

# Комплексная методика и программное средство для оперативного выявления разгерметизации твэлов во время работы реактора

Евдокимов И.А., Калиничев П.М., Хромов А.Г.  
Афанасьева Е.Ю., Маслова Л.А., Горюшин И.О.  
Бурцев А.Ю., Золотарев С.П., Бабкин С.В.

АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»



ТРИНИТИ  
РОСАТОМ



ТВЭЛ  
РОСАТОМ

# Проблема разгерметизации ТВЭЛОВ

## Актуальность

### 1. Проекты по движению к нулевому отказу показали:

- полностью исключить разгерметизации ТВЭЛОВ нельзя
- текущие показатели надежности топлива ВВЭР ниже целевых (средняя частота разгерметизации  $\sim 3 \cdot 10^{-5} > 10^{-6}$ )

### 2. Разгерметизации приводят к значительным финансовым потерям

*Затраты, связанные с ростом активности теплоносителя:*

- обращение с жидкими радиоактивными отходами
- повышение дозовых нагрузок на персонал
- недовыработка электроэнергии при вынужденном снижении мощности РУ или внеплановом останове

Для смягчения последствий разгерметизации необходимо надежное и своевременное выявление фактов разгерметизации ТВЭЛОВ при КГО на работающем реакторе

# Оперативное выявление разгерметизации ТВЭЛОВ

Зачем нужны точность и надежность  
при определении момента разгерметизации?

- 1) Меньше шансов пропустить негерметичную ТВС в ППР  
(загрузка в реактор еще на одну кампанию  $\Rightarrow$  длительная эксплуатация твэла после разгерметизации)
  - снижаются риски образования вторичных дефектов и роста активности теплоносителя до/выше эксплуатационных пределов
- 2) Своевременное принятие корректирующих мер  
(в том числе – для предотвращения сильной деградации состояния негерметичных твэлов)
  - в некоторых энергогенерирующих компаниях разработаны **особые регламенты по изменениям мощности РУ**, которые вступают в действие после обнаружения факта разгерметизации топлива
  - кратковременное снижение мощности как способ подавить образование вторичных дефектов в оболочках твэлов\*
- 3) Момент разгерметизации – это дополнительная информация для оценки произошедшего отказа
  - разгерметизация во время стационарной работы РУ или в переходном режиме указывает, вообще говоря, на разные механизмы отказа

# Имеющиеся подходы к выявлению разгерметизаций

## на работающем реакторе ВВЭР

Традиционные методы КГО:

- в переходном режиме → спайк-эффект (наиболее надежный признак)
- в стационарном режиме → соотношение приведенных активностей  $^{131}\text{I}$  и  $^{134}\text{I}$

В настоящее время  
традиционные методы КГО для топлива ВВЭР  
не всегда позволяют своевременно выявить  
разгерметизацию



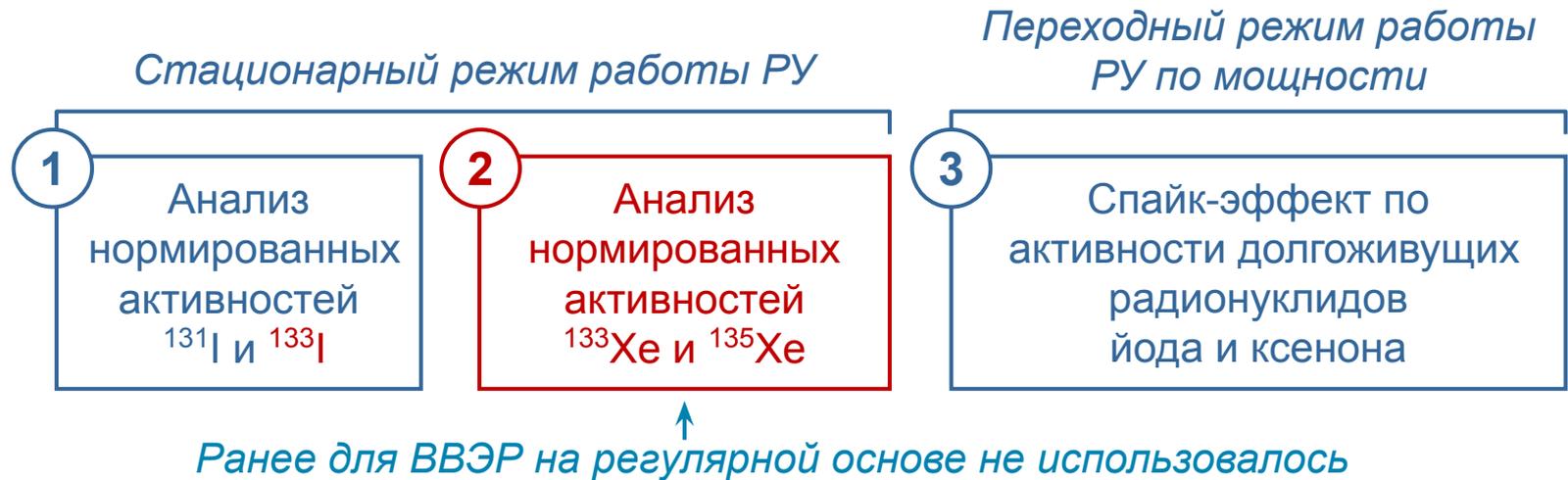
Необходимо **обновление** методик КГО

- повышение надежности и информативности
- желательно без капитальных затрат

# Комплексный подход к выявлению разгерметизаций

## Новизна

Опыт обработки эксплуатационных данных ⇒  
наилучшие результаты по надежному и своевременному выявлению  
разгерметизаций в течение кампании дает **комбинация методов**:



- **применение статистических методов** обработки данных
- учитываются только статистически значимые отклонения от «нормального» состояния (исключаются случайные выбросы данных)

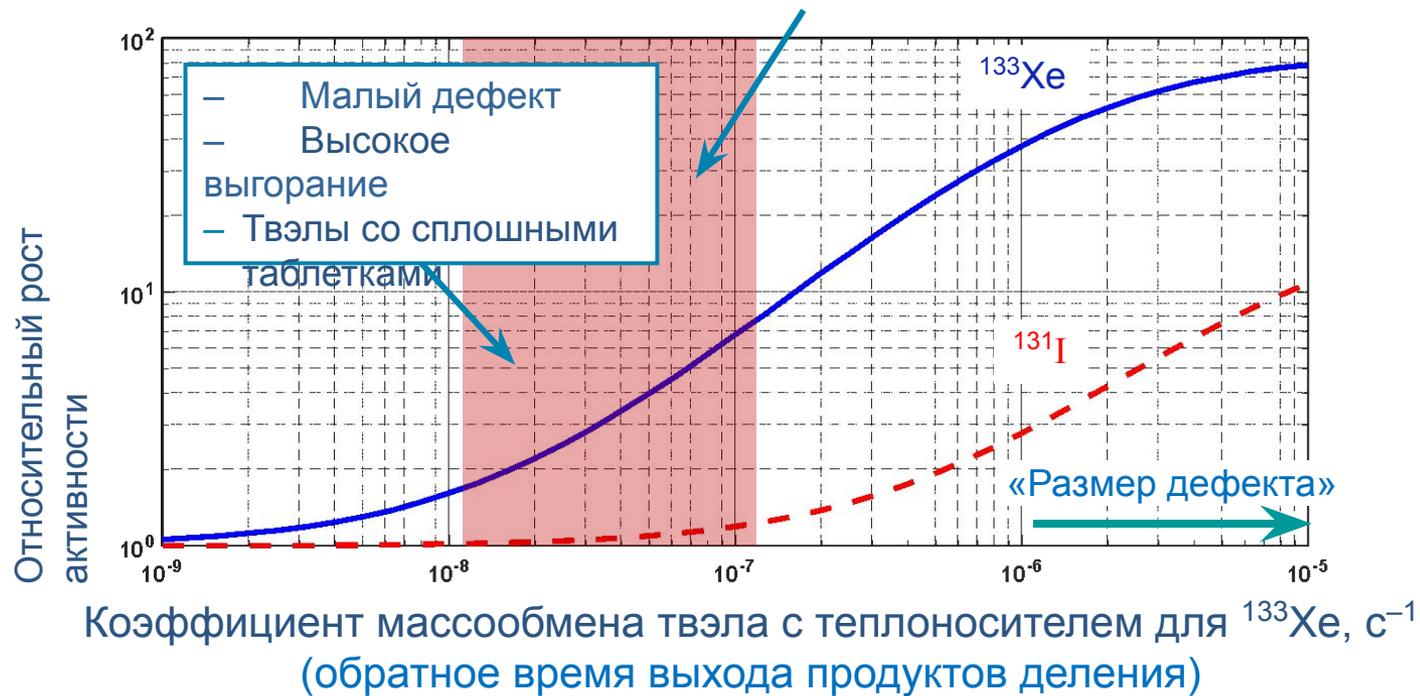
Создан прототип компьютерной программы для автоматической обработки данных с использованием комплексного подхода

# Выявление разгерметизации по активности Хе

Йод может «прилипнуть» под оболочкой, Хе – нет



При малой скорости выхода ПД из негерметичного твэла активность I определяется выходом ПД из топливных отложений



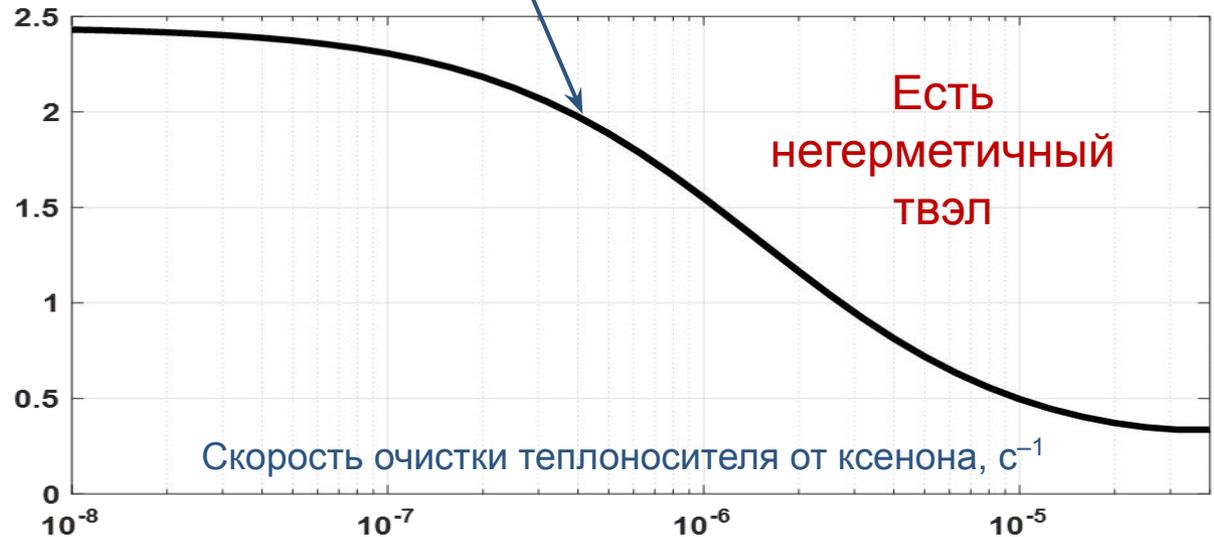
Подход успешно апробирован\*, в том числе, на зарубежных АЭС

Активность ксенона - более чувствительный индикатор разгерметизации, чем активность йода

# Критерий выявления разгерметизации твэлов ВВЭР по активности радионуклидов Хе

«Огибающая» расчетных отношений **измеренных активностей**  $^{133}\text{Xe}$  и  $^{135}\text{Xe}$  при отсутствии негерметичных твэлов

Если продукты деления выходят только из топливных отложений, отношение активностей  $^{133}\text{Xe}$  и  $^{135}\text{Xe}$  **ОГРАНИЧЕНО СВЕРХУ**



- Преимущества:**
- Слабая чувствительность к газопотерям
  - Можно не менять методику измерения активности на АЭС
  - Слабая чувствительность к выгоранию топлива

Технические сложности:

- Отсутствие единого числового критерия для разных энергоблоков
- Зависимость от изменений очистки теплоносителя в течение кампании

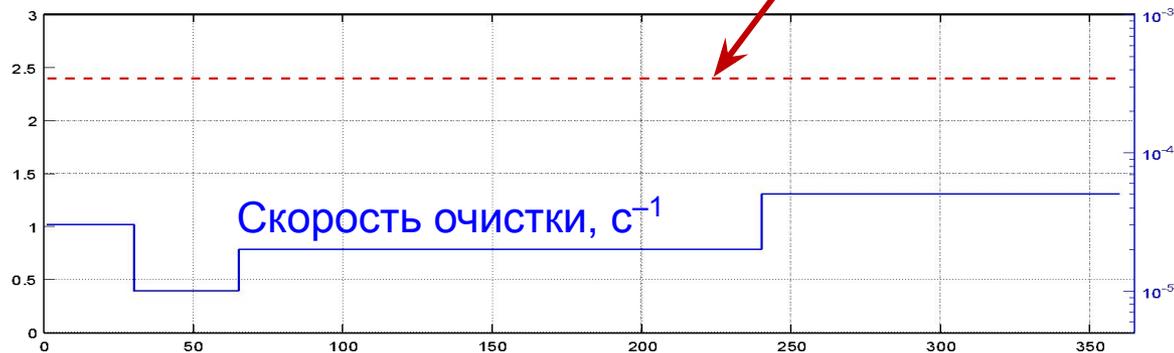
# Унификация критерия выявления разгерметизации ТВЭЛОВ по активности радионуклидов Хе

нормированная активность  
ксенона



Консервативная оценка сверху  $\Rightarrow$   
**унифицированный критерий**

$$\frac{A_{133\text{Xe}}^*}{A_{135\text{Xe}}^*} \leq 2.4$$



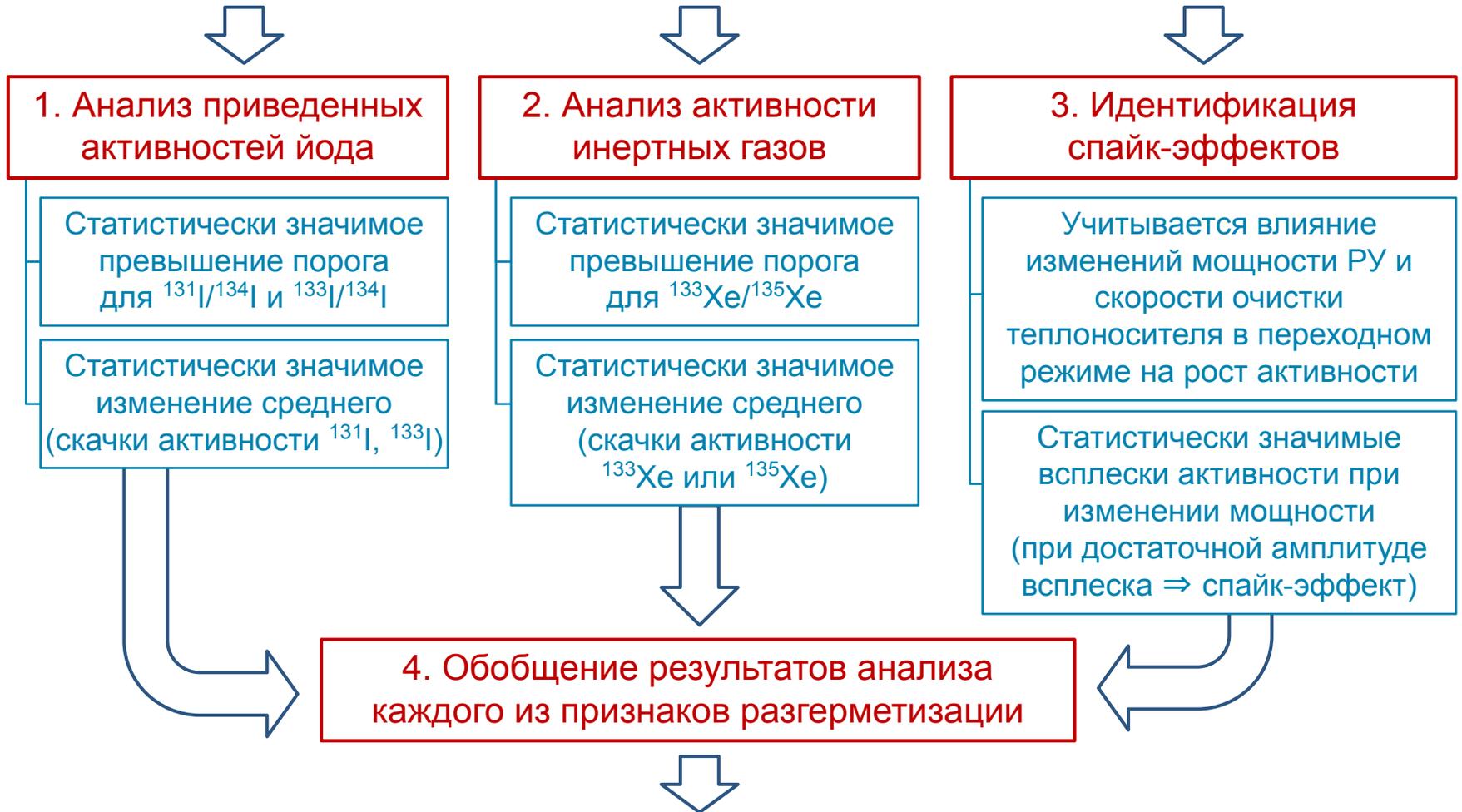
**Унифицированный критерий** на основе  
отношения **нормированных активностей** радионуклидов Хе:

- единый числовой критерий для всех АЭС (ВВЭР-1000/1200)
- не зависит от вариации скорости очистки теплоносителя в течение кампании
- упрощается применение на практике, меньше риски ошибок при обработке данных

# Компьютерная программа для выявления разгерметизаций

## Схема работы

Данные по активности теплоносителя и условиям эксплуатации



- заключение о наличии негерметичных твэлов
- момент разгерметизации

# Использование статистических методов

## Принципы применения

Поиск статистически значимого превышения порогового значения для стационарных условий работы РУ

Используется для анализа

$^{131}\text{I}/^{134}\text{I}$ ,  $^{133}\text{I}/^{134}\text{I}$  и  $^{133}\text{Xe}/^{135}\text{Xe}$

Нижняя граница доверительного интервала для среднего значения (критерий Стьюдента) лежит выше порога

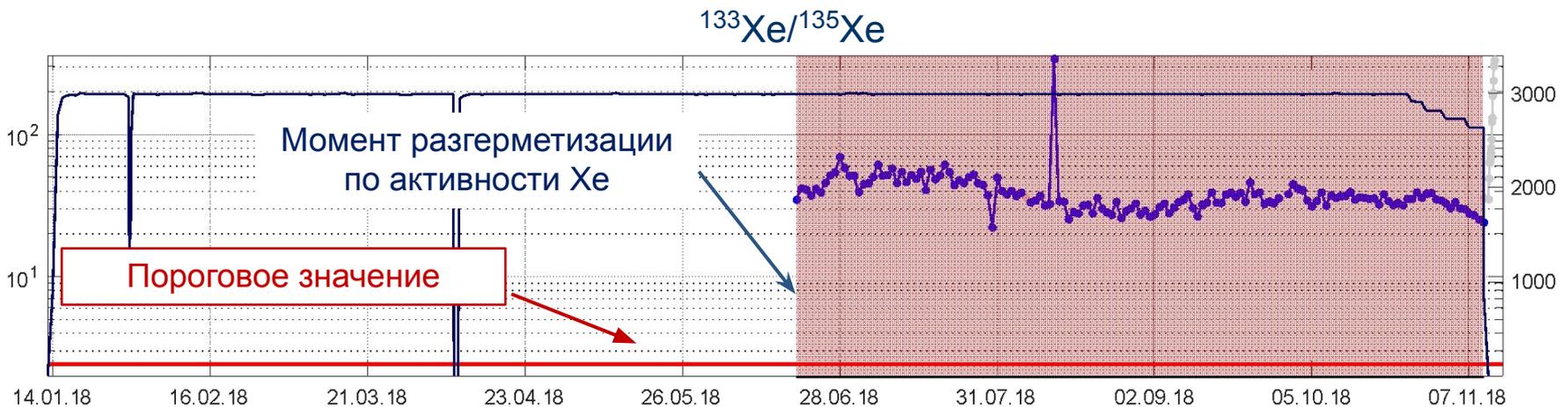


Исключение недостоверных выводов

из-за локальных «выбросов» выше пороговых значений

# Анализ данных по инертным газам: преимущества

## Применение методики для анализа кампаний: пример 1

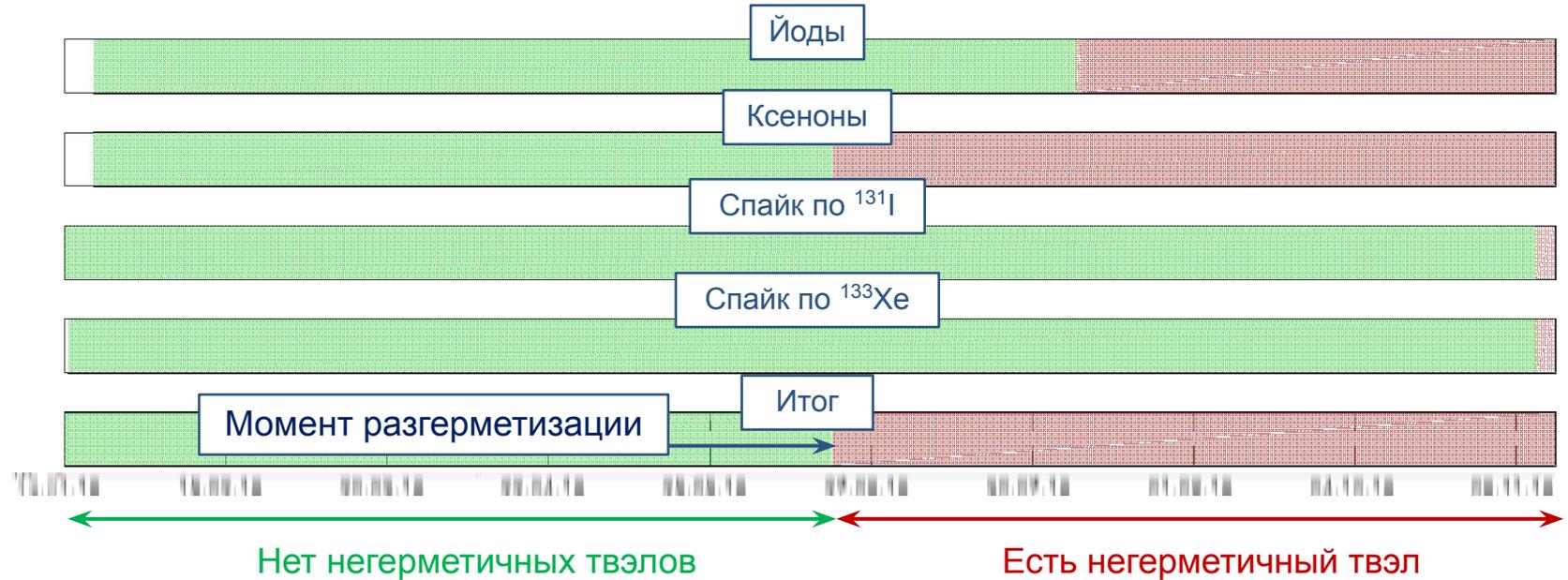
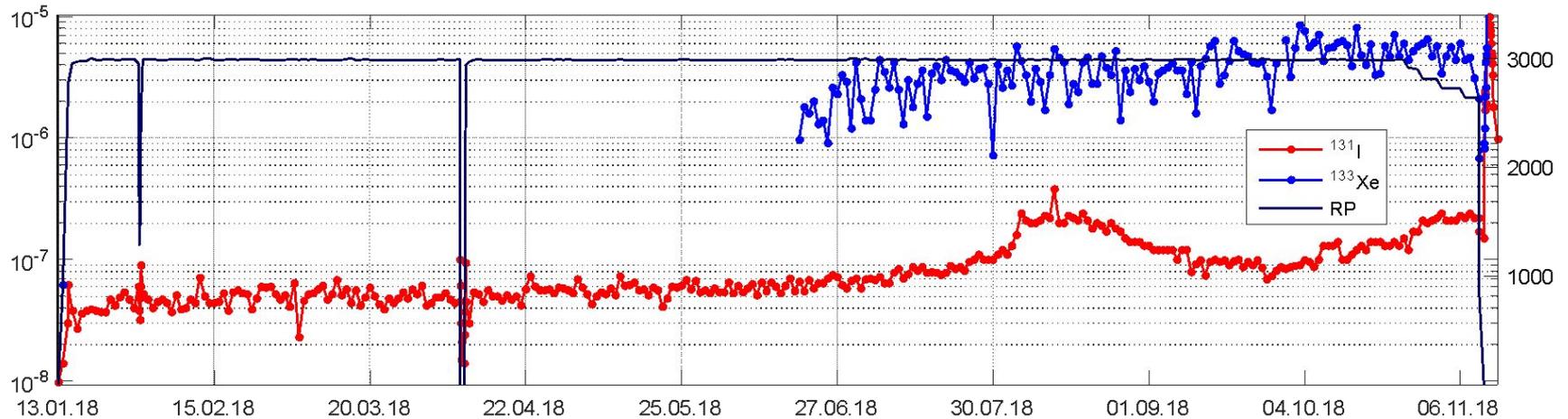


По Xe разгерметизация проявилась на 45 дней раньше

Методика по Xe повышает оперативность выявления разгерметизации твэлов

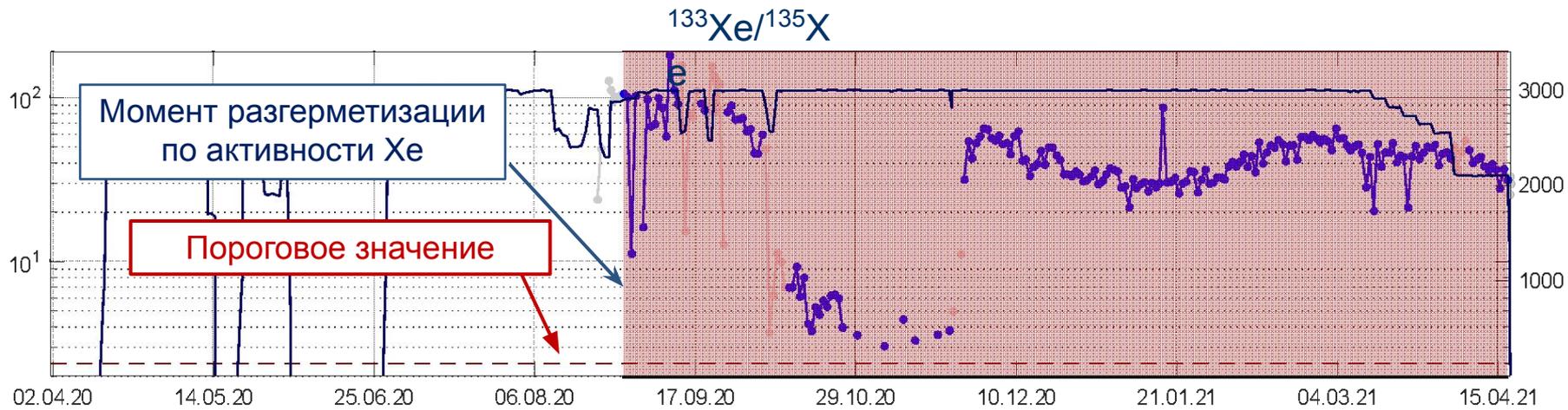
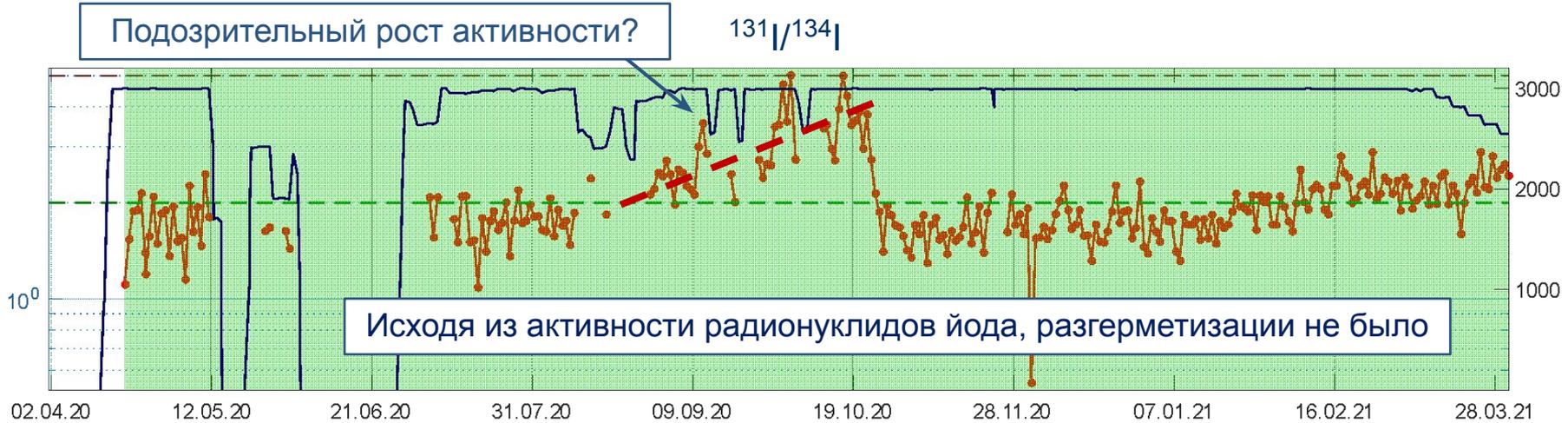
# Анализ данных по инертным газам: преимущества

## Пример 1: обобщение результатов анализа



# Анализ данных по инертным газам: преимущества

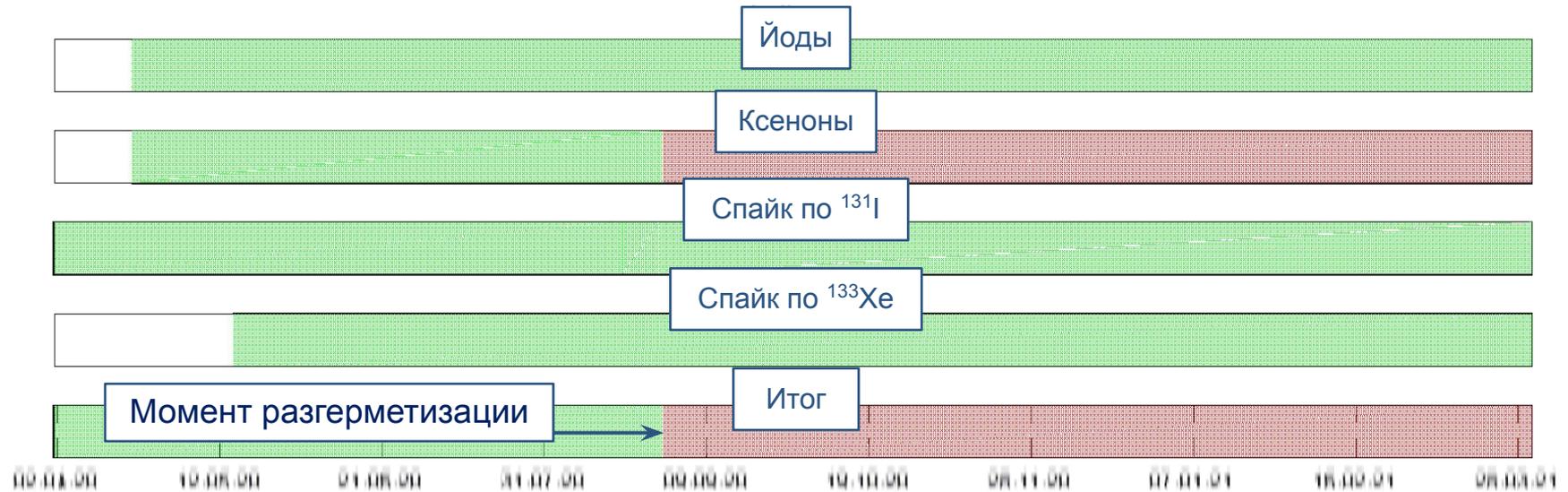
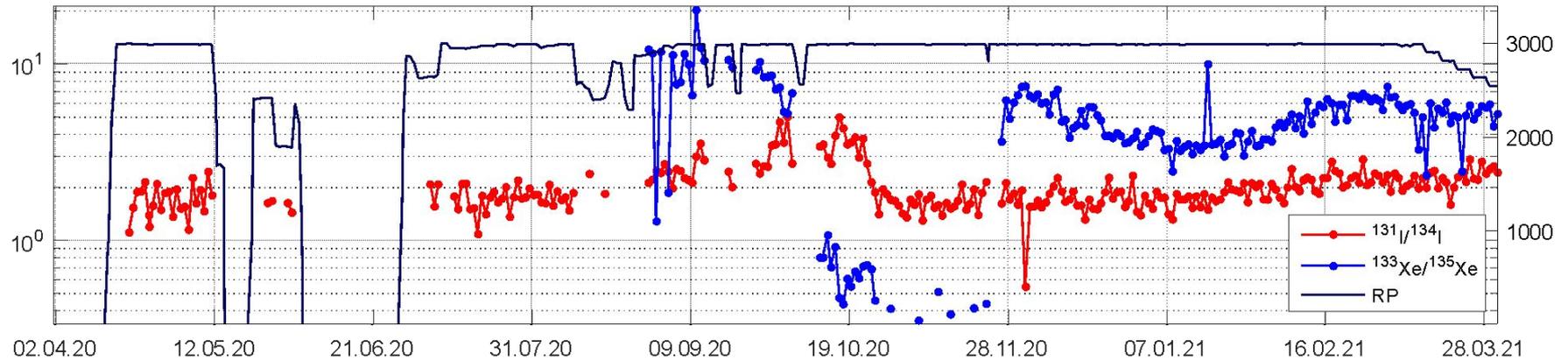
## Применение методики для анализа кампаний: пример 2



Если не учитывать данные по Хе, можно полагать, что негерметичных твэлов нет: отказ от КГО в ППР?

# Анализ данных по инертным газам: преимущества

## Пример 2: продолжение



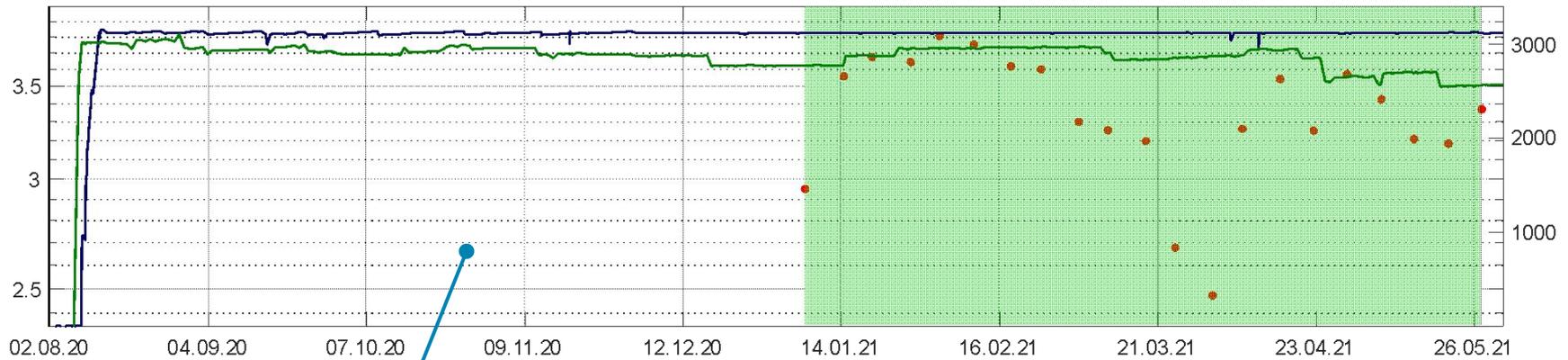
КГО на остановленном реакторе: 1 негерметичная ТВС 3<sup>-го</sup> цикла

Методика по Хе повышает надежность КГО во время работы РУ

# Преимущества комплексного подхода

## Применение методики для анализа кампаний: пример 3

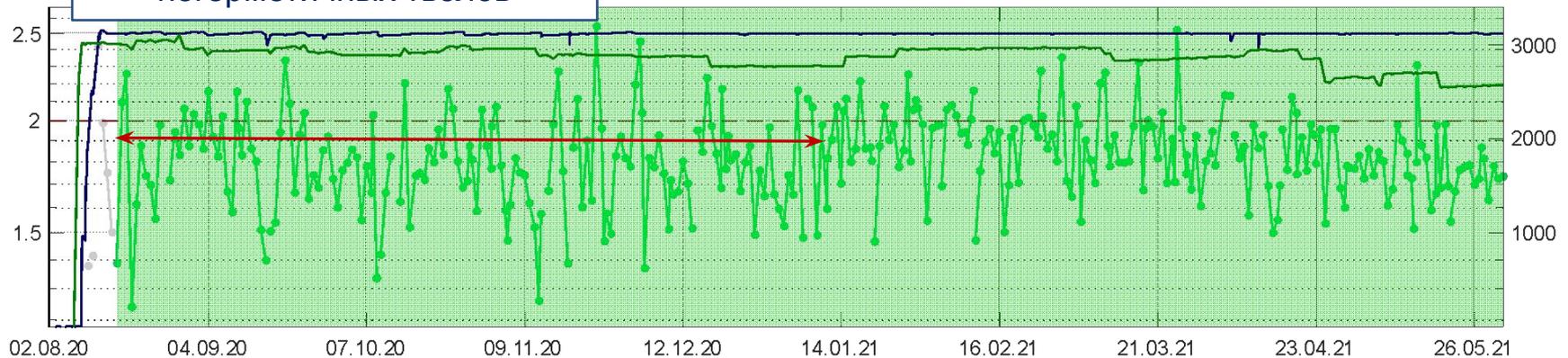
$^{131}\text{I}/^{134}\text{I}$



Данные по активности  $^{131}\text{I}$  отсутствуют (активность ниже МДА при прямом спектрометрировании отобранных проб?)

Аргумент в пользу отсутствия негерметичных твэлов

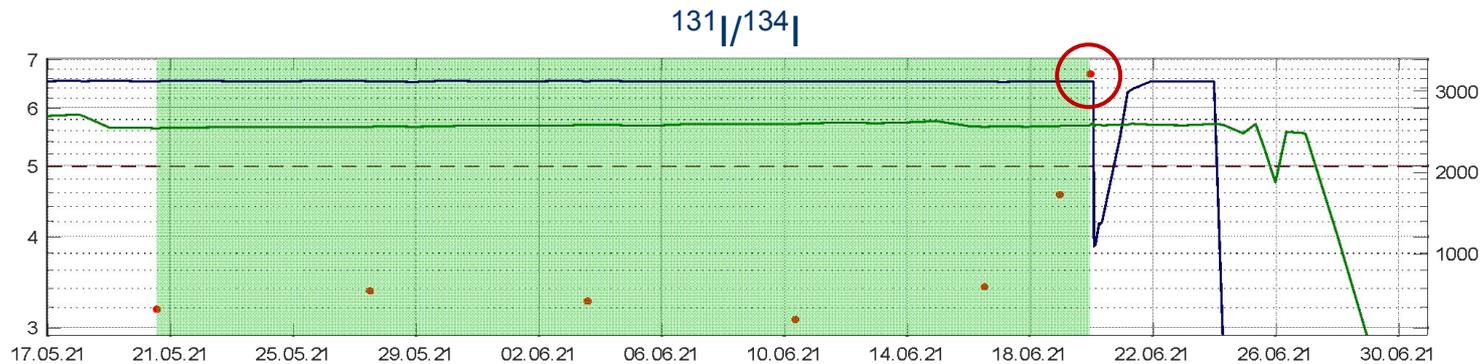
$^{133}\text{I}/^{134}\text{I}$



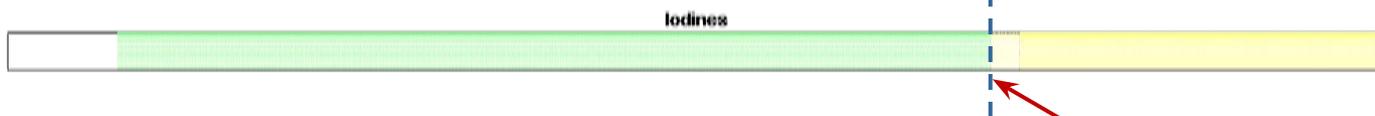
Анализ активности  $^{133}\text{I}$  и инертных радиоактивных газов позволяет обосновывать вывод об отсутствии негерметичных твэлов

# Преимущества комплексного подхода

## Применение методики для анализа кампаний: пример 3



Исходя из активности радионуклидов  $^{131}\text{I}$ , разгерметизации до останова не было

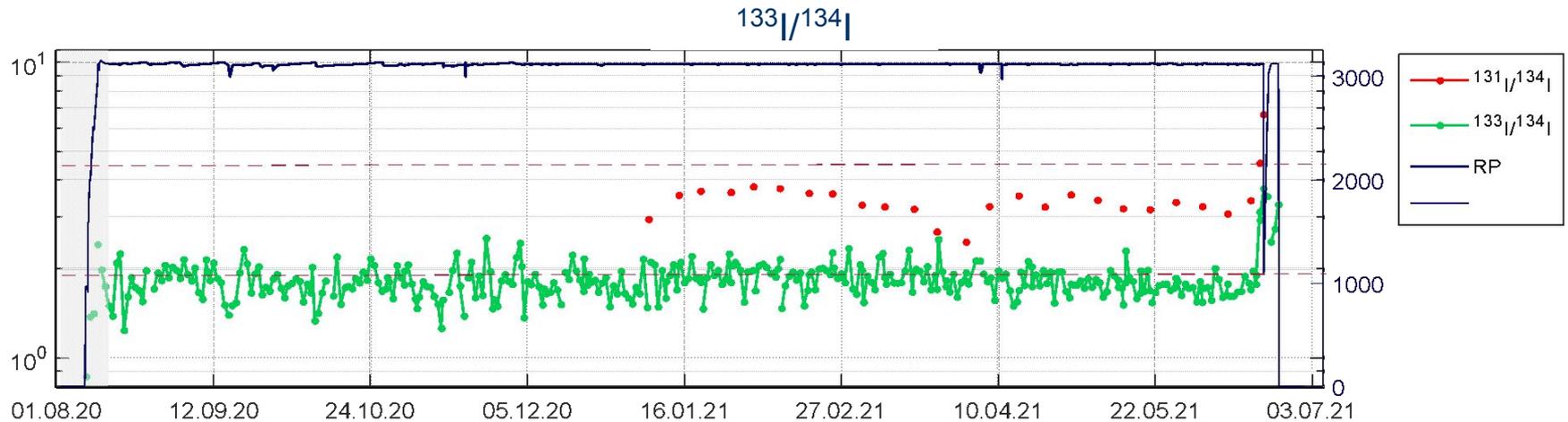


Дополнительный анализ активности  $^{133}\text{I}$  повышает информативность методики

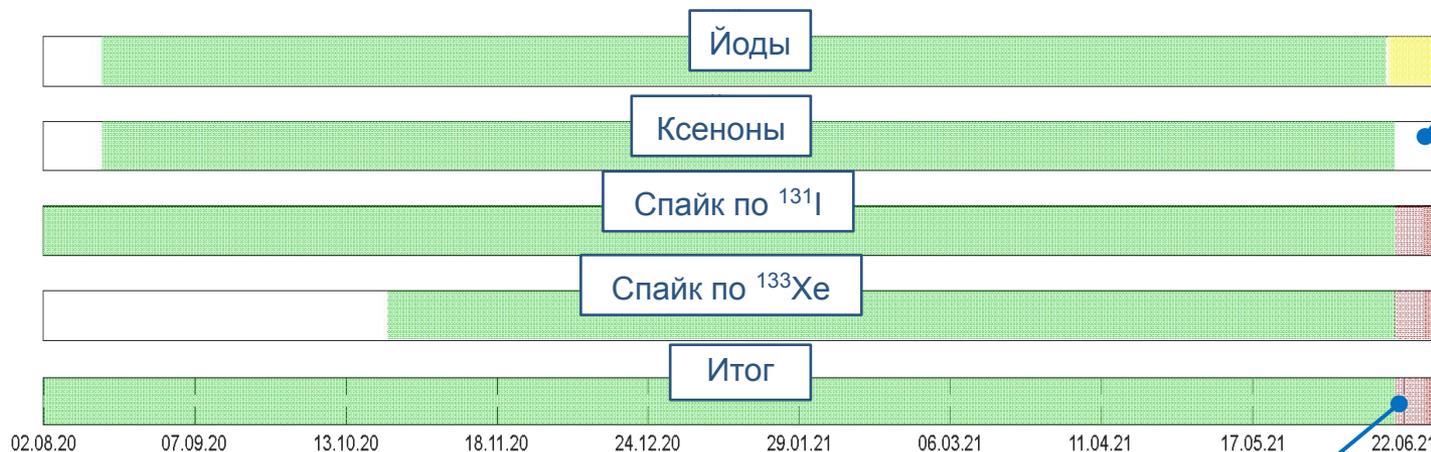
МОМЕНТ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ТОПЛИВА

# Преимущества комплексного подхода

## Пример 3: продолжение



Активность ксенонов на этом интервале не измерялась



Интервал времени, на котором разгерметизировался твэл

Применение дополнительных индикаторов состояния топлива  
повышает достоверность КГО

# Применение статистических методов

## Поиск статистически значимых изменений состояния топлива в РУ

Идентификация момента разгерметизации:

отслеживаются изменения средних характеристик процесса  
(анализ доверительных интервалов для среднего «слева» и «справа»)

$^{131}\text{I}$



Значимо изменилась средняя активность  
(скачок активности)

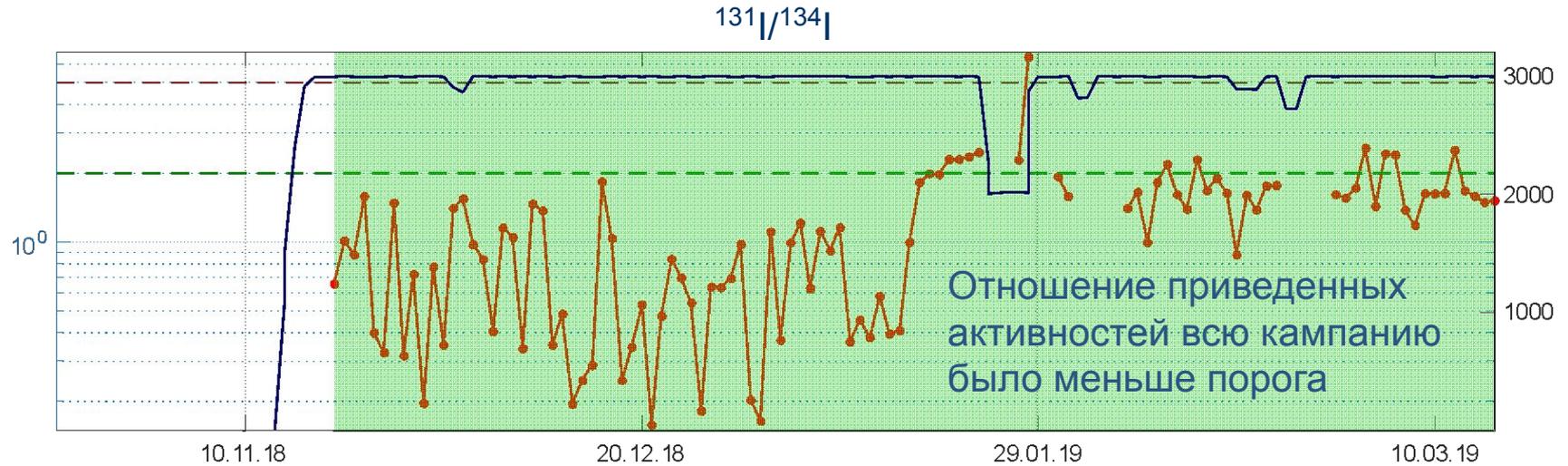
Статистически значимое  
превышение порога по  $^{131}\text{I}/^{134}\text{I}$

Отсутствуют признаки  
разгерметизации

В реакторе есть негерметичный твэл

# «Скачки» активности: применение на практике

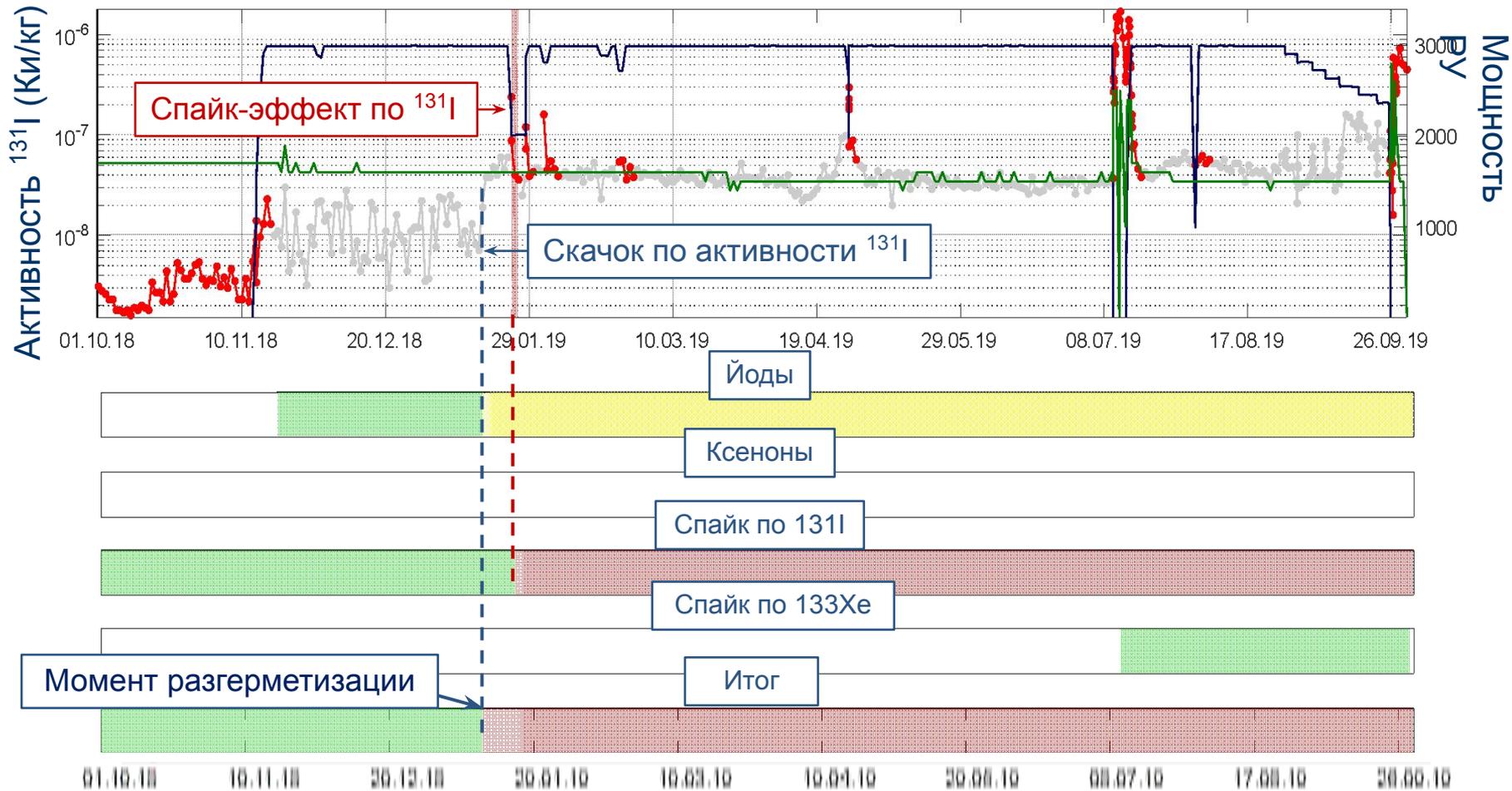
## Применение методики для анализа кампаний: пример 4



# Обобщение результатов с учетом спайк-эффекта

## Пример 4: продолжение

Примерно через неделю спайк-эффект подтвердил разгерметизацию



Без учета «скачка» активности  $\Rightarrow$  неверная идентификация момента разгерметизации (разные механизмы отказа?)

# Преимущества статистических методов

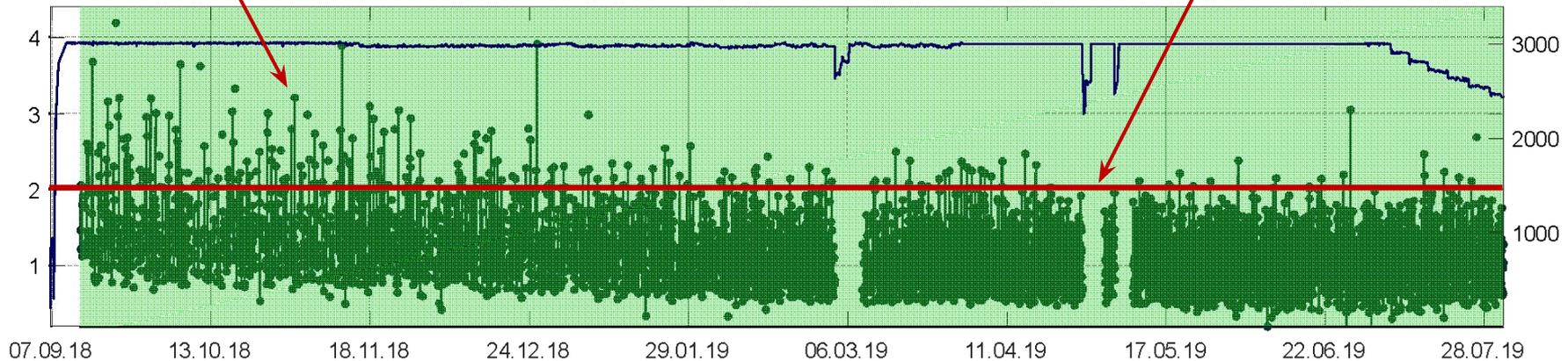
## Применение методики для анализа кампаний: пример 4

Превышения порога  
не являются  
статистически  
значимыми

Кампания без разгерметизации твэлов  
результаты автоматических измерений активности

133I/134I

Пороговое значение



Повышенная надежность и точность выявления момента разгерметизации:

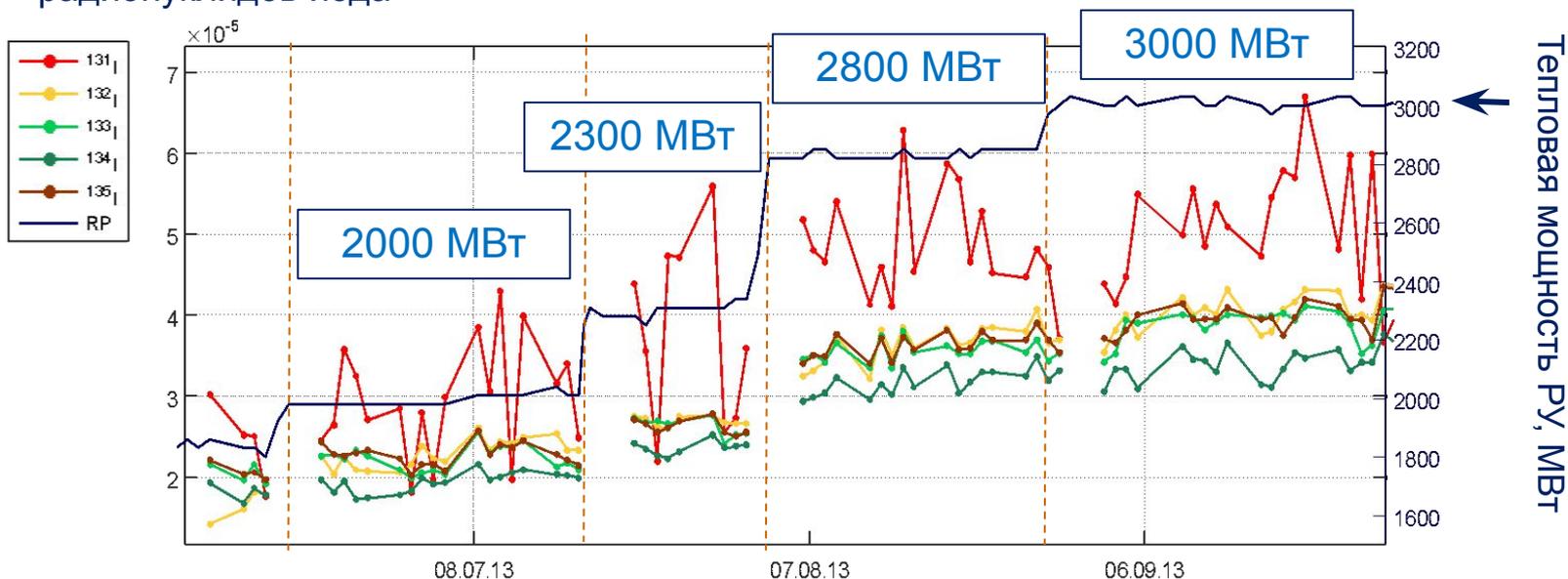
- Исключение недостоверных выводов из-за локальных «выбросов» выше пороговых значений
- Отслеживание статистически значимых изменений состояния
- Идентификация всех статистически значимых превышений фонового уровня активности в переходных режимах

**Статистические методы повышают достоверность выводов**

**о состоянии топлива** (особенно важно в случае большого разброса данных)

### Кампания без разгерметизации твэлов Стационарная работа РУ на разных уровнях мощности

Приведенная активность (Ки/кг)  
радионуклидов йода



Обработка данных в комплексной методике исключает неверную интерпретацию ступенчатых повышений активности

Это уменьшает риск ошибок при анализе активности в случае работы РУ на разных уровнях мощности в стационарных условиях

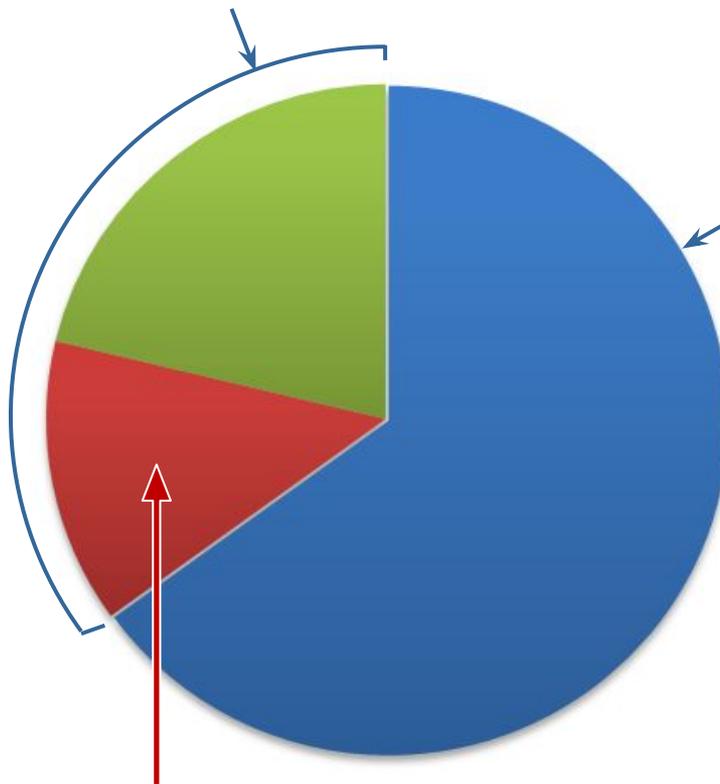
# Применение методики за 2019-2022 года

На данных проекта НУО

Всего проанализировано 80 кампаний

28 кампаний с разгерметизацией твэлов

Наличие негерметичных твэлов подтверждено применением разработанной методики и данными КГО на остановленном реакторе



52 кампании – без негерметичных твэлов

Отсутствие негерметичных твэлов подтверждено применением разработанной методики и данными КГО на остановленном реакторе

Для ~ 40% кампаний с негерметичными твэлами комплексный подход обнаружил разгерметизацию раньше, чем традиционные методы КГО

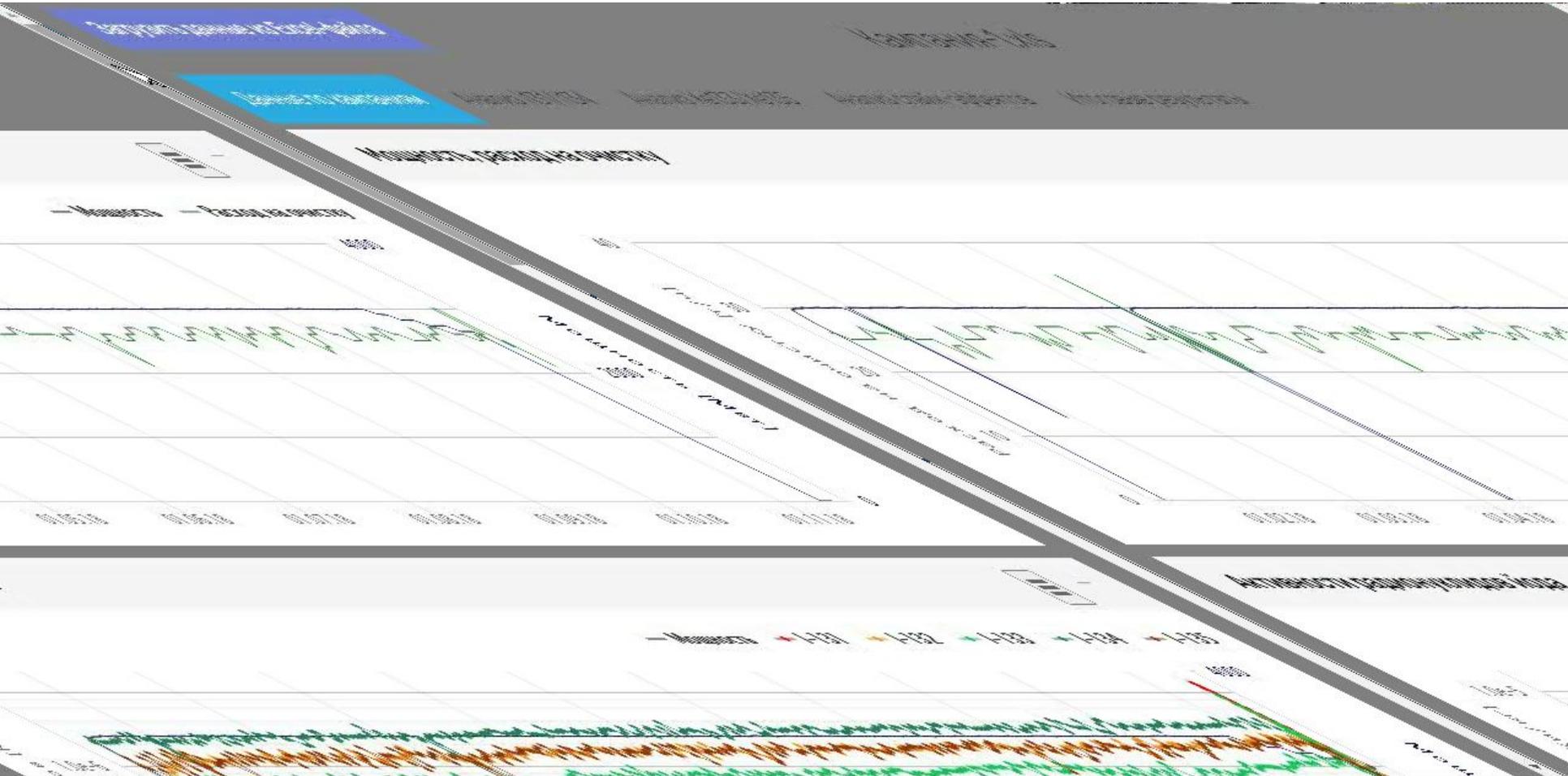
# Применение методики за последние 3 года

На данных проекта НУО



Методика позволяет выявлять разгерметизацию раньше  
(прецеденты: недели, месяцы)

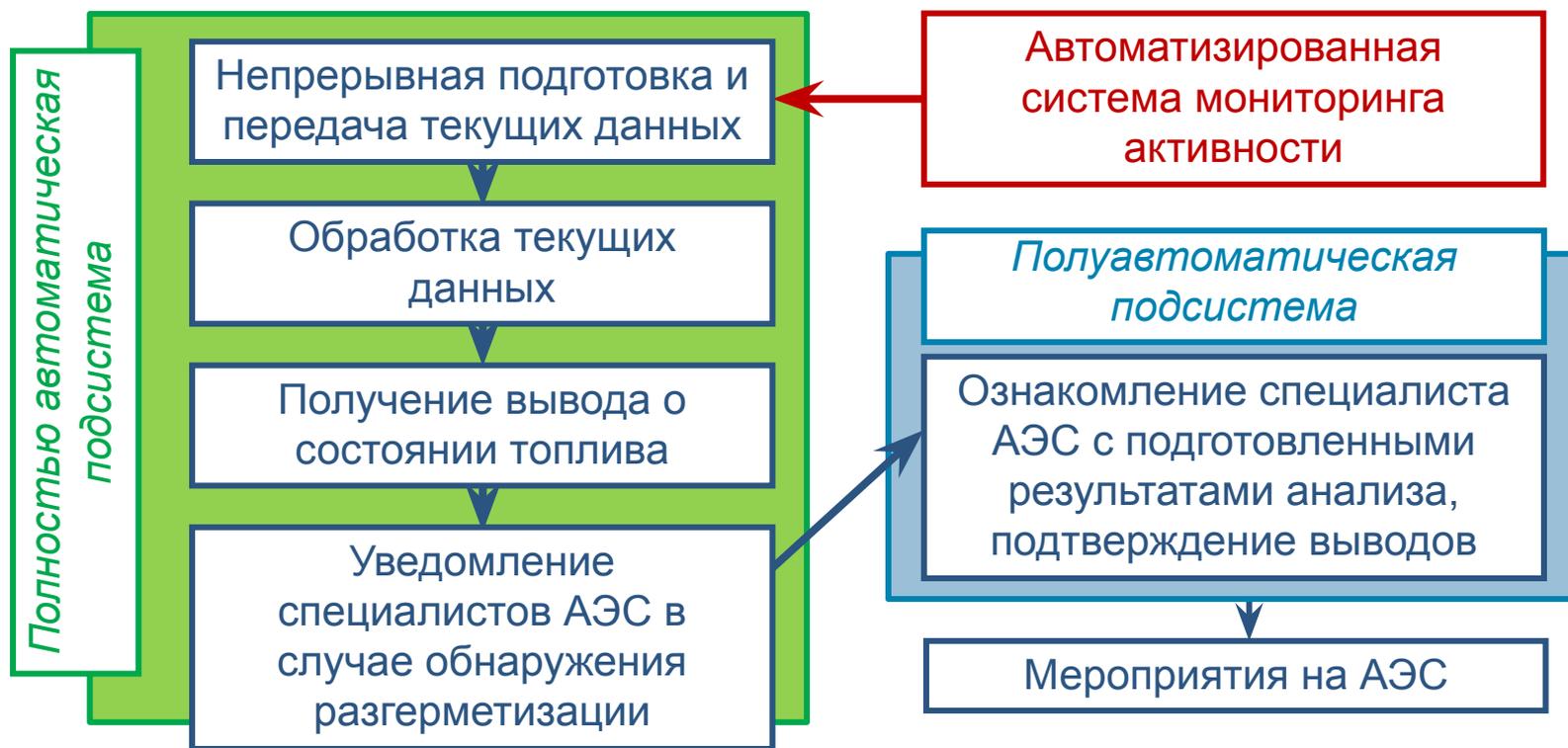
# Демонстрация программного средства



# Режимы работы программного средства

## Полностью автоматизированный режим работы

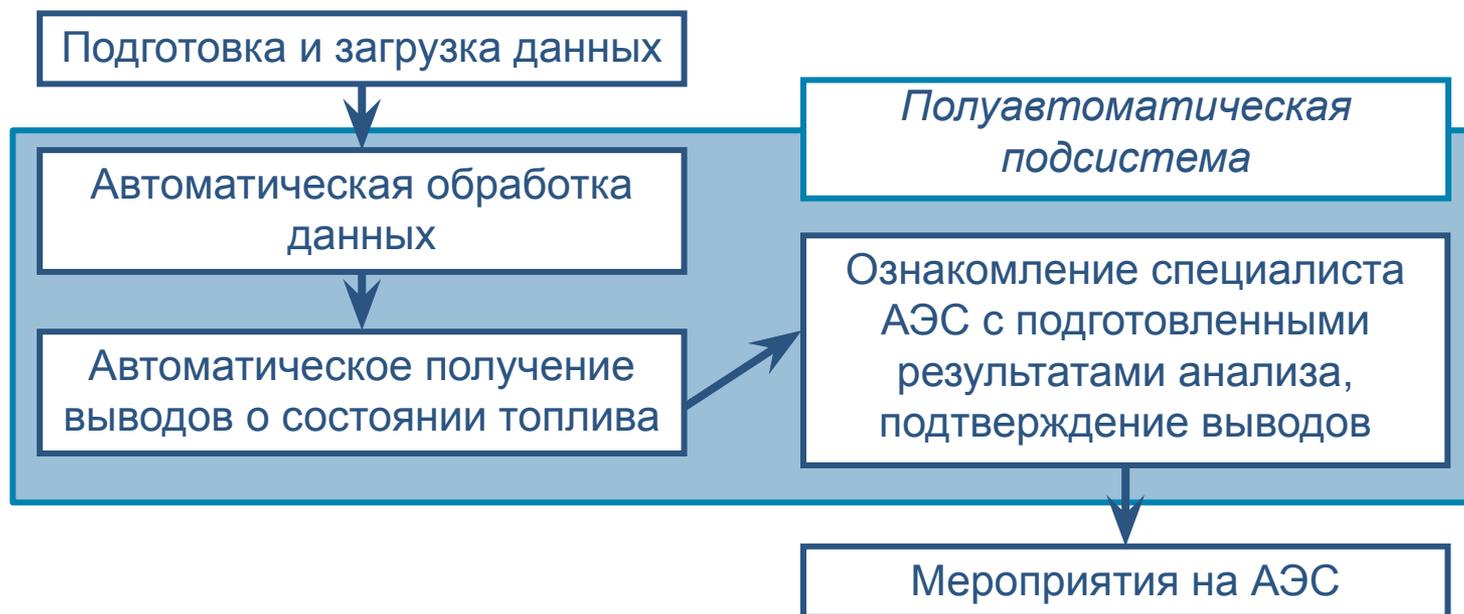
Интеграция со средствами автоматического измерения активности ⇒  
получение информации в режиме реального времени



- Полностью автоматическое получение и анализ данных
- Автоматическое уведомление о разгерметизации
- Интерфейс позволяет специалисту АЭС проследить последовательность получения (аргументацию) выводов о состоянии топлива

# Режимы работы программного средства

## Полуавтоматический режим работы



Кроме автоматического получения выводов о состоянии топлива:

- Анализ архивных данных (включая пополняемый архив по текущей кампании)
- Сравнение результатов, полученных разными методами измерений ⇒ выработка предложений по модернизации применяемых методов
- Обучение и подготовка кадров (интерфейс демонстрирует практическое применение разных методик и критериев КГО)

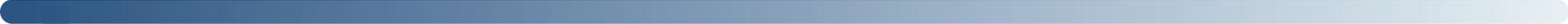
# Заключение

- Разработана комплексная методика для оперативного выявления разгерметизации твэлов во время работы реактора
  - используются **новые** методы дополнительно к традиционным (в том числе, анализ активности Хе)  $\Rightarrow$  повышается информативность
  - статистические методы обработки данных позволяют исключать из рассмотрения случайные «выбросы» данных и автоматически выделять только статистически значимые отклонения активностей реперных радионуклидов от установившихся уровней
  - методика **обладает повышенной чувствительностью и надежностью выявления момента разгерметизации**
- Апробация на данных российских и зарубежных АЭС подтвердила эффективность методики: для значительного числа кампаний разгерметизация выявляется значительно раньше, чем традиционными методами

- На основе разработанной комплексной методики создан прототип программного средства для автоматизированной обработки данных

Применение автоматизированной методики позволяет снизить финансовые потери АЭС за счет:

- снижения трудоемкости и затрат на подготовку и обработку данных КГО
- уменьшения риска ошибок за счет человеческого фактора при анализе данных
- оперативного реагирования на появление негерметичных ТВЭЛОВ в активной зоне (активация «плана действий при разгерметизации»)



Спасибо за  
внимание