



ИРКУТСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

N* Новосибирский
государственный
университет
*НАСТОЯЩАЯ НАУКА

TAIGA

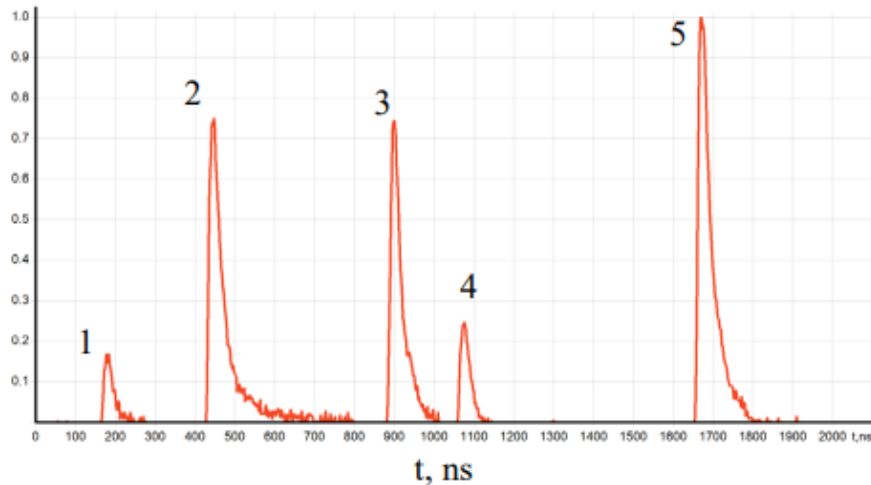
Исследование пространственно-временной структуры ШАЛ по данным установки Tunka-Grande

Иванова А.Л., Монхоев Р. Д., коллаборация TAIGA

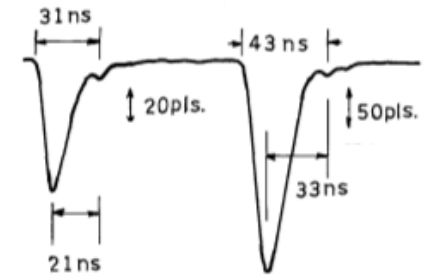
Москва, ВККЛ-2024

Причины интереса к исследованию формы сигналов от ШАЛ:

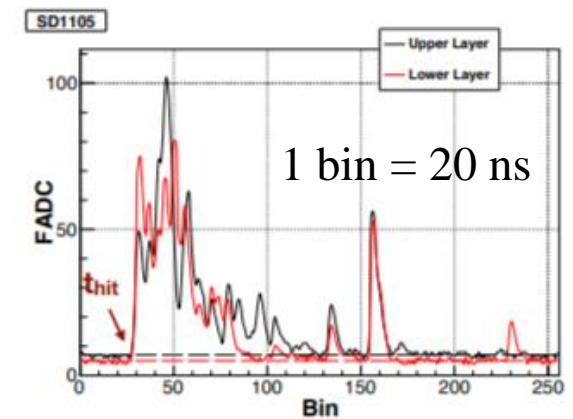
- Исследование кривизны фронта и толщины диска ШАЛ
- Поиск ШАЛ с несколькими фронтами
- Поиск частиц, опережающих фронт ливня
- Поиск запаздывающих частиц



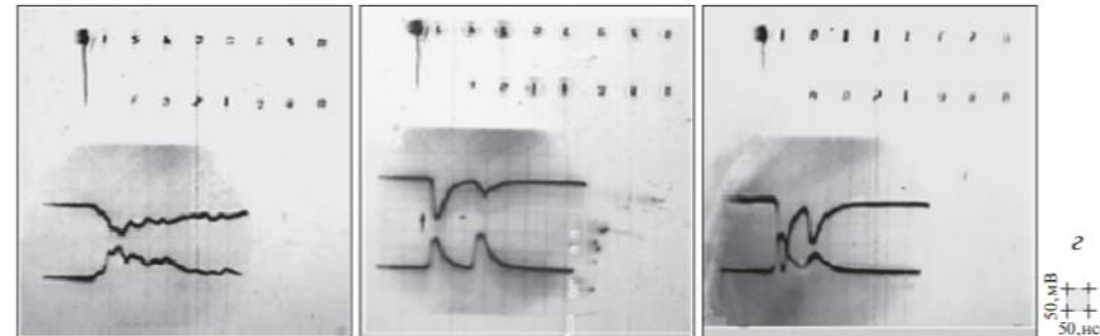
Тянь-Шанская Высокогорная научная станция ФИАН



Kobe EAS Array (jan – okt, 1982 г)

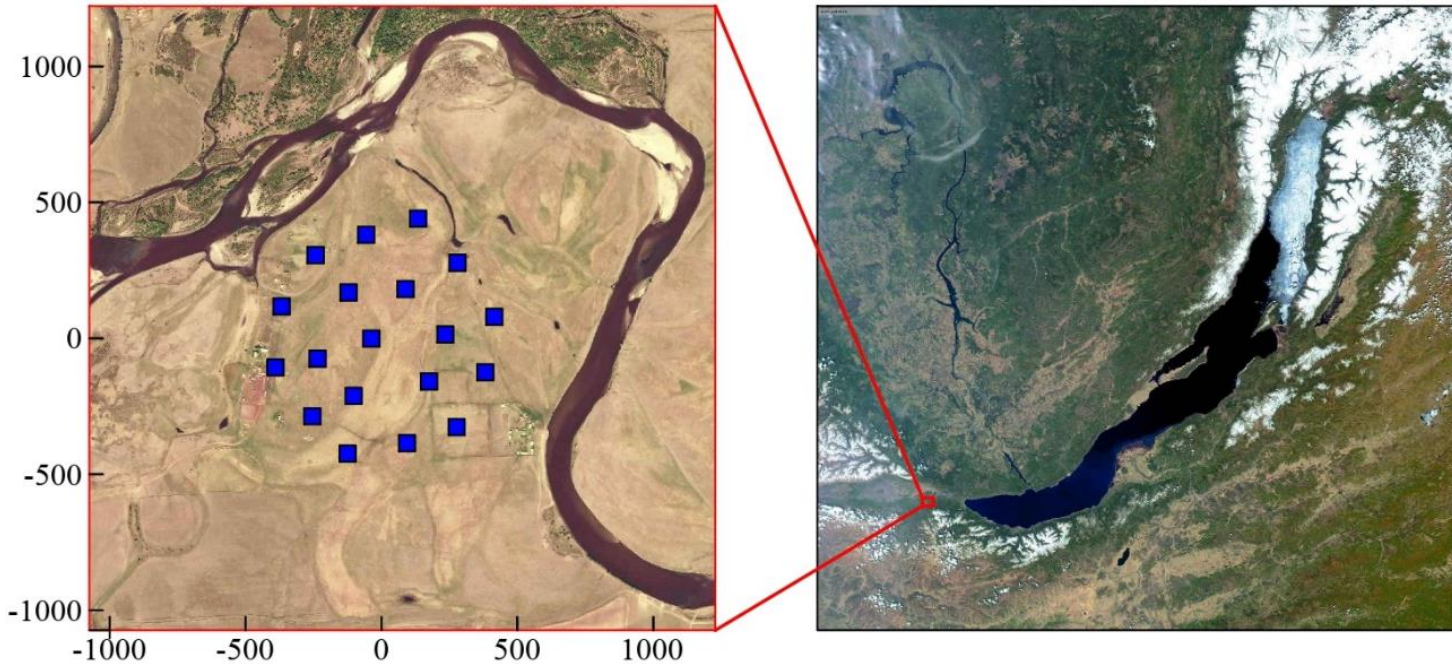


Telescope Array



ШАЛ МГУ

Сцинтилляционная установка Tunka-Grande



Площадь: 0,5 км².

Число станций: 19.

Площадь наземного детектора ~ 8 м².

Площадь подземного детектора ~ 5 м².

Расстояние между соседними станциями ~ 175 м.

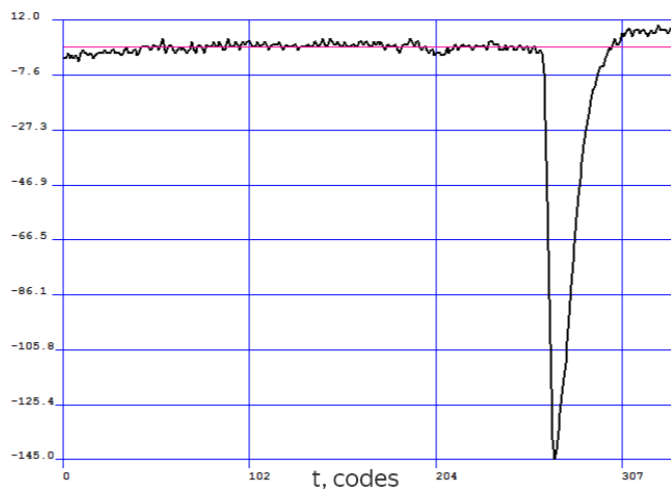
Сцинтилляционная станция = Наземный детектор + Подземный детектор.

Наземный детектор = 12 сцинтилляционных счетчиков.

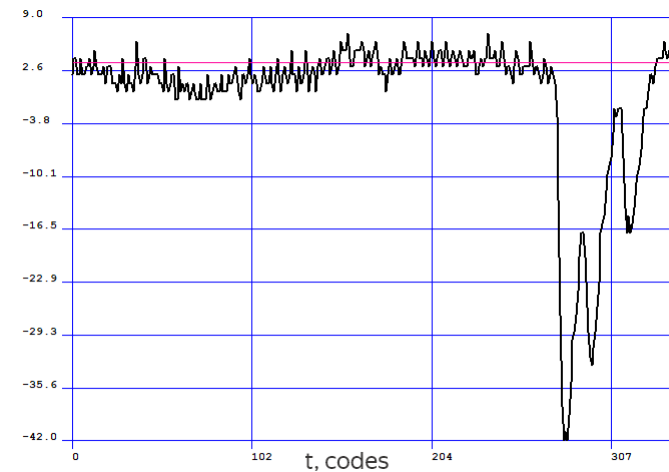
Подземный детектор = 8 сцинтилляционных счетчиков.

Формы сигналов, зарегистрированных на установке Tunka-Grande

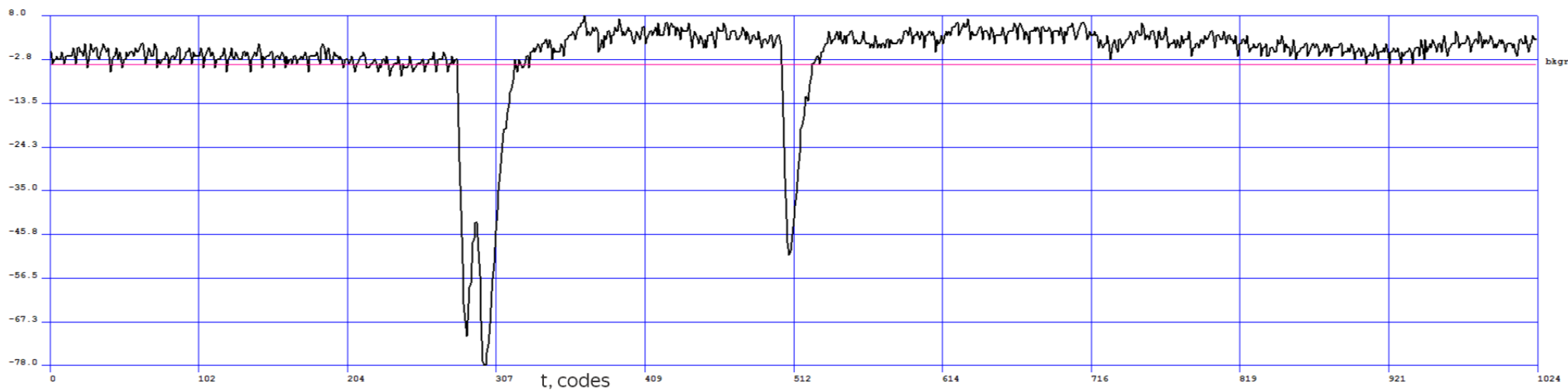
Импульс стандартной формы:



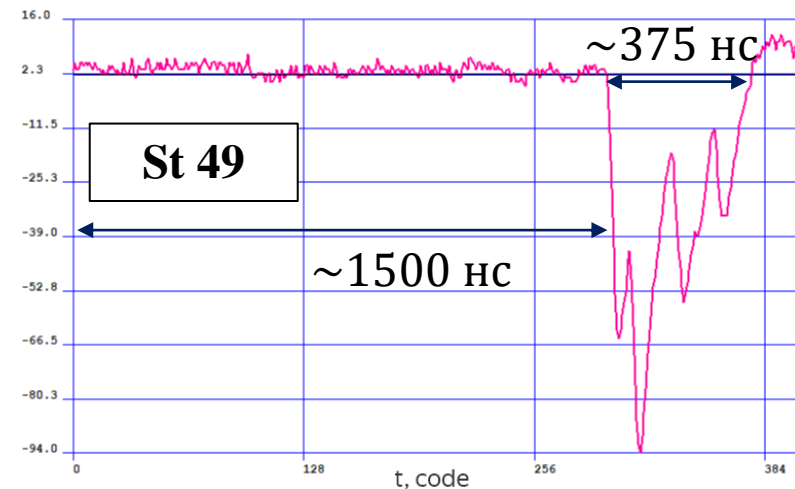
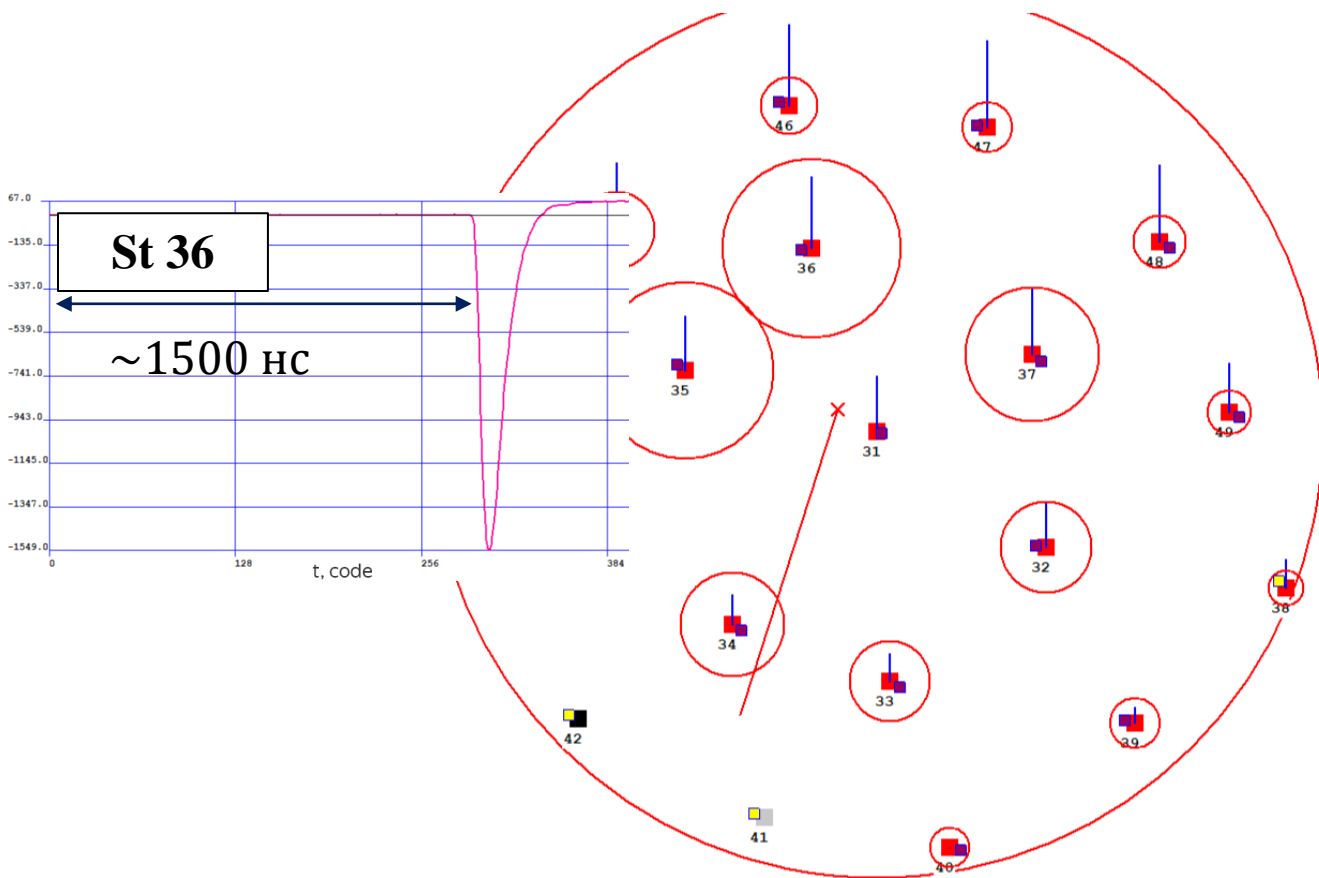
«Многомодальный» импульс:



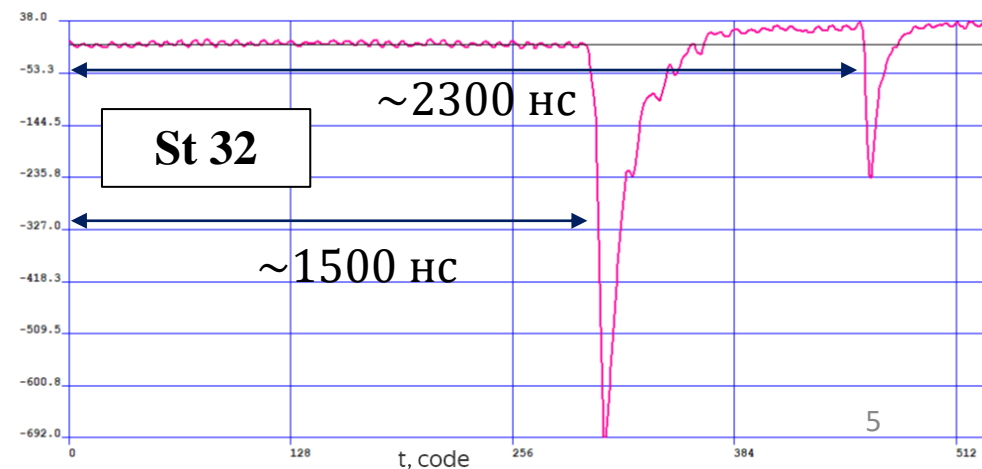
Многоимпульсный сигнал:



Пример события ШАЛ с «многомодальными» импульсами/ многоимпульсными сигналами, зарегистрированными в детекторах установки Tunka-Grande:



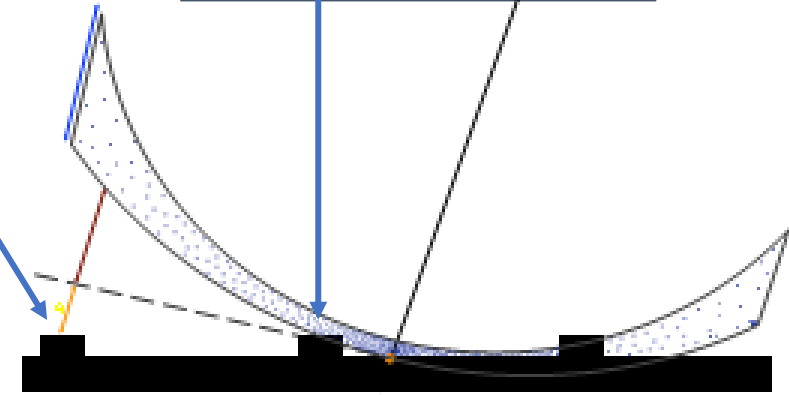
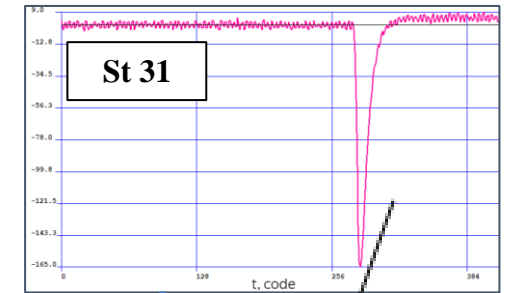
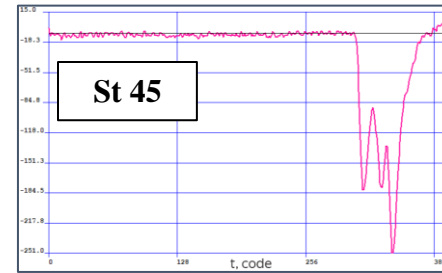
В 12 станциях в наземном детекторе зарегистрированы «многомодальные» импульсы либо многоимпульсные сигналы.



Событие 05.10.21, 17 сработавших станций,
 $\theta = 16.7^\circ$, $\varphi = 252.3^\circ$, $E \approx 1.3 \cdot 10^{17}$ эВ

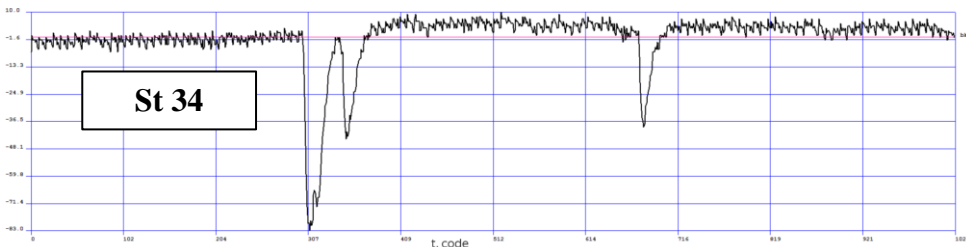
Предположения о природе многомодальных импульсов и многоимпульсных сигналов:

- Многомодальные импульсы связаны с ростом толщины ливневого диска при увеличении расстояния от оси ШАЛ



- Опережающие импульсы в многоимпульсных сигналах вызваны одиночными атмосферными мюонами, попавшими в детекторы несколько раньше частиц ШАЛ.

- После-импульсы в многоимпульсных сигналах могут быть вызваны:



- одиночными мюонами;
- после-импульсами ФЭУ;
- запаздывающими частицами ШАЛ.

Статистика по событиям ШАЛ за 2021-2022 сезон

(триггерное условие: срабатывание трех и более наземных детекторов, минимальная амплитуда импульса соответствует уровню 0.5 частицы (15 amplitude codes), временное окно для записи сигнала $t = 5$ мкс):

- ~ 360 часов наблюдений
- Общее число событий ШАЛ : ~ 72100 N_{EAS}
- N_{EAS} , имеющих ≥ 1 станции с «многомодальным» импульсом и/или многоимпульсным сигналом, зарегистрированным в наземном детекторе: ~ 8300 (11.5%)
- N_{EAS} , имеющих ≥ 1 станции с многоимпульсным сигналом, зарегистрированным в наземном детекторе: ~ 1440 (2%)

Наземная часть установки. Амплитудные и временные распределения импульсов в многоимпульсных сигналах

Условие отбора импульсов: амплитуда импульса ≥ 15 codes (≥ 0.5 частицы)

Импульс ШАЛ:

$|t_{pulse} - t_{EAS}| \leq 20$ codes.

Импульс после ШАЛ:

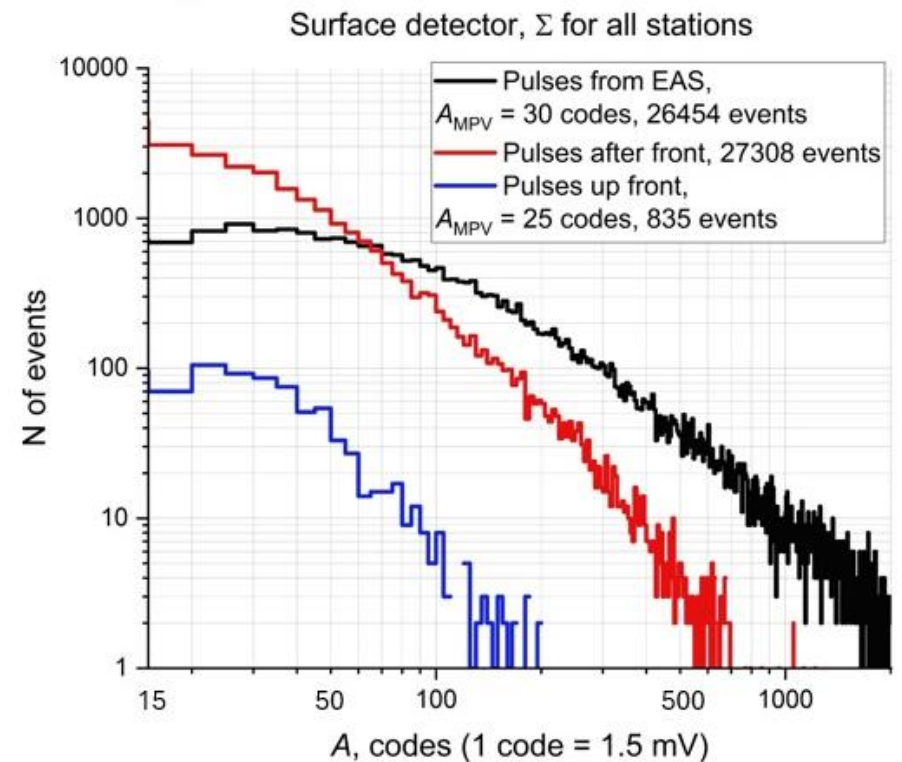
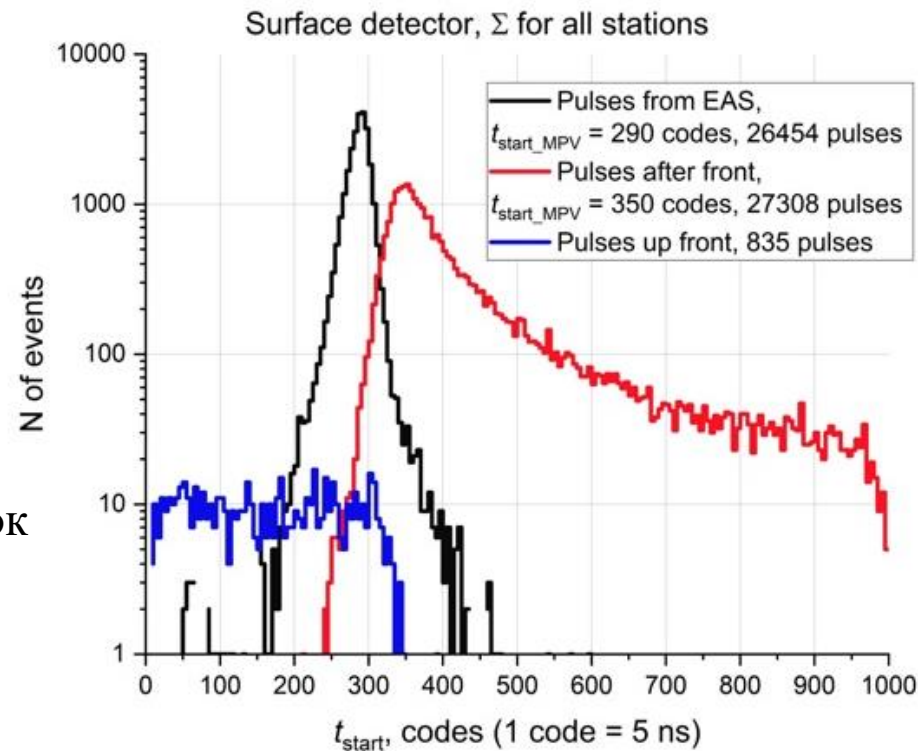
$t_{pulse} - t_{EAS} > 20$ codes.

Импульс перед ШАЛ:

$t_{EAS} - t_{pulse} > 20$ codes.

Статистика:

~ 26500 временных разверток с многоимпульсными сигналами в наземном детекторе,
~ 26500 импульсов ШАЛ,
~ 54600 импульсов



t_{EAS} – время начала импульса, отождествленного с ШАЛ, t_{pulse} – время начала отдельного импульса

Подземная часть установки. Амплитудные и временные распределения импульсов в многоимпульсных сигналах

Условие отбора импульсов: амплитуда импульса ≥ 15 codes (≥ 0.5 частицы)

Импульс ШАЛ:

$|t_{pulse} - t_{EAS}| \leq 20$ codes.

Импульс после ШАЛ:

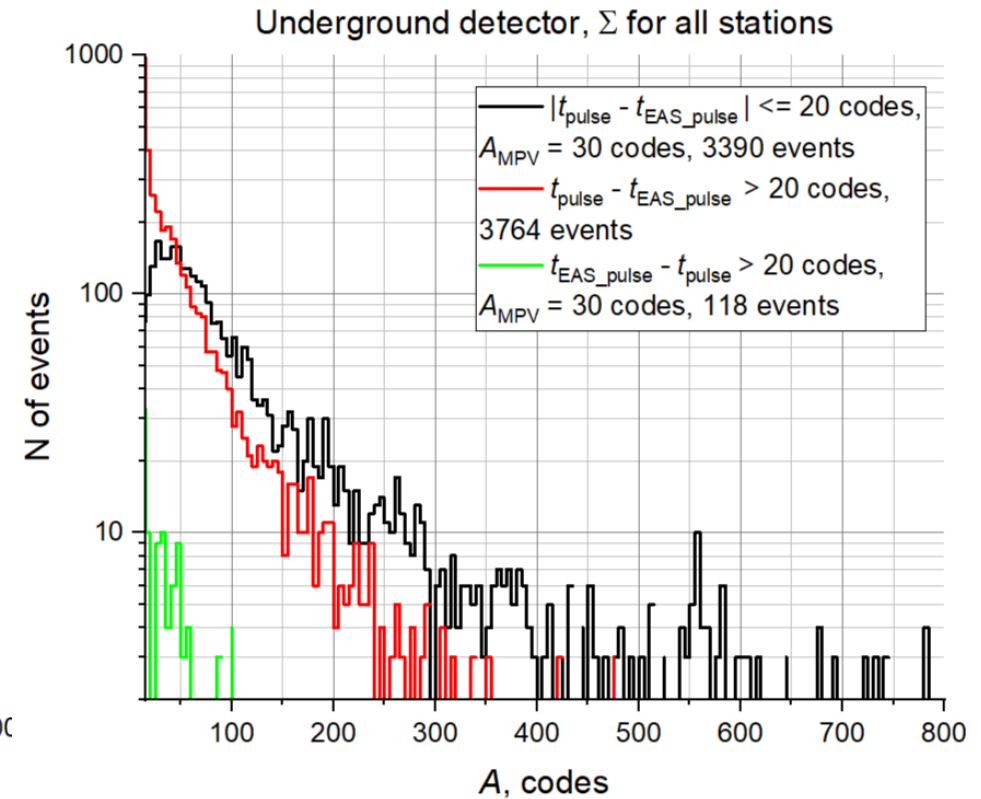
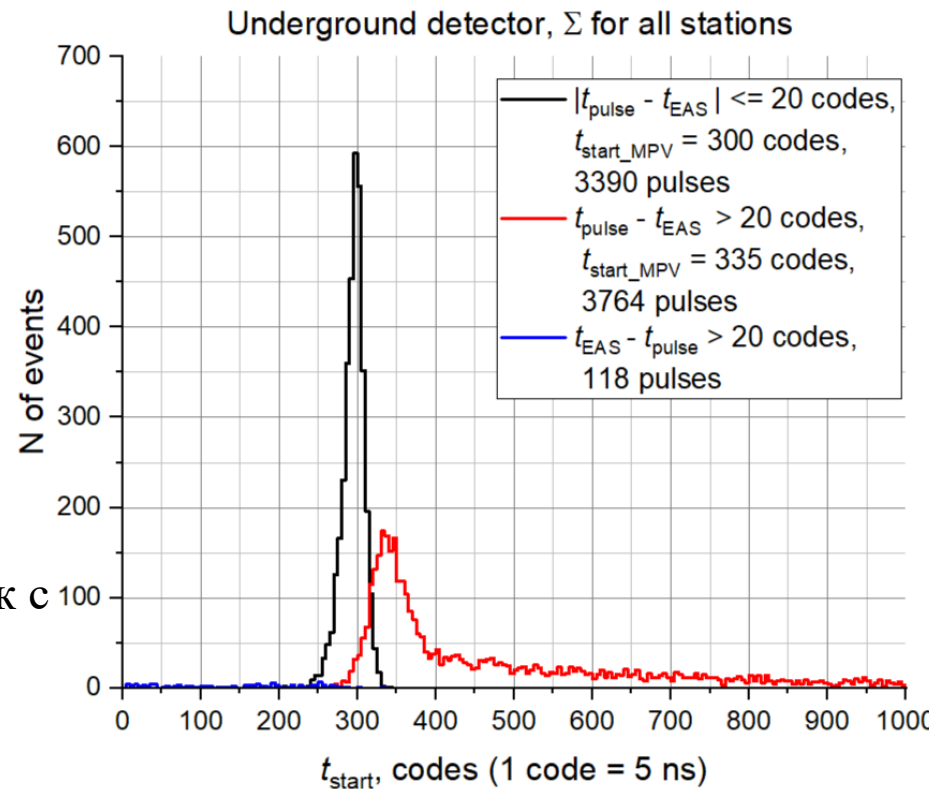
$t_{pulse} - t_{EAS} > 20$ codes.

Импульс перед ШАЛ:

$t_{EAS} - t_{pulse} > 20$ codes.

Статистика:

~ 3400 временных разверток с многоимпульсными сигналами,
~ 3400 импульсов ШАЛ,
~ 7270 импульсов



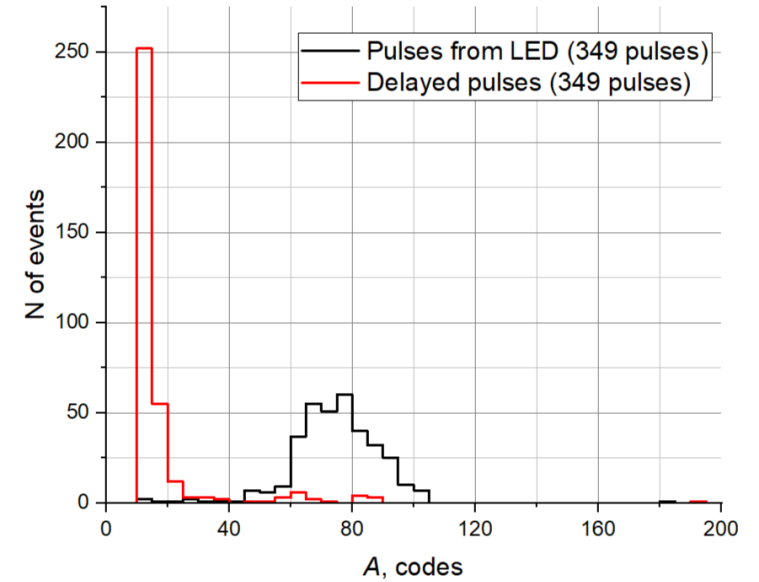
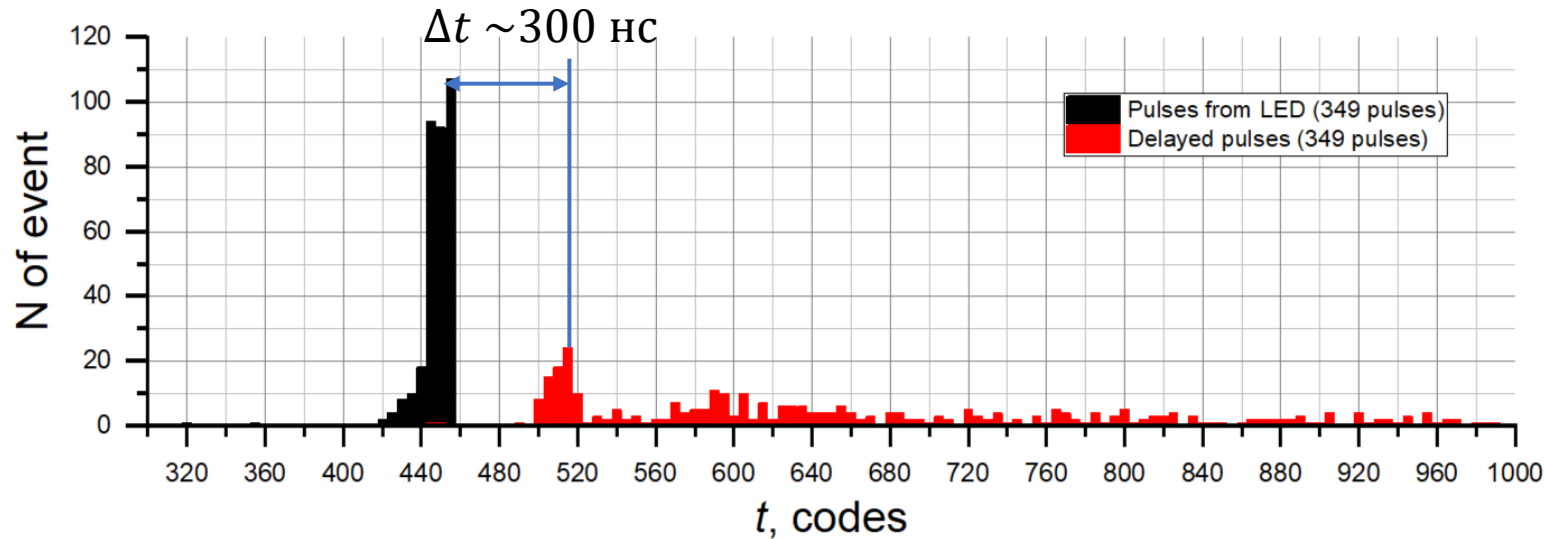
t_{EAS} – время начала импульса, отождествленного с ШАЛ, t_{pulse} – время начала отдельного импульса

Одиночные атмосферные мюоны

	Опережающие импульсы		Запаздывающие импульсы	
	Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент
Наземный детектор	~ 0.3% событий	~ 0.29% событий	~ 0.68% событий	~ 9.89% событий
Подземный детектор	~ 0.07% событий	~ 0.05% событий	~ 0.21% событий	~ 1.55% событий

Опережающие импульсы можно объяснить одиночными мюонами, пришедшими в станцию вместе с частицами ШАЛ.

Запаздывающие импульсы = После-импульсы ФЭУ?



Статистика по данным эксперимента по облучению отдельного ФЭУ наземного детектора светодиодом с частотой 40 Гц, амплитуда сигнала $A \sim 2.5$ частицы, ширина сигнала $t \sim 150$ нс:

Δt между импульсом и после-импульсом ~ 300 нс

N многоимпульсных сигналов с после-импульсами $\approx 0.7\%$ от общего числа зарегистрированных сигналов (50504).

Статистика по данным отдельного наземного детектора при регистрации ШАЛ*:

$\Delta t \sim 300$ нс

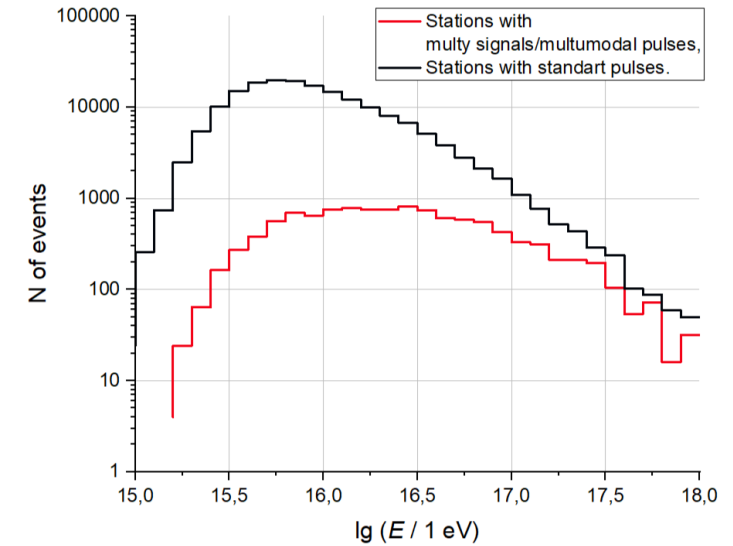
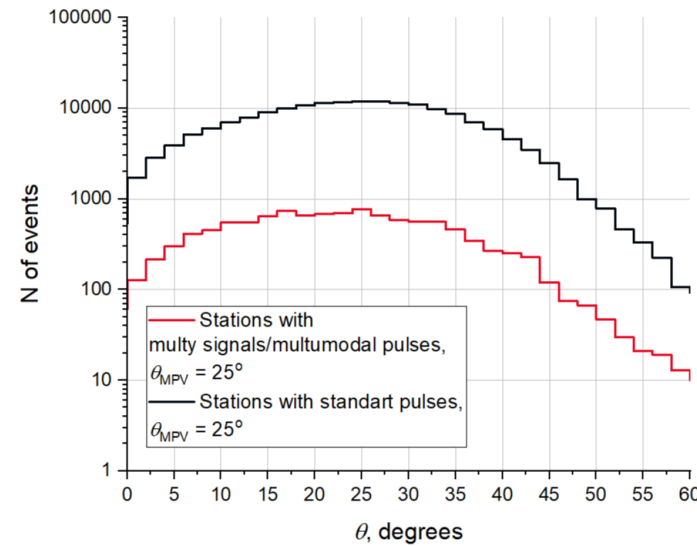
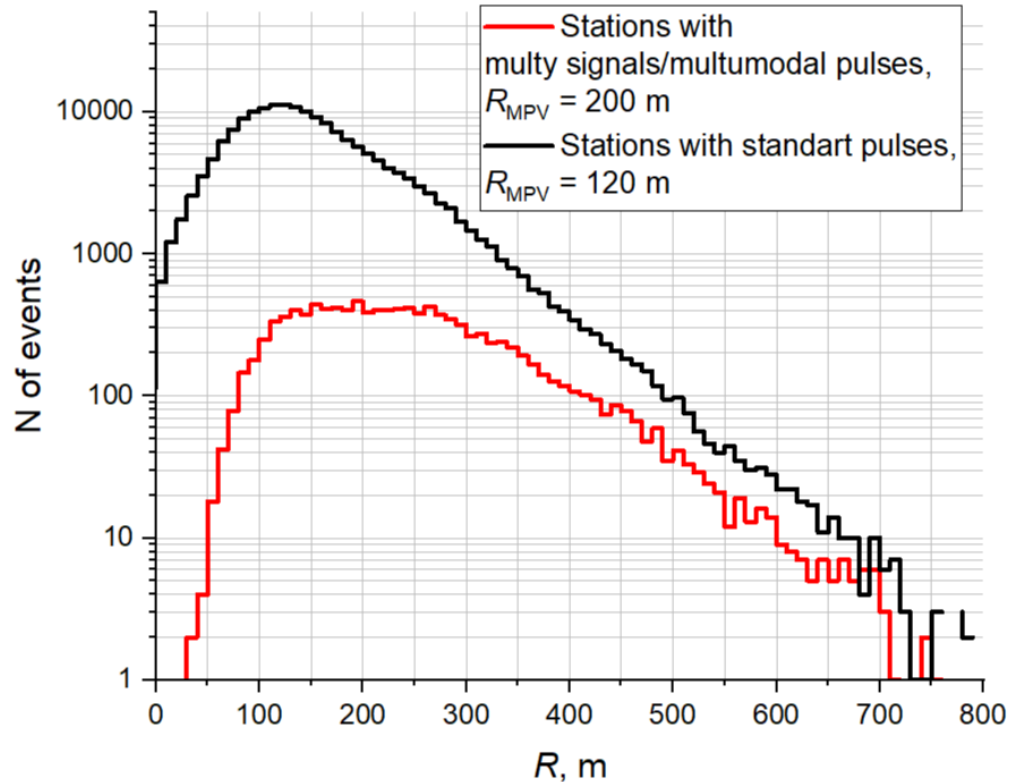
N многоимпульсных сигналов с после-импульсами $\approx 9.89\%$ \Rightarrow
от общего числа зарегистрированных сигналов

При регистрации ШАЛ статистика по запаздывающим импульсам выше, чем дают после-импульсы ФЭУ

*Усреднение по 19 станциям;

Условие отбора: наличие импульса ШАЛ с амплитудой $A \geq 15$ codes в наземном детекторе, амплитуда дополнительного импульса $A \geq 15$ codes.

Распределение сработавших станций в зависимости от направления прихода, расстояния до оси ливня и энергии ШАЛ:



Наблюдается зависимость «многомодальных» импульсов и многоимпульсных сигналов от расстояния до ШАЛ

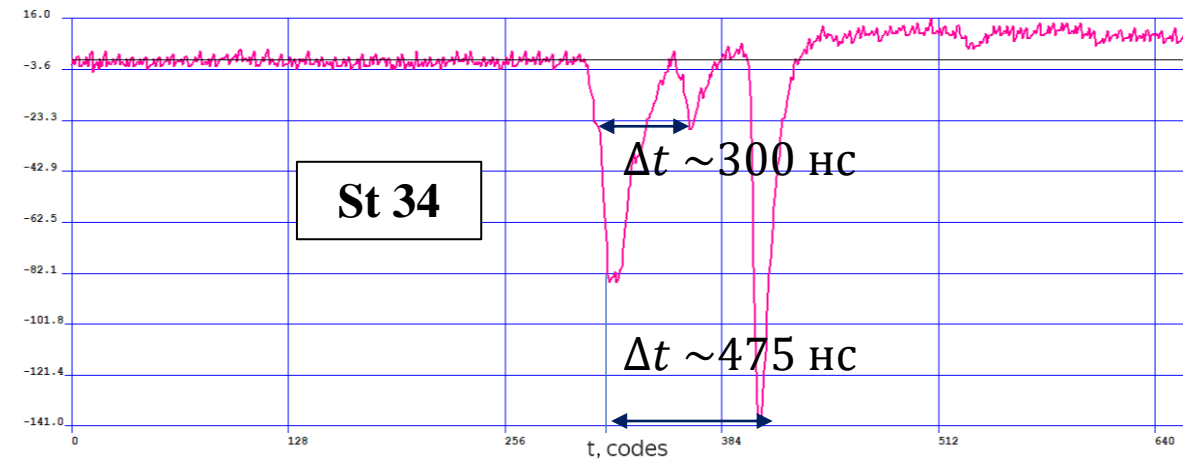
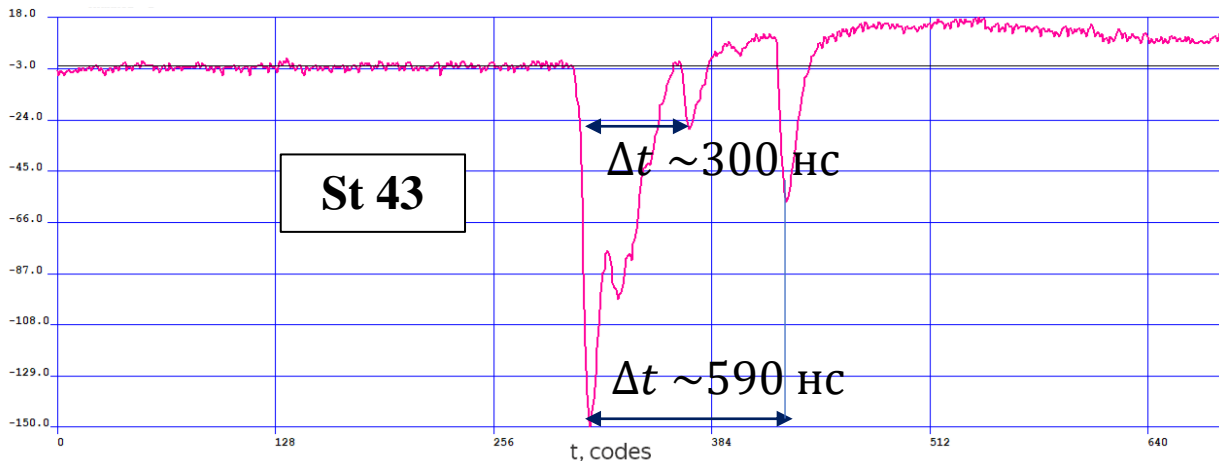
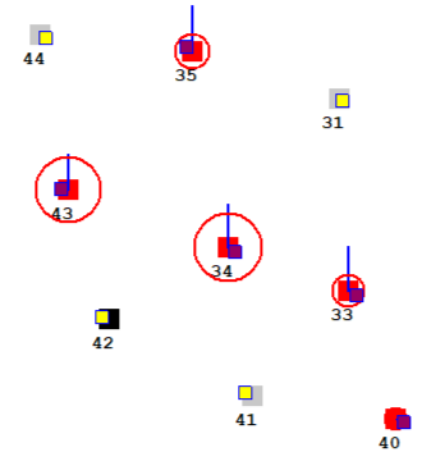
- ~ 181 000 сработавших станций с импульсами стандартной формы;
- ~ 11 200 сработавших станций с «многомодальными» импульсами либо многоимпульсными сигналами;
- ~ 1 550 сработавших станций с многоимпульсными сигналами.

Поиск событий ШАЛ с синхронизированными по времени дополнительными импульсами

- N_{EAS} , имеющих как минимум две станции с многоимпульсными сигналами в наземных детекторах, в которых дополнительные импульсы находятся на одинаковом расстоянии от основного импульса ШАЛ в пределах ± 10 codes (50 нс): $\sim 0.08\%$

Событие 14.10.21

5 сработавших станций, из них в 2 станциях в наземном детекторе наблюдаются синхронизованные по времени импульсы.



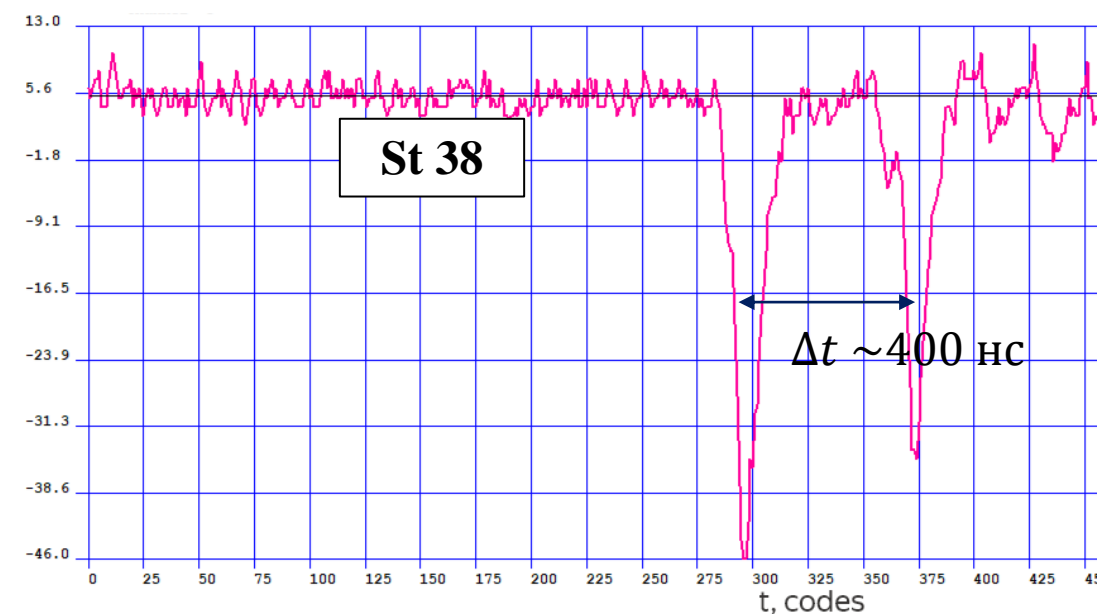
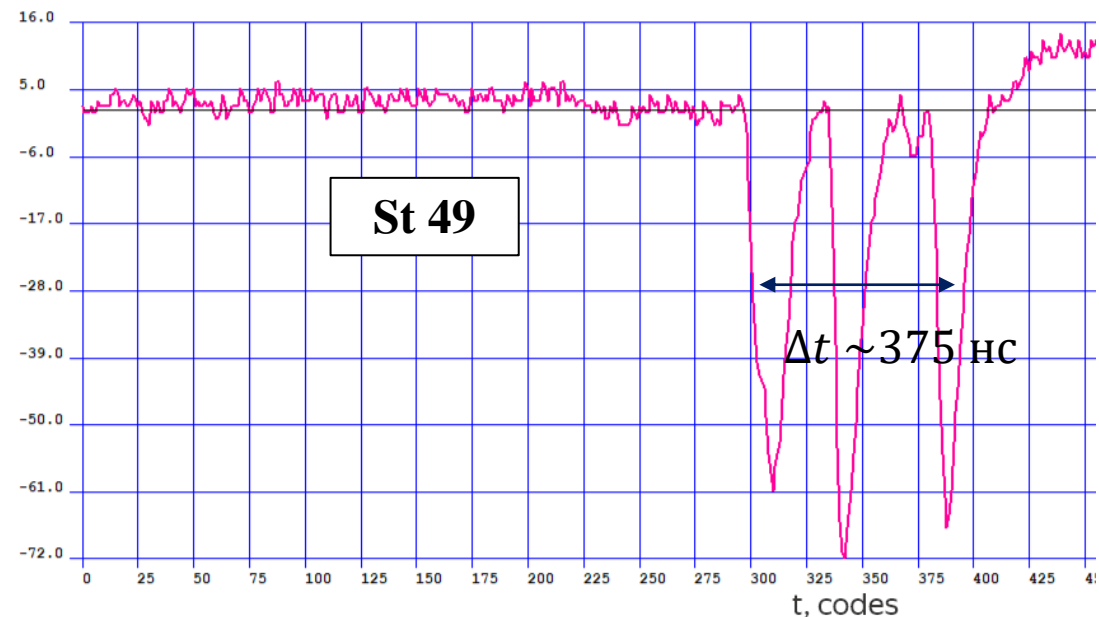
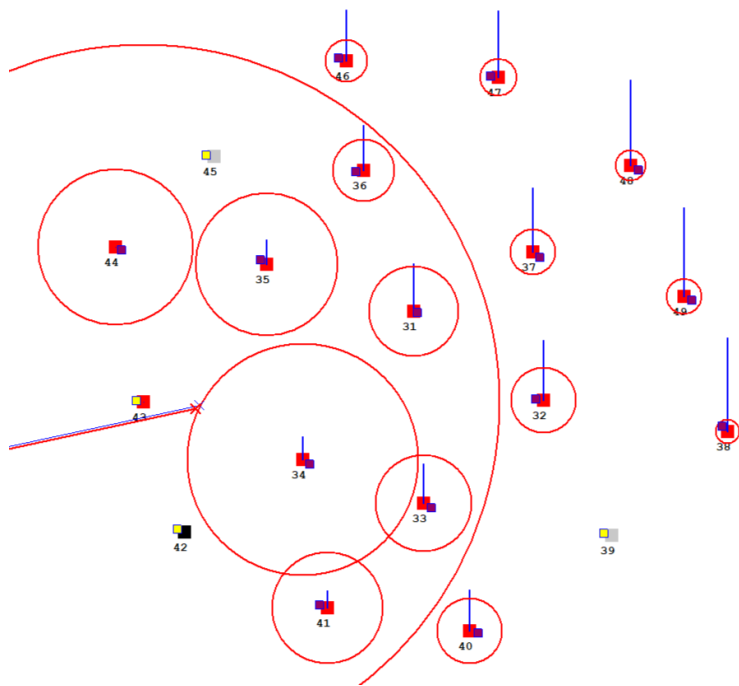
Событие 21.11.07.

16 сработавших станций.

В 12 наземных детекторах наблюдаются либо многоимпульсный сигнал, либо многомодальный импульс,

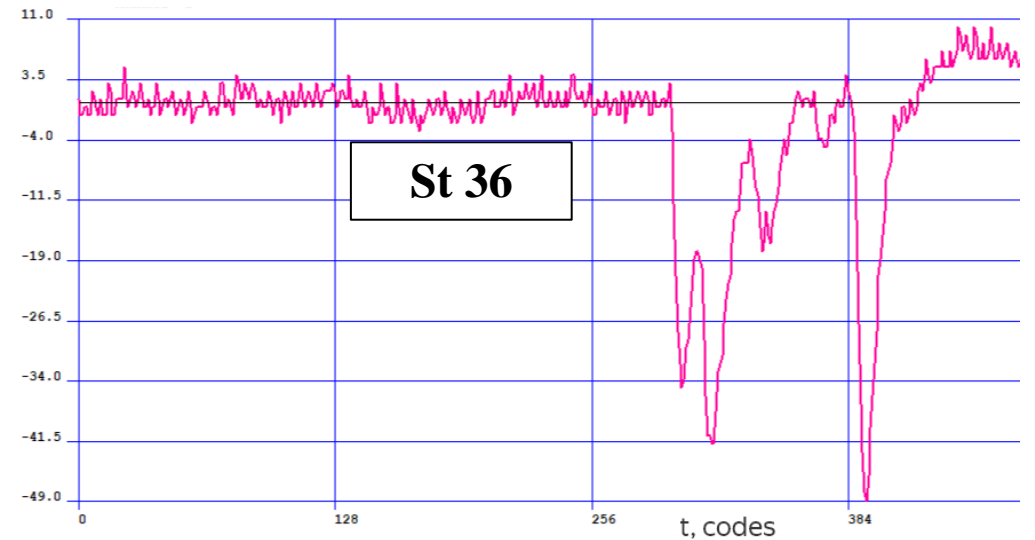
В 2 наземных детекторах – синхронизованные по времени многоимпульсные сигналы.

$$\theta = 25.2^\circ, \varphi = 192.1^\circ, E \approx 2.8 \cdot 10^{17} \text{ эВ}$$



Заключение

- «Многомодальные» импульсы от оси ШАЛ отражают пространственно-временную структуру ШАЛ и связаны с ростом толщины ливневого диска при увеличении расстояния от оси ШАЛ.
- Пред-импульсы связаны с одиночными атмосферными мюонами, пришедшими в станцию вместе с частицами ШАЛ.
- Вклад в запаздывающие импульсы дают:
 - одиночные мюоны;
 - после-импульсы ФЭУ;
 - запаздывающие частицы.



Спасибо за внимание!

Back up Slides

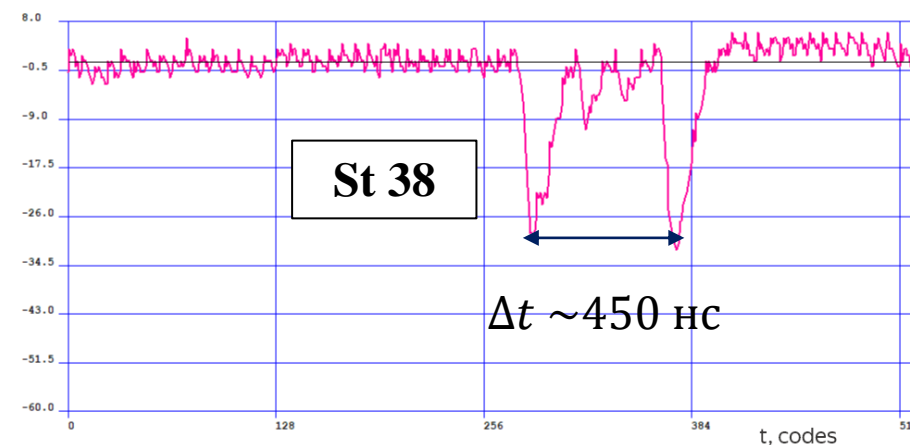
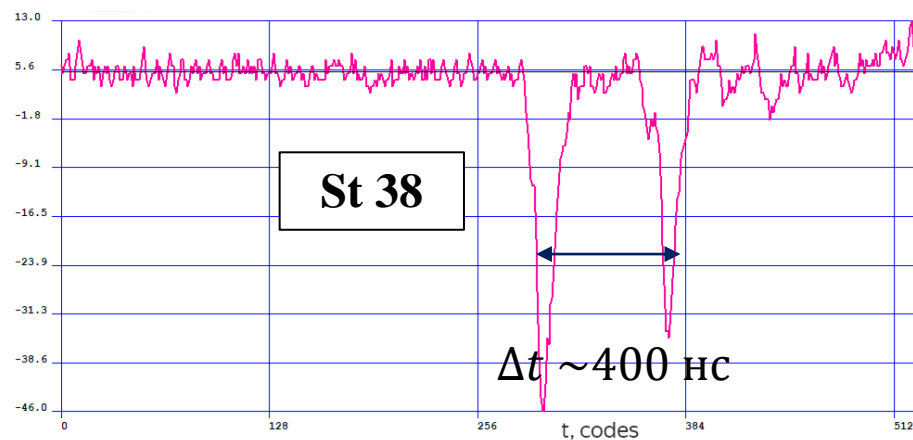
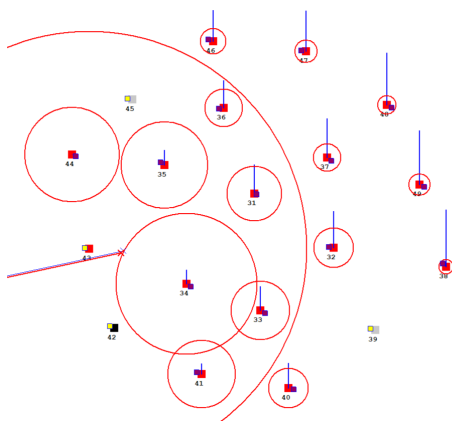
Поиск событий ШАЛ с синхронизированными по времени дополнительными импульсами

- N_{EAS} , имеющих как минимум две станции с многоимпульсными сигналами в наземных детекторах, в которых дополнительные импульсы находятся на одинаковом расстоянии друг от друга в пределах ± 10 codes: $\sim 0.08\%$

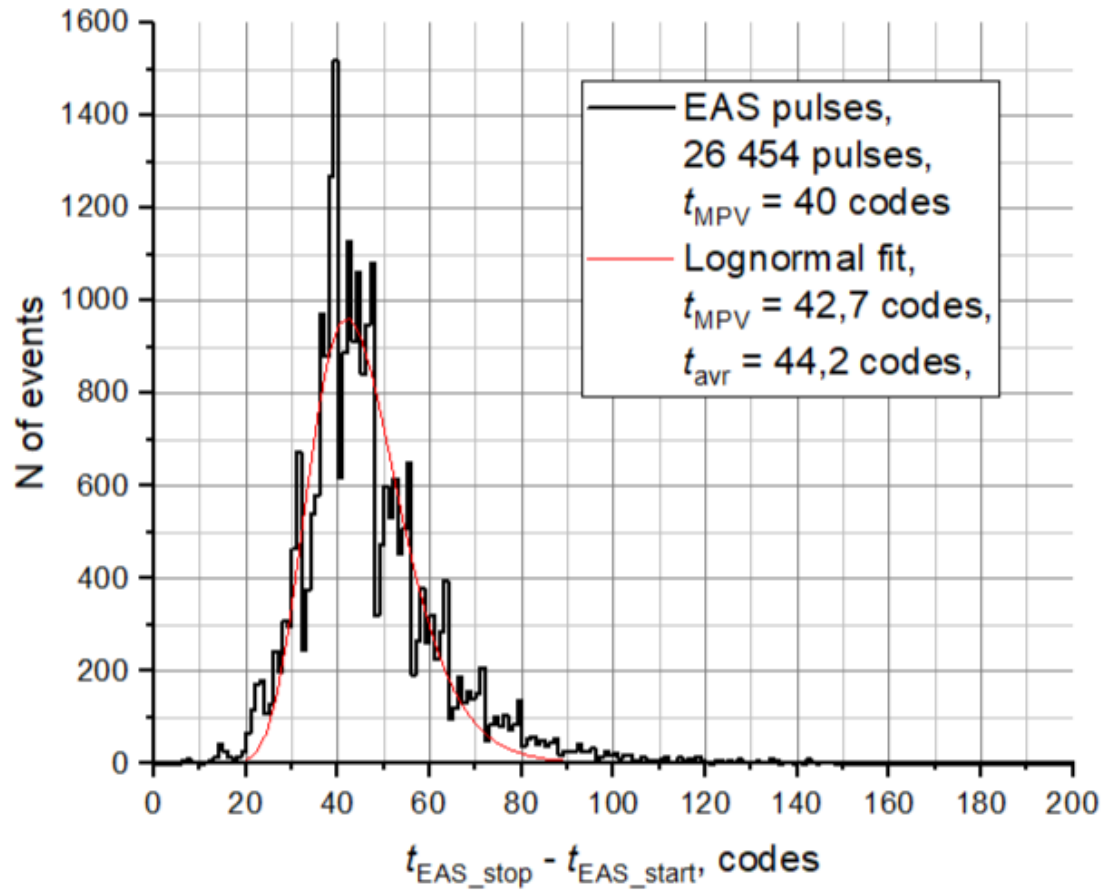
Событие 21.11.07. $\theta = 25.2^\circ$, $\varphi = 192.1^\circ$, $E \approx 2.8 \cdot 10^{17}$ эВ

16 сработавших станций.

В 12 наземных детекторах наблюдаются либо многоимпульсный сигнал, либо многомодальный импульс, в 2 – синхронизованные по времени многоимпульсные сигналы.

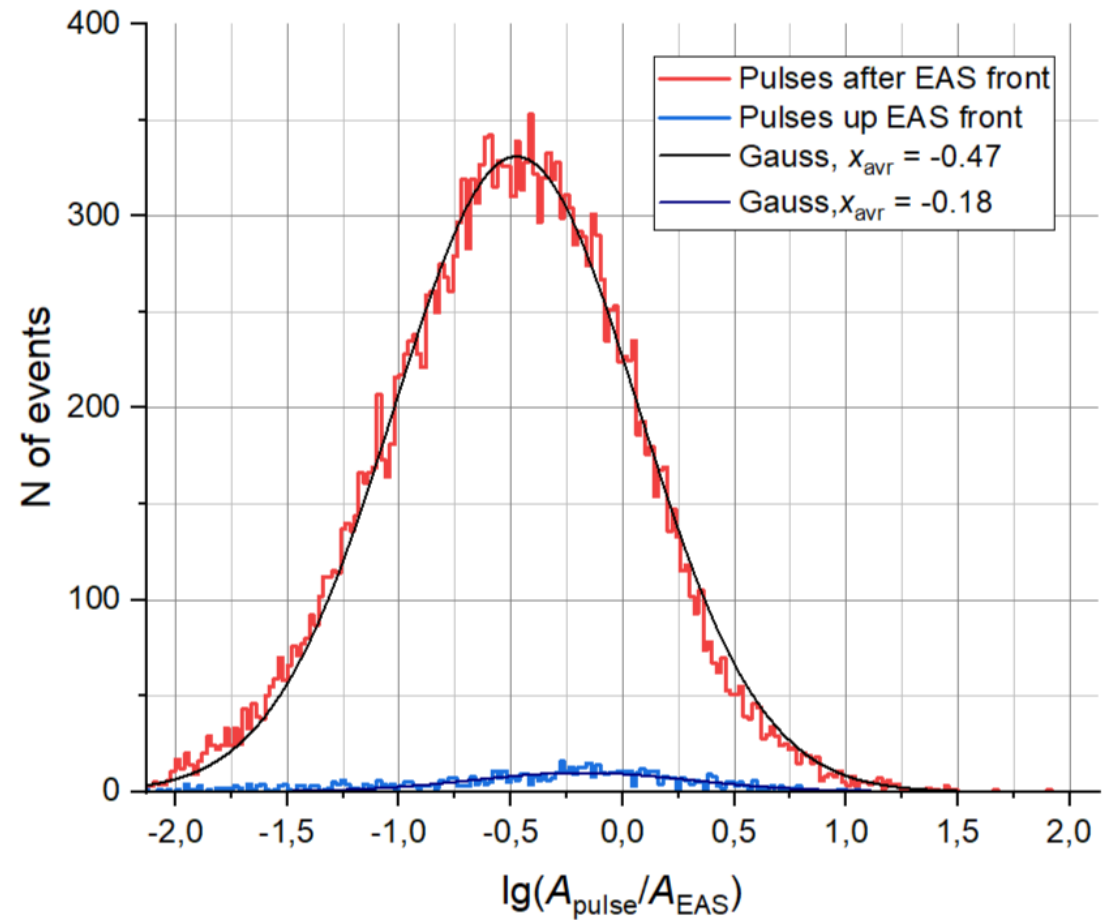


Наземная часть установки.



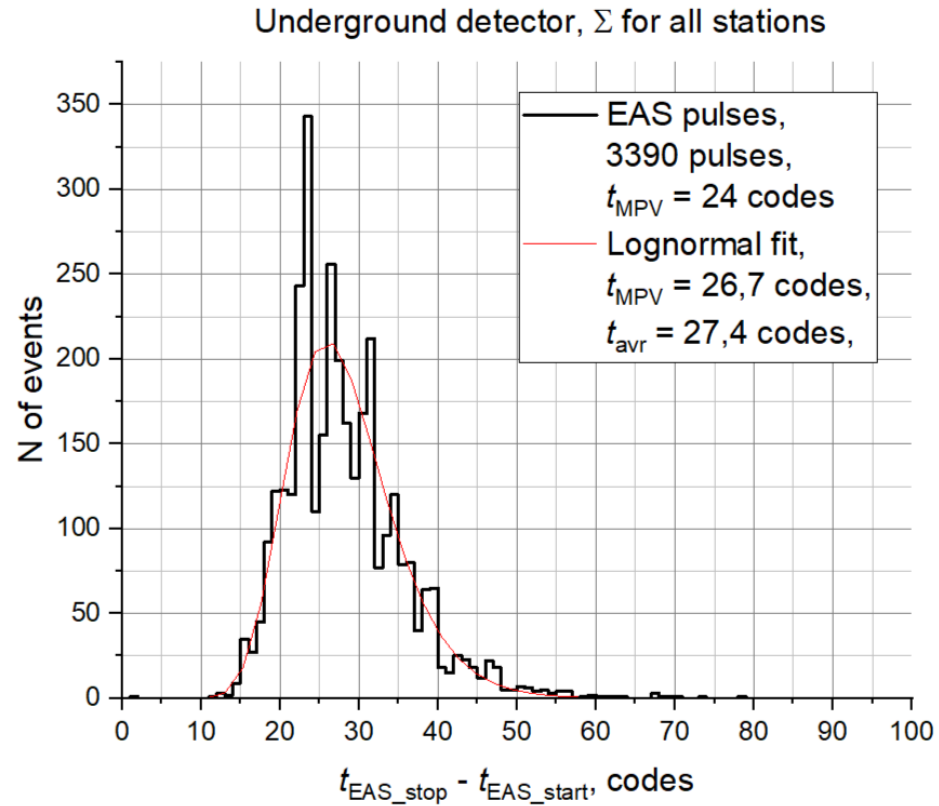
Распределение импульсов ШАЛ по длительности.

Статистика: ~ 54600 импульсов, ~ 26500 временные развертки.



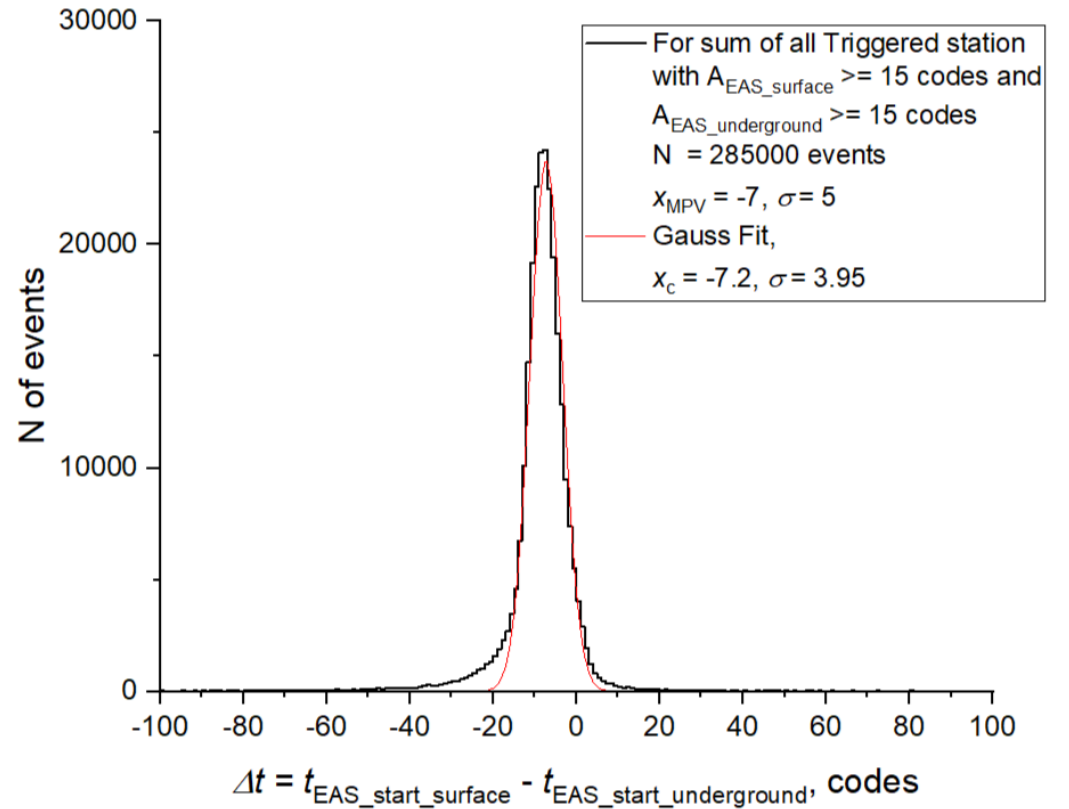
Распределение опережающих и запаздывающих импульсов по отношению амплитуды к амплитуде импульса ШАЛ

Подземная часть установки.



Распределение импульсов ШАЛ по длительности.

Статистика: ~ 54600 импульсов, ~ 26500 временные развертки.

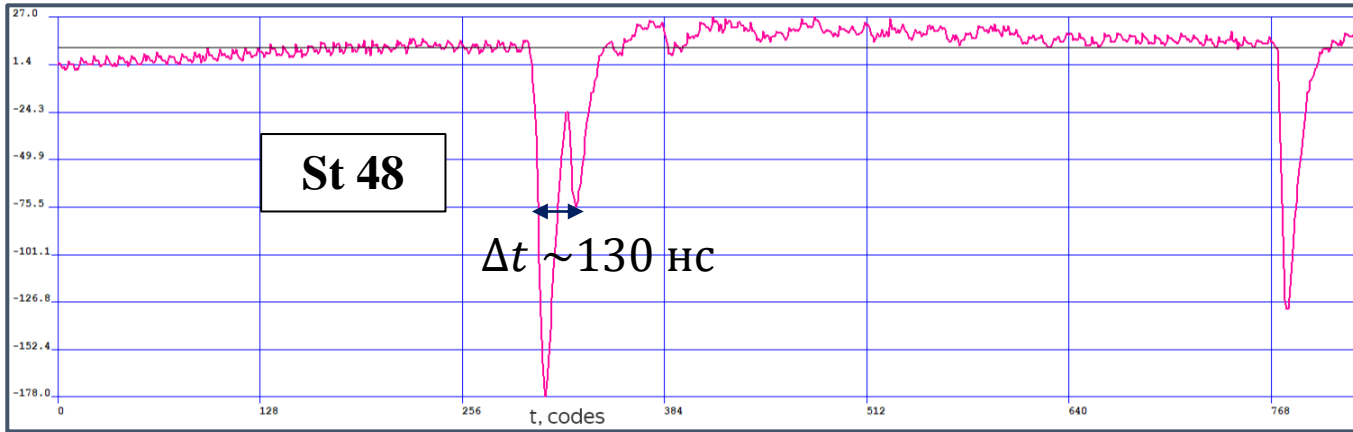


Распределение импульсов ШАЛ в подземной части установки Tunka-Grande по времени задержки относительно импульса ШАЛ в наземной части.

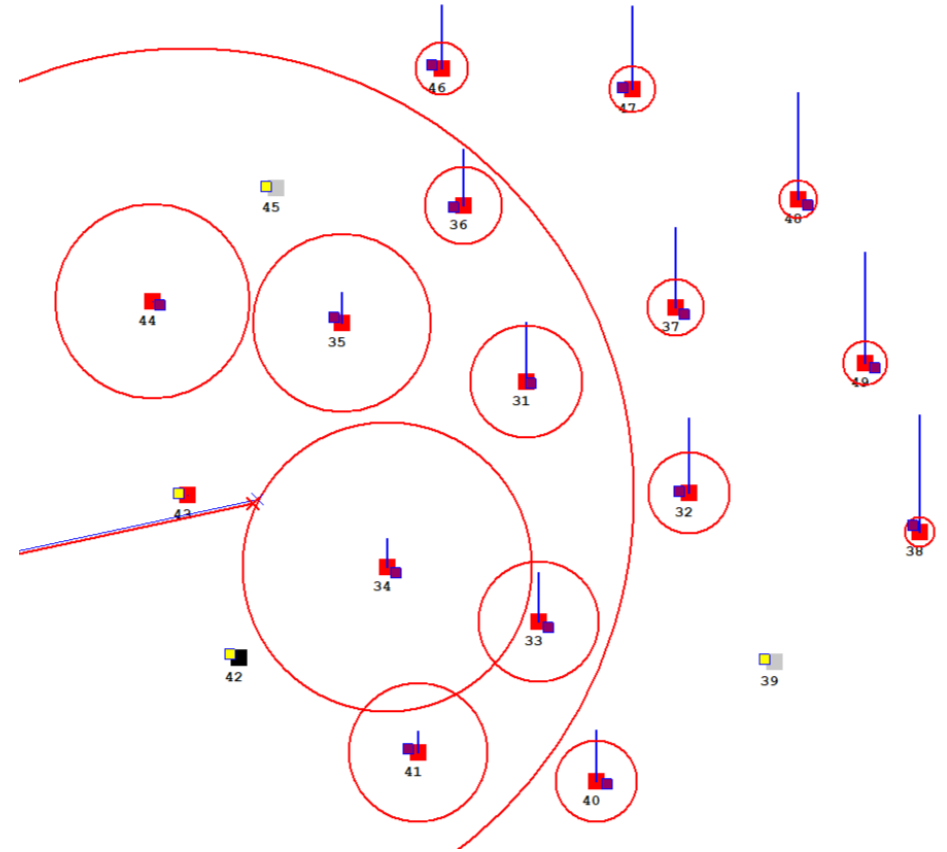
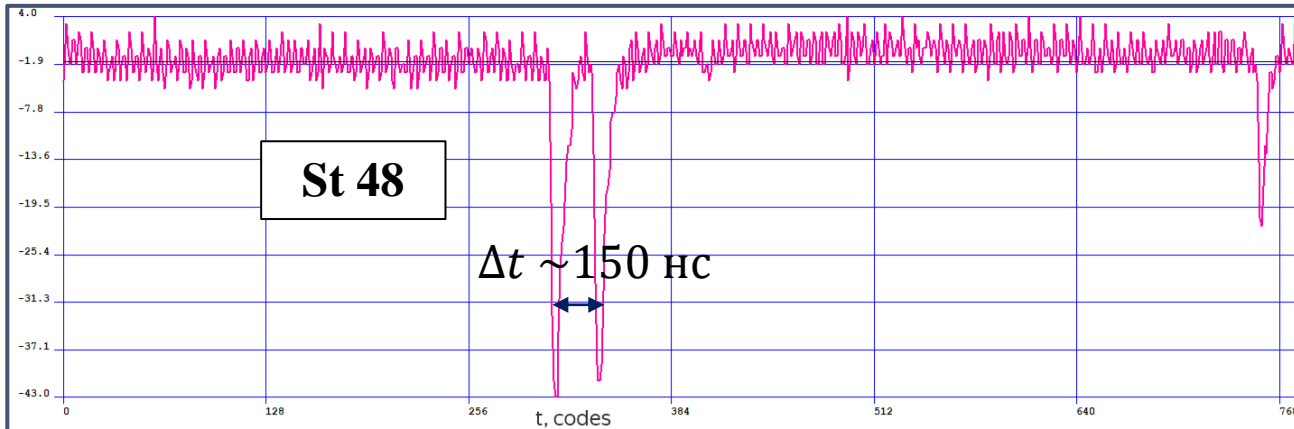
Событие 21.11.07.

16 сработавших станций, $\theta = 25.2^\circ$, $\varphi = 192.1^\circ$,
 $E \approx 2.8 \cdot 10^{17}$ эВ.

Наземная часть



Подземная часть

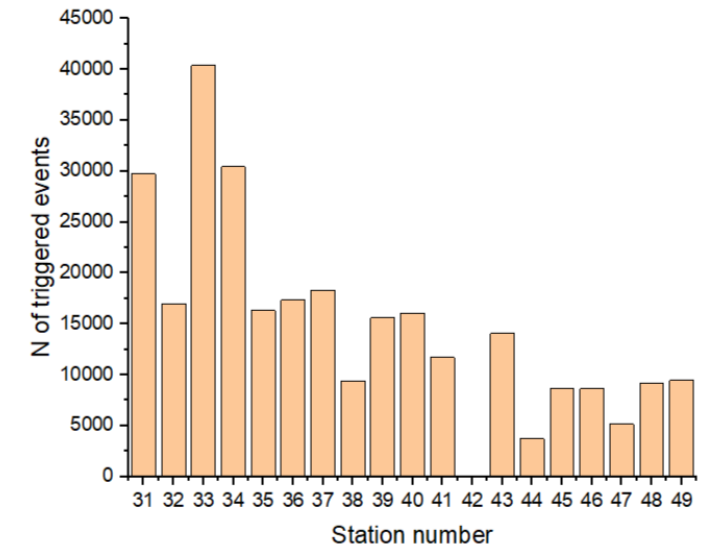


Статистика по зарегистрированным отдельной станцией событиям (усреднение по 18 станциям)

(триггер от установки Tunka-133, дополнительное условие: наличие сигнала с амплитудой $A \geq 15$ codes в каждой половине наземного детектора):

Показатель	Значение, %*
Multy(1&&3) ≥ 2 pulses (e)	0.71 ± 0.22
Multy+Mod(1&&3) ≥ 2 pulses (e)	4.85 ± 1.2
Multy(1 3) ≥ 2 pulses (e)	10.88 ± 2.3
Multy+Mod(1 3) ≥ 2 pulses (e)	27.89 ± 3.79
Multy(5 7 9 11) ≥ 2 pulses (mu)	1.66 ± 0.97
Multy+Mod(5 7 9 11) ≥ 2 pulses (mu)	4.89 ± 2.36
After_pulse_e(1 3) ($t_{\text{pulse}} - t_{\text{EAS}} > 20\text{codes}$)	9.89 ± 2.16
Up_pulse_e(1 3) ($t_{\text{EAS}} - t_{\text{pulse}} > 20\text{codes}$)	0.29 ± 0.1
After_pulse_mu(5 7 9 11) ($t_{\text{pulse}} - t_{\text{EAS}} > 20\text{codes}$)	1.55 ± 0.95
Up_pulse_mu(5 7 9 11) ($t_{\text{EAS}} - t_{\text{pulse}} > 20\text{codes}$)	0.04 ± 0.04

$1 < N_{\text{multy}} < 4$

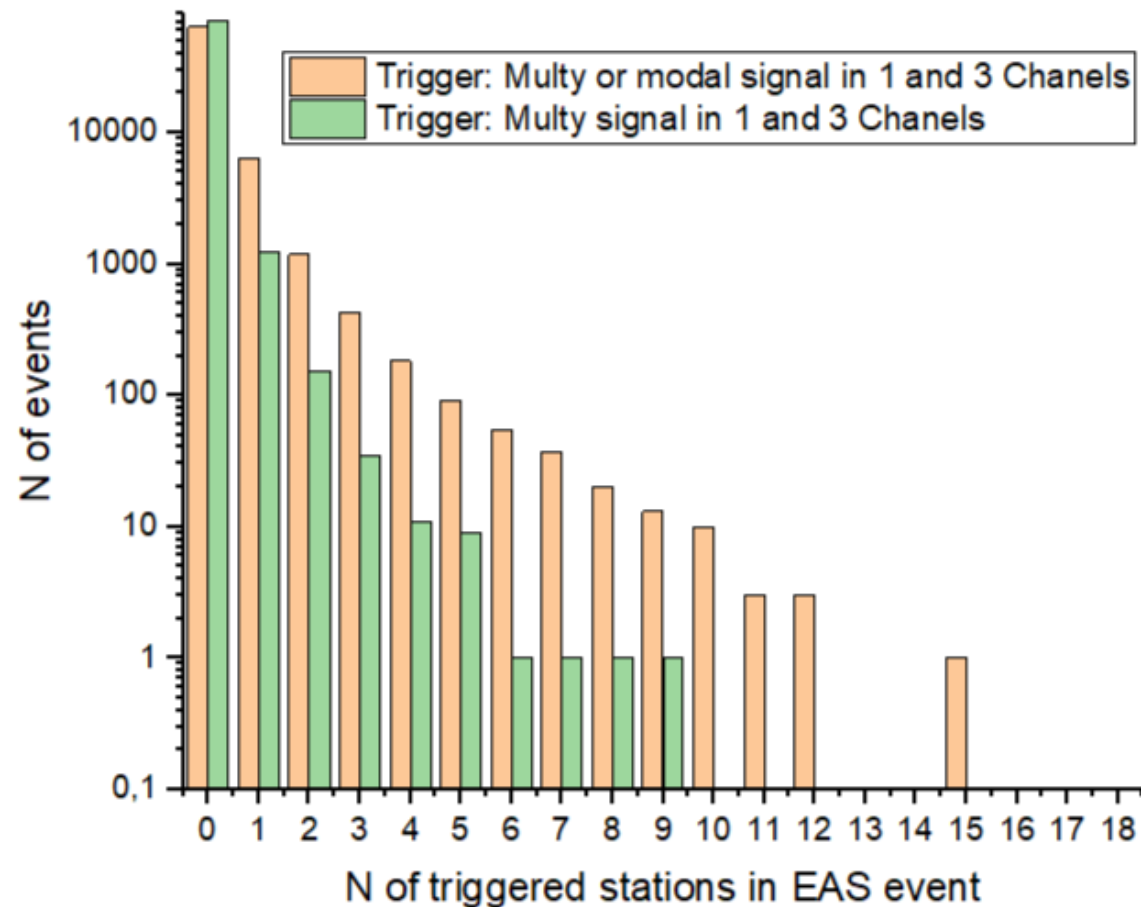


* % относительно числа всех зарегистрированных станцией триггерных событий (наличие импульса ШАЛ в каждой половине наземного детектора)

Статистика по событиям ШАЛ за 2021-2022 сезон

(триггер от установки Tunka-133, дополнительное условие: наличие сигнала с амплитудой $A \geq 15$ codes в каждой половине наземного детектора):

- ~ 360 часов наблюдений
- Общее число событий ШАЛ : ~ 72100 N_{EAS}
- N_{EAS} , имеющих ≥ 1 станции с «многомодальным» импульсом и/или многоимпульсным сигналом, зарегистрированным в наземном детекторе: ~ 8300 (11.5%)
- N_{EAS} , имеющих ≥ 1 станции с многоимпульсным сигналом, зарегистрированным в наземном детекторе: ~ 1440 (2%)



Поиск событий ШАЛ с синхронизированными по времени дополнительными импульсами

- N_{EAS} , имеющих как минимум две станции с многоимпульсными сигналами в наземных детекторах, в которых дополнительные импульсы находятся на одинаковом расстоянии друг от друга в пределах ± 10 codes: $\sim 0.08\%$

Событие 21.11.07. $\theta = 25.2^\circ$, $\varphi = 192.1^\circ$, $E \approx 2.8 \cdot 10^{17}$ эВ

16 сработавших станций.

В 12 наземных детекторах наблюдаются либо многоимпульсный сигнал, либо многомодальный импульс, в 2 – синхронизованные по времени многоимпульсные сигналы.

