



# іDREAM: нейтринные исследования на промышленном реакторе в интересах атомной отрасли

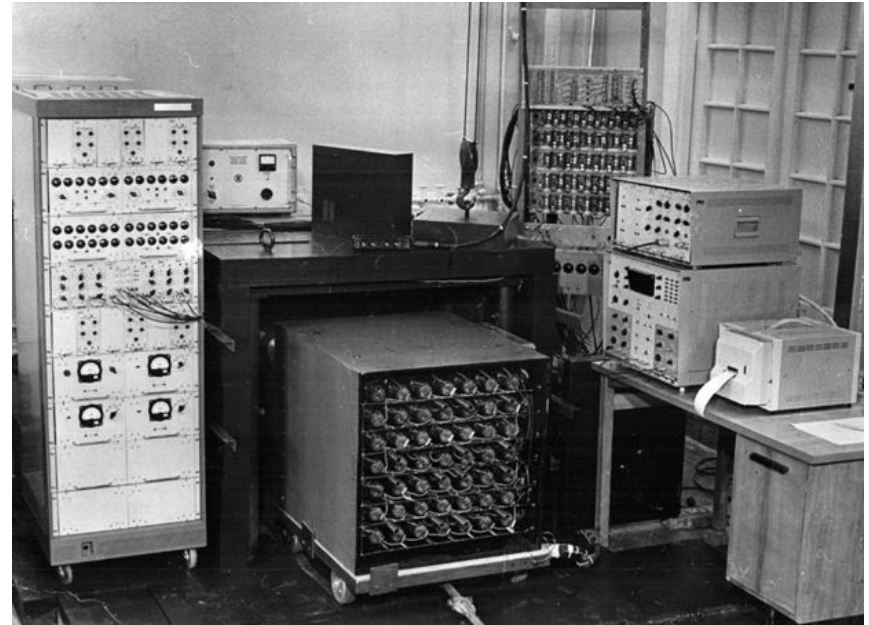
мы здесь!

**СПбГУ, ЯДРО-2025**

Докладчик: Растимешин Антон  
Алексеевич,  
м.н.с. НИЦ “Курчатовский  
Институт”

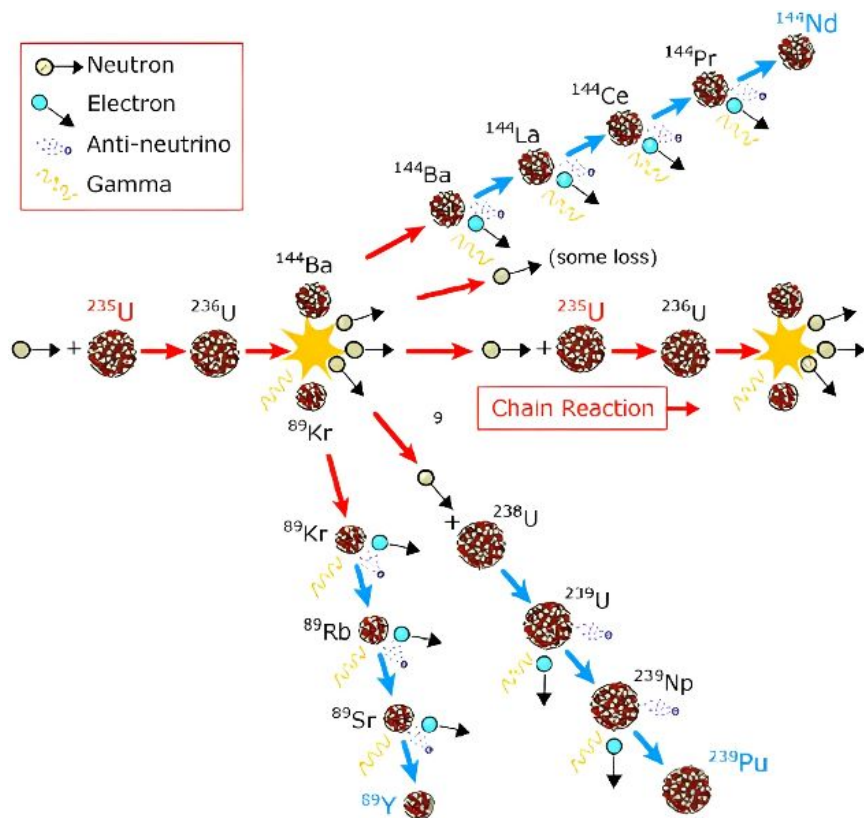
# Реакторные антинейтрино: от первой регистрации до практического применения

- 1956 – экспериментальное обнаружение антинейтрино на реакторном эксперименте
- 1970ые – появление концепции мониторинга ядерных реакторов по потоку антинейтринного излучения
- Эксперименты на Ровенской АЭС (1970ые - 1990ые)
- Н.в. – создание индустриального прибора в интересах атомной отрасли.

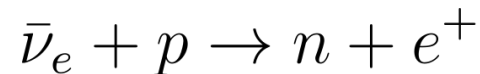


Нейтринная лаборатория на Ровенской АЭС

# Основа метода



- Распадающиеся ядерные материалы являются источниками антинейтрино
- В реакторе с тепловой мощностью 3 ГВт образуется  $\sim 6 \cdot 10^{20}$  электронных антинейтрино в секунду – реакторные антинейтрино, которые образуются в  $\beta$ -распадах нейтроноизбыточных осколков деления:  $^{235}\text{U} + n \rightarrow X_1 + X_2 + n's$
- Регистрация антинейтрино по обратному бета-распаду:

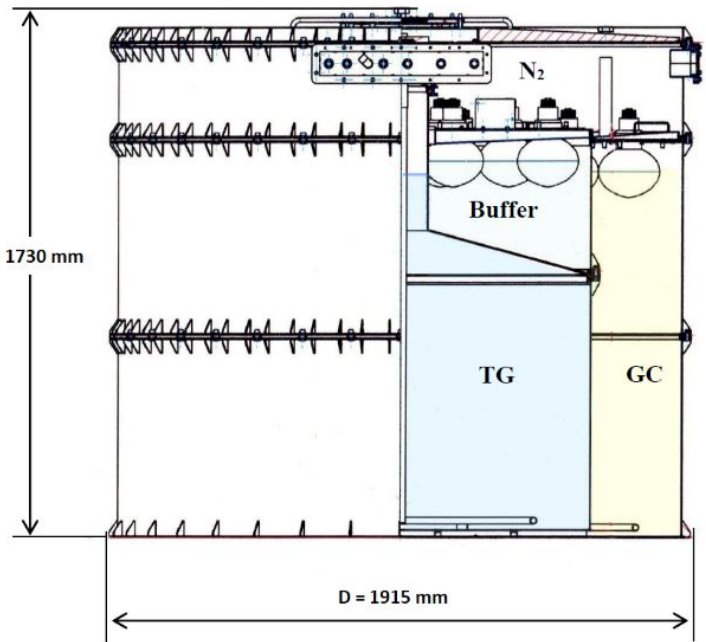


# Цели проекта

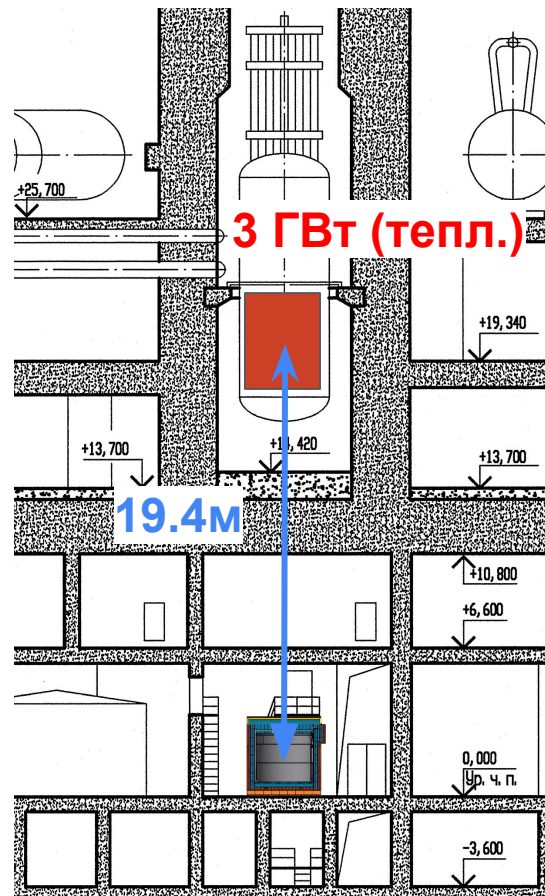
- Повышение безопасности развития атомной энергетики: Внедрение комплементарных методов диагностики состояния ядерных объектов, в т.ч. в нештатных и аварийных ситуациях
- Изучение возможности применения нейтринного метода для применения гарантий МАГАТЭ к плавучим атомным энергоблокам
  - Эксплуатация ПАТЭС не предполагает обращения со свежим и облученным топливом, т.к. реактор является отпрессованным на заводе-изготовителе и возвращается на завод-изготовитель после 8-10 лет эксплуатации
- Испытания новых материалов и технических решений для нейтринных детекторов

# Конструкция и расположение

- Мишень: LAB + PPO (2.7 г/л) + bis-MSB (0.02 г/л) + гадолиний (1 г/л)



- Гамма-кетчер: LAB + PPO (3 г/л) + bis-MSB (0.02 г/л)
- 19.4 метра от геом. центра АЗ
- 16 ФЭУ R5912 в TG, 12 в GC
- Две мюонных пластины сверху детектора.

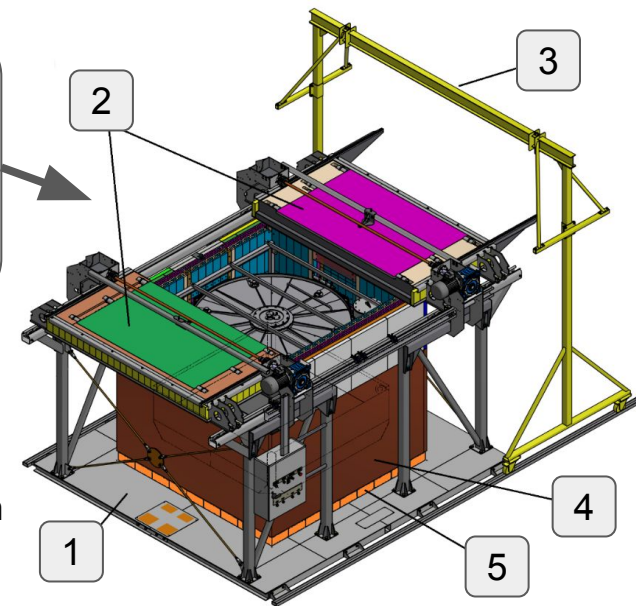


# Защита iDREAM

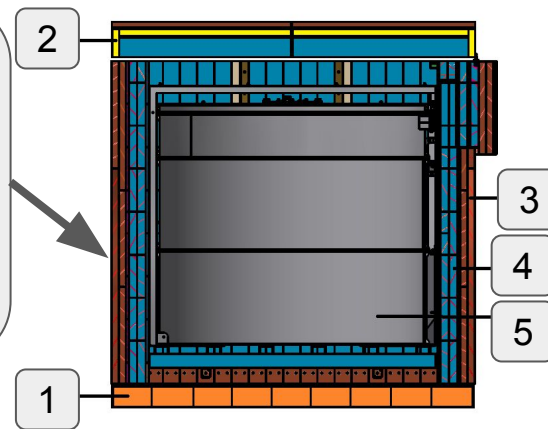


- 1 – разгрузочная платформа
- 2 – сцинт. пластины
- 3 – монтажный кран
- 4 – пластины из п/э
- 5 – чугун

Пространство  $2 \times 2 \times 2 \text{ м}^3$   
внутри защиты для  
нейтринного детектора

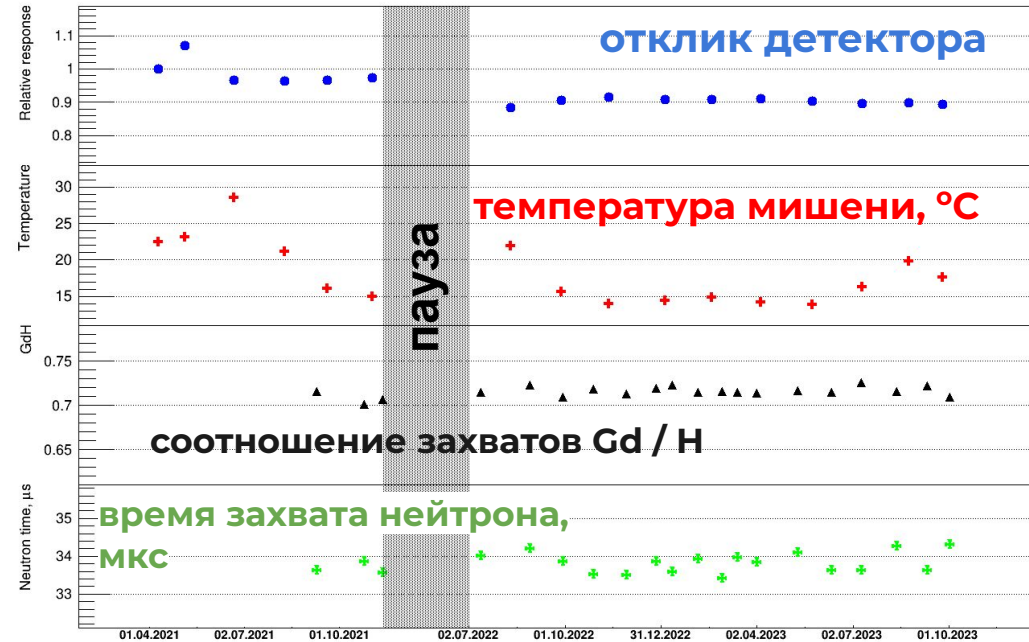


- 1. (оранжевый) – чугун (14 см)
- 2. (желтый) – свинец (5 см)
- 3. (коричневый) – чистый п/э (10 см)
- 4. (синий) – борированный п/э (16 см)
- 5. – нейтринный детектор



# Gd-ЖОС

- ЛАБ + PPO + bis-MSB + Gd (0.1%), всего 1.1 м<sup>3</sup>, Gd в составе триметилгексаноата Gd(TMHA)<sub>3</sub>
- Gd-ЖОС приготовлен в сотрудничестве с НИЦ «Курчатовский институт» – ИРЕА
- Растворение Gd-концентрата (Gd-MS, 10 г/л) в ЛАБе, очистка ТМНА и ЛАБа, использованного для приготовления Gd-MS – вакуумной дистилляцией
- За 2.5 г наблюдений деградации оптических и химических свойств Gd-ЖОС не отмечалось при условии постоянной, менее 20 °С температуры сцинтилляционного раствора и отсутствия контакта с атмосферой



- Стабильность отклика проверялась путем регулярных калибровок с использованием радиоактивных источников <sup>60</sup>Co и <sup>252</sup>Cf.
- Отклик: в пределах [+10%; -10%]
- Соотношение Gd / H: [0.7 - 0.72]
- Время захвата нейтронов: [33.5 - 34.5] мкс

# Измерение энерговыработки реактора

Для практических приложений представляет интерес время **t**, за которое нейтринный детектор способен обеспечить измерение **энерговыработки W**. Фактически, пересчитываем количество событий ОБР с поправками на различие спектров антинейтрино от различных изотопов

$$W(t) = \int_{t_1}^t P_{th}(t') dt',$$

$$N_\nu = \gamma(1 + k)P_{th},$$

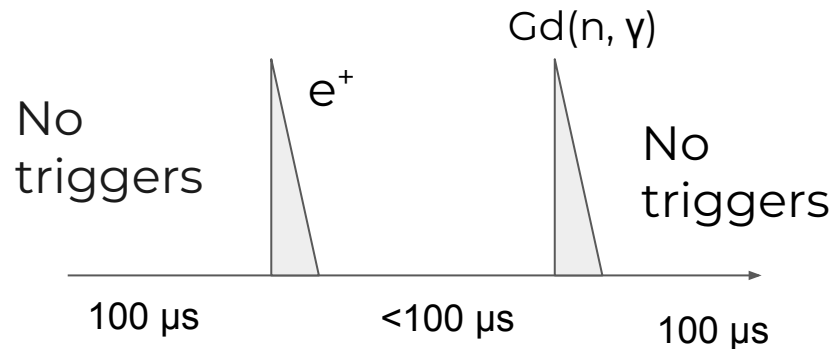
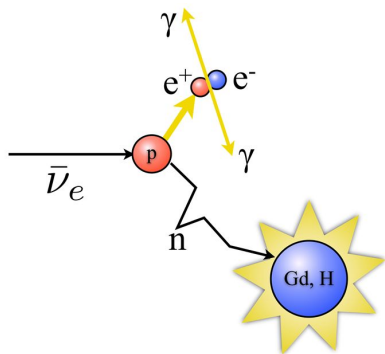
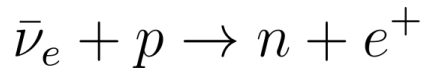
$$\gamma = \frac{\epsilon N_p}{4\pi R^2} \cdot \frac{\sigma_5}{E_5},$$

$$1 + k = \frac{1 + \sum_i \alpha_i (\sigma_i / \sigma_5 - 1)}{1 + \sum_i \alpha_i (E_i / E_5 - 1)},$$

- **P<sub>th</sub>** – тепловая мощность реактора
- **N<sub>v</sub>** – число событий ОБР
- **ε** – эффективность детектора
- **N<sub>p</sub>** – число атомов водорода в мишени
- **R** – расстояние от центра мишени до центра активной зоны
- **σ<sub>i</sub>** — взвешенное со спектром антинейтрино сечение ОБР на одно деление i-го изотопа (по Курчатовской модели) [1]
- **E<sub>i</sub>** — тепловая энергия деления i-го изотопа [2]
- **α<sub>i</sub>** — доля делений i-го изотопа (по данным КАЭС)

1. Kopeikin V., Skorokhvatov M., Titov O. // Phys. Rev.D. 104. L071301 (2021)
2. Kopeikin V.I., Popov D.V., Skorokhvatov M.D. // Phys. Atom. Nuclei. 87. 389 (2024)

# Критерии отбора антинейтринных событий



Критерии отбора:

- Первый импульс: [4; 8] МэВ
- Второй импульс: [5; 10] МэВ
- Отсутствие каких-либо триггерных сигналов в окне 100мкс до мгновенного и после задержанного событий

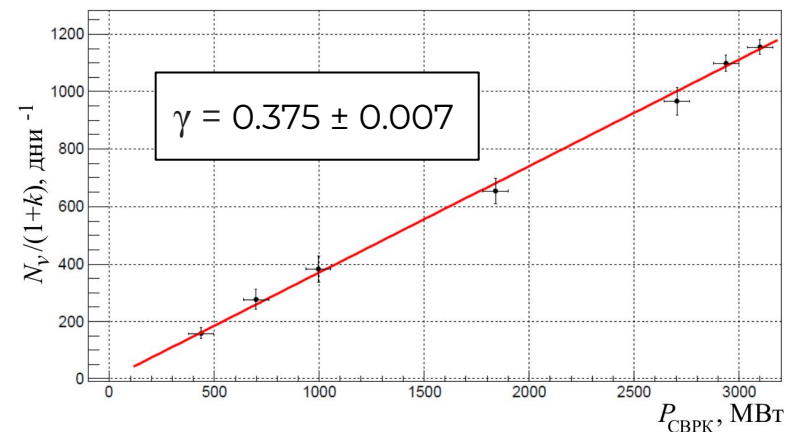
Отбор кандидатов на позитрон с 4 МэВ:

- Обеспечивает оптимальную чувствительность детектора к выгоранию топлива, которое лучше всего заметно при более высоких энергиях
- Позволяет пренебречь неравновесными поправками и поправками от отработавшего ядерного топлива [1]

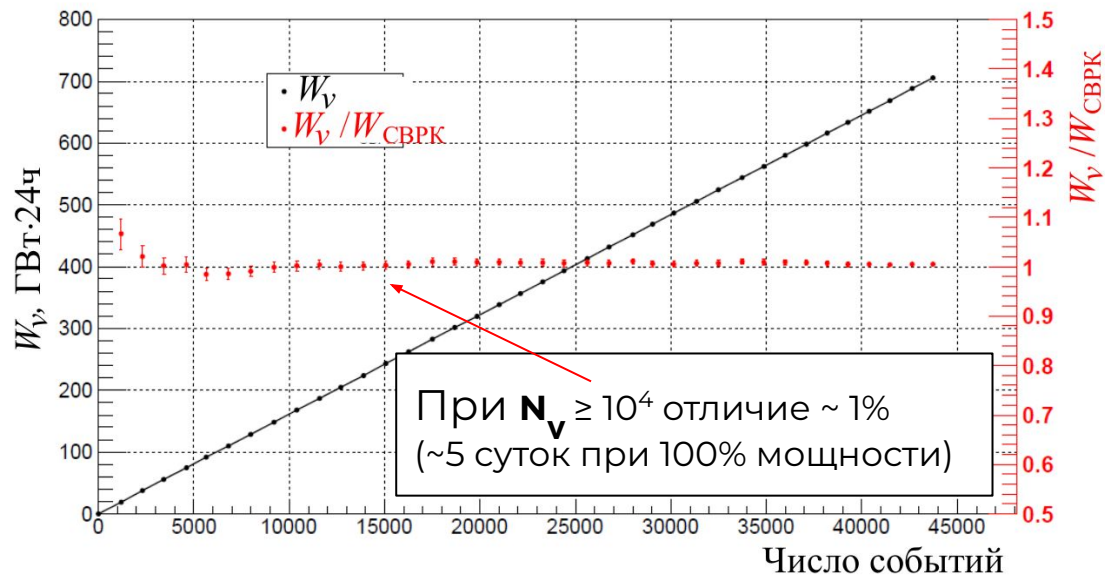
# Измерение энерговыработки реактора

$$N_\nu = \gamma(1 + k)P_{th},$$

- $\gamma = \frac{\epsilon N_p}{4\pi R^2} \cdot \frac{\sigma_5}{E_5}$  – определяем экспериментально
- **(1 + k)** вычисляем по Курч. модели спектров

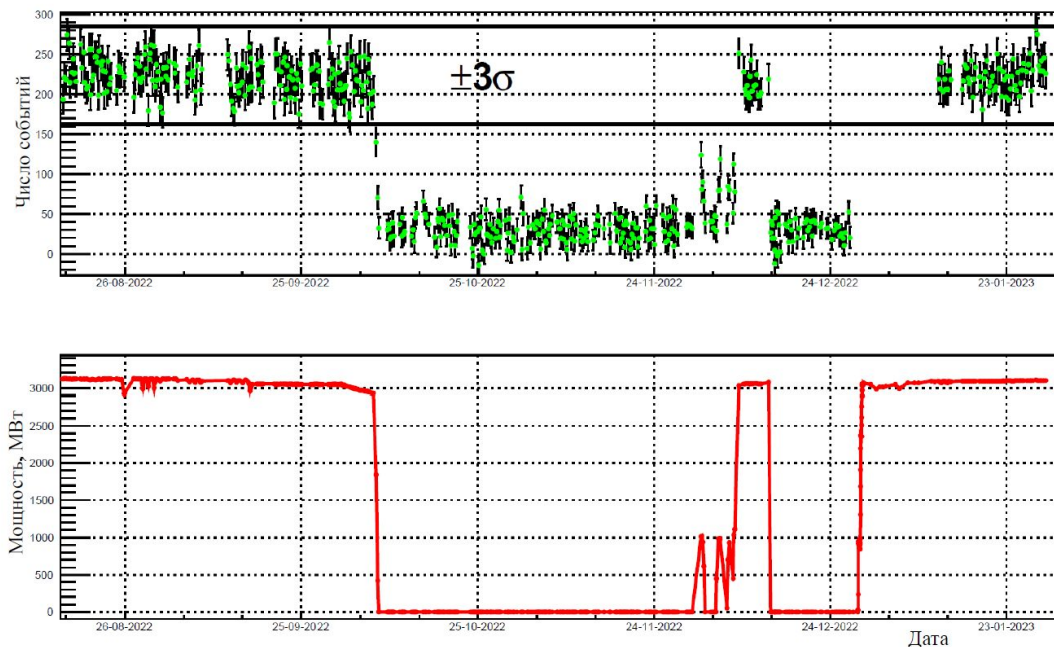


Кол-во событий в день от тепл. мощности реактора

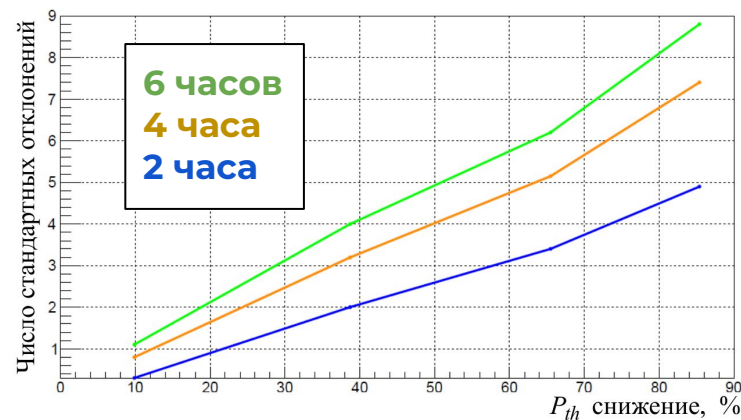


Энерговыработка антинейтринным методом  $W_v$  в зависимости от числа зарегистрированных событий (черн.) и её отношение к энерговыработке  $W_{\text{СВРК}}$  по данным служб КАЭС (красн.)

# Чувствительность iDREAM к изменению мощности реактора



Сверху: число взаимодействий в детекторе iDREAM для 4-часовых интервалов набора статистики. Снизу: Тепловая мощность реактора  $P_{\text{СВРК}}$  по данным служб КАЭС



- Применяется относительный метод измерения мощности
- $N_v = 224 \pm 20$  соб. / 4 часа ( $1344 \pm 120$  соб. / сутки)
- **За 2 часа** набора статистики достоверность обнаружения перехода реактора **на 50%** мощности составляет  **$2.6\sigma$**
- Падение мощности **на 10%** от номинальной обнаруживается **за 6 часов** на уровне  **$1.1\sigma$**

# Заключение

- Продолжаются испытания установки iDREAM в потоке антинейтрино промышленного реактора ВВЭР-1000
- Gd-содержащий жидкий сцинтиллятор является стабильным на протяжении 2.5 лет наблюдений, при условиях поддержания постоянной температуры на уровне менее 20 °C и отсутствия контакта с атмосферой
- На основе данных нейтринного детектора iDREAM измерена суточная энерговыработка промышленного ядерного реактора ВВЭР-1000.
- Согласие результатов измерений энерговыработки по нейтрино и по данным СВРК достигает величины лучше 1% .
- **За 2ч** набора статистики по  $\bar{\nu}_e$  достоверность обнаружения перехода реактора на режим работы в **50%** мощности составляет **2.6 $\sigma$** . Падение мощности **на 10%** от номинальной детектируется **за 6 ч** со статистической значимостью **1.1 $\sigma$** .



**Спасибо за внимание!**