

Актуальные вопросы метода акустической эмиссии  
(АПМАЭ-2018)

ТГУ, 28 мая – 01 июня 2018 г.

Оценка статистических параметров потока  
событий термоакустической эмиссии по данным  
датчика интегральной акустики

н.с. лаб. 301 ИФЗ РАН, к.т.н. *Казначеев Павел Александрович*,  
Майбук З.-Ю.Я., Пономарев А.В., Смирнов В.Б., Бондаренко Н.Б.

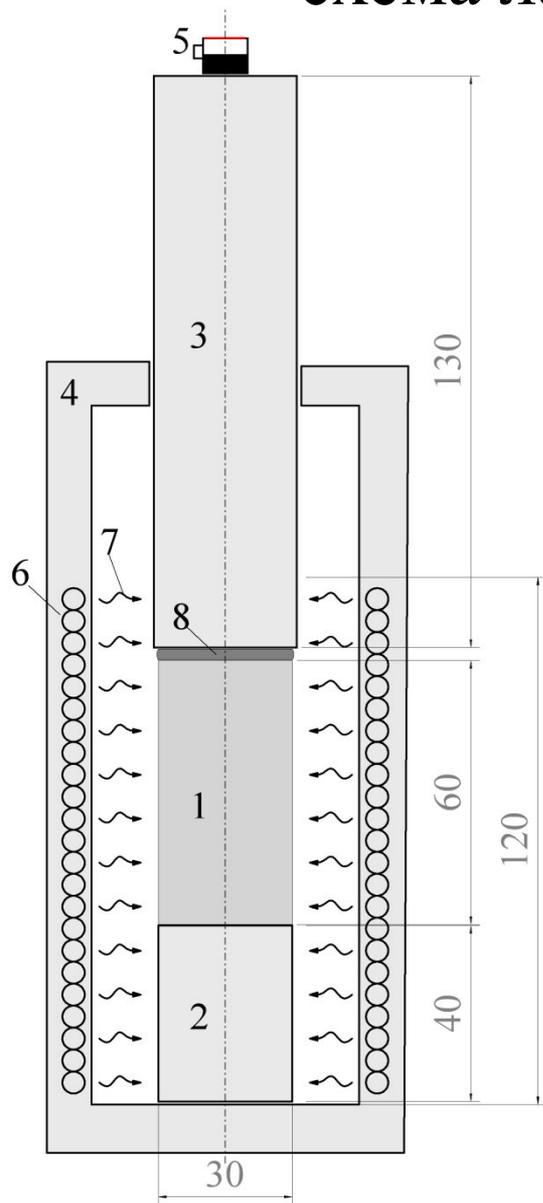
Тольятти, ТГУ - 2018

# Исследование термических разрушений горных пород: отслеживание эволюции

- Эволюция разрушения отслеживается по данным об акустической эмиссии – АЭ (здесь – термоакустической эмиссии, ТАЭ).
- При воздействии высоких температур (более 200°C) затруднен доступ к образцу для установки массива датчиков АЭ.
- На практике лабораторная установка позволяет установить один или два датчика, «снимающих» сигнал АЭ с одного или двух торцов цилиндрического образца.
- Соответственно, невозможна полноценная локация и определение энергии события АЭ.

→ Возникает задача определения параметров событий ТАЭ по параметрам импульсов ТАЭ, регистрируемых одиночным датчиком АЭ. Прежде всего, это касается *оценки статистических параметров потока событий по параметрам потока импульсов* – распределения по энергиям, b-value и т.п.

# Исследование термических разрушений горных пород: схема лабораторной установки



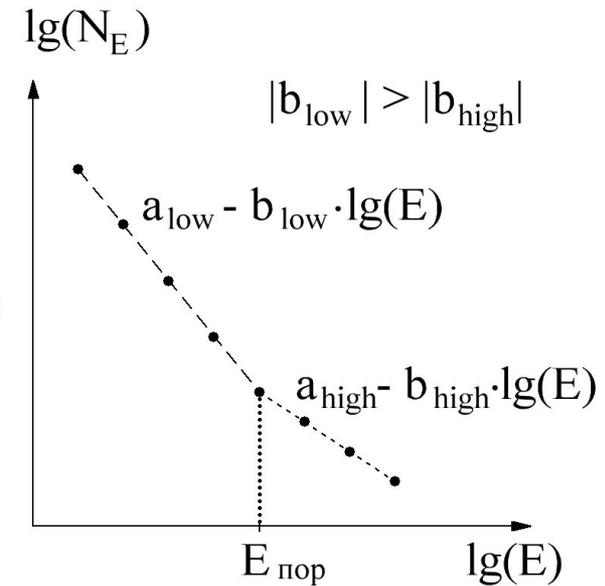
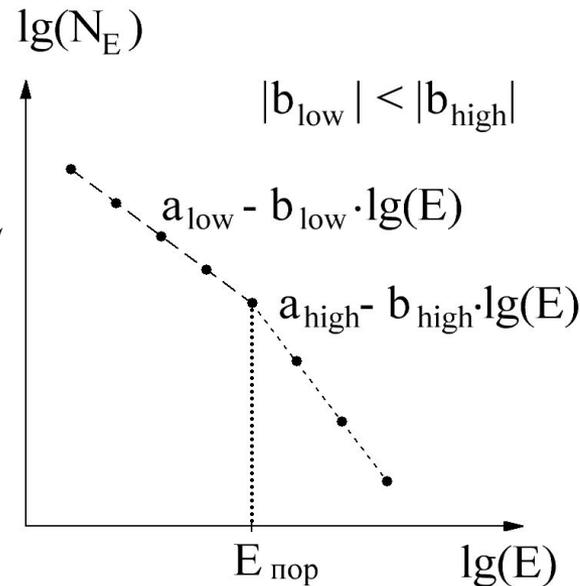
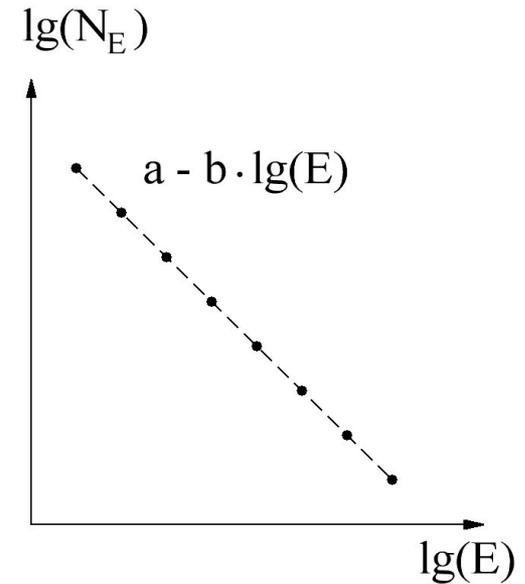
- 1 - исследуемый цилиндрический образец горной породы;
- 2 - подставка;
- 3 - цилиндрический акустический волновод;
- 4 - корпус печи;
- 5 - датчик интегральной акустики;
- 6 - нагревательный элемент;
- 7 - тепловое излучение (условно);
- 8 - прослойка из индия.

# Факторы, влияющие на параметры потока импульсов ТАЭ

## I. Исходный закон распределения

числа событий  $N_E$  по энергиям  $E$ :

- однозвенный;
- двухзвенный.



# Факторы, влияющие на параметры потока импульсов ТАЭ

I. Исходный закон распределения

числа событий  $N_E$  по энергиям  $E$ :

- однозвенный;
- двухзвенный.

разные механизмы  
генерации событий

инициация температурой и  
инициация скоростью изменения  
температуры (градиентом)



# Факторы, влияющие на параметры потока импульсов ТАЭ

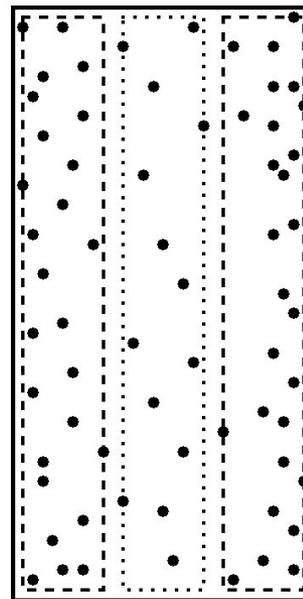
I. Исходный закон распределения числа событий  $N_E$  по энергиям  $E$ :

- однозвенный;
- двухзвенный.

разные механизмы  
генерации событий

инициация температурой и  
инициация скоростью изменения  
температуры (градиентом)

неоднородность распределения  
событий в радиальном  
направлении

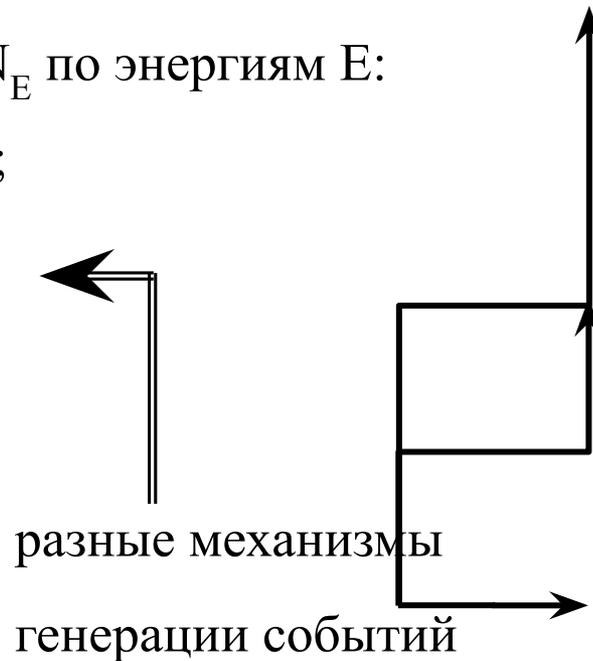


# Факторы, влияющие на параметры потока импульсов ТАЭ

## I. Исходный закон распределения

числа событий  $N_E$  по энергиям  $E$ :

- однозвенный;
- двухзвенный.



инициация температурой и  
инициация скоростью изменения  
температуры (градиентом)

неоднородность распределения  
событий в радиальном  
направлении

разные типы микроразрушений:

- развитие межзерновых и  
внутризерновых трещин при  
разных температурах нагрева;
- разный характер развития  
трещин при нагреве и  
охлаждении.

# Факторы, влияющие на параметры потока импульсов ТАЭ

I. Исходный закон распределения

числа событий  $N_E$  по энергиям  $E$

(однозвенный и двухзвенный).

II. Затухание акустического импульса:

- расхождение;
- поглощение.

# Факторы, влияющие на параметры потока импульсов ТАЭ

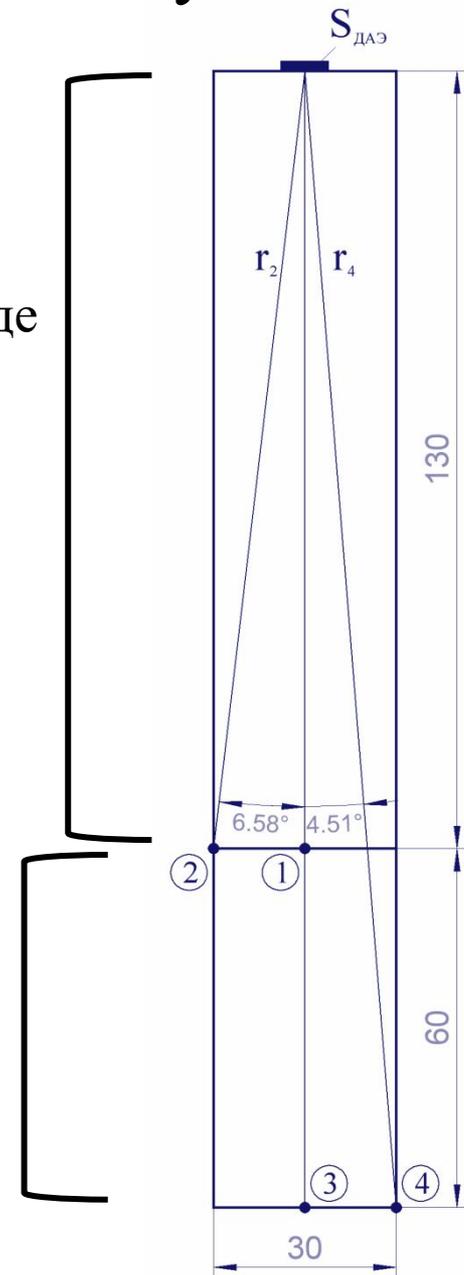
I. Исходный закон распределения  
числа событий  $N_E$  по энергиям  $E$   
(однозвенный и двухзвенный).

II. Затухание акустического импульса:

- расхождение;
- поглощение.

в волноводе

в образце



# Факторы, влияющие на параметры потока импульсов ТАЭ

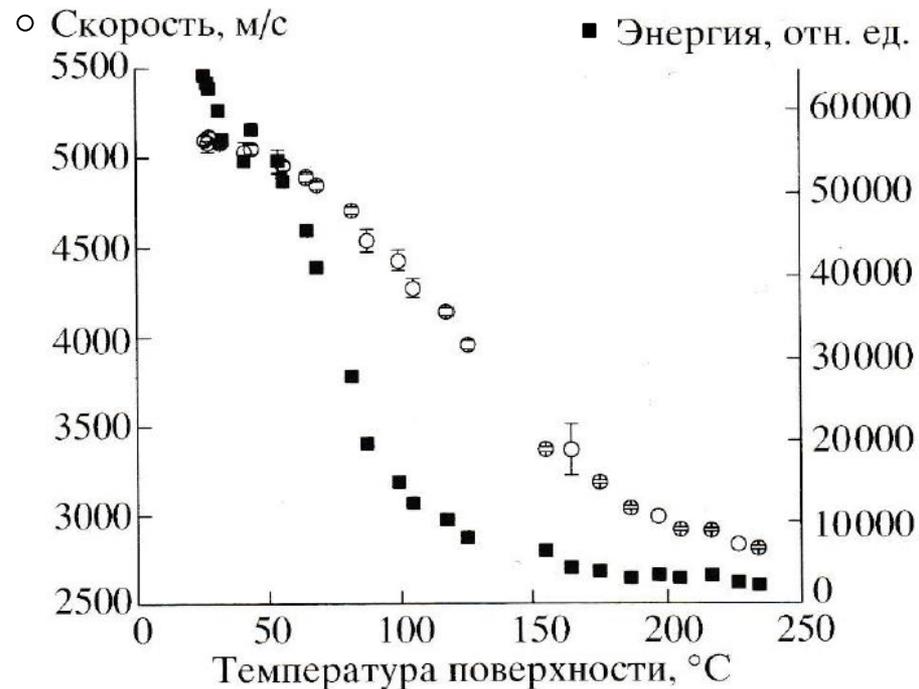
I. Исходный закон распределения числа событий  $N_E$  по энергиям  $E$  (однозвенный и двухзвенный).

II. Затухание акустического импульса:

- расхождение;
- поглощение.



## Поглощение энергии упругих волн в образце в образце [Васин и др., 2006]



# Факторы, влияющие на параметры потока импульсов ТАЭ

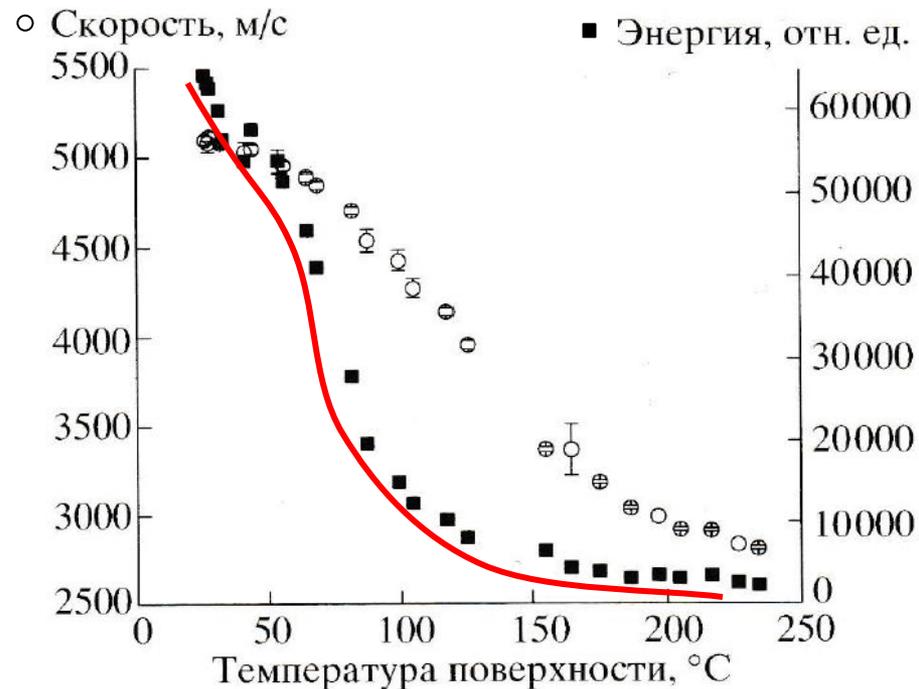
I. Исходный закон распределения числа событий  $N_E$  по энергиям  $E$  (однозвенный и двухзвенный).

II. Затухание акустического импульса:

- расхождение;
- поглощение.



## Поглощение энергии упругих волн в образце в образце [Васин и др., 2006]



Увеличение коэффициента удельного поглощения на ~450 дБ/м (!)

# Факторы, влияющие на параметры потока импульсов ТАЭ

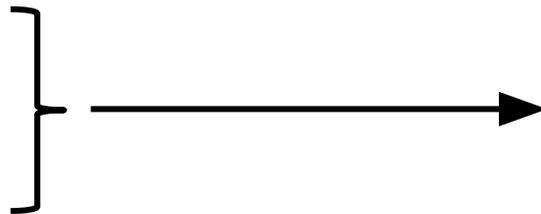
I. Исходный закон распределения

числа событий  $N_E$  по энергиям  $E$

(однозвенный и двухзвенный).

II. Затухание акустического импульса:

- расхождение;
- поглощение.



Подробная оценка показывает, что все затухание может быть учтено линейным законом:

$$K_{\text{осл}} = \beta \cdot z$$

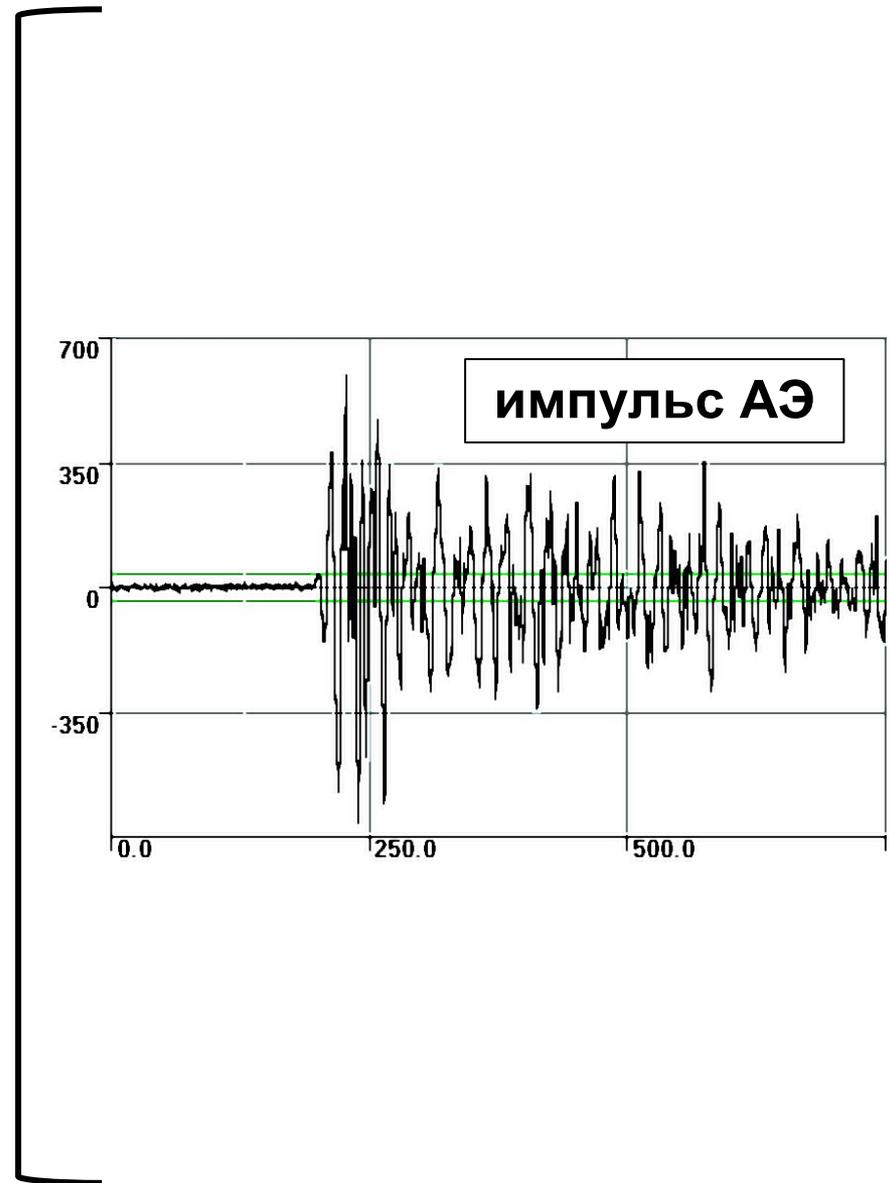
где  $K_{\text{осл}}$  [дБ] – суммарный коэффициент ослабления энергии импульса,  
 $\beta$  [дБ/м] – удельный коэффициент затухания,  
 $z$  – расстояние, проходимое импульсом вдоль оси образца.

# Факторы, влияющие на параметры потока импульсов ТАЗ

I. Исходный закон распределения числа событий  $N_E$  по энергиям  $E$  (однозвенный и двухзвенный).

II. Затухание акустического импульса (расхождение и поглощение).

III. Вторичные волны (преломление, переотражение и интерференция).



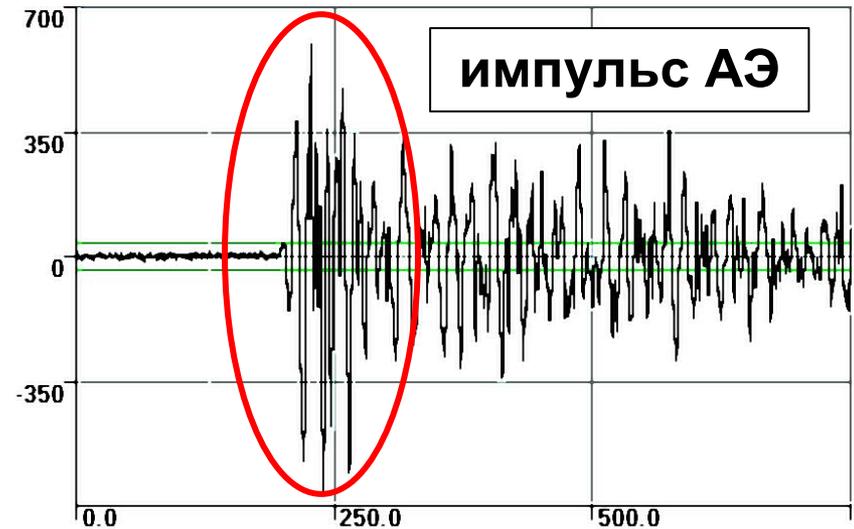
# Факторы, влияющие на параметры потока импульсов ТАЗ

I. Исходный закон распределения числа событий  $N_E$  по энергиям  $E$  (однозвенный и двухзвенный).

II. Затухание акустического импульса (расхождение и поглощение).

III. Вторичные волны (преломление, переотражение и интерференция). →

Для большинства импульсов АЭ характерно достижение максимальной амплитуды первыми полуволнами



Эта часть зарегистрированного импульса соответствует головной части волны, которая не успевает исказиться наложением

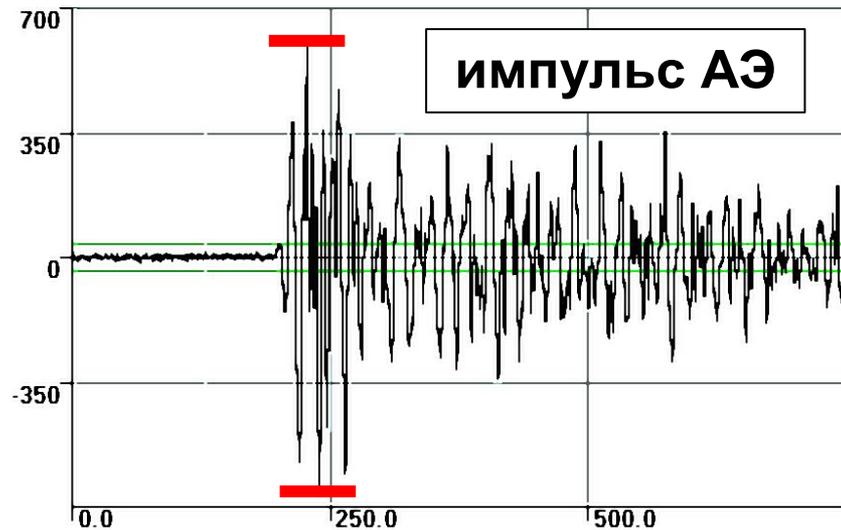
# Факторы, влияющие на параметры потока импульсов ТАЗ

I. Исходный закон распределения числа событий  $N_E$  по энергиям  $E$  (однозвенный и двухзвенный).

II. Затухание акустического импульса (расхождение и поглощение).

III. Вторичные волны (преломление, переотражение и интерференция). →

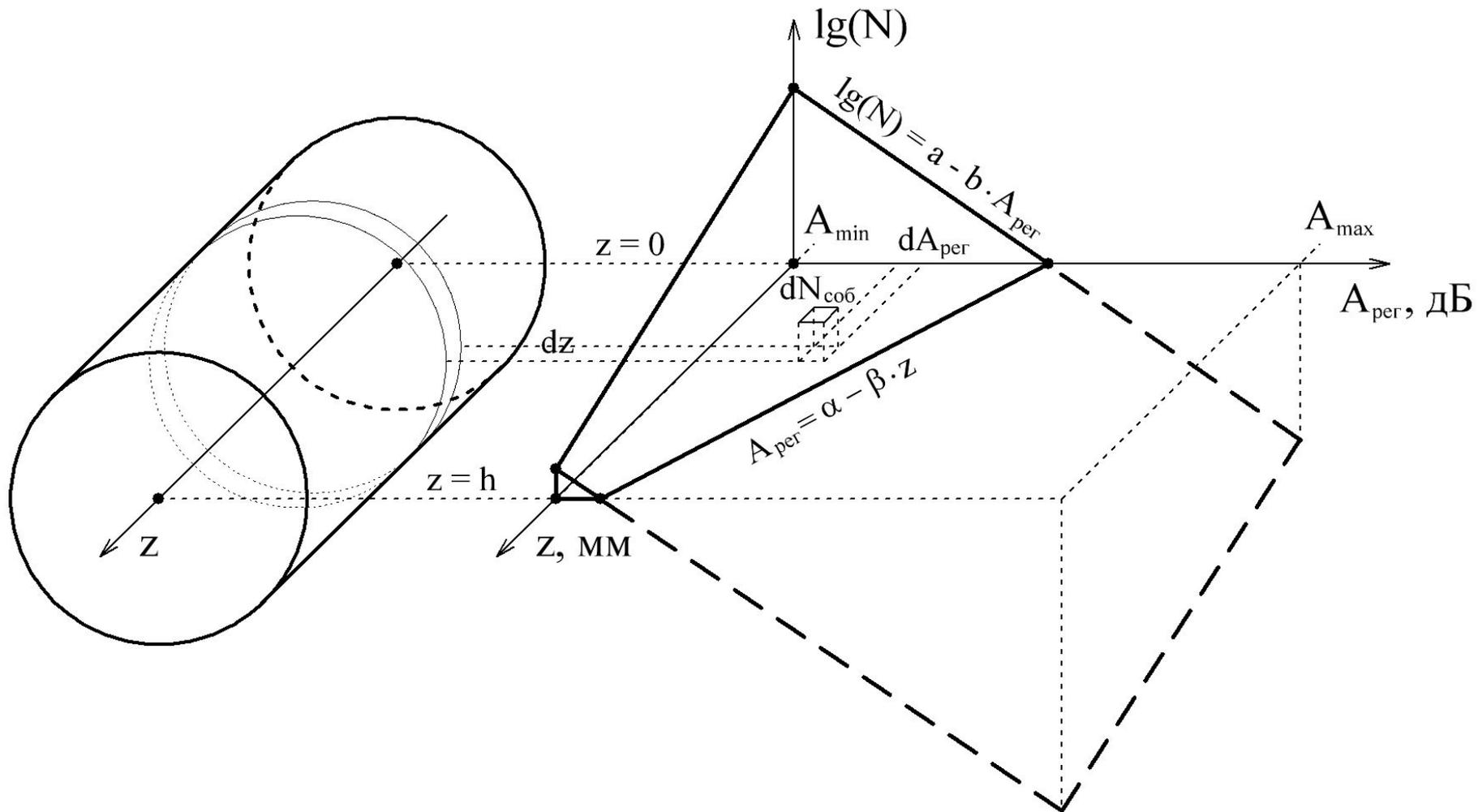
Подавляющее большинство АЭ-систем оценивает энергию импульса по квадрату максимальной амплитуды



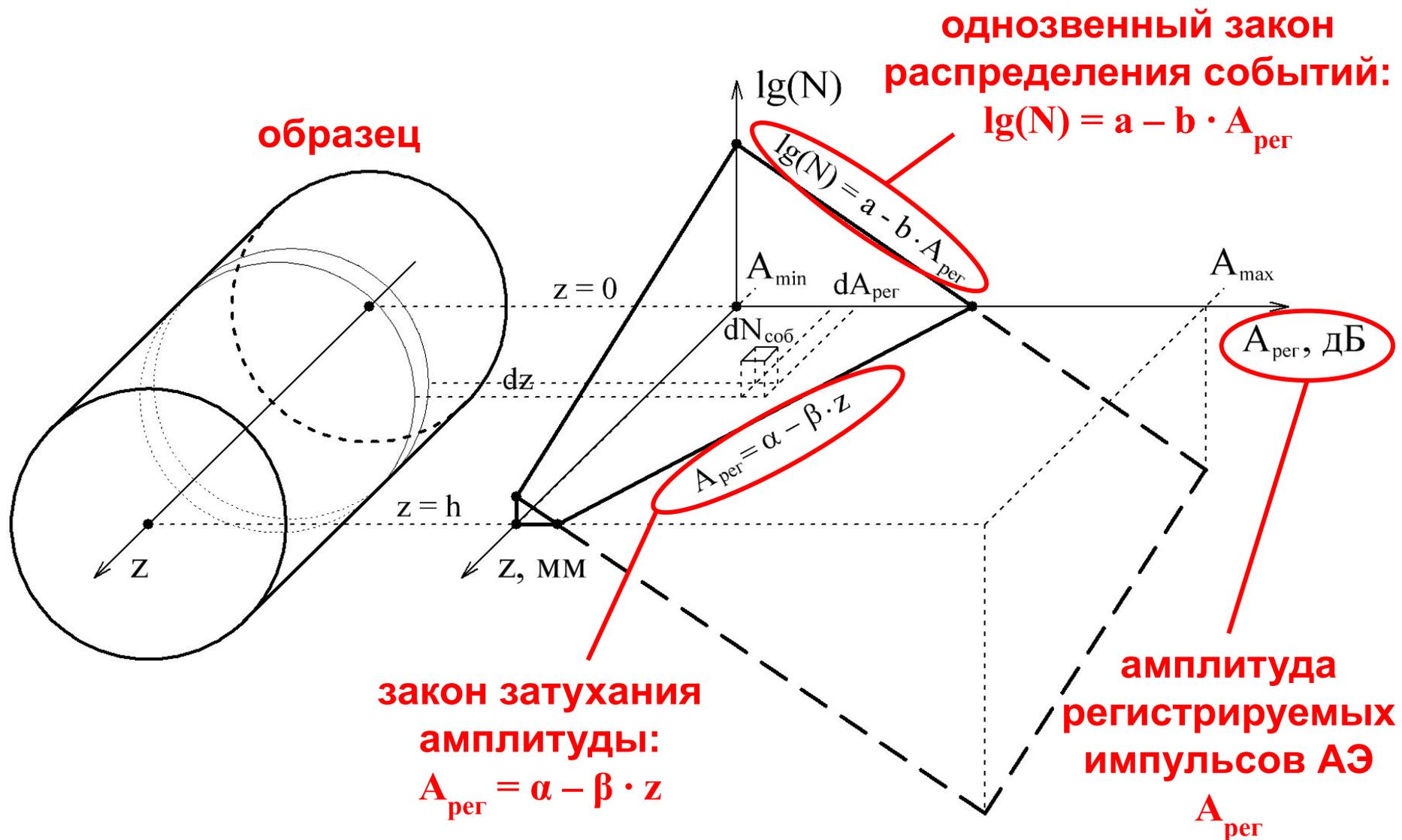
$$E_{\text{имп}} = k_{\text{пр}} \cdot A^2$$

поэтому в первом приближении можно пренебречь наложением волн

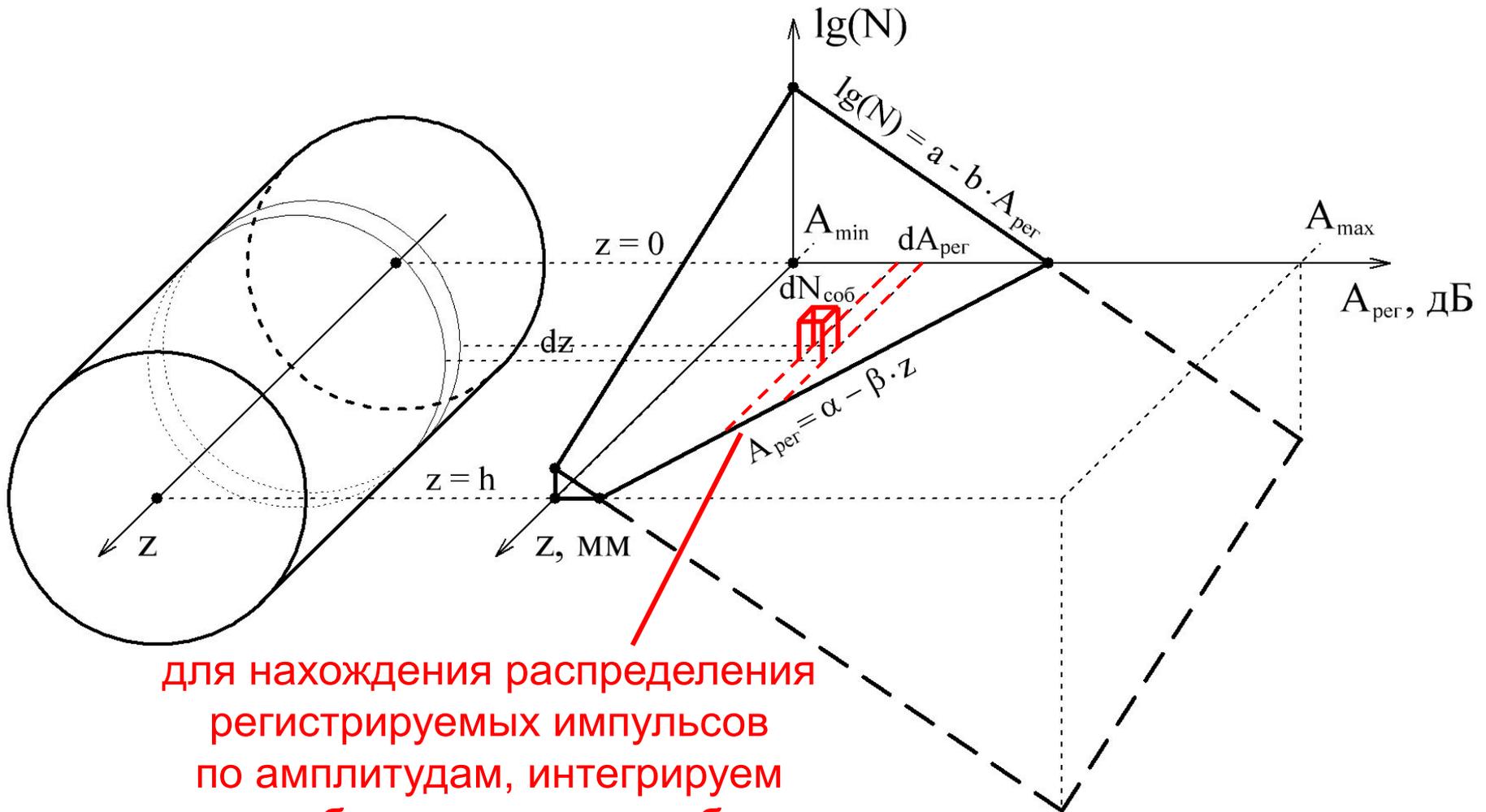
# Оценка влияния факторов: расчетная модель



# Оценка влияния факторов: расчетная модель



# Оценка влияния факторов: расчетная модель

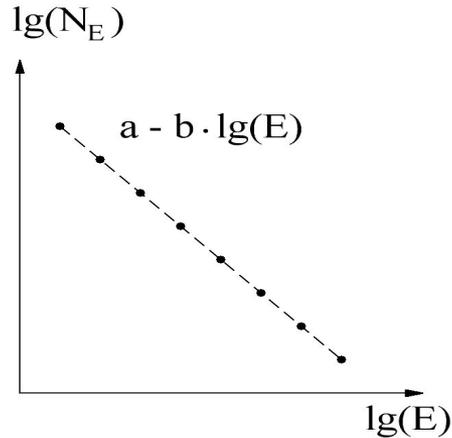


для нахождения распределения регистрируемых импульсов по амплитудам, интегрируем по всему объему вдоль оси образца  $z$

# Оценка влияния факторов:

## распределение регистрируемых импульсов по амплитудам

### исходное распределение событий по энергиям

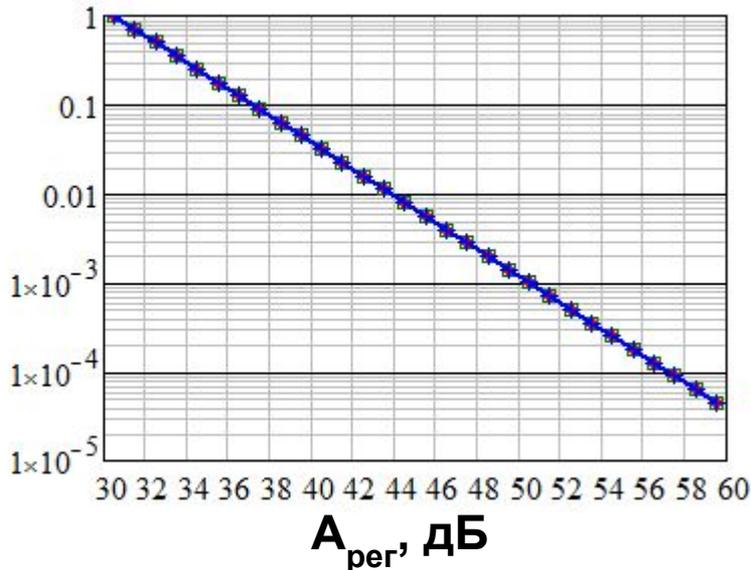


**однозвенный**  
**закон**

$n = N_A / N_{\max}$  - относительное распределение импульсов по амплитудам

затухание ( $\beta$ )

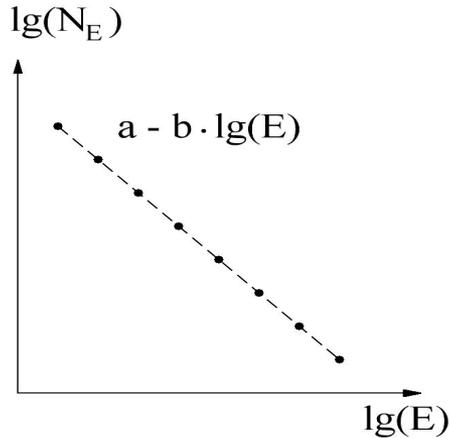
- 0 дБ/м
- 100 дБ/м
- 1000 дБ/м



# Оценка влияния факторов:

## распределение регистрируемых импульсов по амплитудам

### исходное распределение событий по энергиям

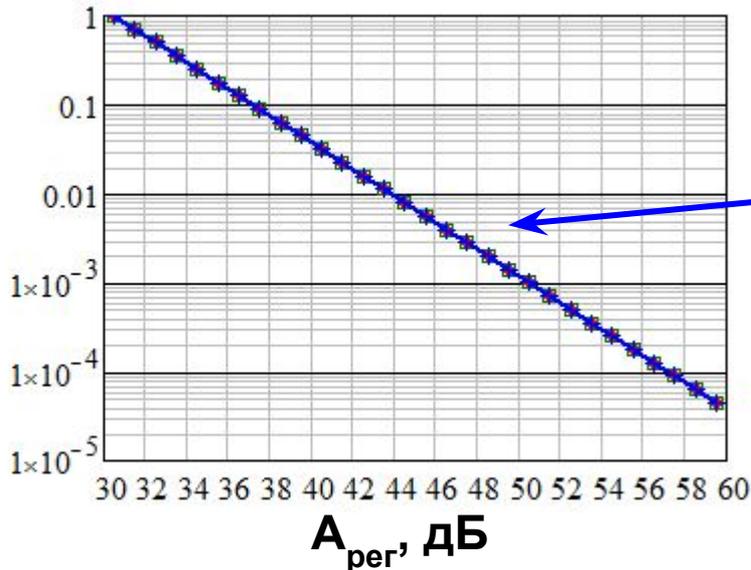


**однозвенный  
закон**

$n = N_A / N_{\max}$  - относительное распределение импульсов по амплитудам

затухание ( $\beta$ )

- 0 дБ/м
- 100 дБ/м
- 1000 дБ/м



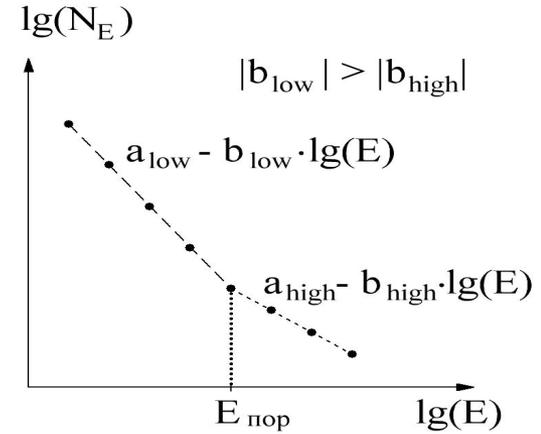
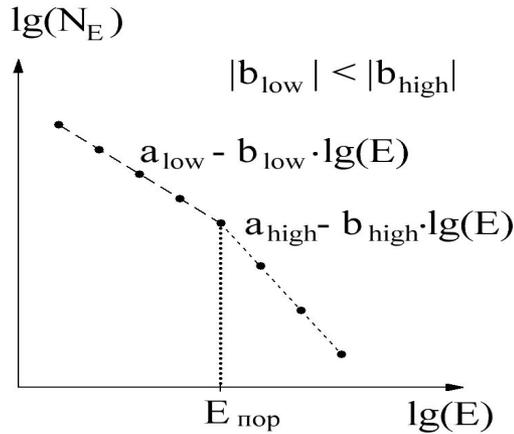
**наклон соответствует  
наклону исходного  
распределения и не  
зависит от затухания**

# Оценка влияния факторов:

## распределение регистрируемых импульсов по амплитудам

### исходное распределение событий по энергиям

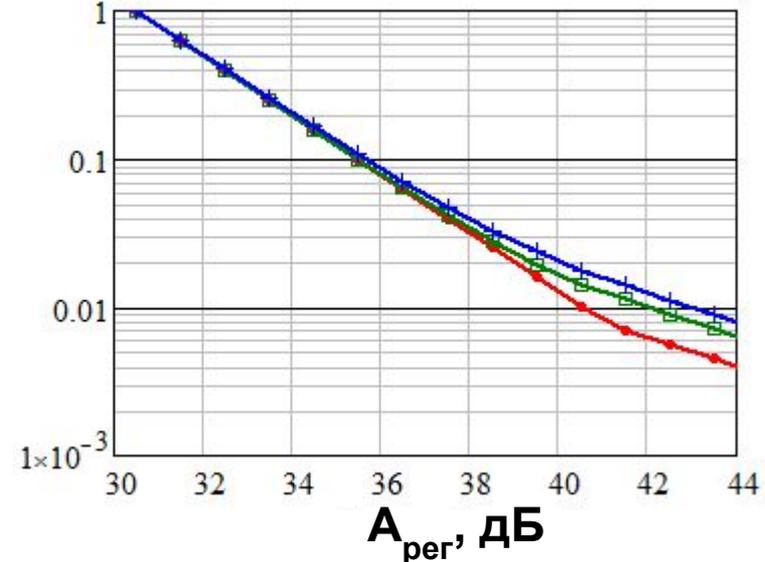
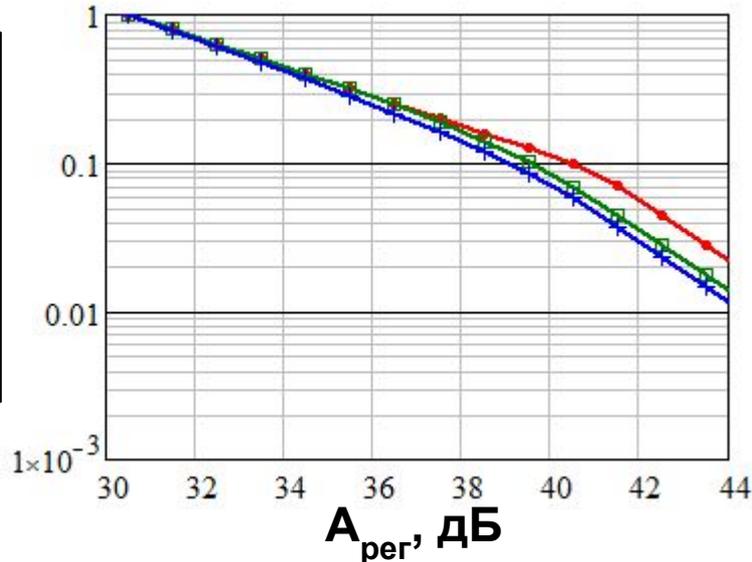
**ДВУХЗВЕННЫЙ  
ЗАКОН**



$n = N_A / N_{\text{max}}$  - относительное распределение импульсов по амплитудам

затухание ( $\beta$ )

- 0 дБ/м ●●●
- 100 дБ/м ■ ■ ■
- 1000 дБ/м + + +

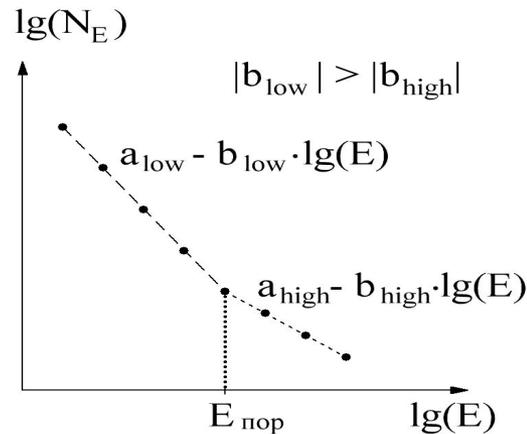
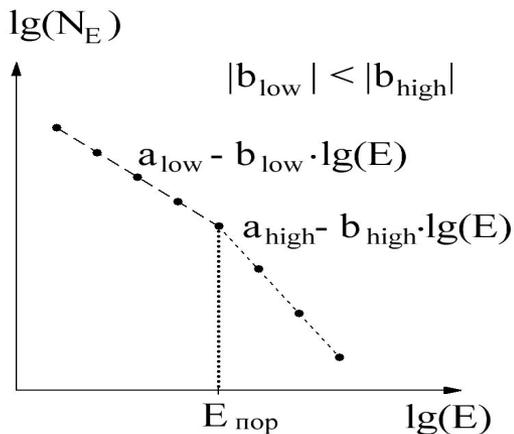


# Оценка влияния факторов:

## распределение регистрируемых импульсов по амплитудам

### исходное распределение событий по энергиям

### ДВУХЗВЕННЫЙ ЗАКОН



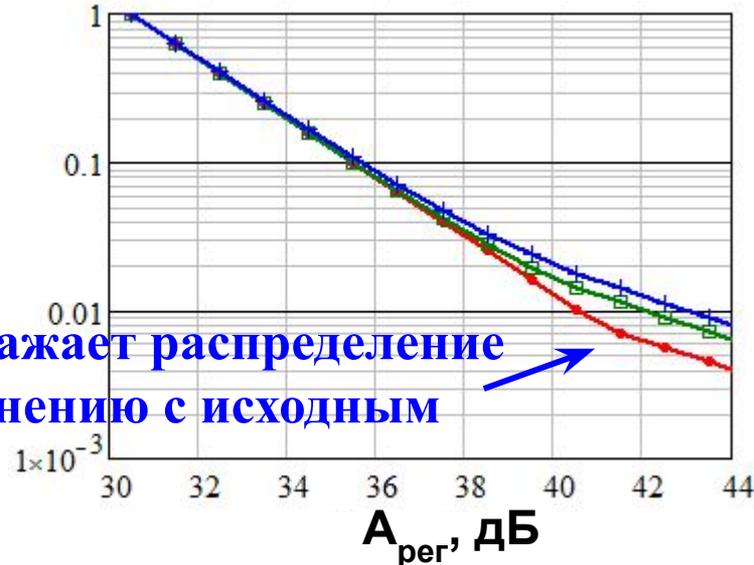
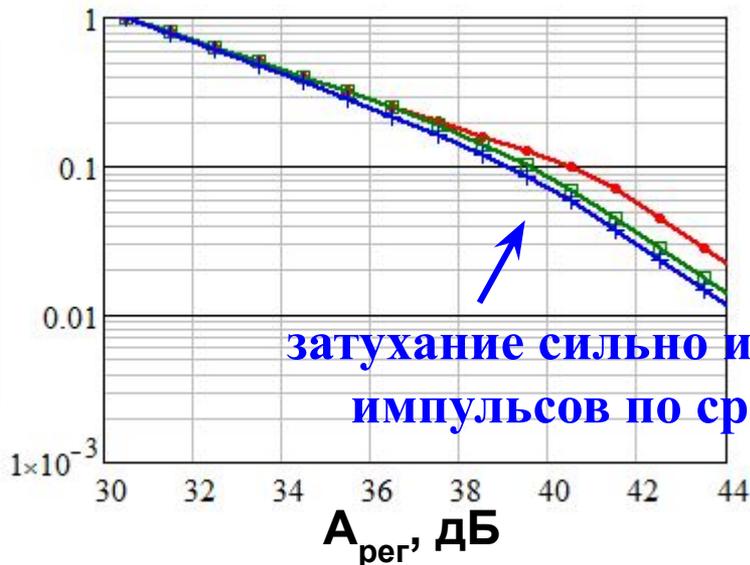
$n = N_A / N_{\text{max}}$  - относительное распределение импульсов по амплитудам

затухание ( $\beta$ )

0 дБ/м

100 дБ/м

1000 дБ/м



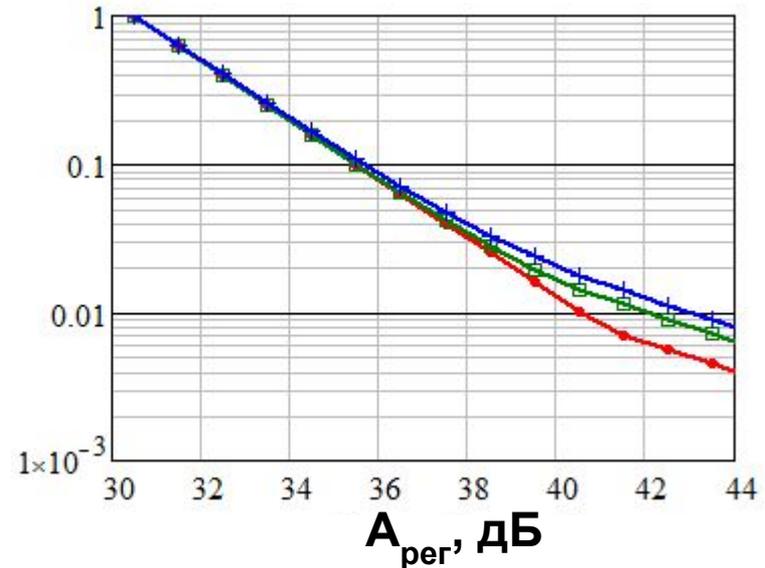
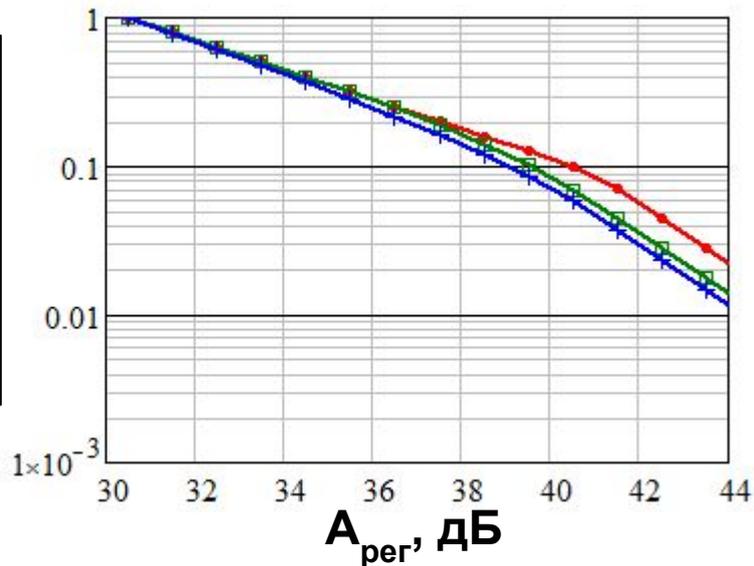
# Анализ экспериментальных данных:

## методика оценки характера закона распределения и b-value

- Выявление характера распределения – однозвенный или более сложный
- Оценка b-value

затухание ( $\beta$ )

0 дБ/м  
100 дБ/м  
1000 дБ/м

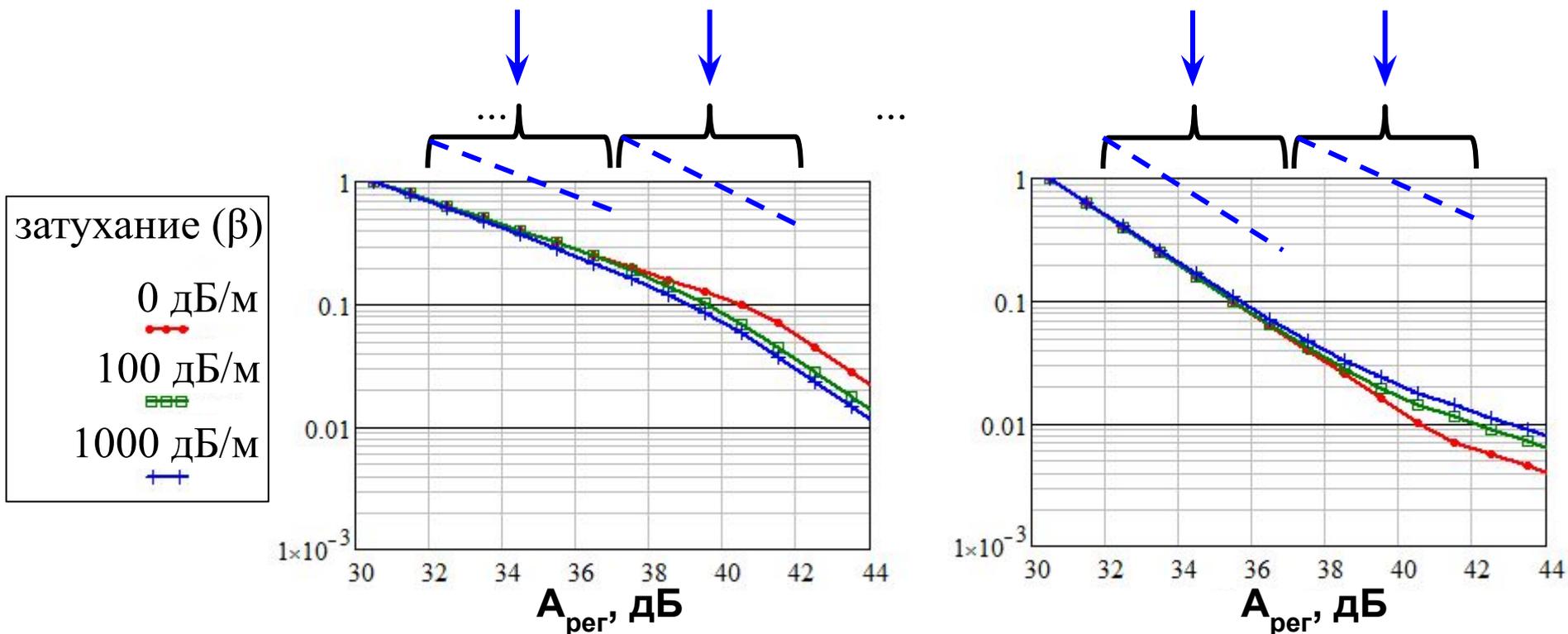


# Анализ экспериментальных данных:

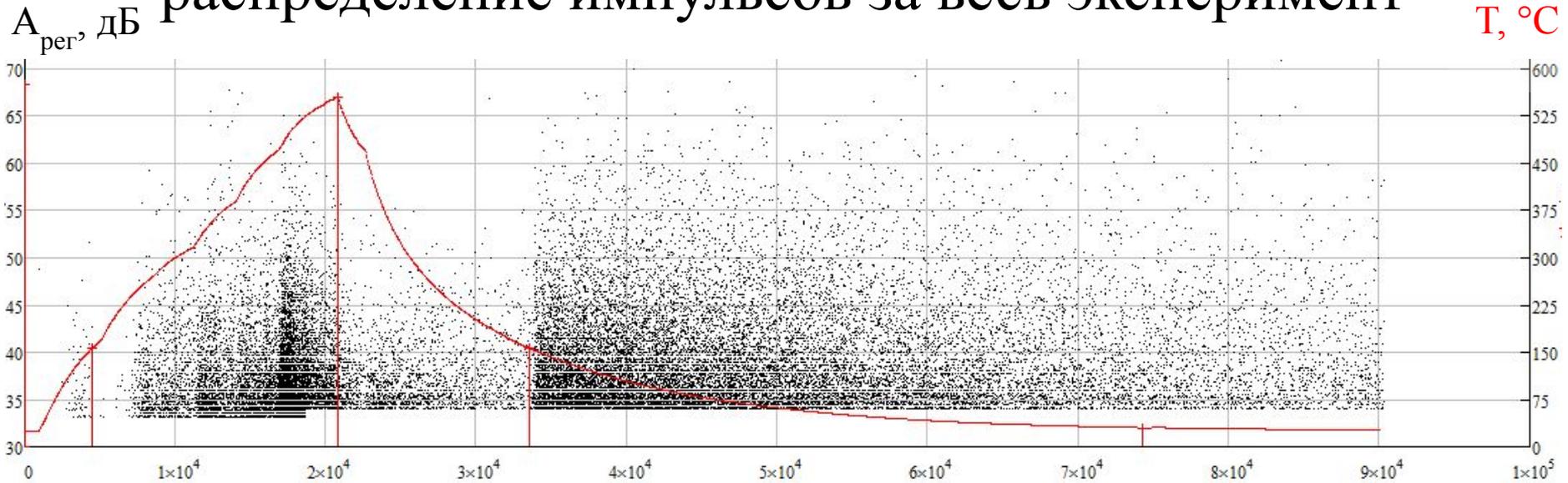
## методика оценки характера закона распределения и b-value

- Выявление характера распределения – однозвенный или более сложный
- Оценка b-value

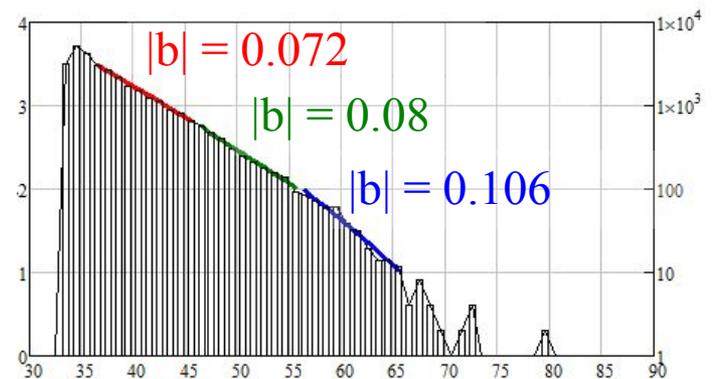
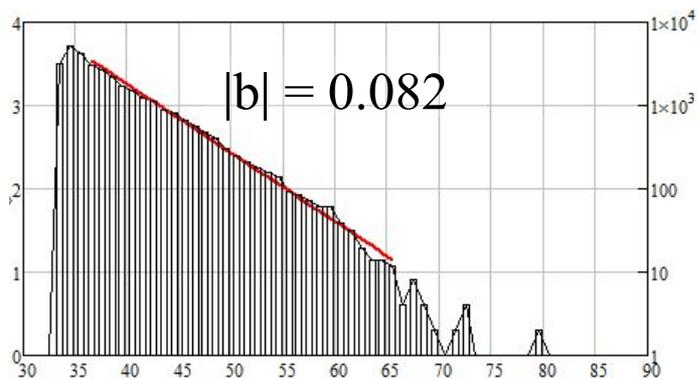
Целесообразен анализ в двух и более соседних поддиапазонах амплитуд



# Анализ экспериментальных данных – примеры: распределение импульсов за весь эксперимент



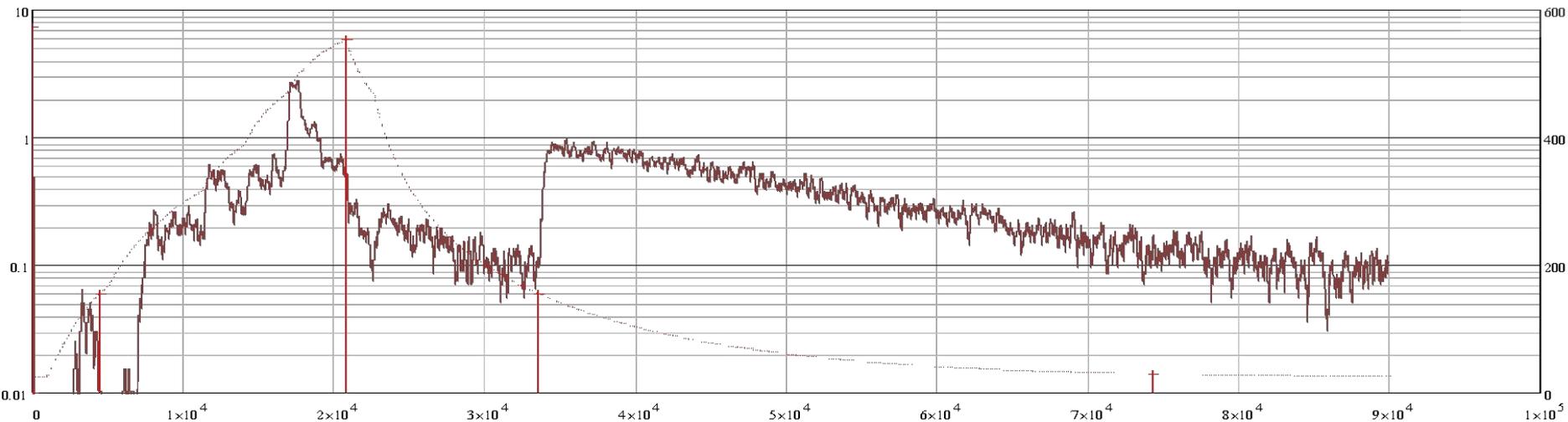
## Распределение импульсов по амплитудам за весь эксперимент



# Анализ экспериментальных данных – примеры: этапы эксперимента

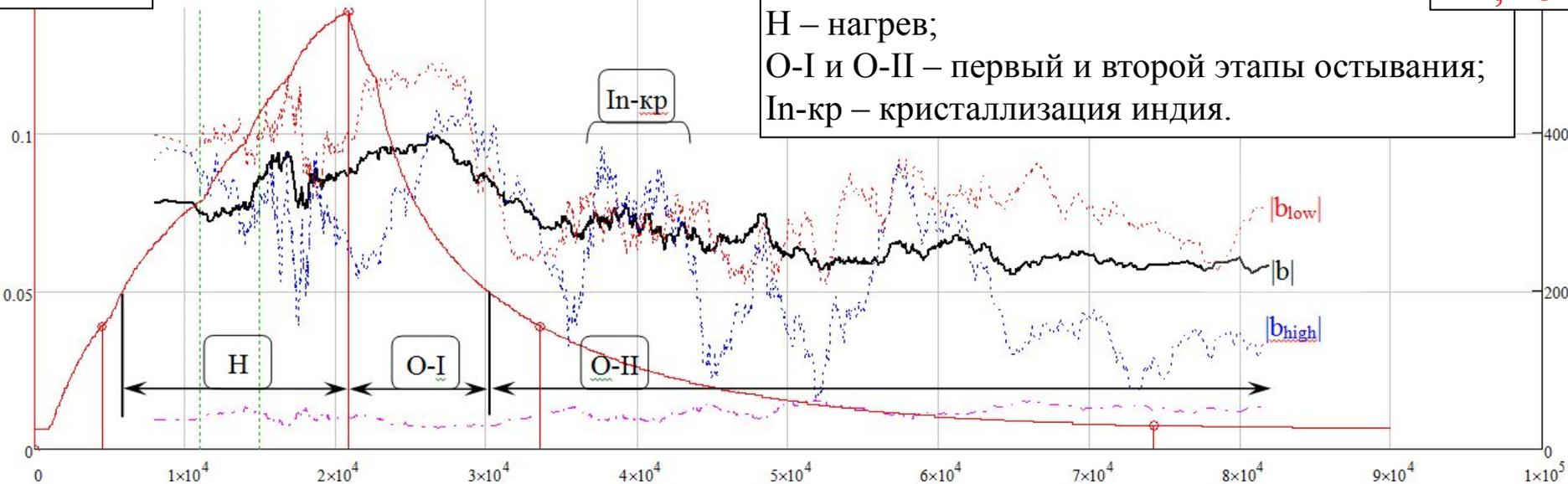
актив. ТАЭ, имп/сек

$T, ^\circ\text{C}$



b-value

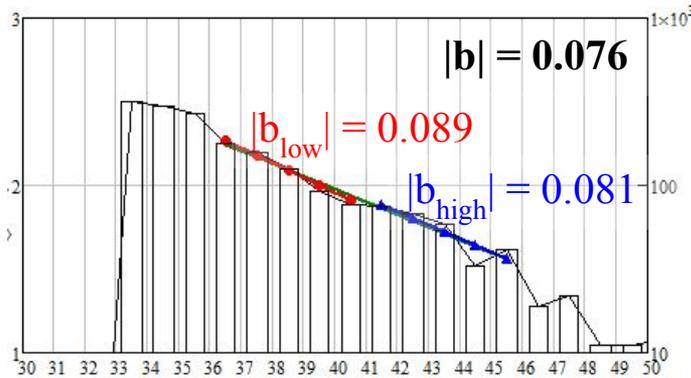
$T, ^\circ\text{C}$



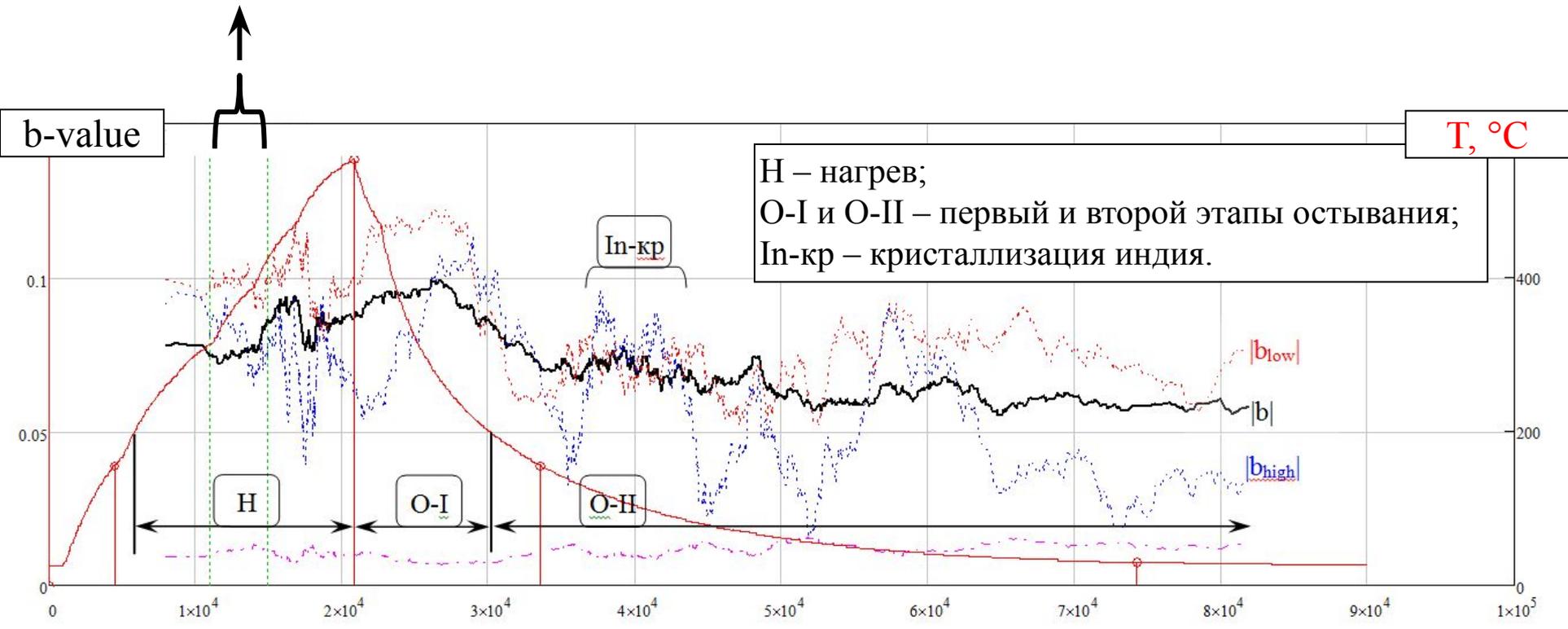
H – нагрев;  
O-I и O-II – первый и второй этапы остывания;  
In-кр – кристаллизация индия.

# Анализ экспериментальных данных – примеры:

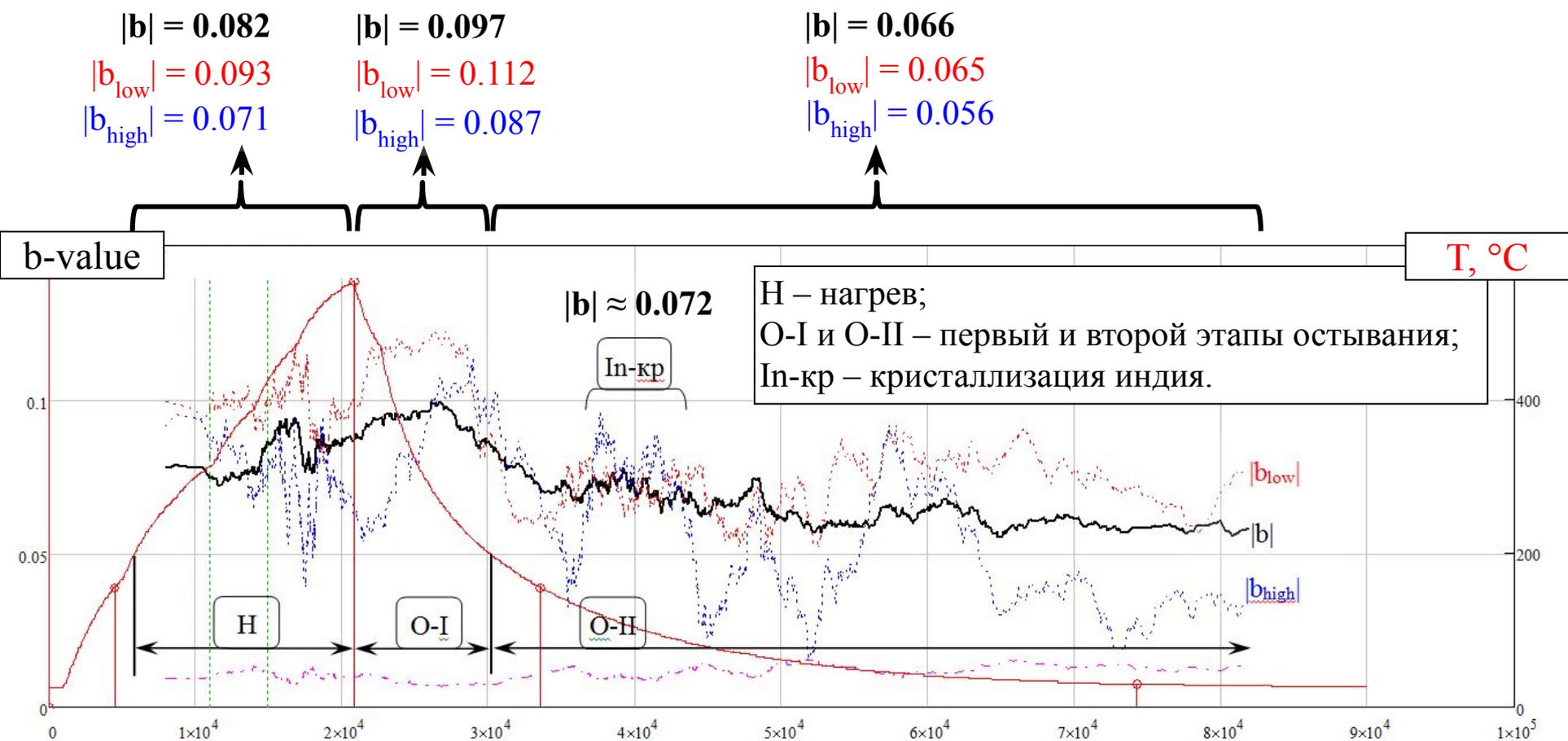
## этапы эксперимента



выборочная проверка  
(~900 импульсов в  
выборке)



# Анализ экспериментальных данных – примеры: этапы эксперимента



# Анализ экспериментальных данных: инициация ТАЭ градиентом температуры



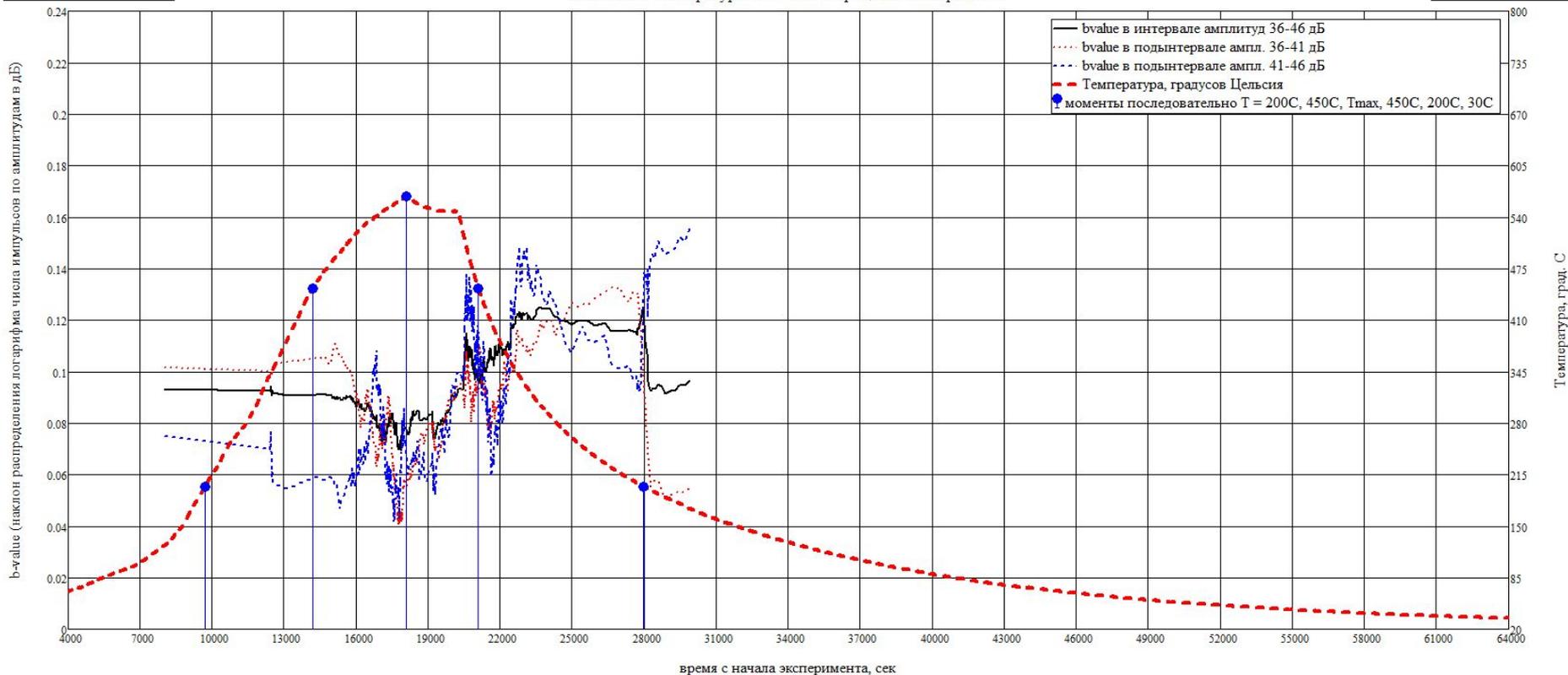
# Анализ экспериментальных данных: инициация ТАЭ градиентом температуры

образец – гранит мелкозерн. из скваж. с глуб. 837 м (район Койна-Варна, Индия)  
пористость до / после нагрева ~ 0.1 / 1.0 %

b-value

T, °C

Изменение температуры и b-value в процессе эксперимента



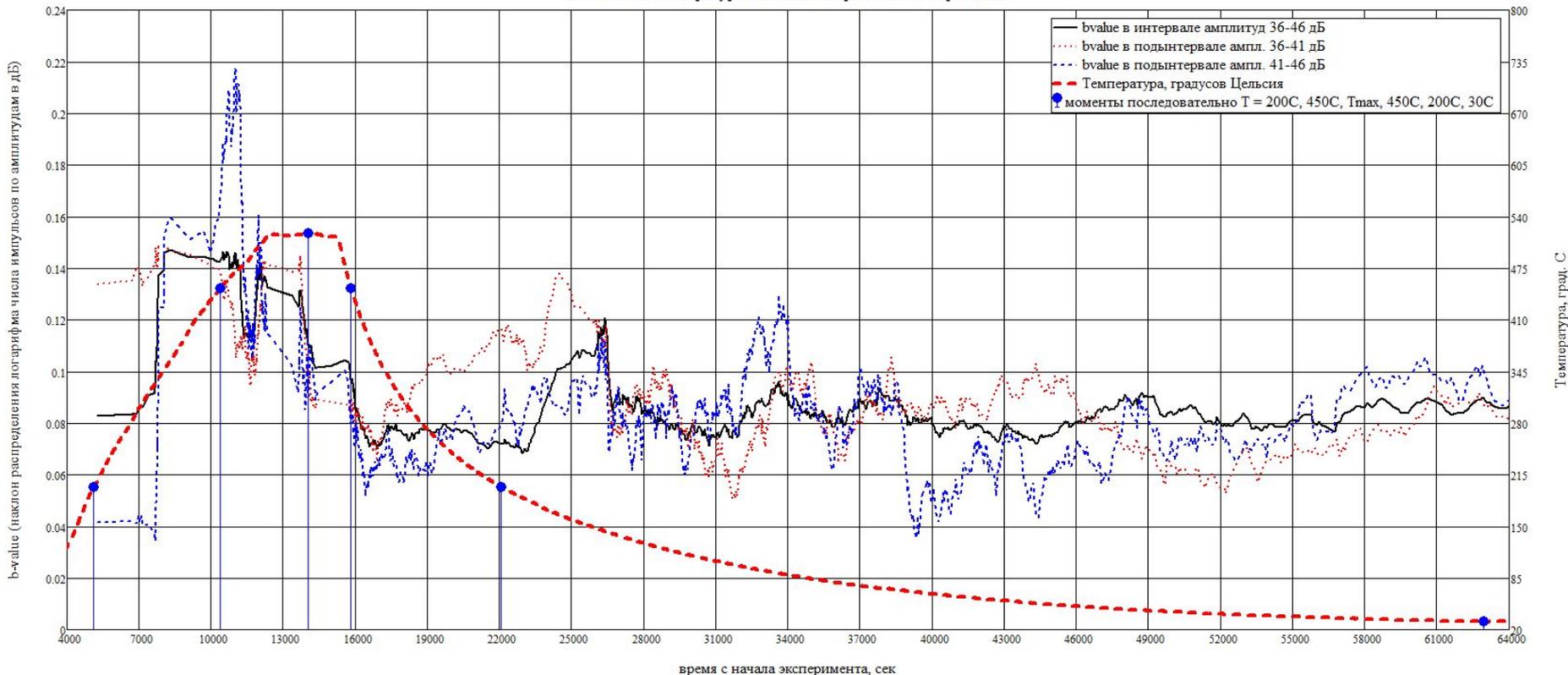
# Анализ экспериментальных данных: инициация ТАЭ градиентом температуры

образец – гранит мелкозерн. из скваж. с глуб. 1438 м (район Койна-Варна, Индия)  
пористость до / после нагрева ~ 0.1 / 3.0 %

b-value

T, °C

Изменение температуры и b-value в процессе эксперимента

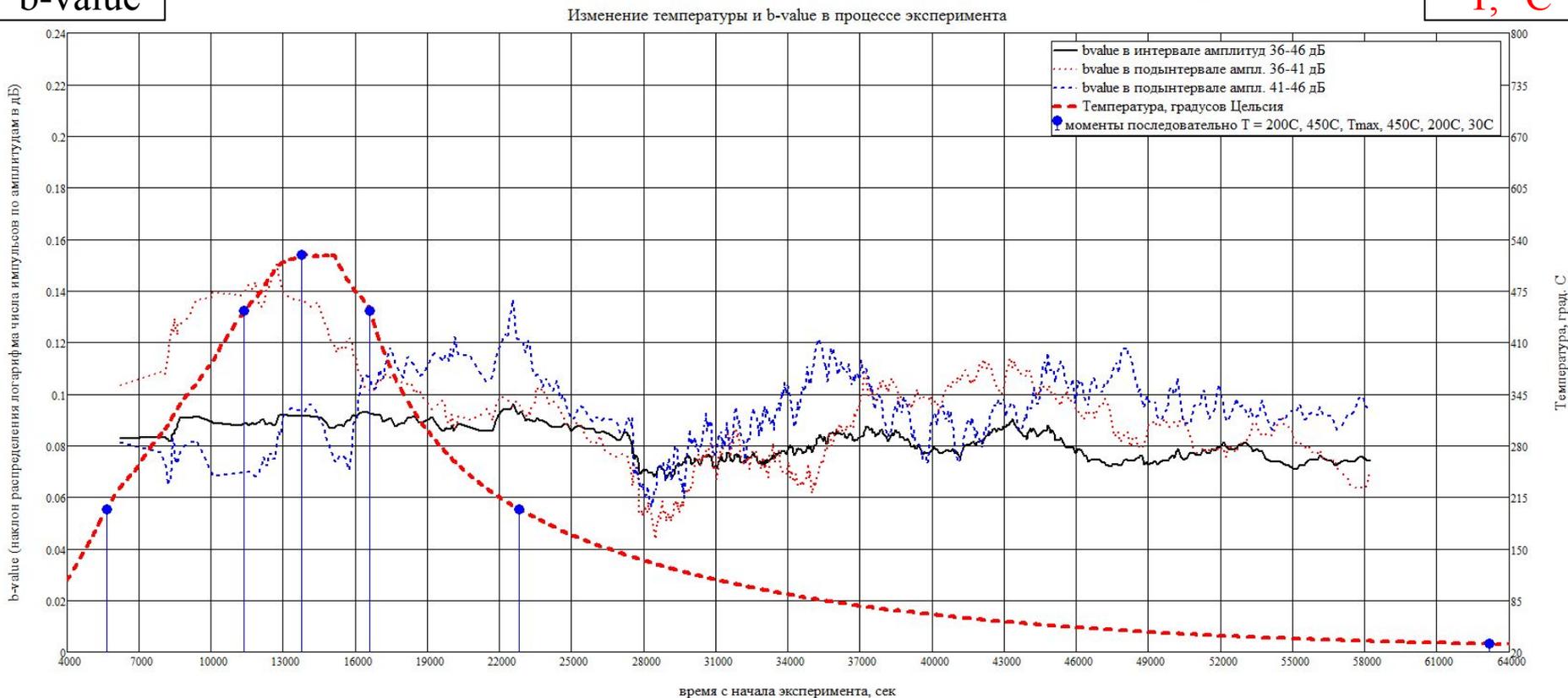


# Анализ экспериментальных данных: инициация ТАЭ градиентом температуры

образец – гранит мелкозерн. из скваж. с глуб. 1013 м (район Койна-Варна, Индия)  
пористость до / после нагрева ~ 0.05 / 0.6 %

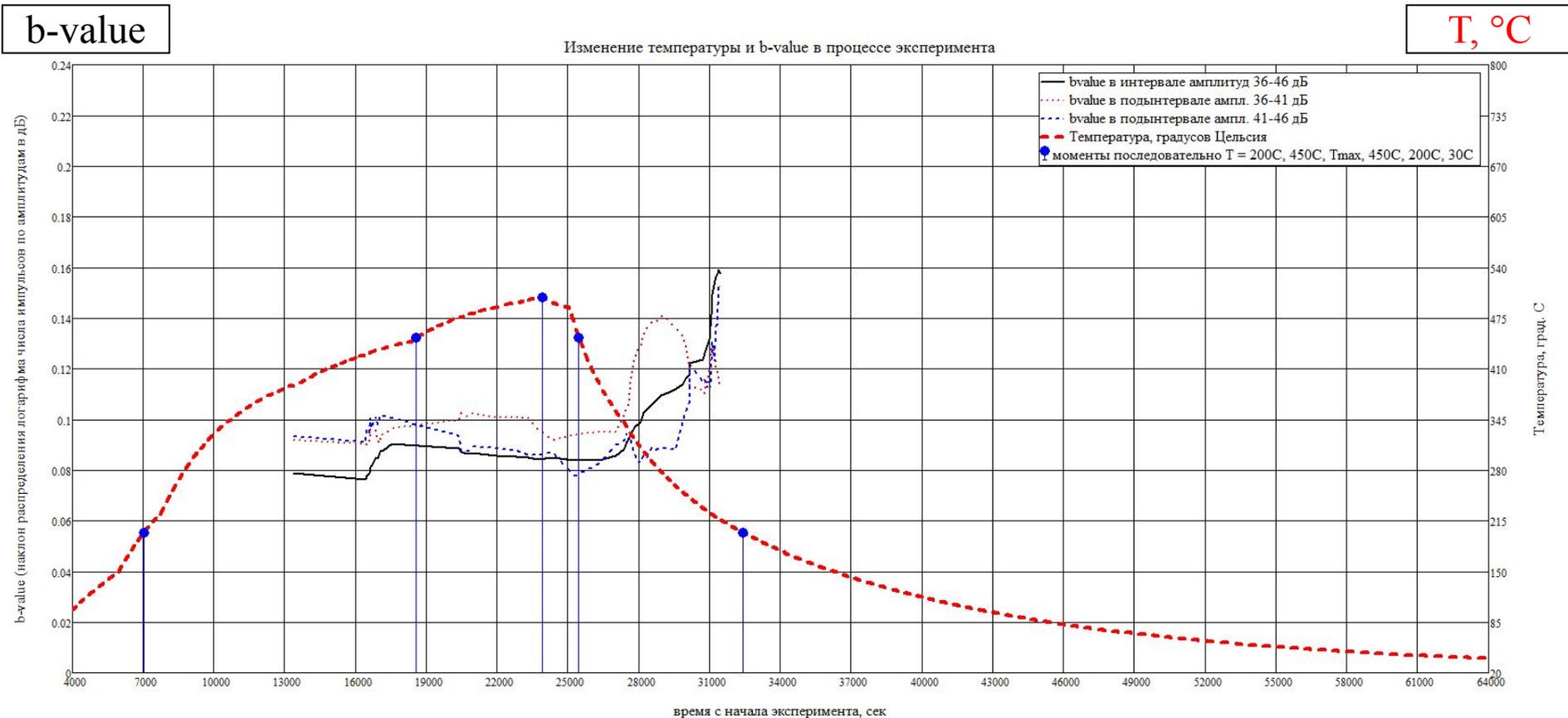
b-value

T, °C



# Анализ экспериментальных данных: инициация ТАЭ градиентом температуры

образец – гранит мелкозерн. из скваж. с глуб. 829 м (район Койна-Варна, Индия)  
пористость до / после нагрева ~ 0.04 / 0.8 %



# Выводы

- Затухание (энергии) импульсов ТАЭ в настоящей экспериментальной установке (и подобной ей установках) может быть представлено в виде линейного закона поглощения.
- Для однозвенного закона распределения событий ТАЭ по энергиям затухание не искажает форму распределения импульсов ТАЭ по амплитудам по сравнению с исходной.
- Для двухзвенного закона распределения событий ТАЭ затухание существенно искажает вид распределения импульсов, теряется сам двухзвенный характер распределения.
- Оценка  $b$ -value в соседних поддиапазонах амплитуд позволяет сделать вывод о характере закона распределения событий ТАЭ (одно-, двухзвенный или более сложный) и оценить  $b$ -value, близкое к исходному.
- На экспериментальных данных такая методика показала возможность различения механизмов генерации ТАЭ, связанных с разными этапами эксперимента по термическим разрушениям горных пород.
- Обнаружено, что исходное распределение событий ТАЭ может быть двухзвенным с уменьшением  $b$ -value с ростом амплитуды («вогнутым»), что представляет интерес для дальнейшего изучения.

**Спасибо за внимание!**



# Распределение импульсов по амплитудам в скользящем окне

$A_{\text{per}}$ , дБ

