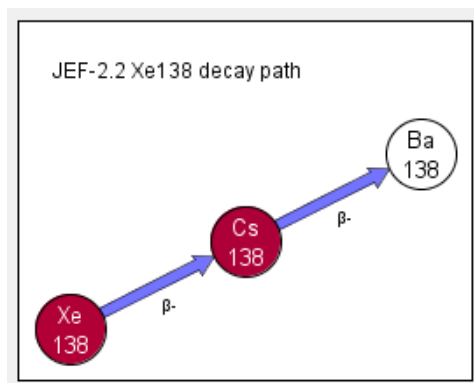


# Радиоактивные изотопы ИРГ в составе выброса: $^{135}\text{Xe}$ , $^{135\text{m}}\text{Xe}$





# Радиоактивные изотопы ИРГ в составе выброса: $^{138}\text{Xe}$

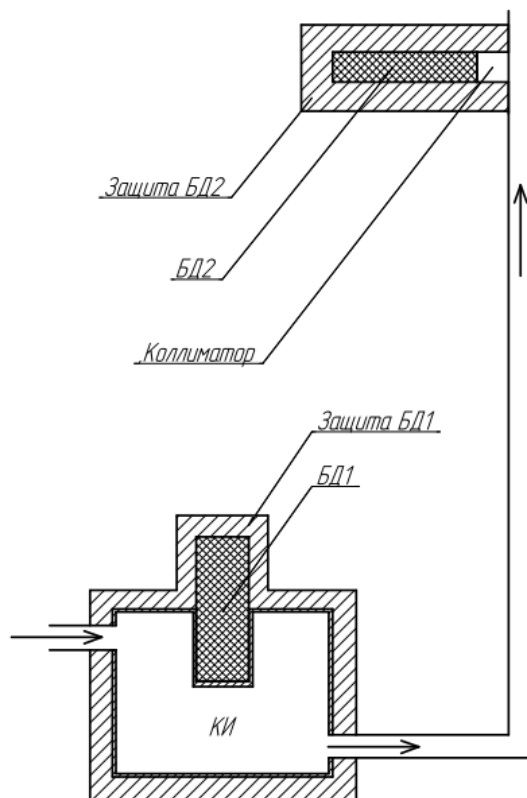


# Характерные линии изотопов ИРГ в составе выброса



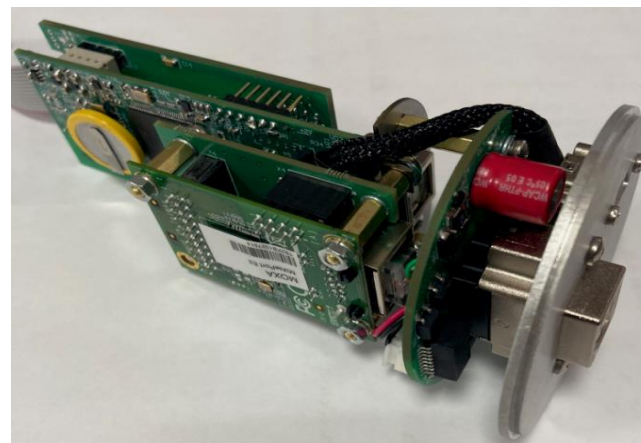
Нуклид	Схема распада	Ожидаемая линия гамма-излучения	Интенсивность
$^{41}\text{Ar}$	$\beta^- \rightarrow ^{41}\text{Ar}$	1284 кэВ	100%
$^{85}\text{Kr}$	$\beta^- \rightarrow ^{85}\text{Rb}$	514 кэВ	0,43%
$^{85\text{m}}\text{Kr}$	$\beta^- \rightarrow ^{85}\text{Rb}$	151 кэВ	75,5%
		305 кэВ	14%
$^{87}\text{Kr}$	$\beta^- \rightarrow ^{87}\text{Sr}$	403 кэВ	49,6%
		2555 кэВ	9,2%
		845 кэВ	7,3%
		2558 кэВ	3,9%
		2011 кэВ	2,9%
		1740 кэВ	2%
$^{88}\text{Kr}$	$\beta^- \rightarrow ^{88}\text{Sr}$	2392 кэВ	34,6%
		196 кэВ	26%
		2196 кэВ	13,2%
		835 кэВ	13%
		1530 кэВ	10,9%
$^{133}\text{Xe}$	$\beta^- \rightarrow ^{133}\text{Cs}$	81 кэВ	37,1%
$^{133\text{m}}\text{Xe}$	$\beta^- \rightarrow ^{133}\text{Cs}$	233 кэВ	10,3%
$^{135}\text{Xe}$	$\beta^- \rightarrow ^{135}\text{Cs} \rightarrow \beta^- \rightarrow ^{135}\text{Ba}$	250 кэВ	90%
		608 кэВ	2,9%
$^{135\text{m}}\text{Xe}$	$\beta^- \rightarrow ^{135}\text{Cs} \rightarrow \beta^- \rightarrow ^{135}\text{Ba}$	527 кэВ	81,2%
$^{138}\text{Xe}$	$\beta^- \rightarrow ^{138}\text{Cs} \rightarrow \beta^- \rightarrow ^{138}\text{Ba}$	258 кэВ	31,5%
		434 кэВ	20,3%
		1768 кэВ	16,7%
		2016 кэВ	12,3%
		396 кэВ	6,3%
		154 кэВ	6%
		2005 кэВ	5,4%

# Инновационные технические решения



Измерительный тракт

- ✓ Двухканальный измерительный тракт на основе перспективных неорганических сцинтилляционных кристаллов  $\text{SrI}_2(\text{Eu})$  и  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ ;
- ✓ Применение встроенного мультисканального анализатора;
- ✓ Применение комбинированного интерфейса **PoE** (Power over Ethernet)



МКА «интеллектуального» БД

## **2. Использование методов математического моделирования при разработке СГГ-02Р**

The background is a solid blue color. On the right side, there is a decorative graphic consisting of numerous thin, white, curved lines that fan out from a single point at the bottom right towards the top right, creating a sense of motion or a stylized wave.

# Моделирование: взаимодействие ионизирующего излучения с детектором



СНИИП  
РОСАТОМ



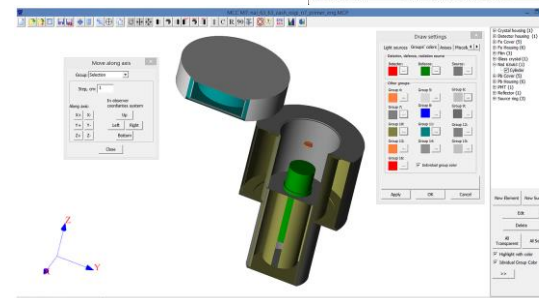
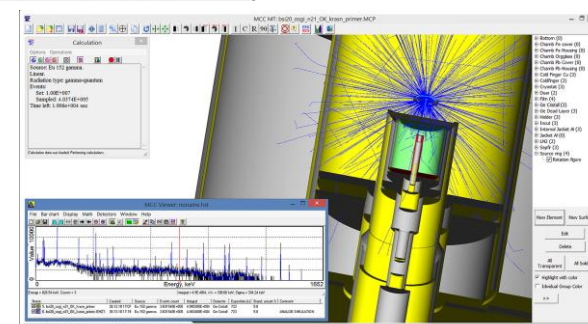
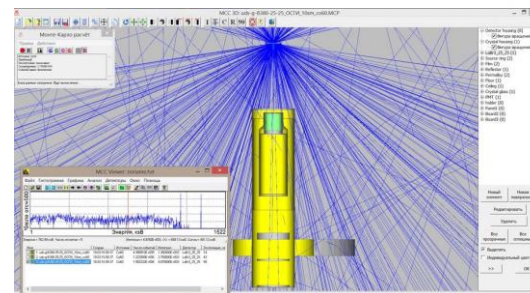
✓ **Программный пакет MCC MT** - программа имитационного трехмерного моделирования процессов переноса и регистрации ионизирующих излучений.

✓ **Задача:** расчет функции отклика детектора исключительно на базе развитого графического интерфейса.

✓ **Цель применения:** выбор оптимальной геометрии проектируемого устройства детектирования без необходимости изготовления нескольких опытных образцов.

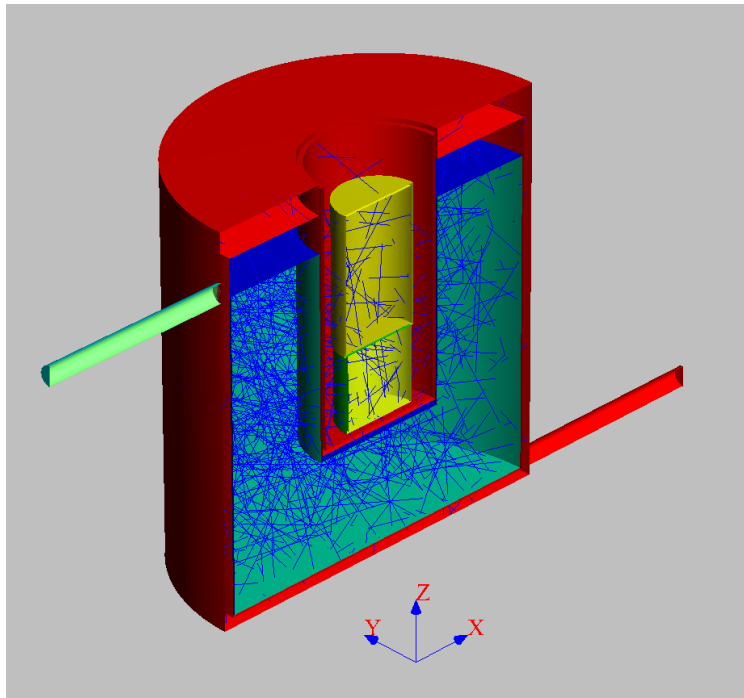
✓ **Доступные ИИ:**

- $\alpha$
- $\beta$  ( $e^-$ ,  $e^+$ )
- $\gamma$
- ТЗЧ





# Моделирование регистрации гамма-излучения

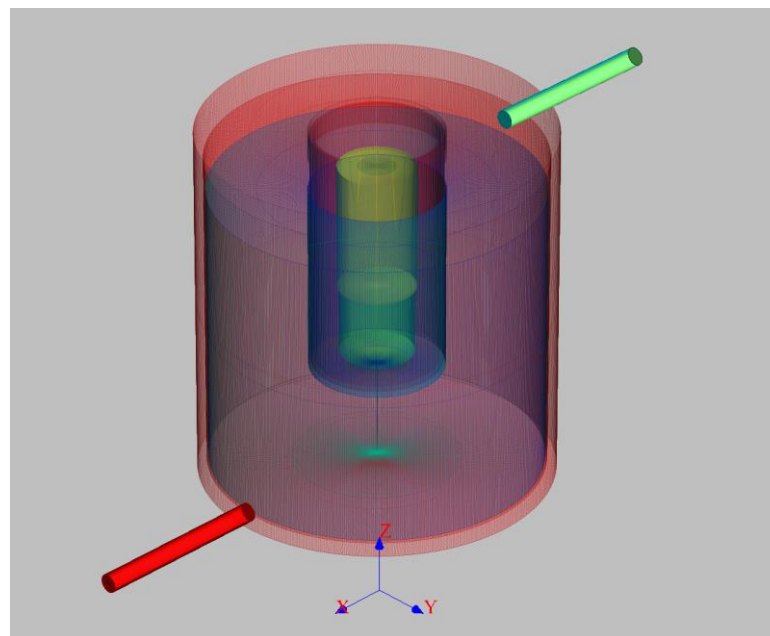
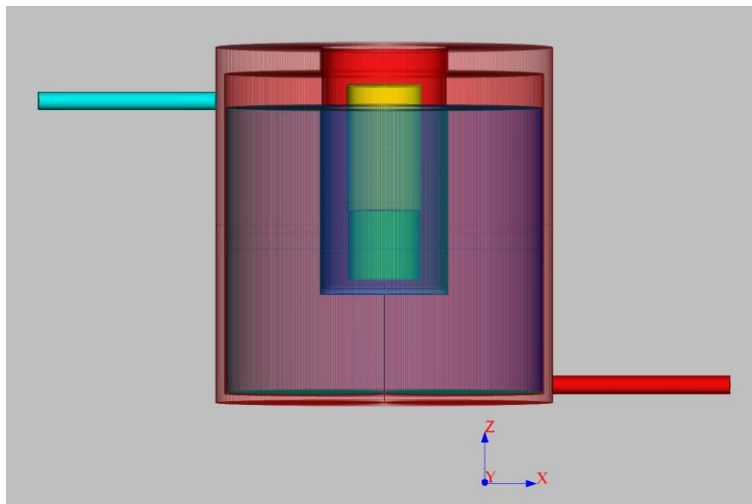


Варьируемые параметры:

1. **Материал** детектора
2. **Объём** детектора
3. **Объём** измерительной камеры

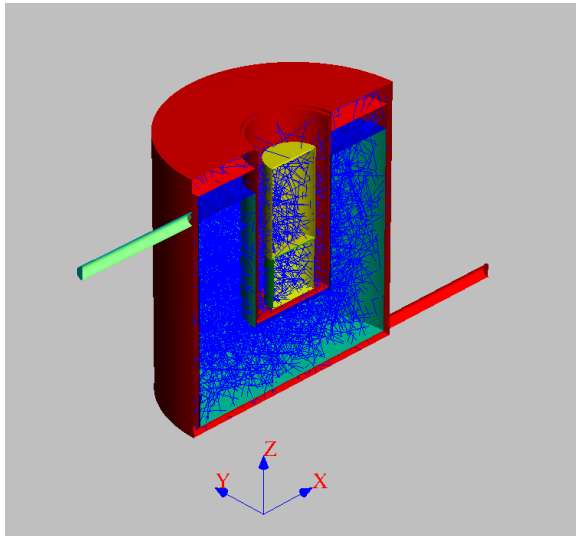
Регистрация излучения радионуклидного состава **ИРГ в выбросе АЭС** при помощи сцинтилляционного блока детектирования на основе кристалла  **$\text{SrI}_2(\text{Eu})$**  <sup>19</sup>

# Этап 1. Построение геометрической модели эксперимента



Геометрическая модель узла детектирования, размещённого в сосуде Маринелли.

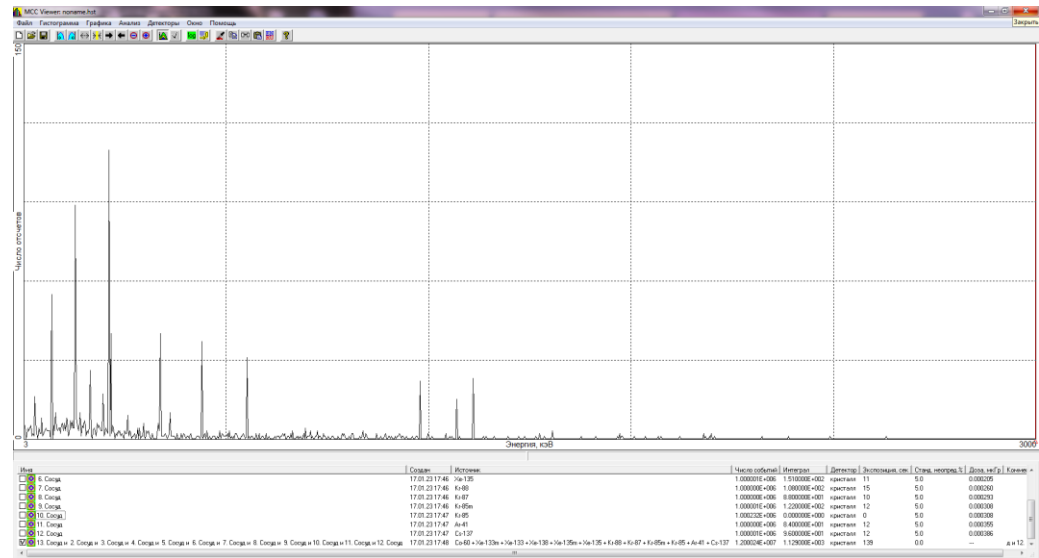
# Этап 2. Построение физической модели эксперимента



Симуляция распадов в объёмном источнике – сосуде **Маринелли объёмом 3л** – и регистрации гамма-квантов, возникающих вследствие распада изотопов ИРГ и примесей Cs и Co в объёмном источнике.

Нуклиды  $^{133}\text{Xe}$ ,  $^{133\text{m}}\text{Xe}$ ,  $^{135}\text{Xe}$ ,  $^{135\text{m}}\text{Xe}$ ,  $^{138}\text{Xe}$ ,  $^{88}\text{Kr}$ ,  $^{87}\text{Kr}$ ,  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{85\text{m}}\text{Kr}$ ,  $^{41}\text{Ar}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$

Формирование **функции отклика детектора** с кристаллом  $\text{SrI}_2(\text{Eu})$  размером  $38 \times 38 \text{ мм}$  при регистрации гамма-квантов изотопов йода в модуле «MCC Viewer»



# Этап 3. Анализ функции отклика детектора



Суммарный спектр от объёмного от **объёмного источника, имитирующего выброс**  $^{133}\text{Xe}$ ,  $^{133\text{m}}\text{Xe}$ ,  $^{135}\text{Xe}$ ,  $^{135\text{m}}\text{Xe}$ ,  $^{138}\text{Xe}$ ,  $^{88}\text{Kr}$ ,  $^{87}\text{Kr}$ ,  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{85\text{m}}\text{Kr}$ ,  $^{41}\text{Ar}$

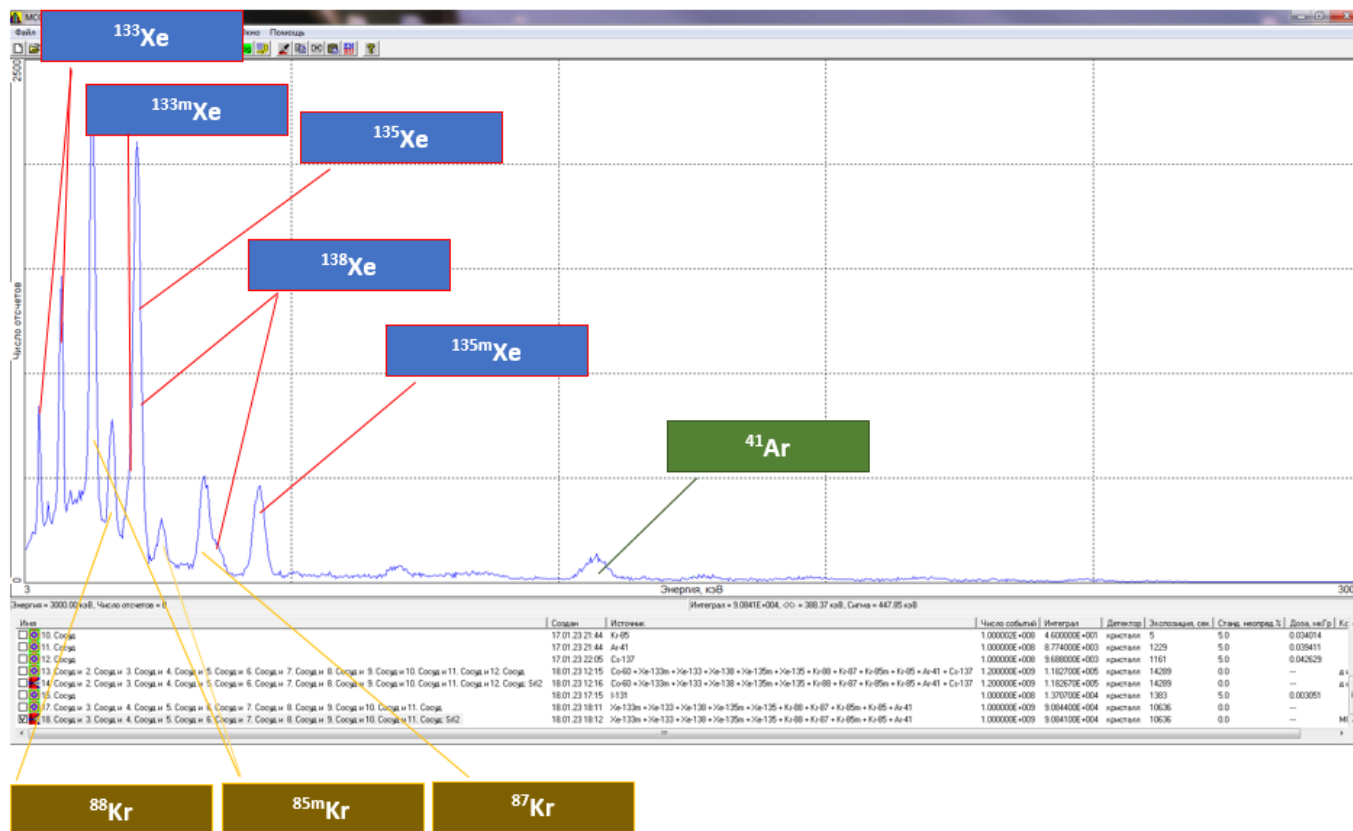
# Этап 3. Анализ функции отклика детектора



Суммарный спектр от объёмного от **объёмного источника, имитирующего выброс  $^{133}\text{Xe}$ ,  $^{133\text{m}}\text{Xe}$ ,  $^{135}\text{Xe}$ ,  $^{135\text{m}}\text{Xe}$ ,  $^{138}\text{Xe}$ ,  $^{88}\text{Kr}$ ,  $^{87}\text{Kr}$ ,  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{85\text{m}}\text{Kr}$ ,  $^{41}\text{Ar}$**



# Этап 3. Анализ сэмулированного спектра

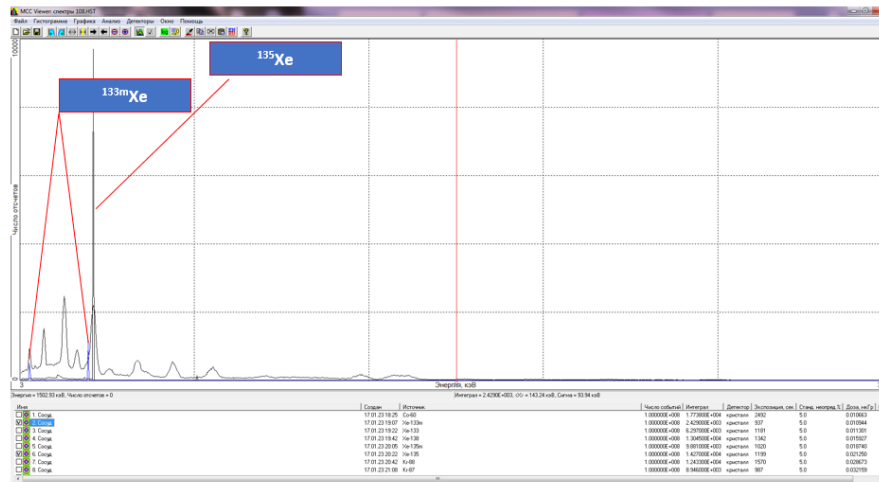


Задание характеристик реального детектора с кристаллом  $\text{SrI}_2(\text{Eu})$  размером  $38 \times 38$  мм, эмуляция спектра, регистрируемого реальным детектором от **объёмного источника, имитирующего выброс**

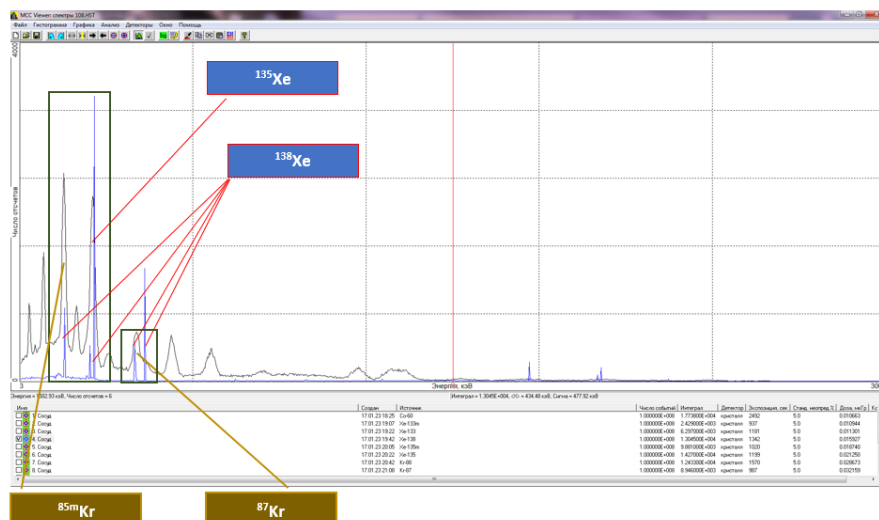
Суммарный спектр от объёмного от **объёмного источника, имитирующего выброс**.  
Задание характеристик реального детектора с кристаллом  $\text{SrI}_2(\text{Eu})$  размером  $38 \times 38$  мм, эмуляция спектра, регистрируемого реальным детектором от **объёмного источника, имитирующего выброс**.

# Особенности интерпретации спектра ИРГ в выбросе АЭС

- Затрудненная идентификация  $^{133m}\text{Xe}$  на фоне  $^{135}\text{Xe}$



- Затрудненная идентификация  $^{138}\text{Xe}$  на фоне прочих радионуклидов Xe и Kr



# Этап 3. Анализ сэмулированного спектра выброса НВАЭС



Суммарный спектр от объёмного от **объёмного источника, имитирующего выброс  $^{133}\text{Xe}$ ,  $^{135}\text{Xe}$ ,  $^{88}\text{Kr}$ ,  $^{87}\text{Kr}$ ,  $^{41}\text{Ar}$**

**Вывод:** линии гамма-излучения искомым нуклидов разрешимы с помощью сцинтилляционных детекторов высокого разрешения.

# Спасибо за внимание!

Тел.: +7 (499) 968 60 60, доб. 4149  
Моб. тел.: +7 (982) 309 80 81  
E-mail: MaDDeryabina@sniip.ru  
[www.sniip.ru](http://www.sniip.ru)

Февраль 2023