

Исследование одноэлектронного шума в жидком ксеноне с помощью двухфазного эмиссионного детектора РЭД-1

Подготовил: Аспирант 3 курса, Лскавян А.Н.
Руководитель: К.ф.-м.н., доцент Сосновцев В.В

Одноэлектронный шум в жидком ксеноне содержит две компоненты

Электроны, захваченные
потенциальным барьером у
поверхности раздела жидкой и
газовой фаз детектора



Решение:
Использование электронного
затвора в детекторе РЭД-100

Электроны, задержанные в
рабочем объеме детектора

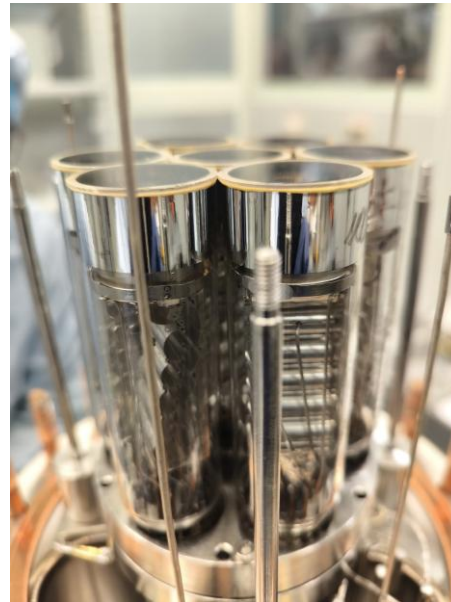
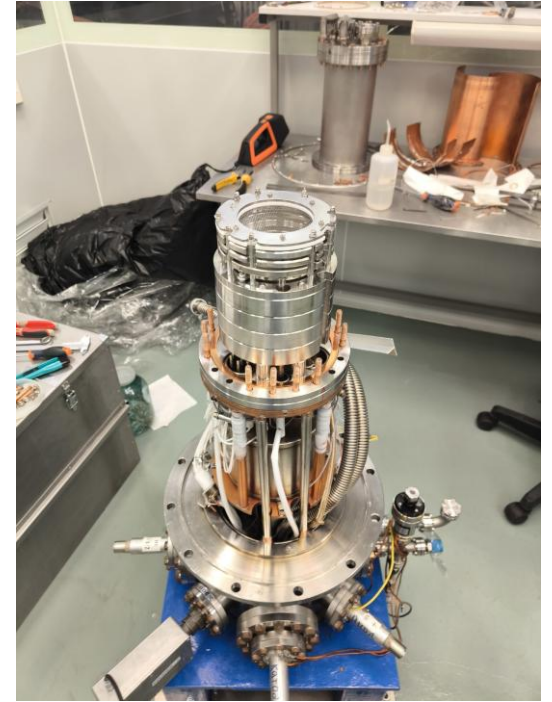
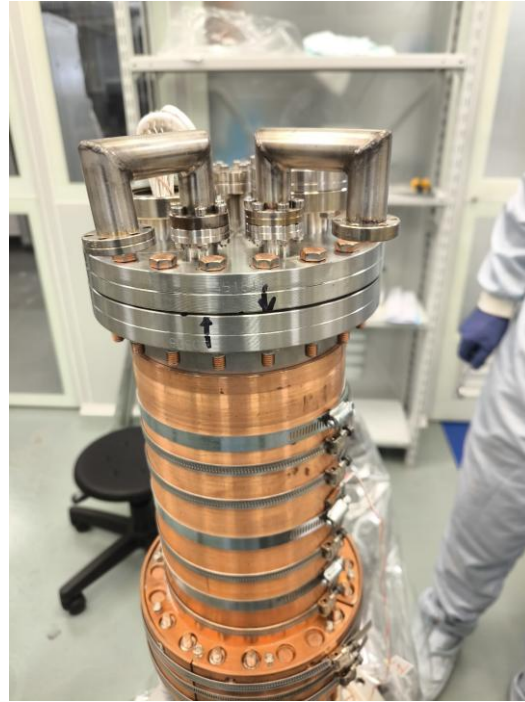


Решение:
???

Не ясен конкретный
механизм задержки
электронов.
Предположение:
электроны
задерживаются
примесями в газе.

Решение:
Сравнить
одноэлектронный
шум в ксеноне с
разными
примесями

РЭД-1



Пример исходного вида измеренного сигнала

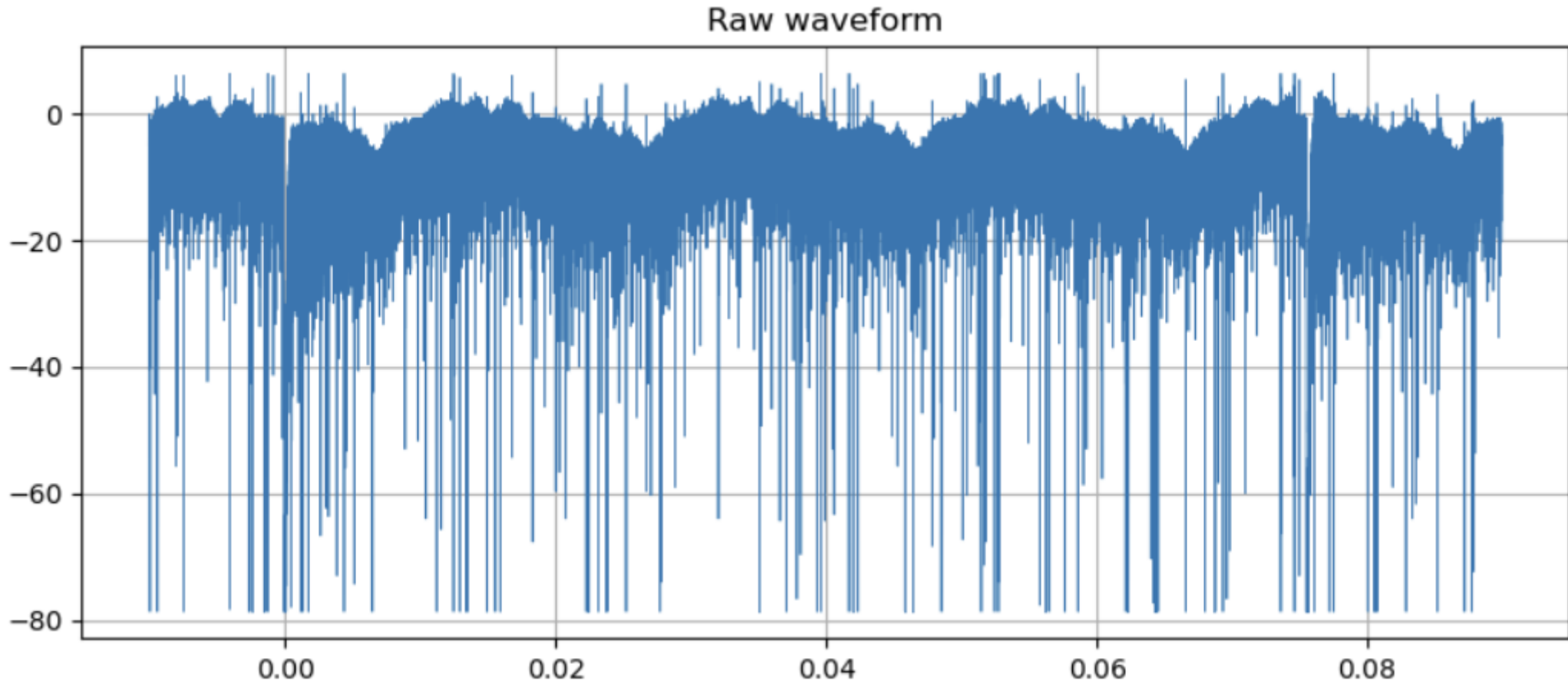
$$y(t) = s(t) + b(t) + \varepsilon(t)$$

$y(t)$ – измеренный сигнал

$s(t)$ – физические импульсы от заряженных части (мюоны, альфа, электроны)

$b(t)$ – низкочастотный шум (медленно смещающаяся нулевая линия)

$\varepsilon(t)$ – высокочастотный шум электроники и статистические флуктуации



Для оценки нулевой линии сигнал разбивается на блоки по 40 мкс. В каждом блоке считаются две характеристики: медианный уровень блока и абсолютное медианное отклонение (MAD).

$$MAD_i = \text{median}(|y_i - \mu|),$$

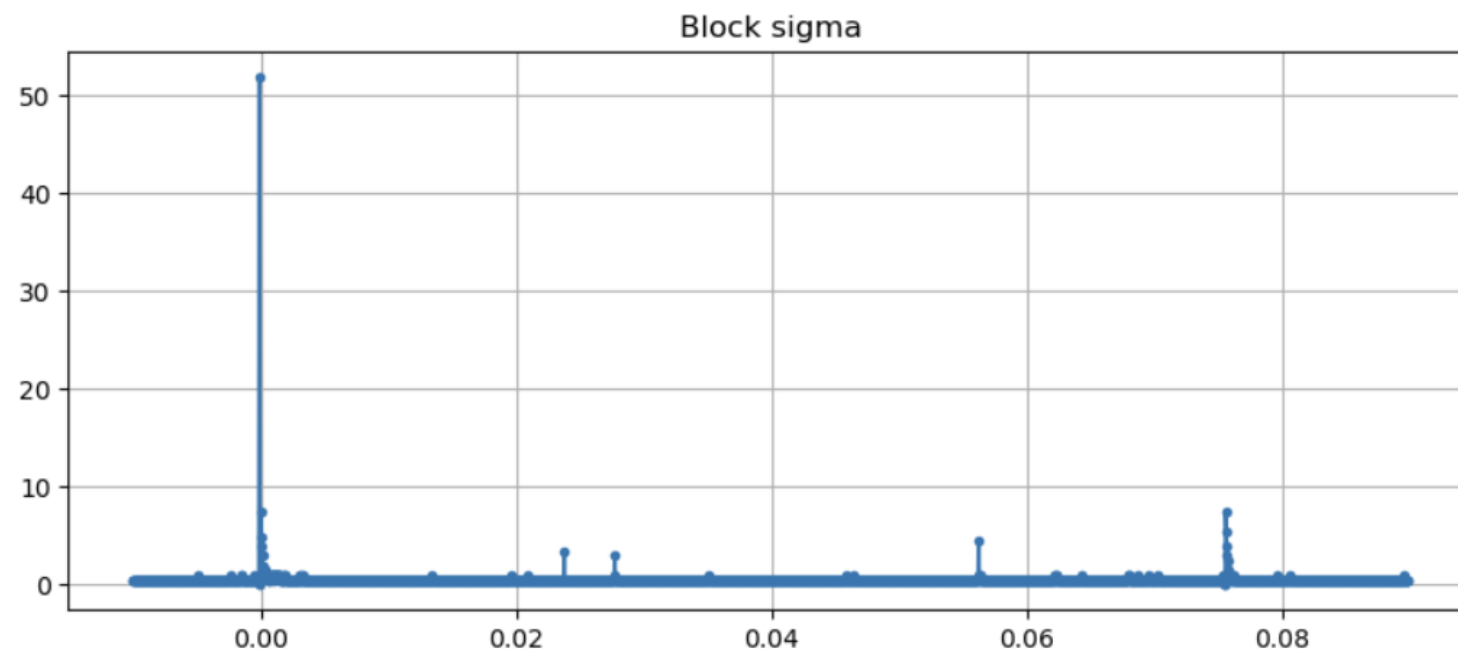
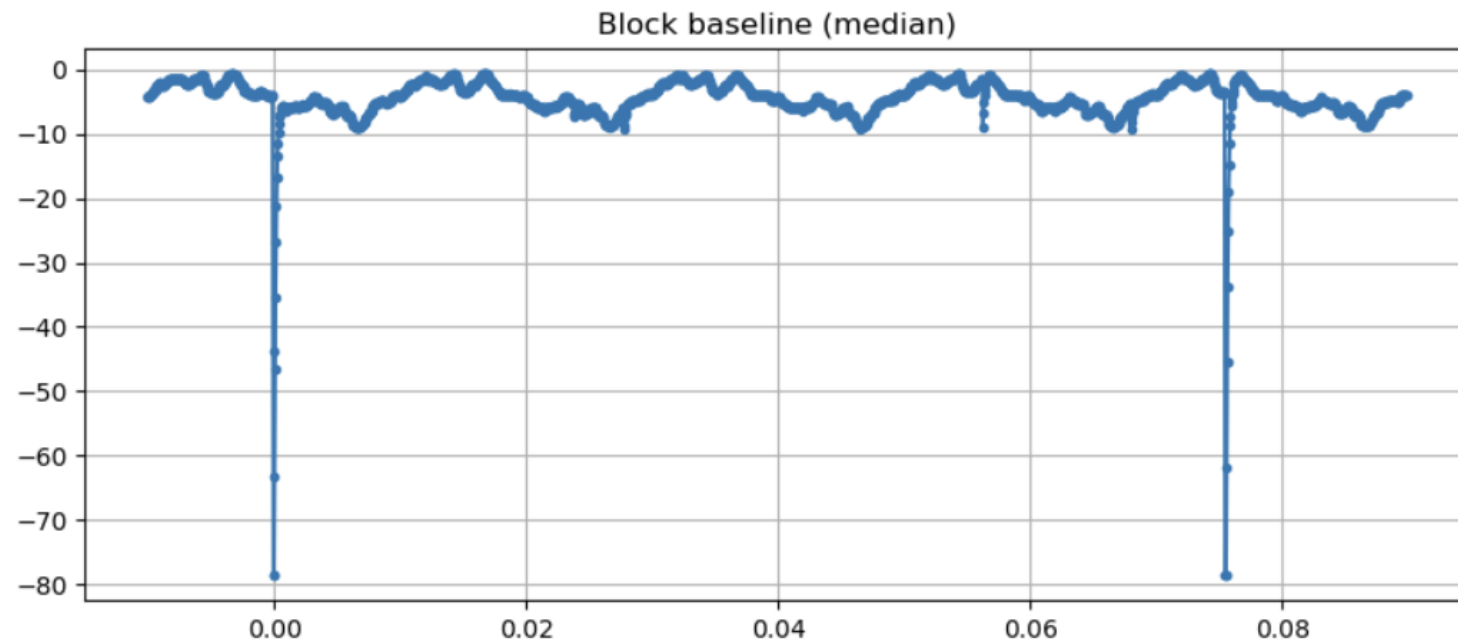
где μ – медианный уровень блока

$$\sigma_i = \frac{MAD_i}{0,6745} = 1,4826 * MAD_i$$

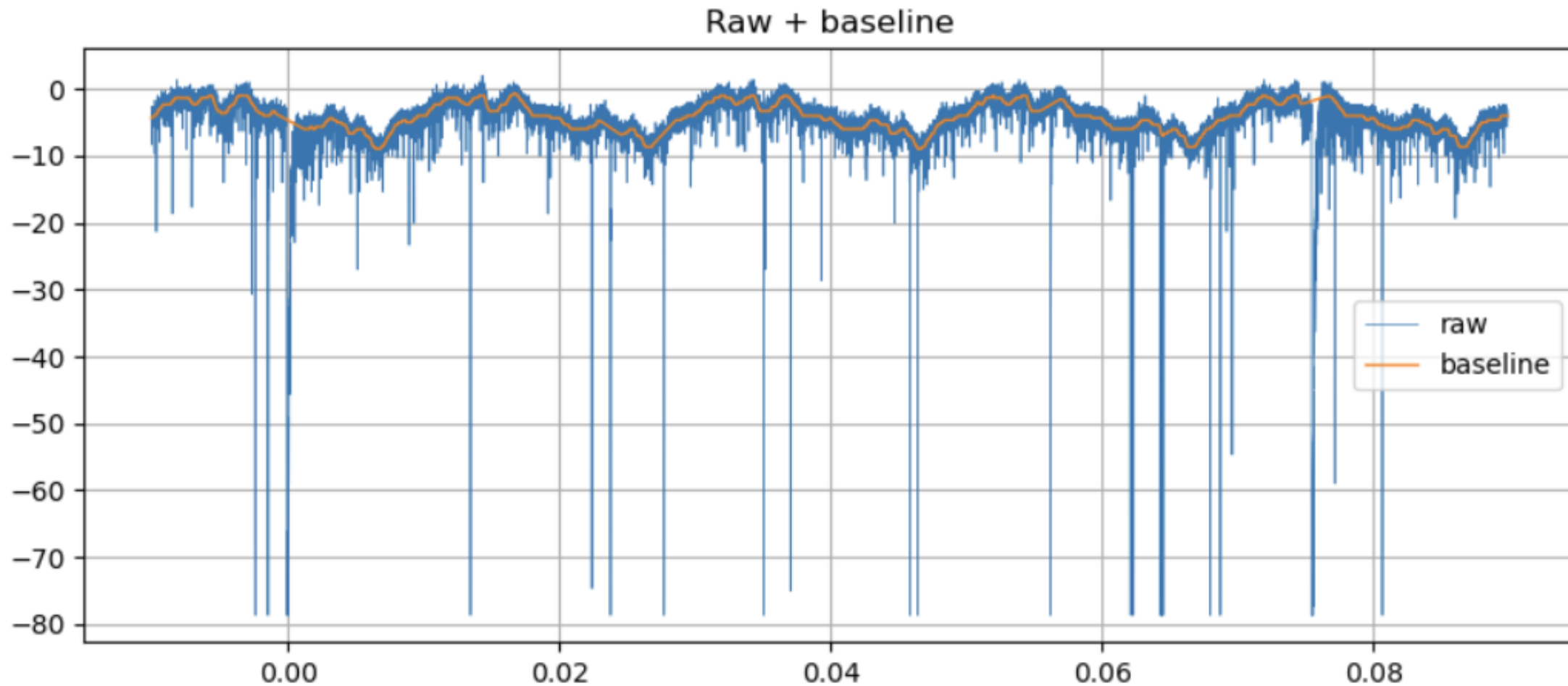
После первичной оценки нулевой линии определяются блоки, которые нельзя надежно использовать для выравнивания по следующим критериям:

1. уровень блока слишком сильно отклоняется от локальной нулевой линии
2. блок слишком шумный (большая сигма)
3. блок подозрительно «тихий», но при этом есть заметное отклонение от нулевой линии

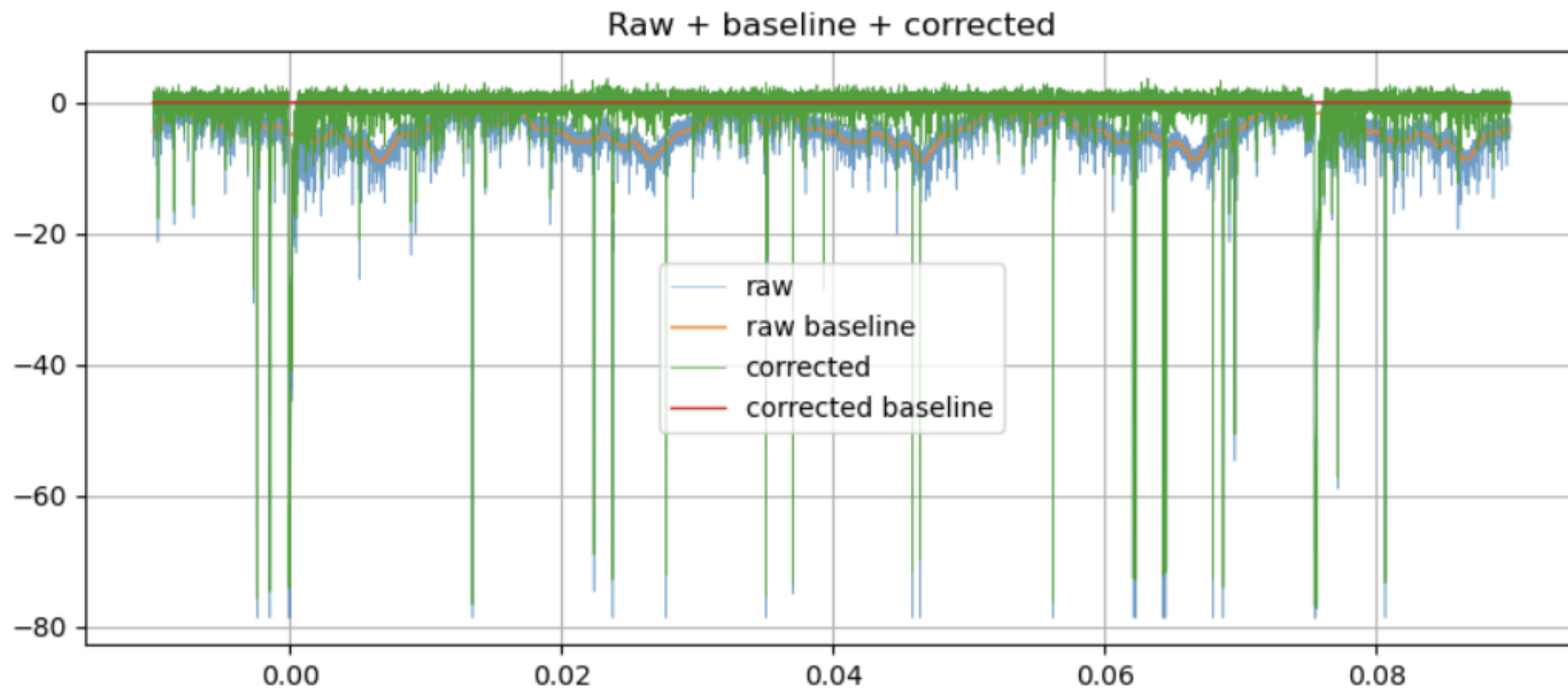
В «плохих» блоках используется интерполяция по соседним «хорошим» блокам



Исходный сигнал с плавающей нулевой линией



Исходный сигнал со скорректированной нулевой линией



Анализ одноэлектронных сигналов. Критерии отбора.

SPE-сигнал
(одиночные фотоэлектроны)

Отдельные отрицательные импульсы, проходящие по амплитудному окну
 $|A_{SPE}| = 3 \text{ мВ}$

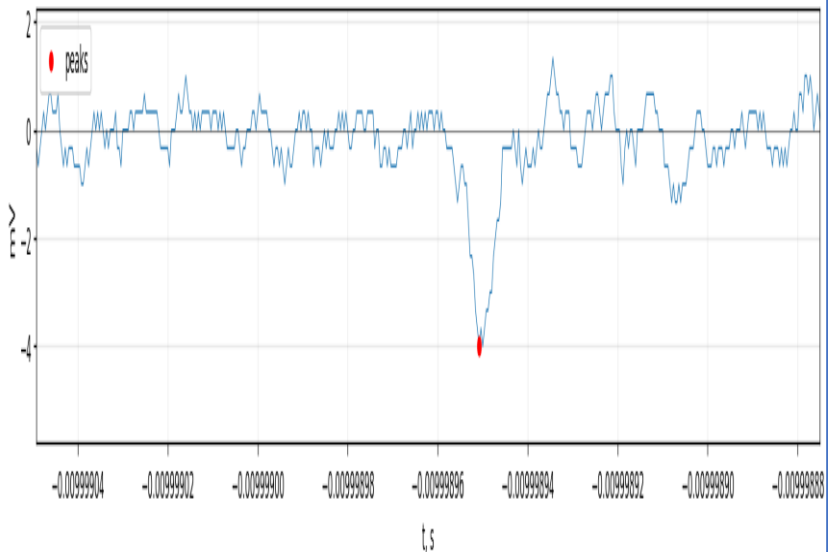
SE-кластер (одноэлектронный шум)

Группа SPE пиков, появившихся близко друг к другу по времени
 $|A_{SPE}| = 3 \text{ мВ}$
 $\Delta t = 700 \text{ нс}$
 $N_{min} = 3$

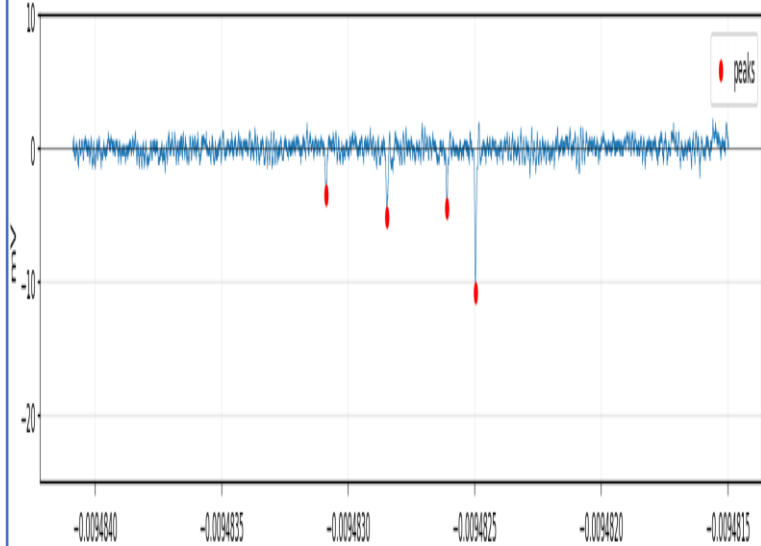
Мюонный сигнал

Мюонный сигнал определяется большой амплитудой, и формой: насыщенное плато + длинная спадающая "борода"
 $|A_{SPE}| = 25 \text{ мВ}$
 $A_{plateau} = 700 \text{ нс}$
 $\Delta t_{plateau} = 50 \text{ мкс}$

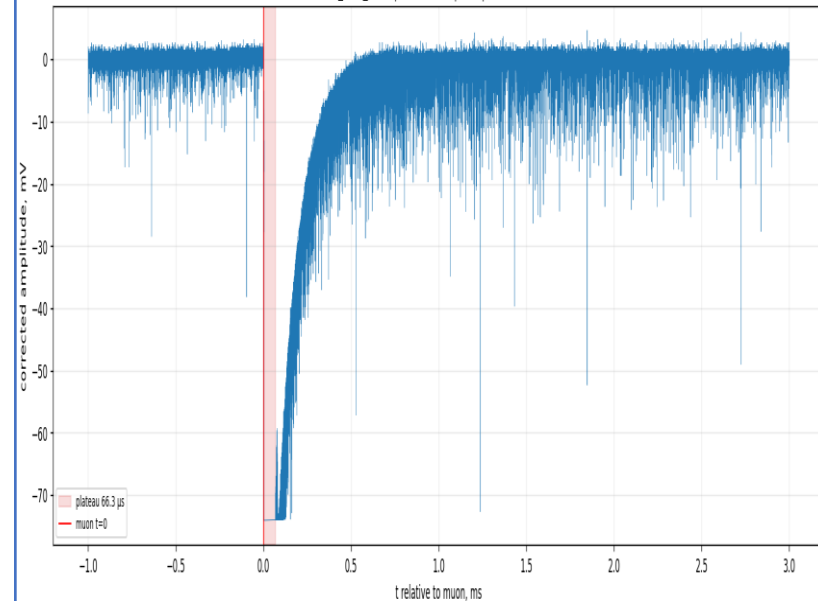
SPE signals: 1/77394



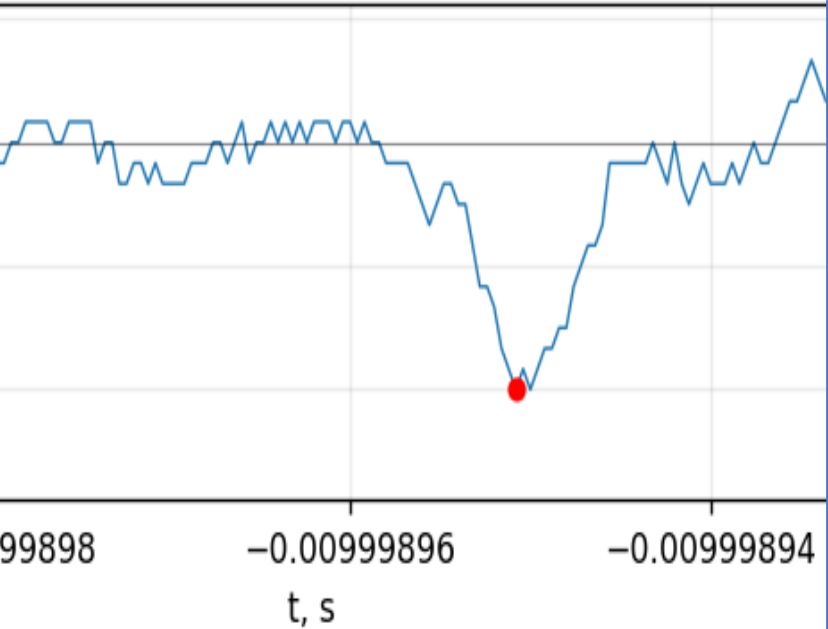
SE clusters: 17/6561



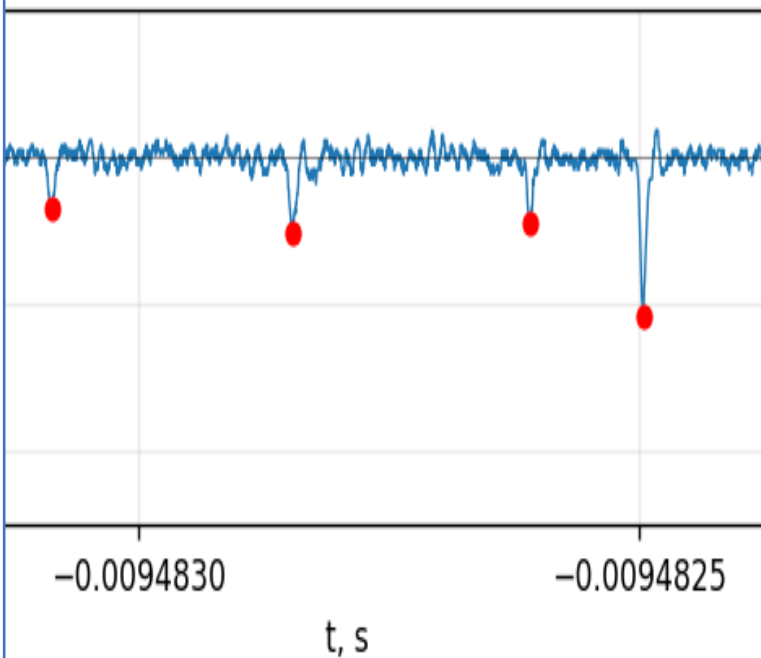
muon_long_8.bin | muon №22 | USE | plateau=66.3 μ s



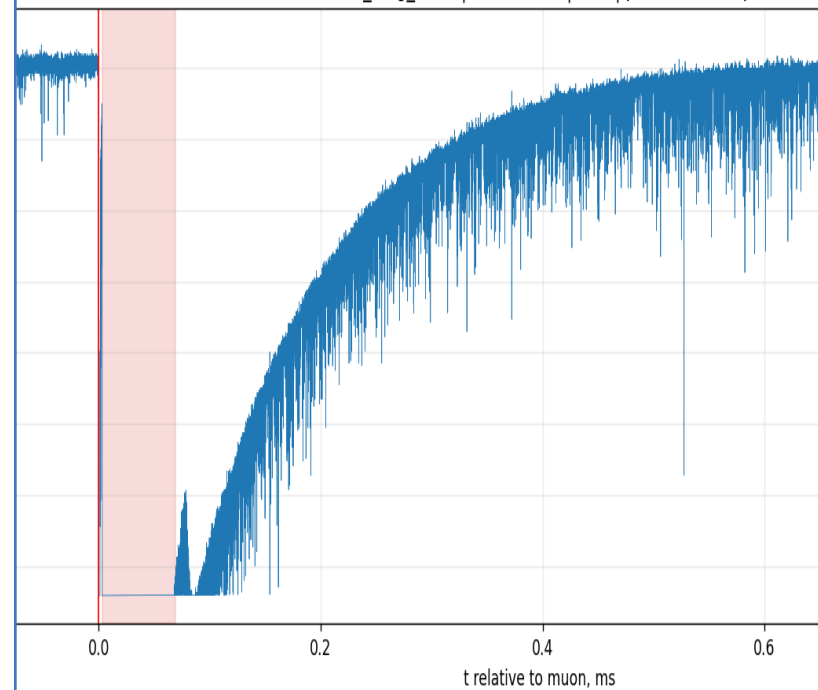
SPE signals: 1/77394



SE clusters: 17/6561

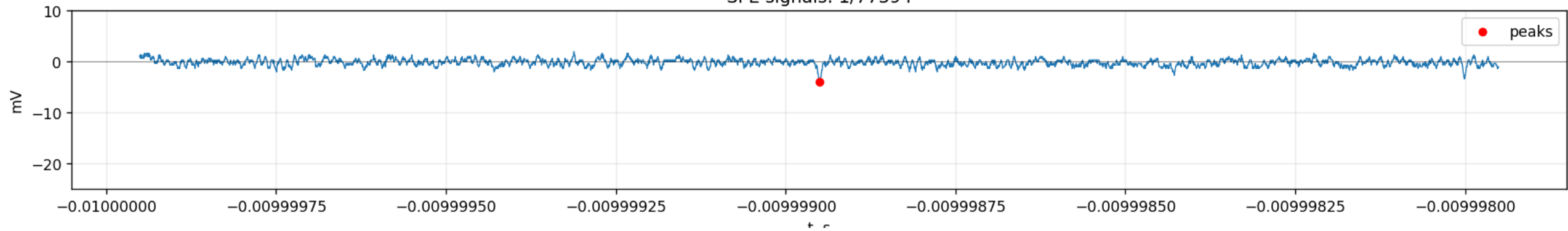


muon_long_8.bin | muon №22 | USE | plateau=66.3 μ s

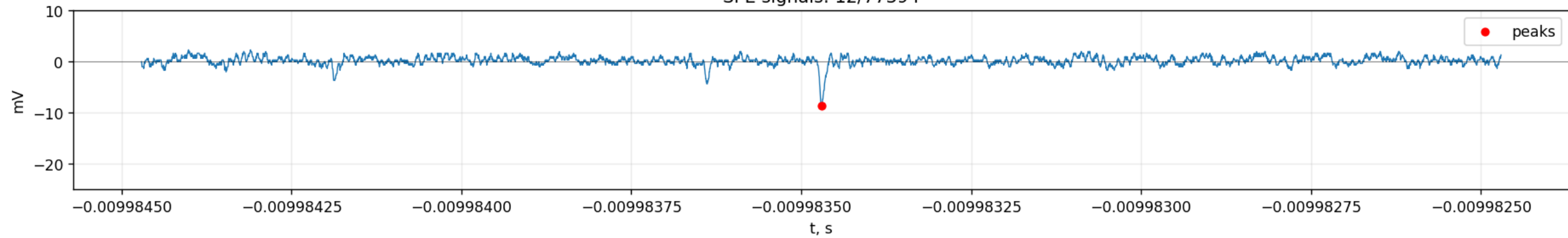


SPE-кандидаты

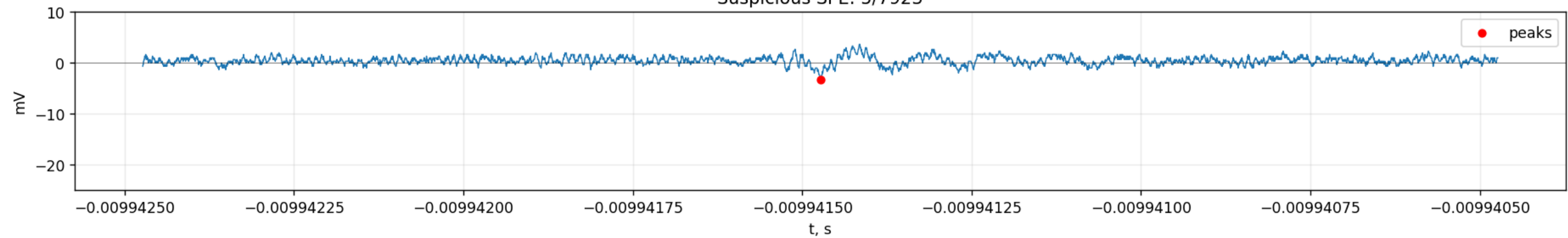
SPE signals: 1/77394



SPE signals: 12/77394

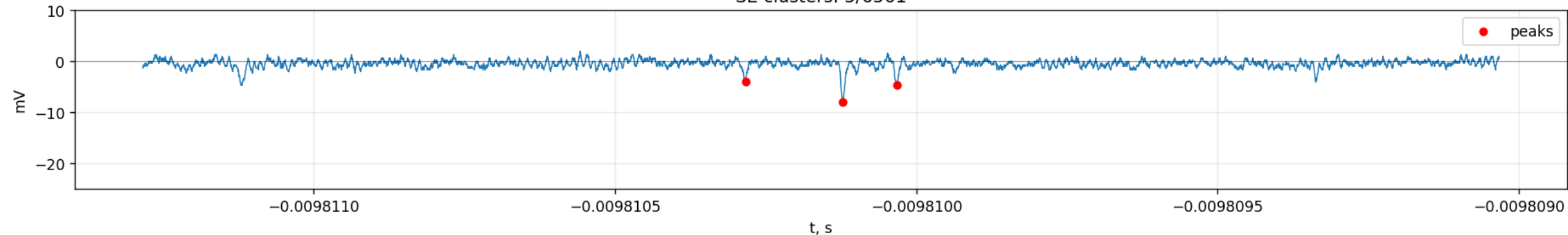


Suspicious SPE: 5/7923

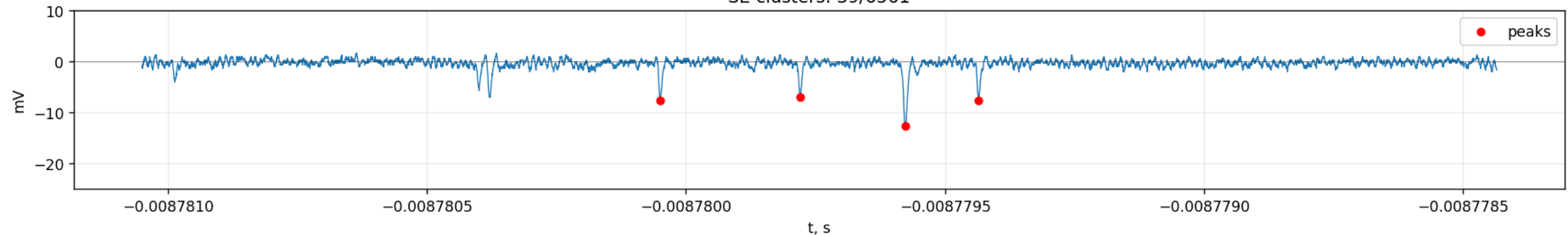


SE-кандидаты

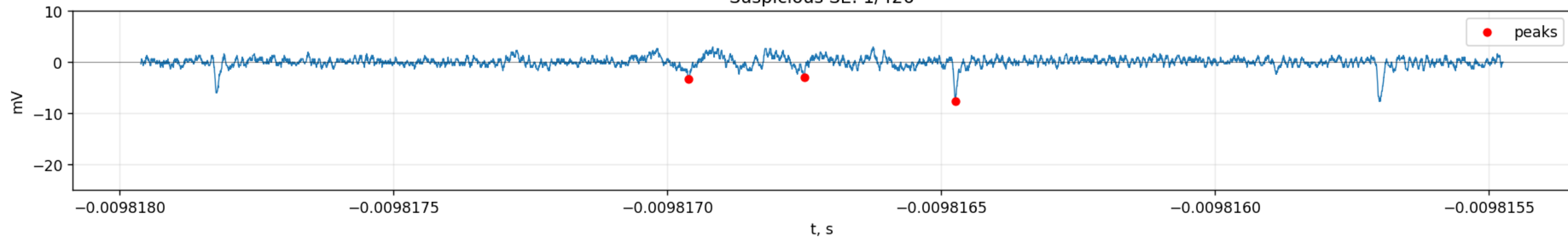
SE clusters: 5/6561



SE clusters: 39/6561

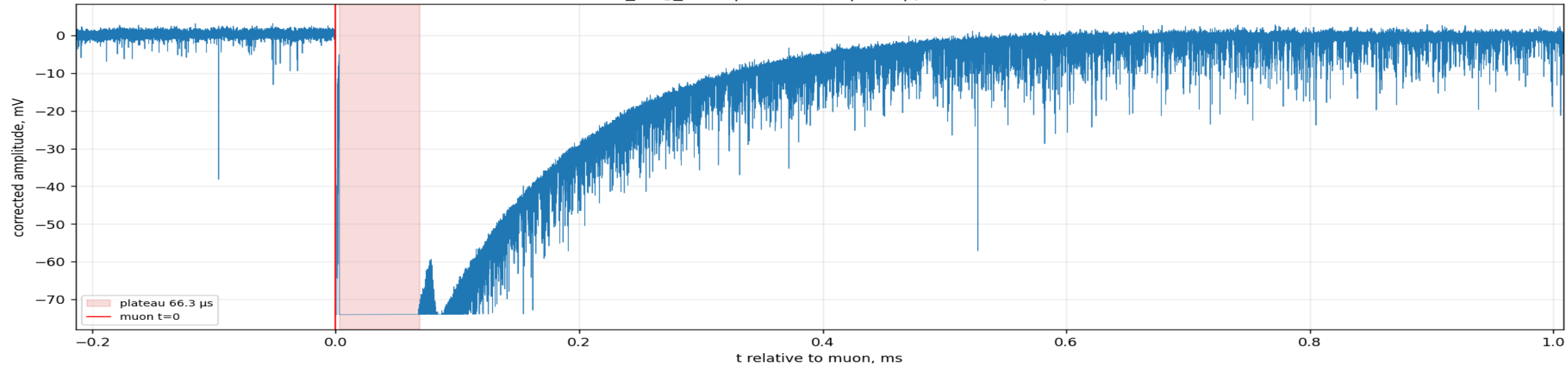


Suspicious SE: 1/426

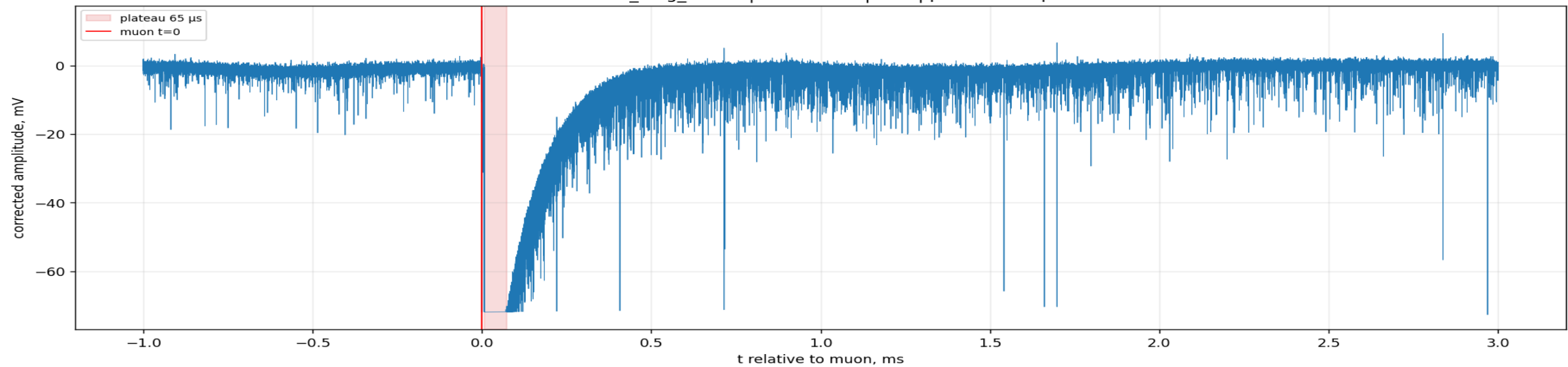


Мюонные кандидаты

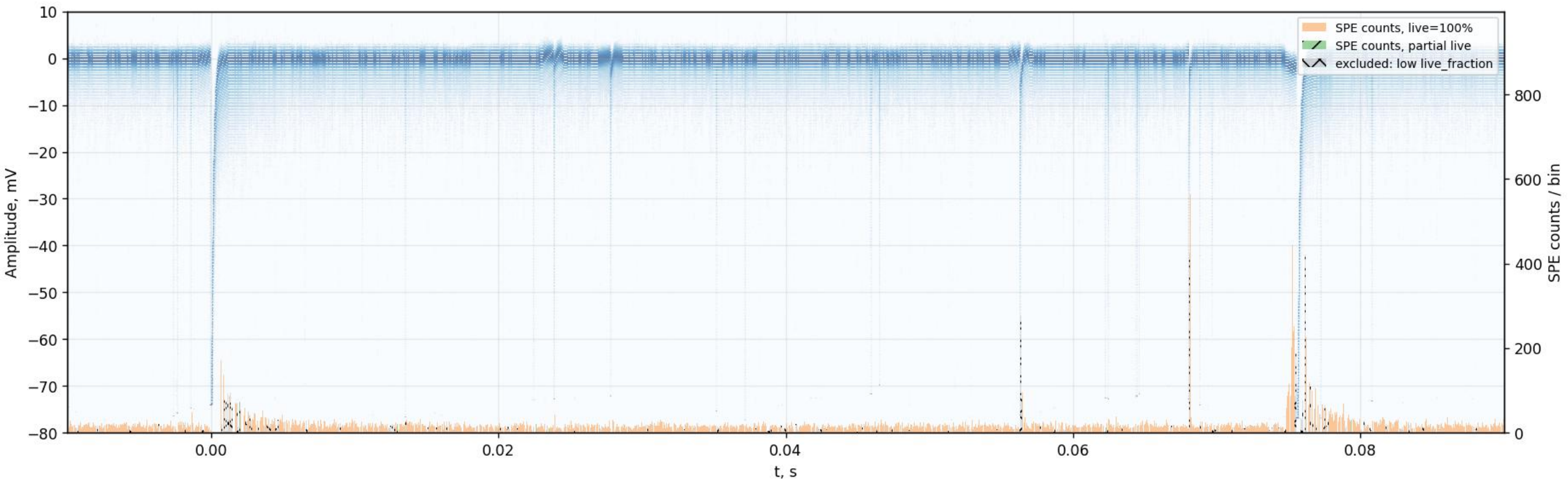
muon_long_8.bin | muon №22 | USE | plateau=66.3 μ s



muon_long_32.bin | muon №28 | USE | plateau=65 μ s



Пример распределения одноэлектронных сигналов

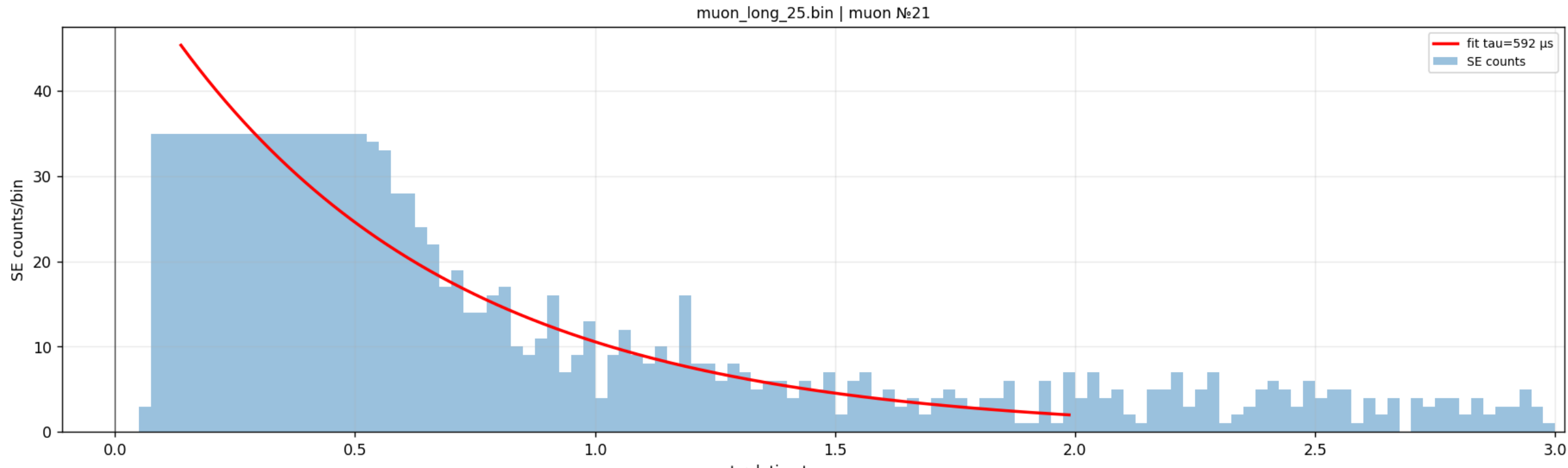


Аппроксимация распределения SE-шумов для отдельных мюонов

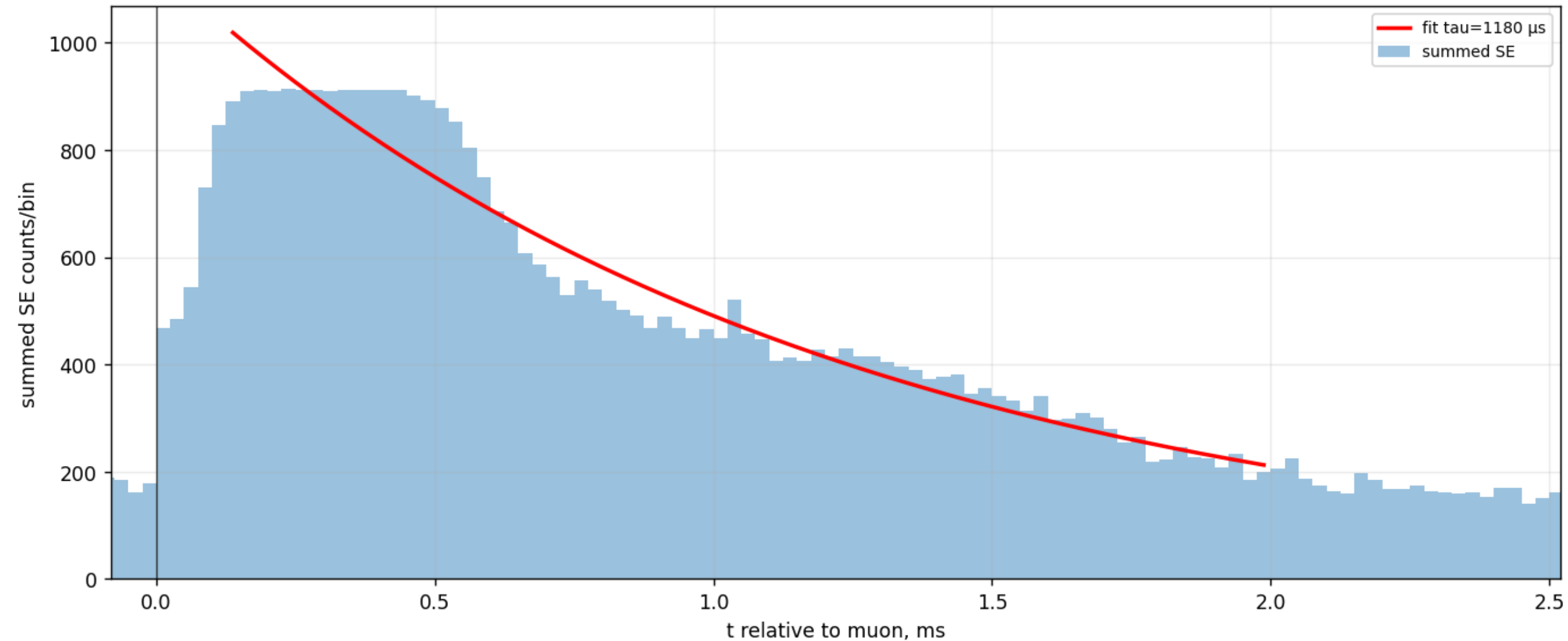
Для оценки времени затухания SE-шумов распределение событий по времени бинируется по времени с шагом в 25 мкс. В каждом бине считается число найденных кластеров, после чего распределение аппроксимируется экспоненциальной зависимостью:

$$N(t) = A * \exp\left(-\frac{t-t_0}{\tau}\right) + C, \text{ где}$$

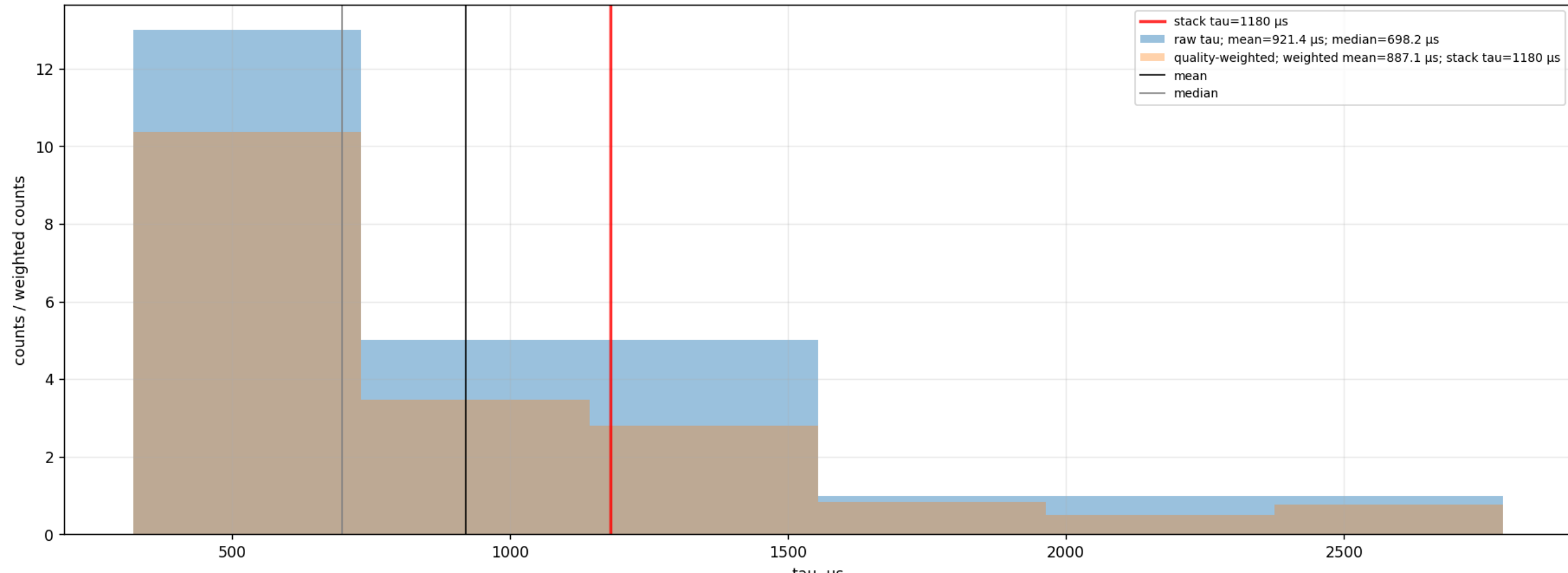
A — начальная амплитуда затухающей компоненты, τ — характерное время затухания, C — постоянный фоновый уровень, а t_0 — начало интервала фитирования.



Аппроксимация суммы распределений SE-шумов



Распределение характерного времени затухания τ



Достигнутые результаты

- Проведена доработка детектора РЭД-1, увеличены автономность и надежность
- Проведены тестовые сеансы, а также полноценный сеанс со снятием сигналов
- Написана программа, позволяющая в короткие сроки строить и анализировать распределения сигналов от одиночных фотоэлектронов и одноэлектронных шумовых кластеров с нормировкой на мюоны

Дальнейшие шаги

- Проведение сеанса с ксеноном от второго производителя
- Доработка программы для анализа полученных результатов и их сравнения с ксеноном от первого производителя
- Поиск возможности включить в аппроксимацию участка сигнала сразу после мюонного плато

Спасибо за внимание!

Дополнительные материалы. Интерфейс

RED-1 SE/SPE waveform analysis 14.3

Файл: muons-long april 2026/muon_long_8.bin Выбрать .bin Advanced

Header: Siglent V4.0, CH3, N=250,000,000, offset=4096, dtype=uint8, sample_rate=2.5e+09 Sa/s, dt=0.4 ns, t_min=-0.01 s, t_max=0.0899999996 s, scale=0.333333333 mV/code

Start Candidates review Distribution / Fit Muon stack 14.3 Log / Progress

RED-1 SE/SPE analysis 14.3

Обычный сценарий: выбери binary-файл сверху и нажми зелёную кнопку. Далее приложение спросит, что анализировать — SE-кластеры или SPE-сигналы, покажет параметры с уже выставленными значениями по умолчанию и запустит всю подготовку автоматически.

СТАРТ АНАЛИЗА

Анализ завершён. Режим: SPE signals. Ручной отбор: нет.

Что будет выполнено после старта:

- 1) загрузка binary через pr.memmap;
- 2) baseline correction;
- 3) поиск больших сигналов и bad intervals;
- 4) поиск SE или SPE по выбранному режиму;

Start Candidates review Distribution / Fit Muon stack 14.3 Log / Progress

Набор: Suspicious SE Открыть кандидатов Сохранить картинку ← Назад Далее → Оставить Исключить 1/426 рад, мкс 1,000 ymin -25,000 ymax 10,000

Загружен набор: Suspicious SE; строк: 426. На графике показан текущий выбранный кандидат из этой таблицы.

(x, y) = (-0.009817555, -9.8)

Suspicious SE: 1/426

номер кластера	начало idx	конец idx	о кластера (сек)	д кластера (сек)	с кластера (сек)	ость кластера (число пиков	мум амплитудь	индексы пиков	учитывать	подозрительный	комментарий	ix positive amp r	max pos
1	4	457598	458815	-0.0098169608	-0.009816474	-0.0098167174	4.868e-07	3	-7.66665649	array(len=3)	1	1	3	457708
2	27	2205699	2207306	-0.0091177204	-0.0091170776	-0.009117399	6.428e-07	5	-16.333313	array(len=5)	1	1	3.00003052	2205797
3	22	2626282	2627601	0.0089454468	0.0089449226	0.0089451952	5.222e-07	2	2.66665649	array(len=2)	1	1	2.66665649	2626488

Параметры построения и fit

Mode: SPE header header

bin, μ s: 25,000 auto SE time: start

fit start: -0.0101 fit stop: 0.01 min live: 0,950 auto

use waveform ylim ymin: -80,000 ymax: 10,000

Что отображать / учитывать

use selected candidates waveform waveform after distribution fit

+ C Poisson sigma ignore count=0 live_fraction correction

Легенда: tau A C chi2 NDoF

chi2/NDoF N events bin width live threshold

Интерактивность графика: Базовый zoom/pan

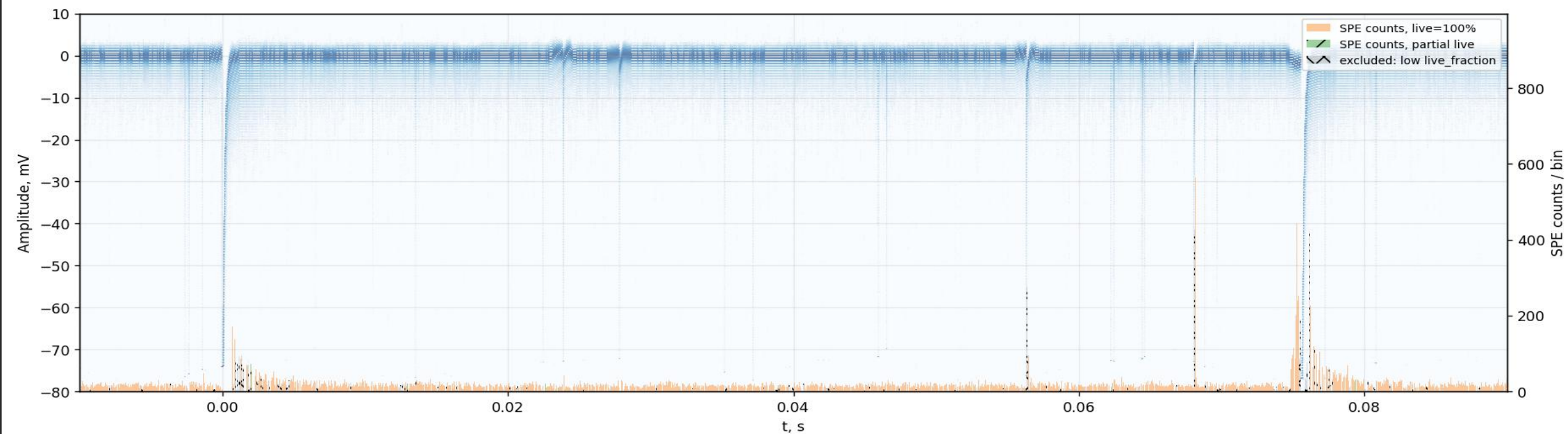
Действия

Построить график

Сохранить картинку

Показать параметры fit

СТОП / аварийно остановить



Выбрать бинарники

Очистить список

1) Найти мюоны

Выбрано файлов: 32

C:/Users/Happy/Desktop/Разное/НРИ/отчет 6/RED1/RED_1_analysis/muons-long april 2026/muon_long_8.bin
C:/Users/Happy/Desktop/Разное/НРИ/отчет 6/RED1/RED_1_analysis/muons-long april 2026/muon_long_9.bin
C:/Users/Happy/Desktop/Разное/НРИ/отчет 6/RED1/RED_1_analysis/muons-long april 2026/muon_long_10.bin
C:/Users/Happy/Desktop/Разное/НРИ/отчет 6/RED1/RED_1_analysis/muons-long april 2026/muon_long_11.bin
C:/Users/Happy/Desktop/Разное/НРИ/отчет 6/RED1/RED_1_analysis/muons-long april 2026/muon_long_12.bin
C:/Users/Happy/Desktop/Разное/НРИ/отчет 6/RED1/RED_1_analysis/muons-long april 2026/muon_long_13.bin
C:/Users/Happy/Desktop/Разное/НРИ/отчет 6/RED1/RED_1_analysis/muons-long april 2026/muon_long_14.bin
C:/Users/Happy/Desktop/Разное/НРИ/отчет 6/RED1/RED_1_analysis/muons-long april 2026/muon_long_15.bin
...

Общие настройки muon-normalized batch

pre, ms ^ v post, ms ^ v muon thr, mV ^ v plateau thr, mV ^ v

min plateau, μ s ^ v

требовать плато

Метод анализа подтверждённых мюонов

mode v bin, μ s ^ v

fit start rel, ms ^ v fit stop rel, ms ^ v

Параметры поиска SE-кластеров

peak thr, mV ^ v dead-time, ns ^ v

cluster window, ns ^ v min peaks ^ v

Запуск поиска SE/SPE на уже подтверждённых мюонах

2) Найти SE/SPE и построить fit

fit каждого мюона

fit суммы распределений

Просмотр и отбор мюонов

← → **Оставить мюон** **Исключить** Оставить все 22/26



muon_long_32.bin | muon №28 | USE | plateau=65 μ s

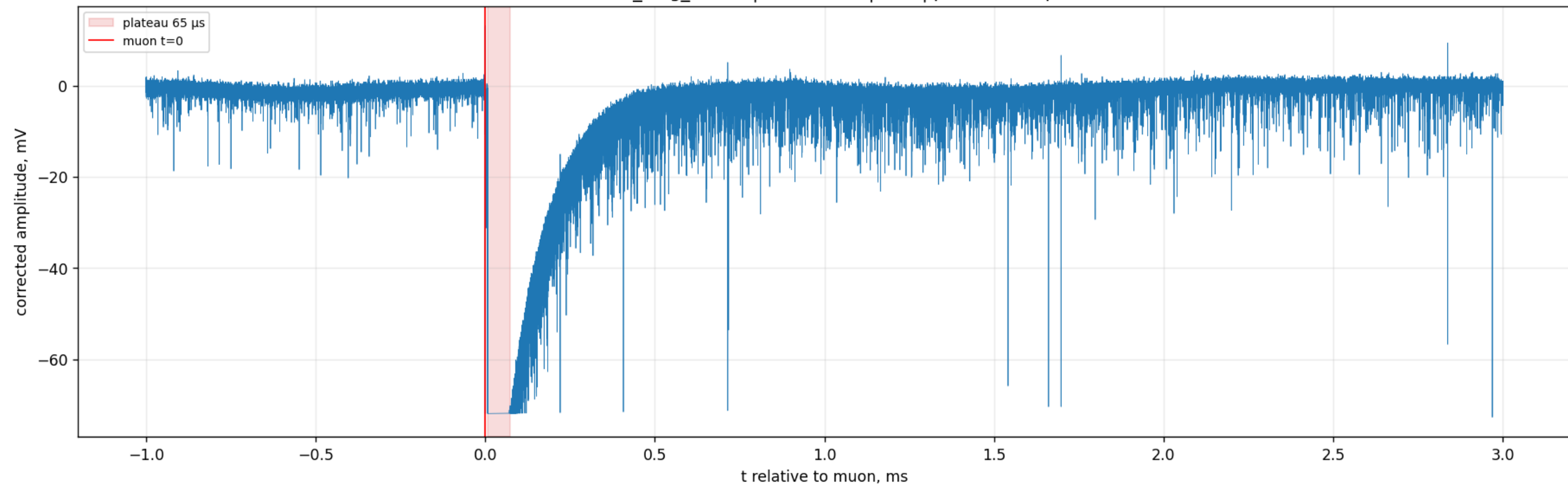


Таблица найденных мюон-кандидатов. Выбор строки синхронизирован со страницей просмотра.

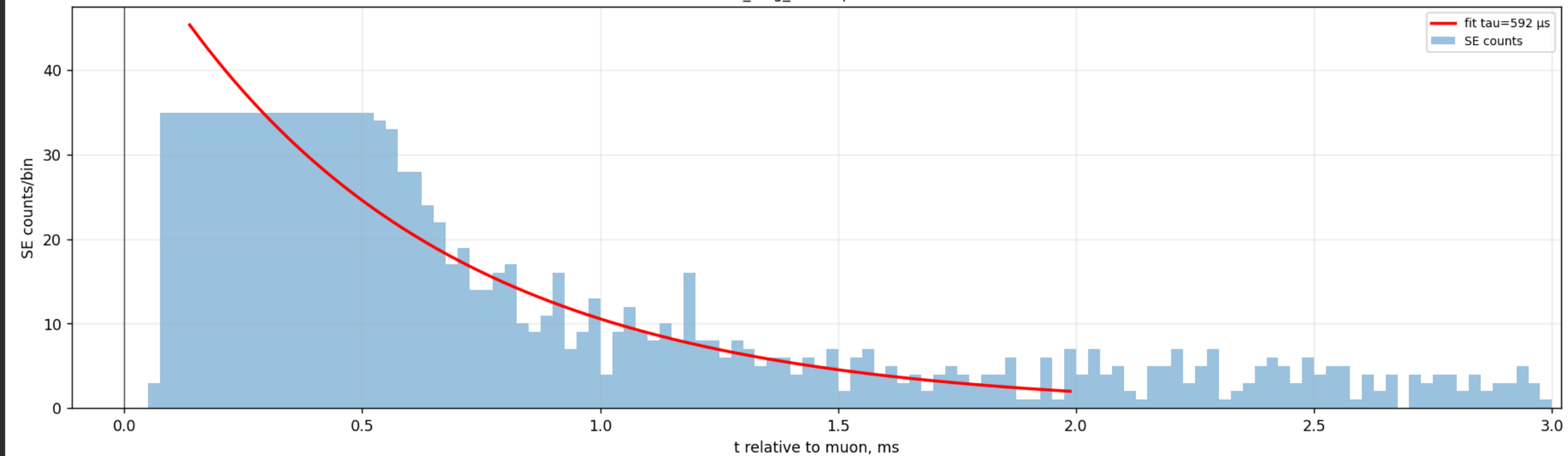
Фильтр:

	учитывать	session	file	path	muon #	trigger idx	trigger time, s	live window start	live window stop	trigger amplitude, i	plateau width, us	plateau total, us	tau threshold, i	plateau start time, latea	latea
6	1	5	muon_long_13....	C:/Users/Happy...	22	12475648	-1.94816e-05	-1	3	-37.4526215	86.6528	92.944	-70	-1.94808e-05	6.717
7	1	6	muon_long_14....	C:/Users/Happy...	16	12468643	-2.50856e-05	-1	3	-50.5726471	67.3936	73.2448	-70	-1.714e-05	5.025
8	1	6	muon_long_14....	C:/Users/Happy...	196	111531958	0.0792255664	-1	3	-42.8903809	89.1416	106.8408	-70	0.0792264904	0.079
9	1	7	muon_long_15....	C:/Users/Happy...	16	12463384	-2.92928e-05	-1	3	-36.6240845	80.3408	82.9552	-70	-2.01848e-05	6.015
10	1	8	muon_long_16....	C:/Users/Happy...	20	12473165	-2.1468e-05	-1	3	-42.3333282	70.66	81.5368	-70	-1.67216e-05	5.393
11	1	9	muon_long_17....	C:/Users/Happy...	23	12464793	-2.81656e-05	-1	3	-49.9366455	147.4448	154.724	-70	-2.81648e-05	0.000
12	1	10	muon_long_18....	C:/Users/Happy...	20	12443609	-4.51128e-05	-1	3	-27.27771	82.5616	87.7808	-70	-1.91664e-05	6.339
13	1	11	muon_long_19....	C:/Users/Happy...	18	12418561	-6.51512e-05	-1	3	-31.9371948	92.8352	112.7688	-70	-2.3508e-05	6.932
14	1	12	muon_long_20....	C:/Users/Happy...	16	12469900	-2.408e-05	-1	3	-25.2029572	98.2512	109.3272	-70	-2.014e-05	7.811
15	1	13	muon_long_21....	C:/Users/Happy...	15	12469982	-2.40144e-05	-1	3	-38.5362396	126.3672	133.1416	-70	-2.40136e-05	0.000
16	1	15	muon_long_23....	C:/Users/Happy...	25	12446224	-4.30208e-05	-1	3	-25.2211914	59.612	65.7208	-70	-1.66816e-05	4.292
17	1	16	muon_long_24....	C:/Users/Happy...	26	12477668	-1.78656e-05	-1	3	-32.8026428	73.9768	82.4368	-70	-1.7864e-05	5.611
18	1	17	muon_long_25....	C:/Users/Happy...	21	12475822	-1.93424e-05	-1	3	-33.8134766	76.8384	80.7928	-70	-1.93416e-05	5.749
19	1	18	muon_long_26....	C:/Users/Happy...	21	12478737	-1.70104e-05	-1	3	-25.333313	75.5456	80.9216	-70	-1.70088e-05	5.853
20	1	20	muon_long_28....	C:/Users/Happy...	21	12467462	-2.60304e-05	-1	3	-39.2389679	141.8328	150.9792	-70	-2.60296e-05	0.000
21	1	23	muon_long_31....	C:/Users/Happy...	24	12466991	-2.64072e-05	-1	3	-42.6435394	109.3768	118.4936	-70	-2.37136e-05	8.566
22	1	24	muon_long_32....	C:/Users/Happy...	28	12470693	-2.34456e-05	-1	3	-27.5357208	64.984	75.9944	-70	-1.61248e-05	4.885

muon_long_25.bin | muon №21: tau=591.956 μ s, chi2/NDoF=1.12828, N bins=75



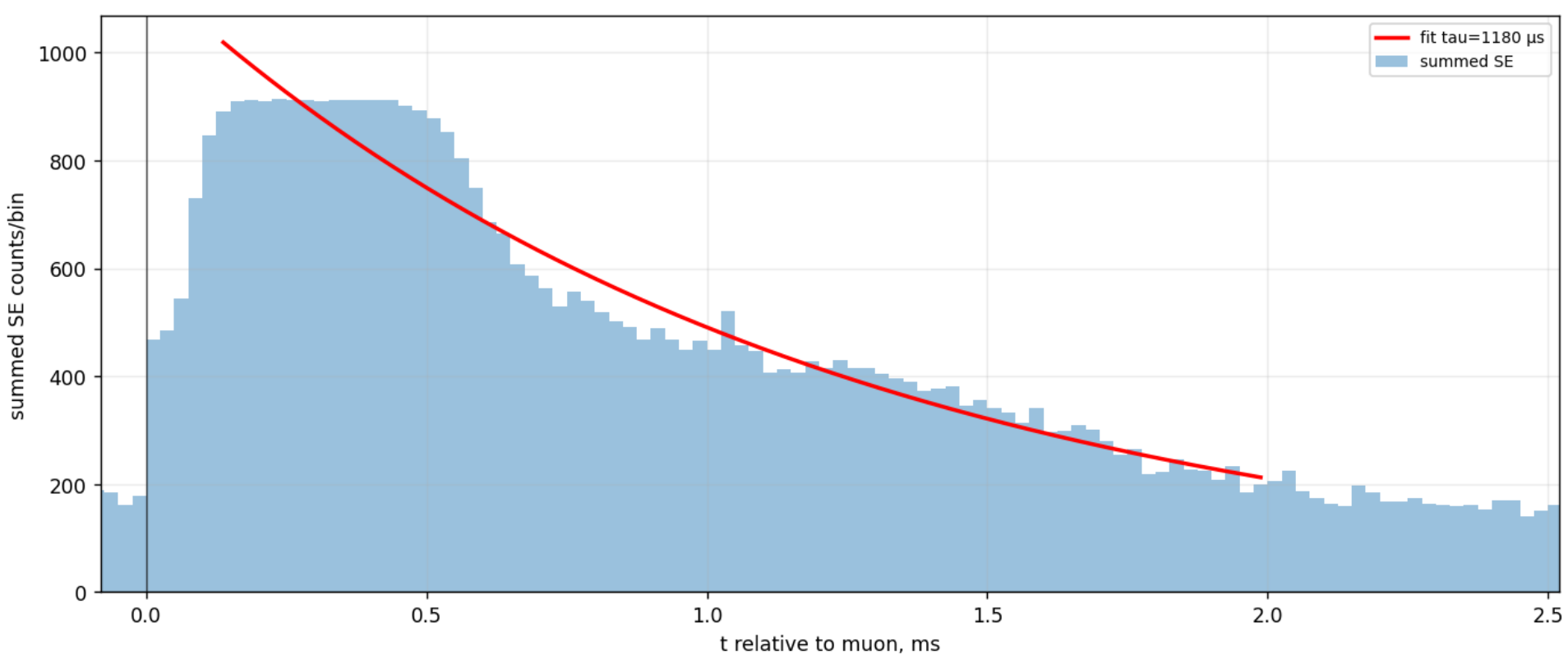
muon_long_25.bin | muon №21



Fit суммы распределений

2) Анализ подтверждённых мюонов

individual fits: N=26, mean tau=921.358 μ s, median tau=698.247 μ s. Fit суммы распределений: tau=1180.36 μ s, sigma(tau)=65.6751 μ s, chi2/NDoF=4.57723, N fit bins=75.



Результаты fit суммы

Fit суммы распределений

tau = 1180.35511 μ s
sigma(tau) = 65.6750949 μ s
A = 1018.87067
C = 3.54742527e-18
chi2 = 329.560431
NDoF = 72
chi2/NDoF = 4.5772282
N fit bins = 75
N total bins = 161

	file	muon #	tau, us	tau err, us	chi2/NDoF	N fit bins
1	muon_long_8.bin	22	1057.73072	278.912448	0.795829234	75
2	muon_long_8.bin	236	746.241444	132.332548	0.862895953	75
3	muon_long_9.bin	29	479.864113	43.9682941	1.44716856	75
4	muon_long_10....	22	322.080443	32.1946435	1.20722779	75
5	muon_long_12....	26	571.378369	66.4123426	0.950137883	75
6	muon_long_13....	22	371.733096	27.9473808	1.7121241	75
7	muon_long_14....	16	1342.89189	443.481797	0.980301431	75
8	muon_long_14....	196	2785.2709	3567.05903	0.702742648	75
9	muon_long_15....	16	431.486602	55.4527698	1.33154472	75
10	muon_long_16....	20	1135.23242	280.064404	3.25740146	75
11	muon_long_17....	23	1215.81148	346.8043	0.560526021	75
12	muon_long_18....	20	403.644084	33.5569574	1.52473674	75
13	muon_long_19....	18	659.149194	88.1945626	0.959814689	75
14	muon_long_20....	16	600.766536	109.362728	0.954983094	75
15	muon_long_21....	15	737.343813	149.956302	1.53772879	75
16	muon_long_23....	25	1147.92234	270.303588	5.37472834	75
17	muon_long_24....	26	455.202827	40.8228427	1.26740710	75

Сырое распределение tau и quality-weighted распределение. Вес: $1 / (1 + \chi^2/NDof - 1)$.

