

Оценка вклада ОЯТ и горячего топлива в реакторе в сигнал детектора ТАО

ПРОКОПЕНКО АЛЕКСАНДРА

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ, МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА

Эксперимент JUNO

Эксперимент JUNO — это эксперимент с реакторными нейтринными детекторами, одной из основных целей которого является определение иерархии нейтринных масс.



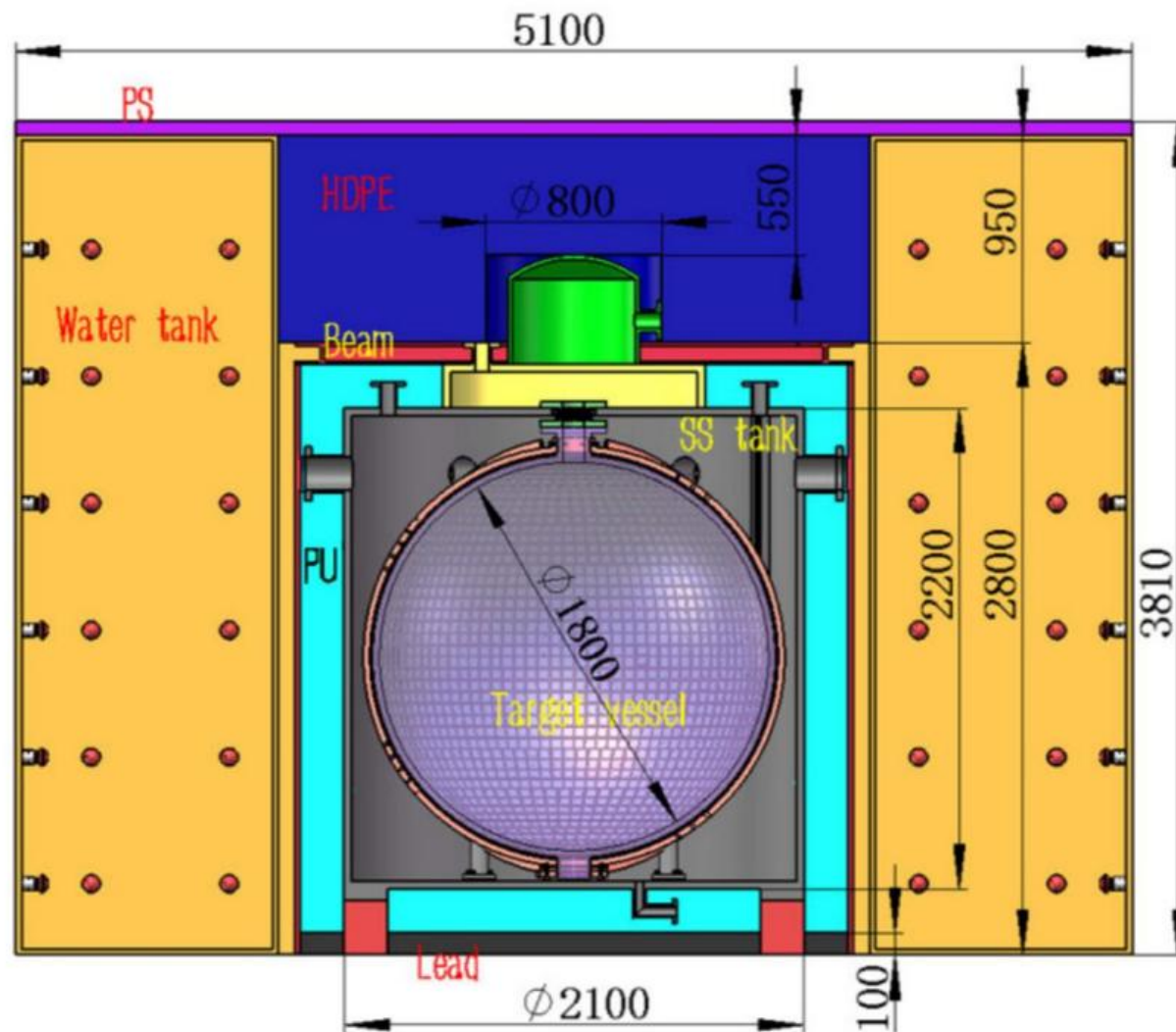
Ожидаемое энергетическое разрешение в эксперименте JUNO - 3.4% при 1 МэВ

Детектор ТАО

Для эффективного наблюдения параметров осцилляций необходимо прецизионное измерение антинейтринных спектров.

Чтобы уменьшить влияние неопределённостей моделей исходных спектров (до осцилляций), эксперименты с реакторными антинейтрино используют дополнительный детектор, располагаемый вблизи реактора.

- Детектор ТАО находится на расстоянии 44м от центра активной зоны ближнего энергоблока АЭС Тайшань

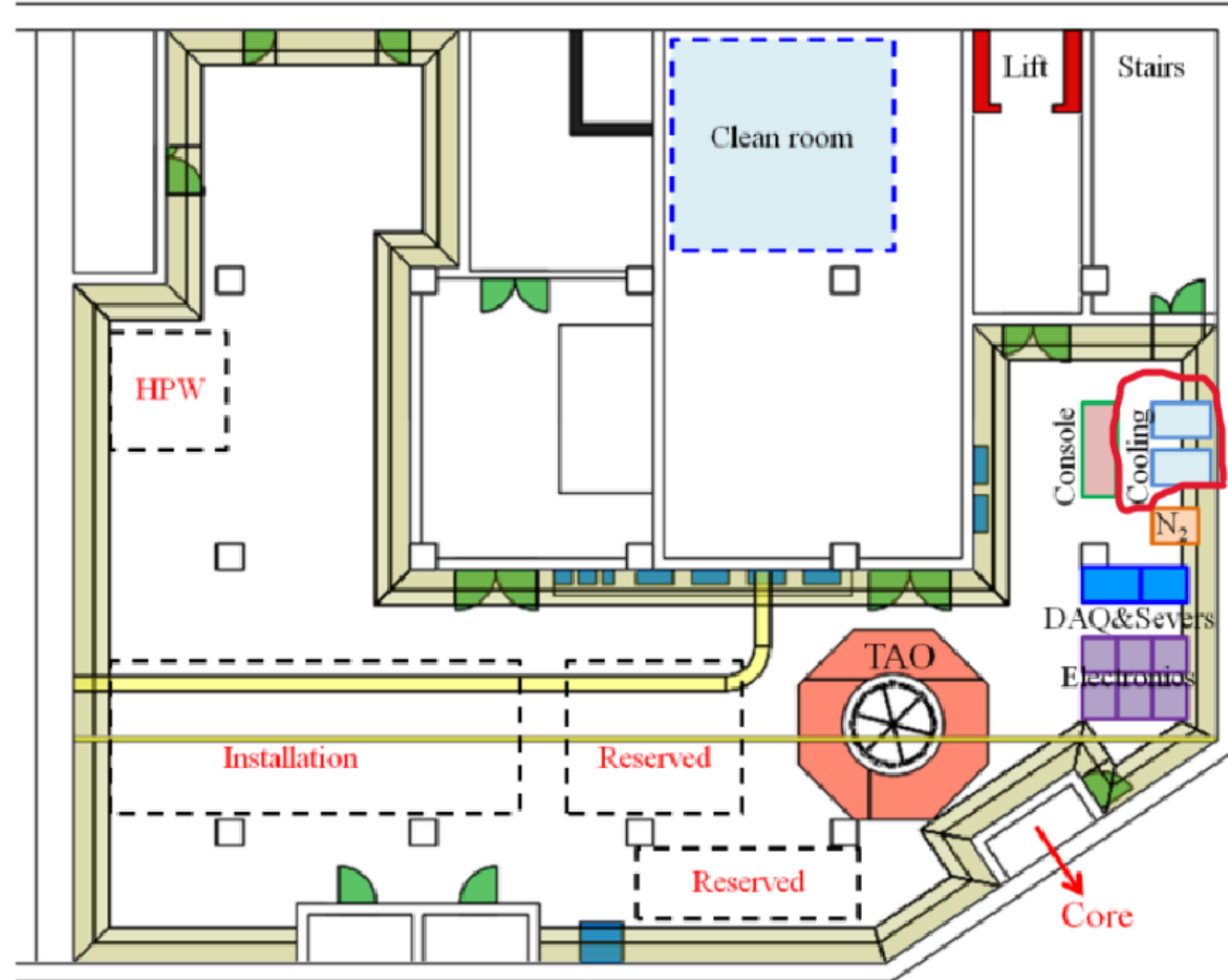


Схематическое изображение детектора ТАО.

Цели работы

Сигнал в детекторе формируется не только работающим реактором, но и другими, динамическими источниками — **бассейном выдержки ОЯТ и горячим топливом** в остановленных реакторах, вклад которых сильно зависит от времени. В текущем анализе используется усреднённый по времени спектр для всего периода действия эксперимента DayaBay, не учитывающий различий в конфигурации в сравнении с TAO, временной эволюции вклада и отличий в расписании перегрузок и остановок реакторов.

Цель работы — разработать гибкий динамический подход к расчёту вкладов ОЯТ и горячего топлива, продемонстрировать результаты для условий TAO с учётом реального графика перегрузок и остановок реакторов, количественно оценить их максимальный и минимальный вклады.



Расчёты

События в детекторе фиксируются с помощью реакции обратного β -распада:



Вклад бассейна отработавшего топлива в полный поток рассматривается в диапазоне энергий от **1.8 МэВ** (порог реакции обратного бета-распада) до **3.8 МэВ** (начало обрыва спектра ОЯТ)

Спектры реактора

$$\psi(E_{\bar{\nu}_e}) = P_{\text{тепл}} K_{\text{киум}} \sum_{i=1}^4 \left(\frac{p_i}{Q_i} \right) \lambda_i(E_{\bar{\nu}_e})$$


$$\lambda_i(E_{\bar{\nu}_e}) = \exp \left(\sum_{p=1}^6 a_p^i E_{\bar{\nu}_e}^{p-1} \right)$$

Спектры ОЯТ

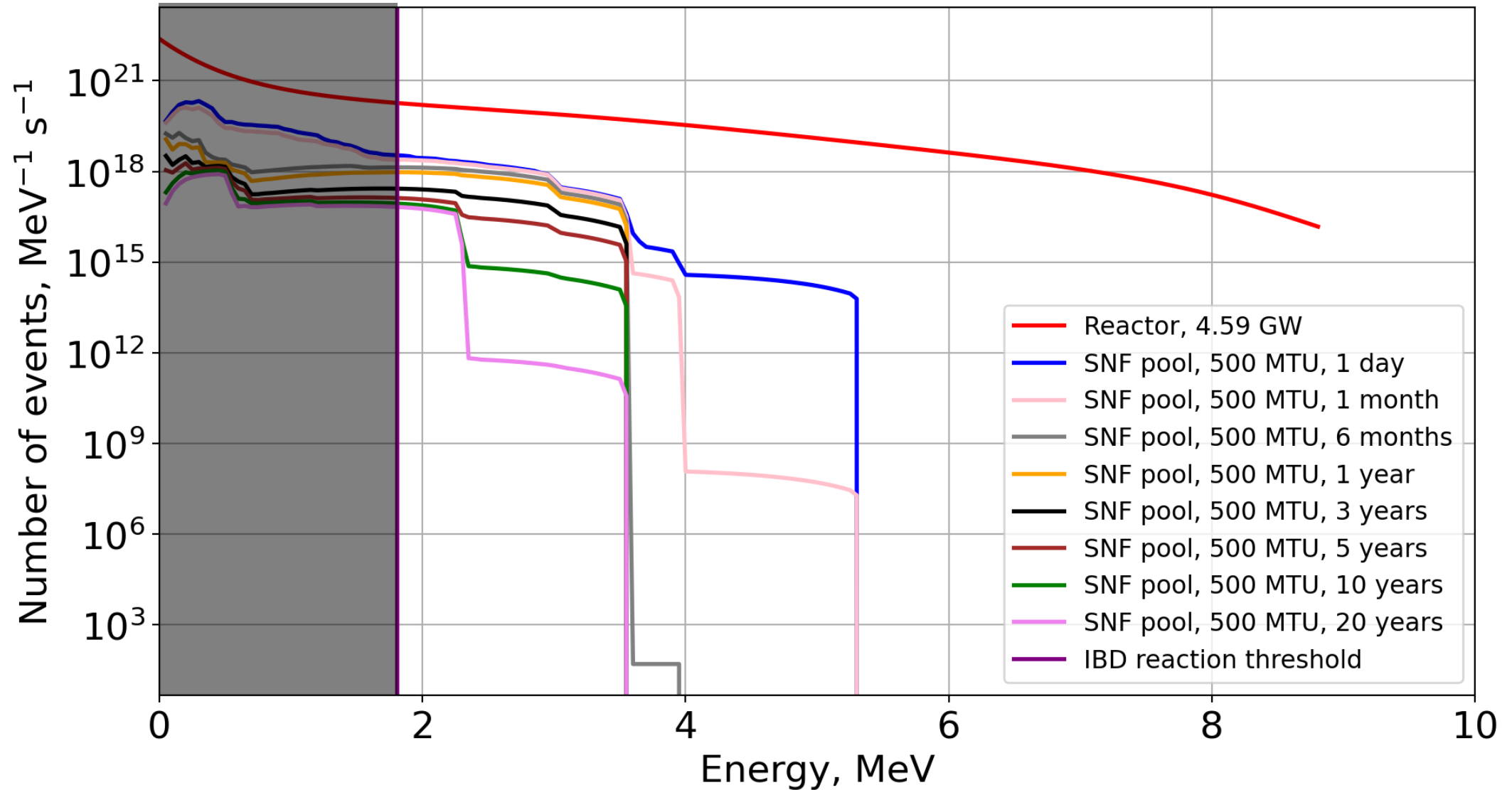
Спектры ОЯТ напрямую взяты из статьи
(в виде таблицы):
"Antineutrino monitoring of spent nuclear fuel"
Vedran Brdar, Phys. Rev. - ноябрь 29, 2017

Число событий

$$N_{\text{reac}} = \epsilon(E_{\bar{\nu}_e}) N_p \sum_{m=1}^M \frac{1}{4\pi L_m^2} \int P_{ee}(E_{\bar{\nu}_e}, L_m) \sigma_{\text{IBD}}(E_{\bar{\nu}_e}) \psi_m(E_{\bar{\nu}_e}) dE_{\bar{\nu}_e}$$

Реактор или ОЯТ 

Изменение спектра ОЯТ со временем



Тестовая конфигурация

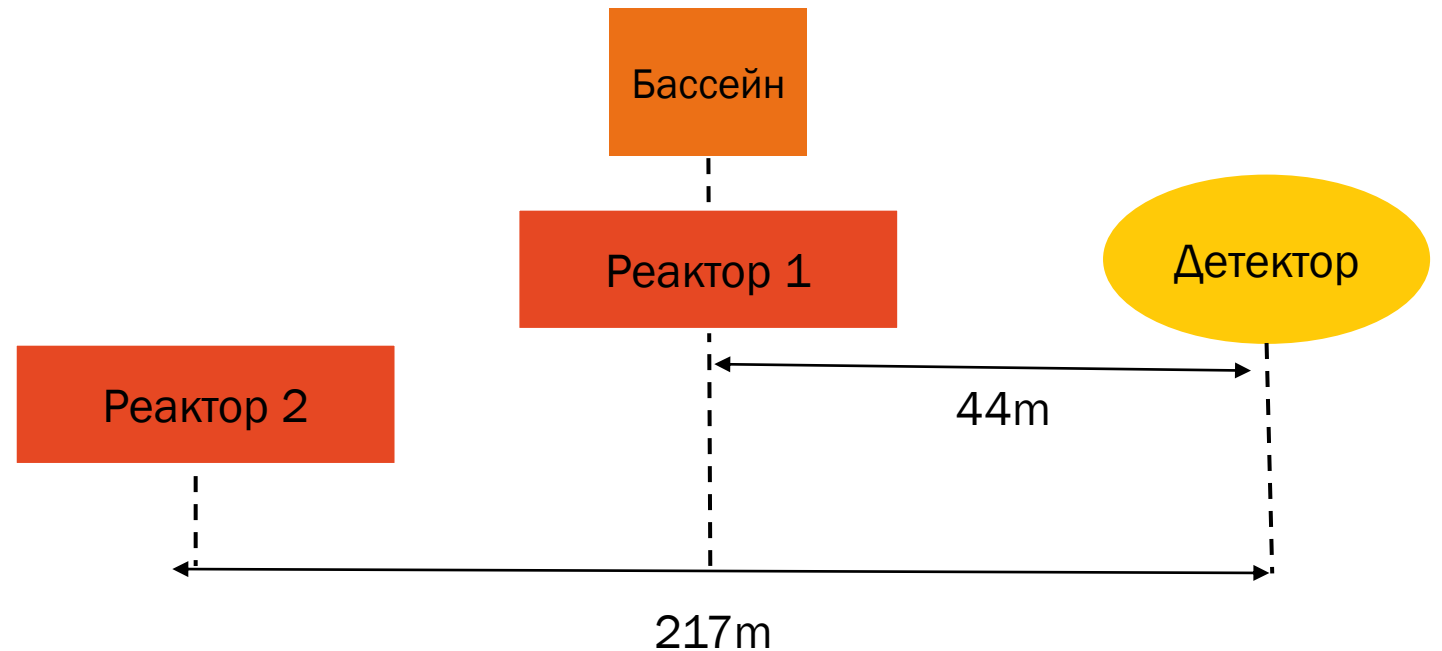
Мы рассматриваем два реактора типа EPR, каждый тепловой мощностью **4590 МВт**.

И периодически перегружаемый бассейн выдержки ОЯТ ближнего реактора и объёмом одной загрузки **50 MTU**.

Интервал перегрузки составляет **18 месяцев**.

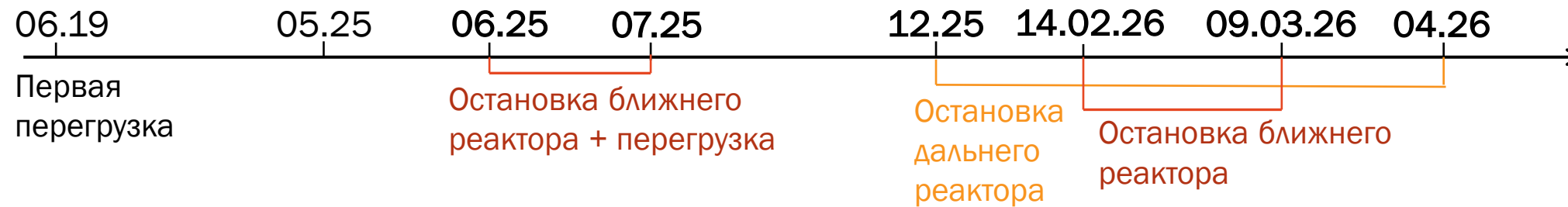
Реакторы типа EPR содержат примерно **180 MTU** урана в активной зоне.

Когда реактор остановлен, предполагается, что его антинейтринный спектр имеет ту же форму, что и спектр ОЯТ, но с другой MTU топлива (**180** для остановленного реактора и **130** для перегрузки).



Расстояния: дальний реактор – 217 м
ближний реактор и бассейн – по 44 м

Тестовая конфигурация



Временная шкала эксперимента:

- Мы начинаем расчёты с **Мая 2025**, чтобы отобразить процесс перегрузки топлива (реальные расчёты начались в 2026 году)
- Ближний реактор начал работу в **Декабре 2018** → к началу расчётов первая партия ОЯТ охлаждалась ~6 лет (5я перегрузка)
- **Июнь – июль 2025**: остановка ближнего реактора и перегрузка топлива
- **Декабрь 2025 – апрель 2026**: остановка дальнего реактора
- **14 февраля 2026 – 9 марта 2026**: остановка ближнего реактора

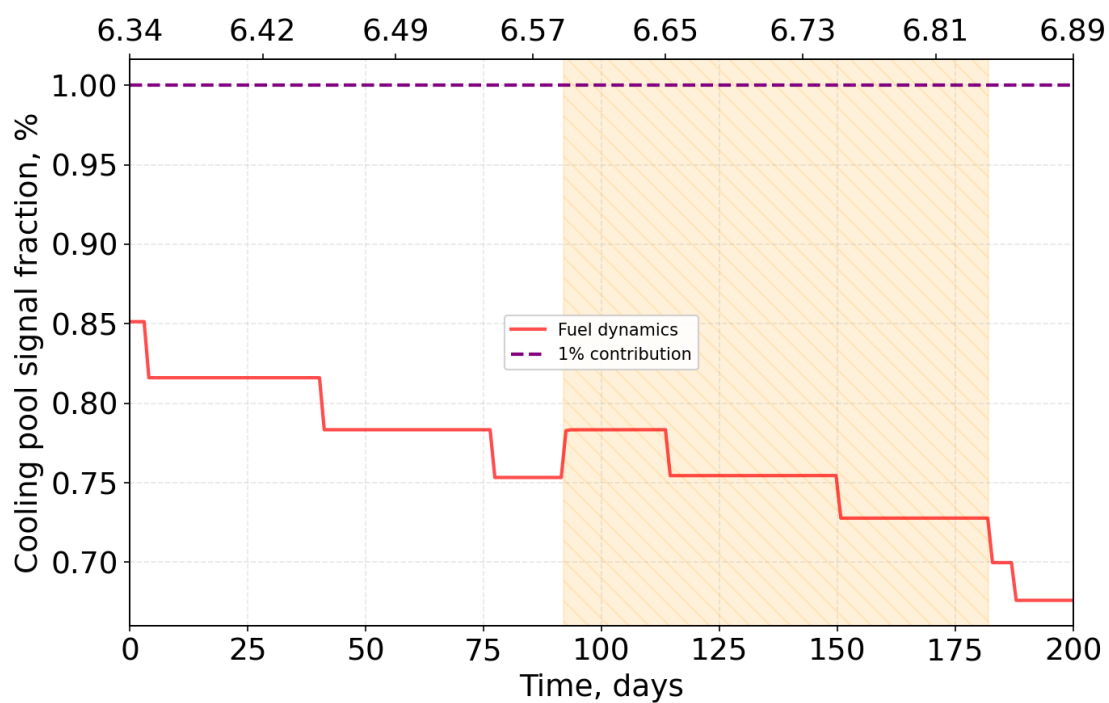
Специфика детектора:

- Доверительный объем детектора: **1т** ($N_p=7,2 \cdot 10^{28}$)
- Эффективность детектора: **~50%** для реакции ОБР

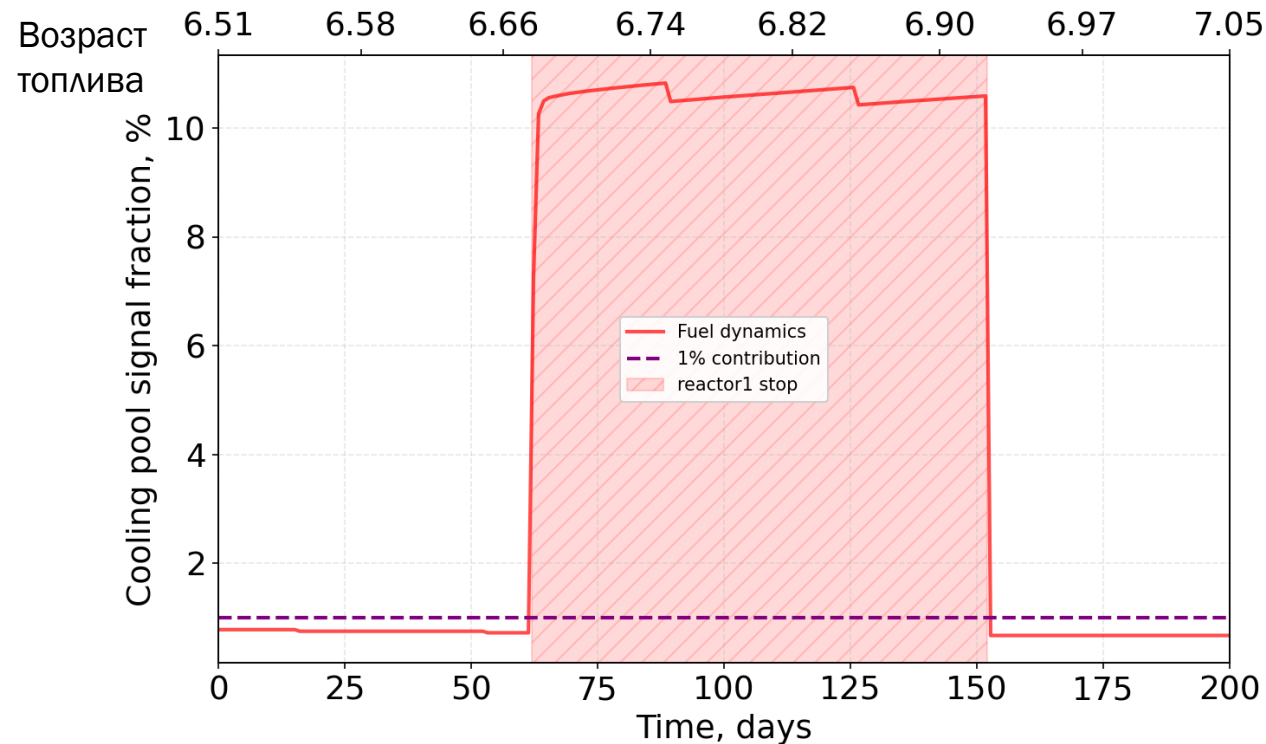
Для низкоэнергетической части
спектра (1.8-3.8МэВ)

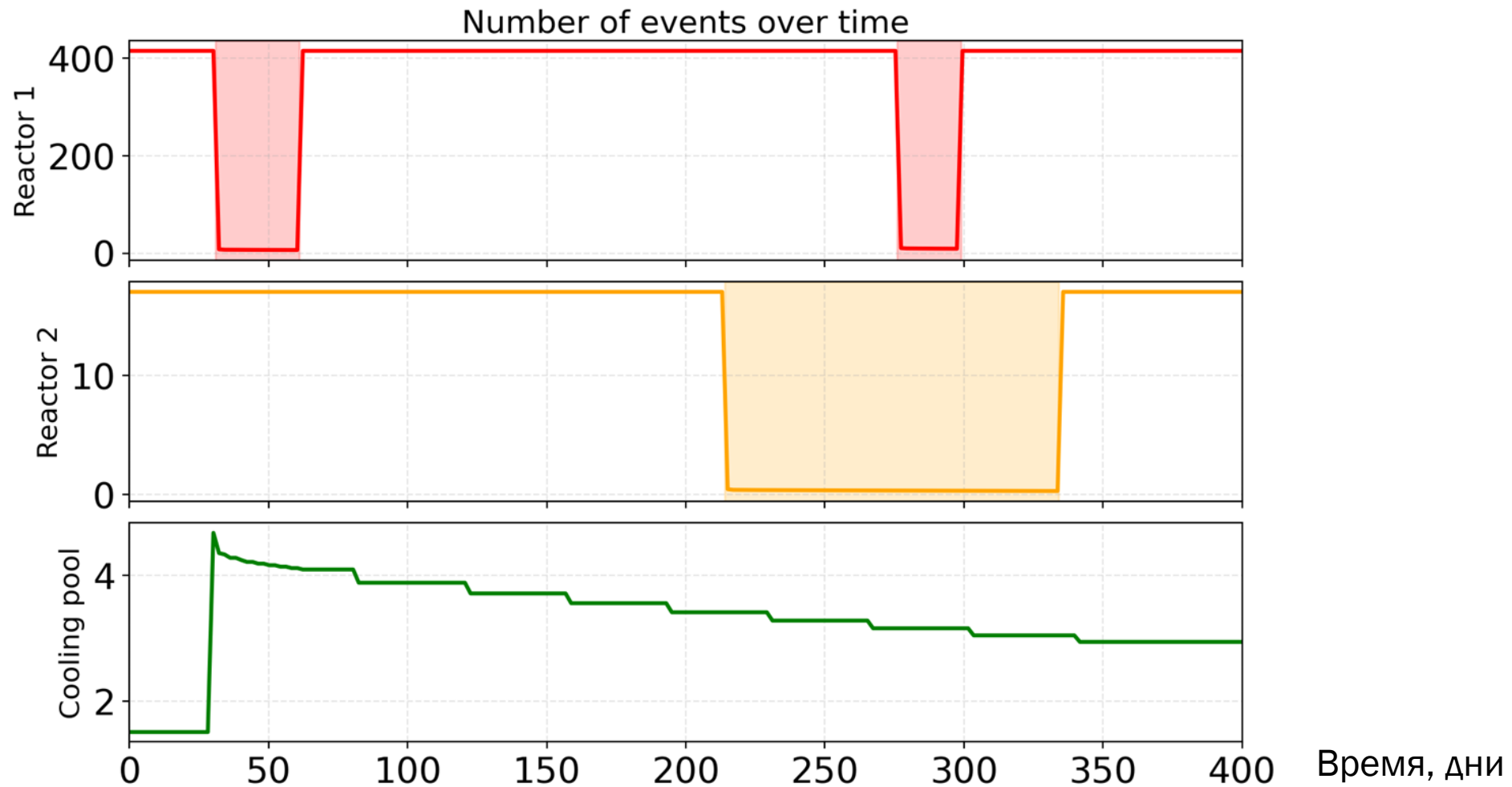
Сценарии остановок реакторов

Остановлен только дальний реактор



Остановлен только ближний реактор





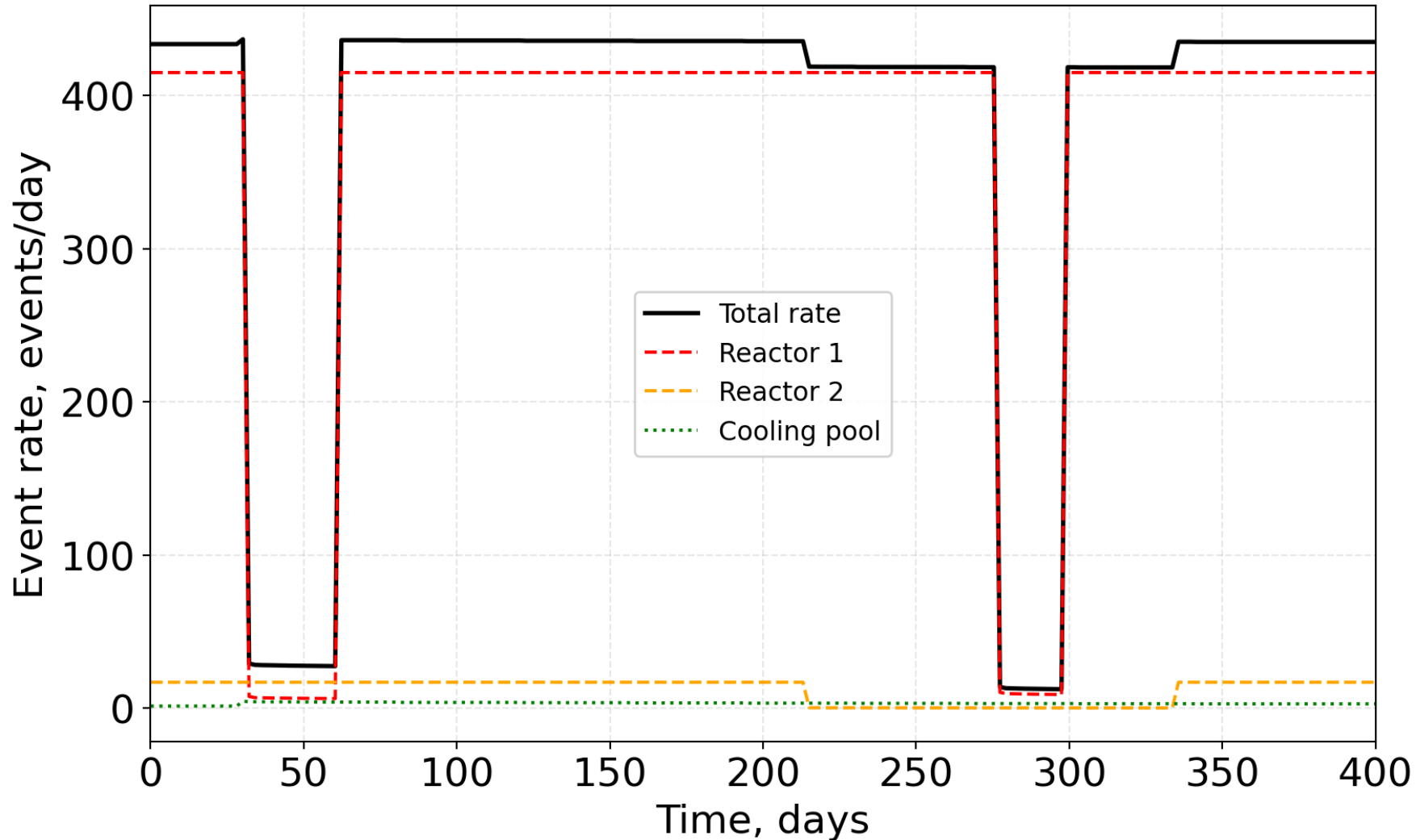
Остановка ближнего реактора + перегрузка

Остановка дальнего реактора

Остановка ближнего реактора

Скорость счёта каждого источника

Скорость счёта от каждого источника в зависимости от времени



Ближний реактор:

Off - 10

On - 415

Перегрузка - 6

Дальний реактор:

Off - 0.3

On - 17

Бассейн ОЯТ:

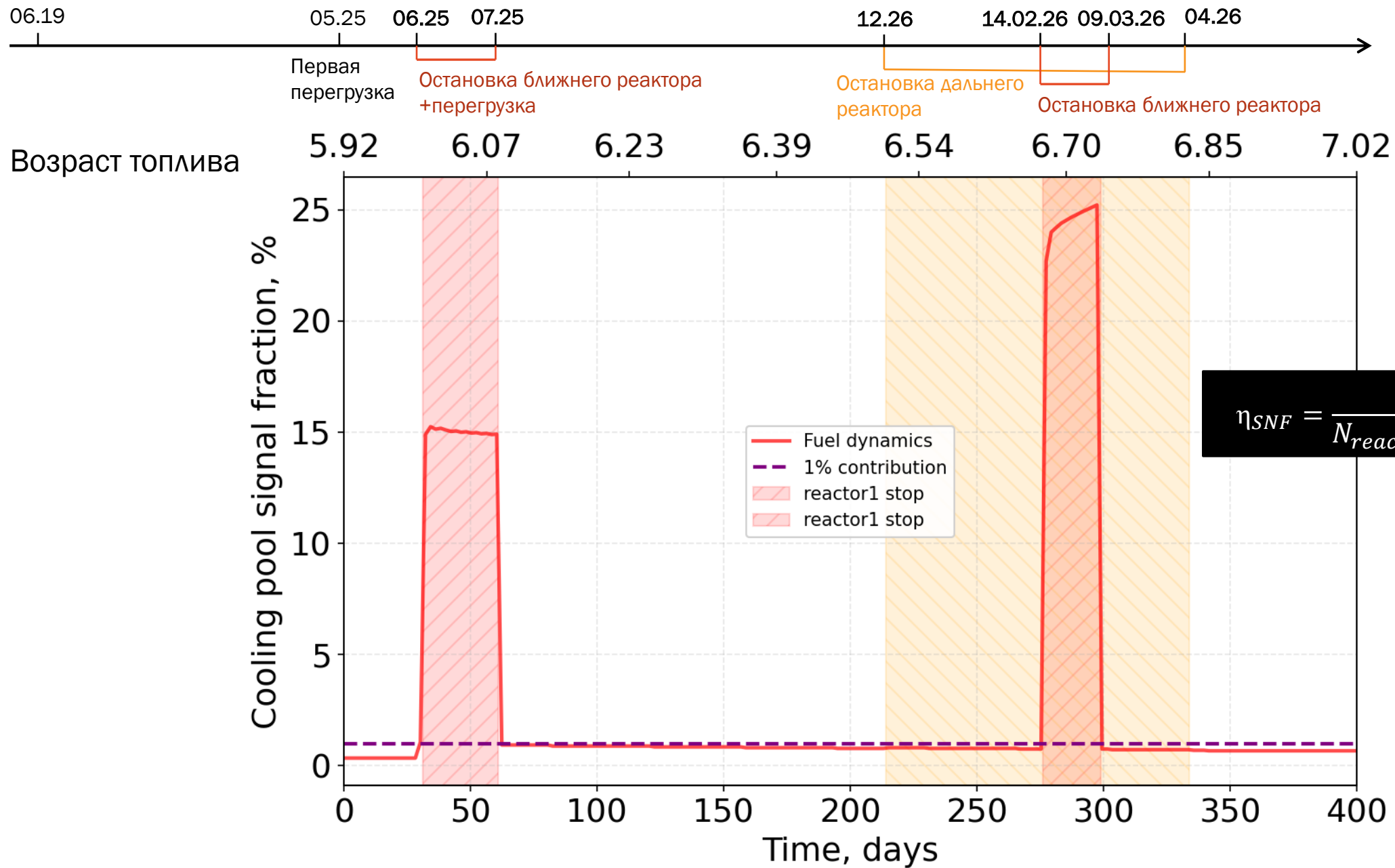
До перегрузки - 1

После перегрузки - 4

Итого:

Max - 437

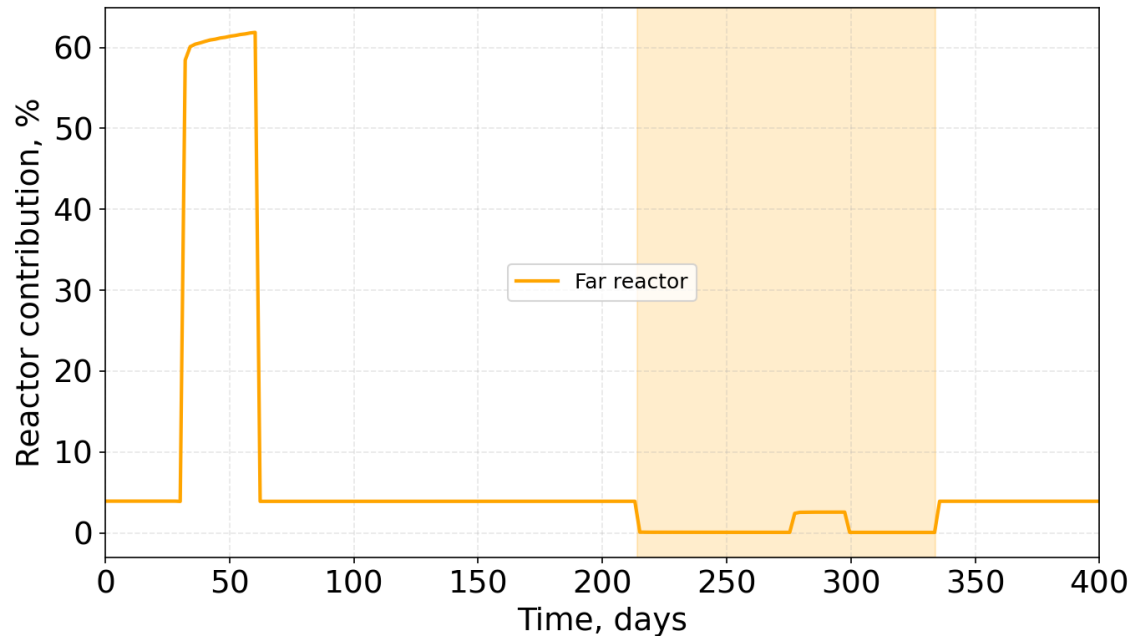
Min - 13



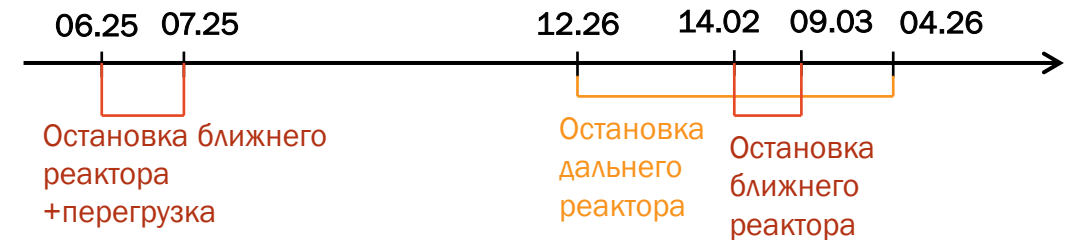
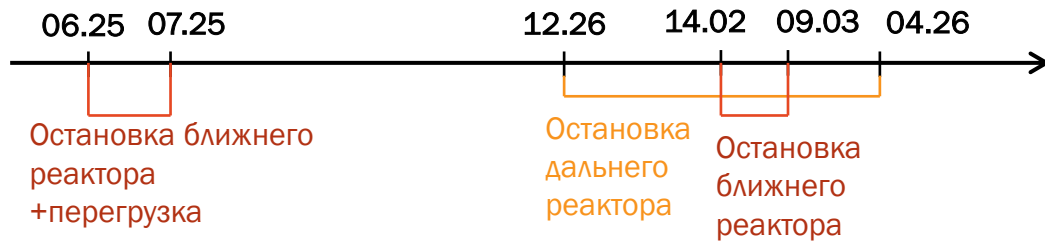
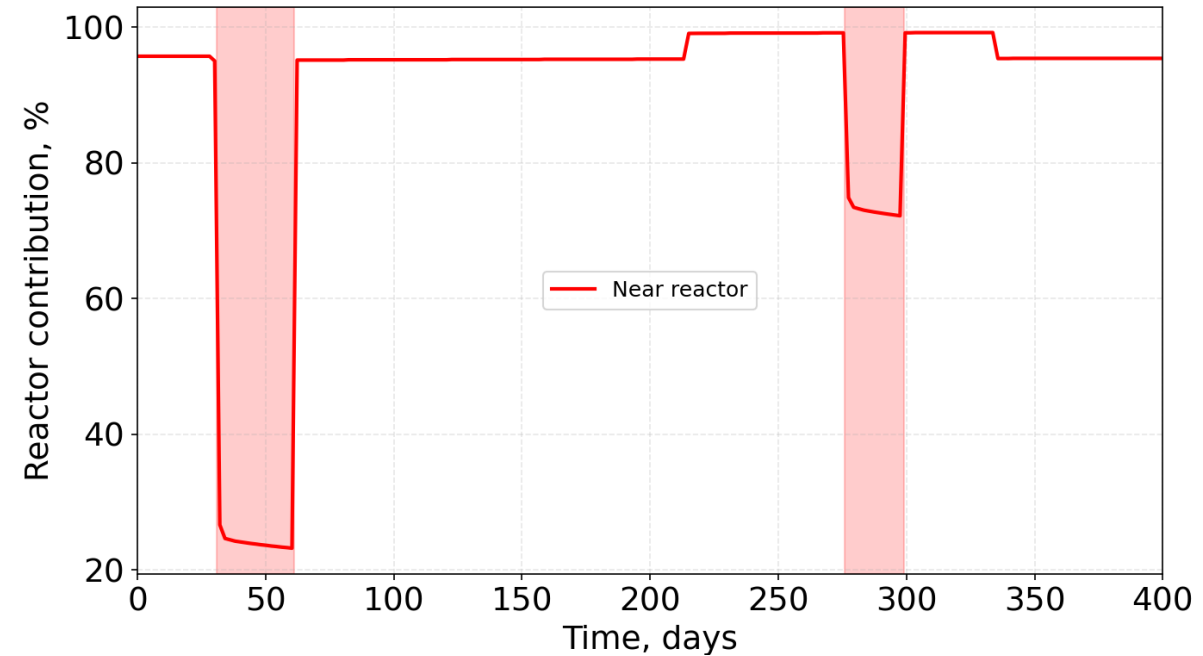
Временная зависимость вклада бассейна ОЯТ в сигнал

Вклады реакторов

Вклад дальнего реактора

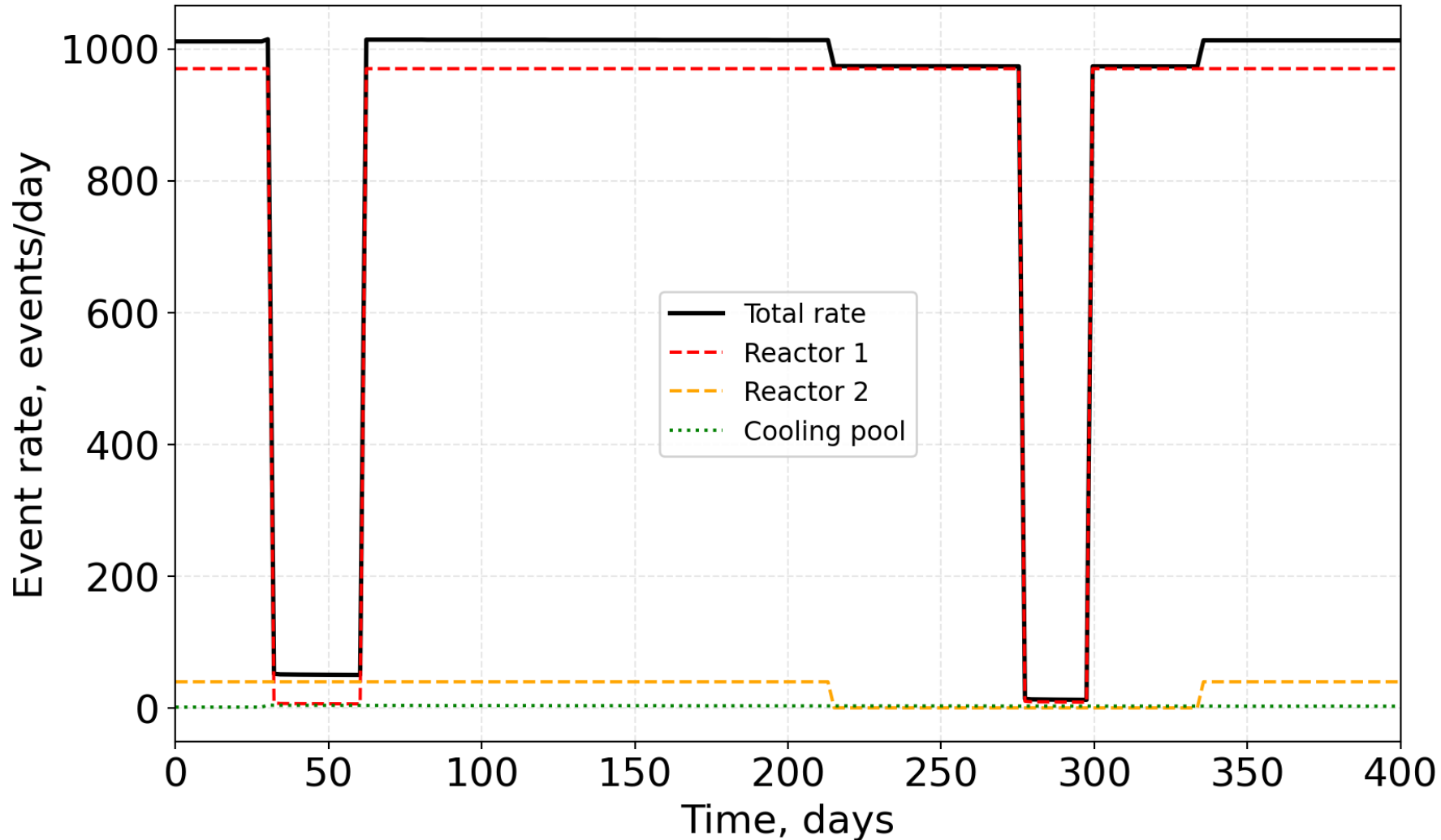


Вклад ближнего реактора



Для полного энергетического
спектра (1.8–8.8 МэВ)

Скорость счёта от каждого источника в зависимости от времени



Ближний реактор:

Off - 10

On - 970

Перегрузка - 7

Дальний реактор:

Off - 0.4

On - 40

Бассейн ОЯТ:

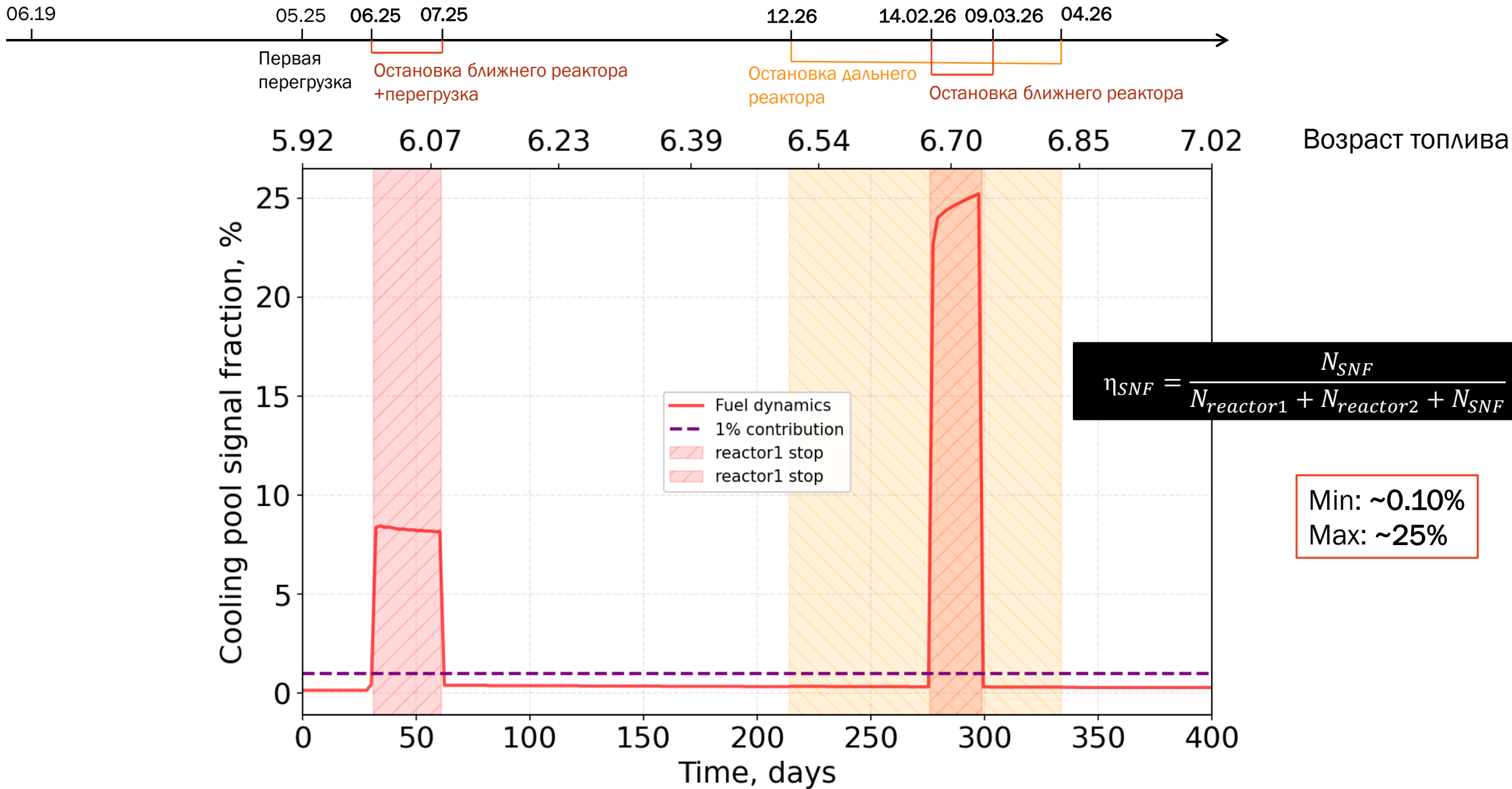
До перегрузки - 1

После перегрузки - 4

Итого:

Max - 1014

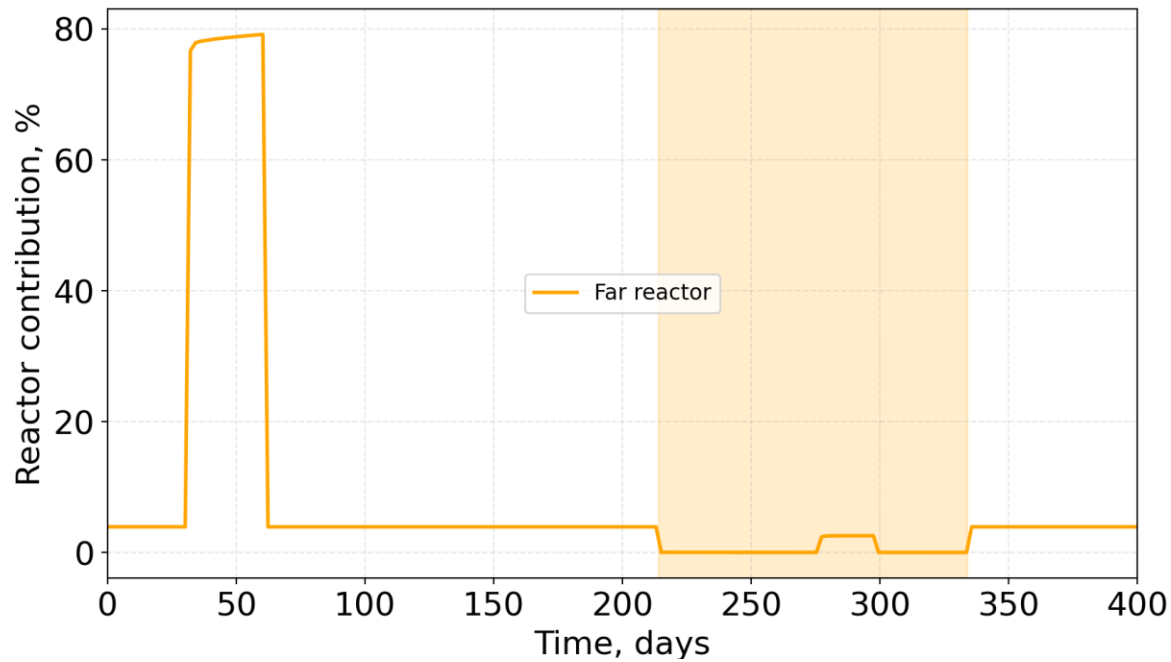
Min - 13



Временная зависимость вклада бассейна ОЯТ в сигнал

Вклады реакторов

Вклад дальнего реактора



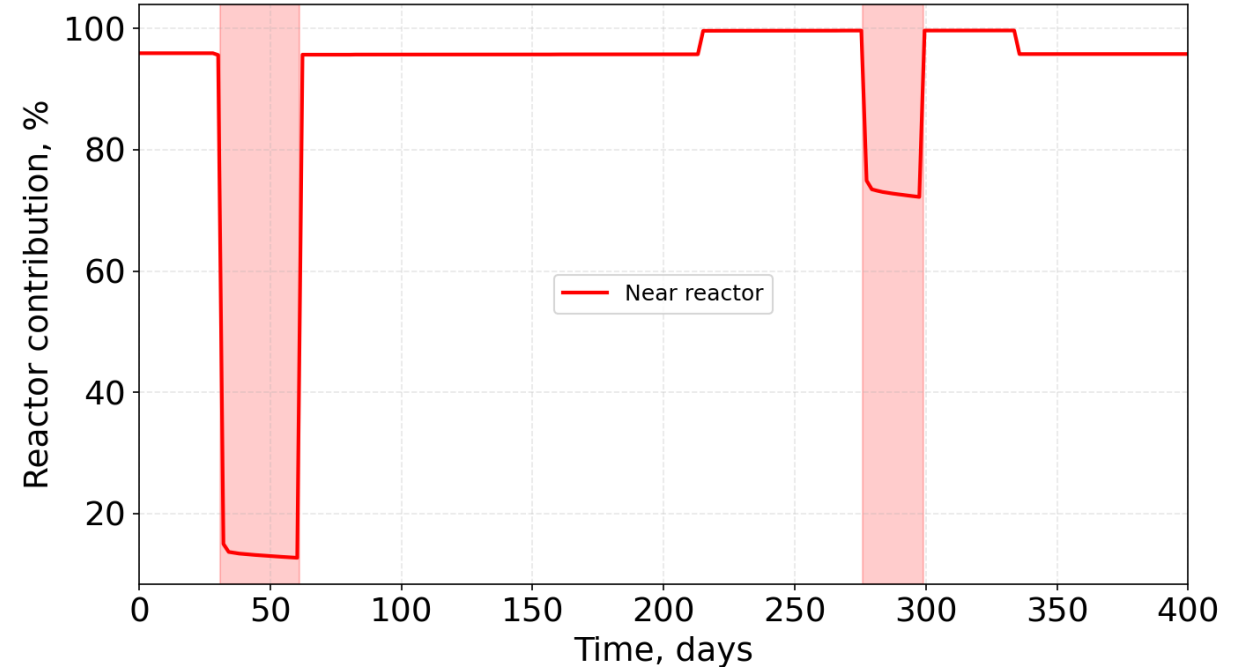
06.25 07.25

Остановка ближнего реактора +перегрузка

12.26 14.02 09.03 04.26

Остановка дальнего реактора
Остановка ближнего реактора

Вклад ближнего реактора



06.25 07.25

Остановка ближнего реактора +перегрузка

12.26 14.02 09.03 04.26

Остановка дальнего реактора
Остановка ближнего реактора

Результаты

Основные численные результаты:

- ✓ Скорость счёта от бассейна ОЯТ: до перегрузки — **1 событие/сутки**, после перегрузки — **4 события/сутки**.
- ✓ Полная скорость счёта: от **13 до 437** событий/сутки (1.8–3.8 МэВ) и от **13 до 1014** событий/сутки (1.8–8.8 МэВ).
- ✓ Максимальный вклад ОЯТ: **25%** - когда оба реактора остановлены.
- ✓ Минимальный вклад ОЯТ: **0.35%** (1.8–3.8 МэВ) и **0.15%** (1.8–8.8 МэВ) до перегрузки в случае работы обоих реакторов.
- ✓ Вклад ОЯТ при перегрузке ближнего реактора при работающем в обычном режиме дальнем реакторе составил около **15%** (1.8–3.8 МэВ) и около **10%** (для 1.8–8.8 МэВ).
- ✓ Вклад ближнего реактора: снижается до **~20%** при перегрузке (дальний реактор работает) и до **~70%** при остановке обоих реакторов (1.8–3.8 МэВ)
- ✓ Вклад дальнего реактора: возрастает до **~60%** при перегрузке ближнего и падает почти до нуля при остановке

Выводы

Определён пиковый вклад: В нашей конкретной экспериментальной конфигурации вклад ОЯТ достигает **~25%** от общего сигнала при остановке обоих реакторов.

Значительный вклад горячего топлива: Ближний реактор даже при перегрузке даёт вклад в районе **~20%** однако влияние дальнего при остановке оказывается мало.

Реализован динамический анализ: Разработанный инструмент переводит анализ от статической модели к динамической и настраиваемой системе, позволяя оценивать вклад ОЯТ и горячего топлива для различных временных и экспериментальных конфигураций.

Входные данные для процедуры фитирования: Полученные значения могут быть использованы как входной параметр для компоненты ОЯТ и горячего топлива в реакторе при фитировании наблюдаемого спектра событий бета-распада.

- Полученные значения согласуются с оценками коллаборации DayaBay (0.26–0.34% при работающем реакторе, до 20% при остановке). Численные значения скоростисчёта соответствуют предварительным данным измерений и ожидаемому счёту.