

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.

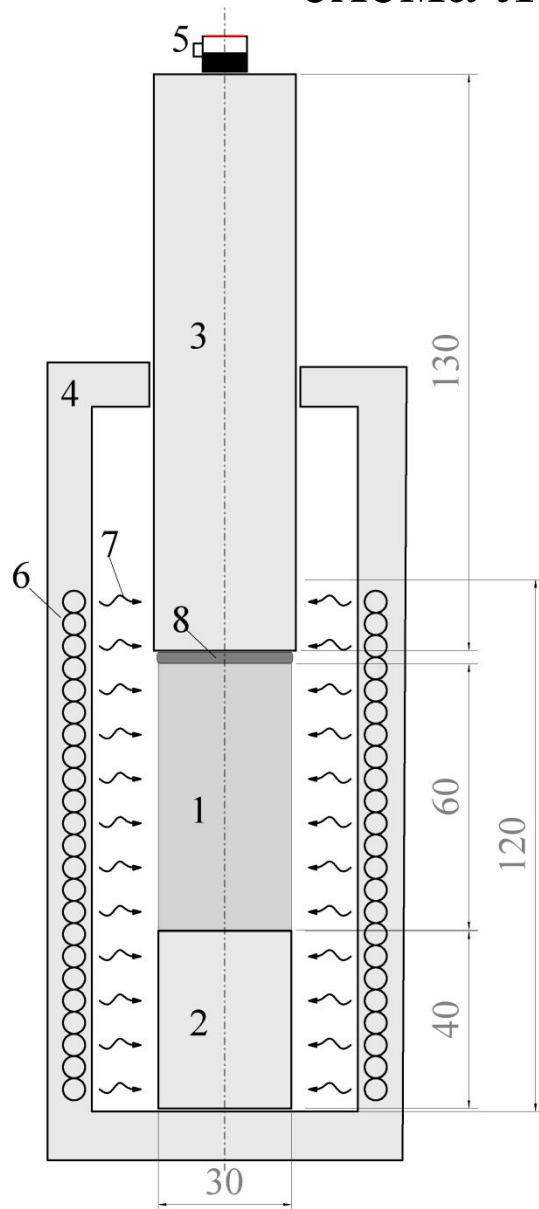
Тольятти, ТГУ - 2018

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



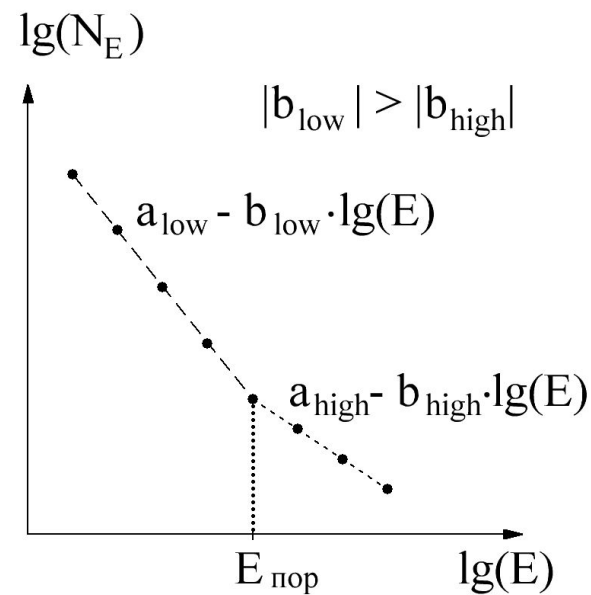
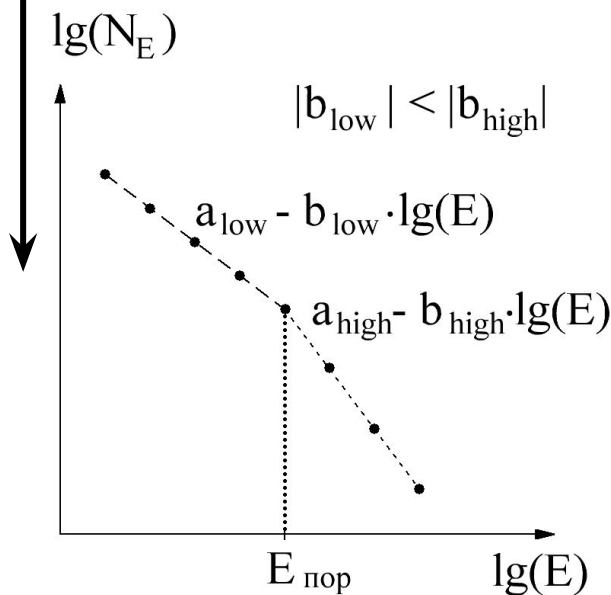
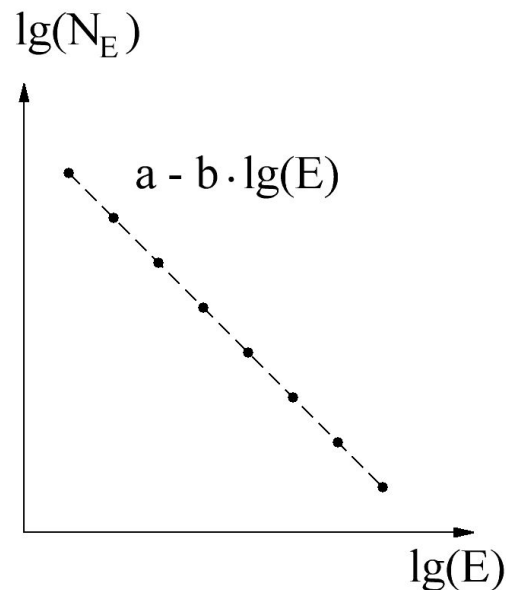
- 1 - исследуемый цилиндрический образец горной породы;
- 2 - подставка;
- 3 - цилиндрический акустический волновод;
- 4 - корпус печи;
- 5 - датчик интегральной акустики;
- 6 - нагревательный элемент;
- 7 - тепловое излучение (условно);
- 8 - прослойка из индия.

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

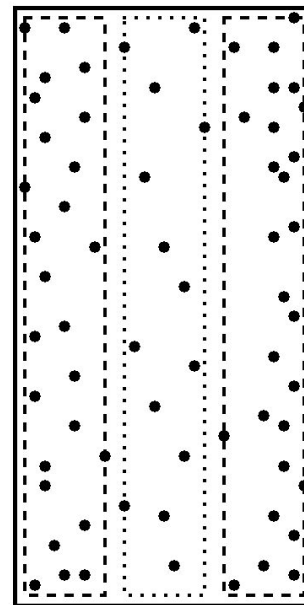
I. Исходный закон распределения числа событий N_E по энергиям E :

- однозвенный;
- двухзвенный.

разные механизмы
генерации событий

инициация температурой и
инициация скоростью изменения
температуры (градиентом)

неоднородность распределения
событий в радиальном
направлении

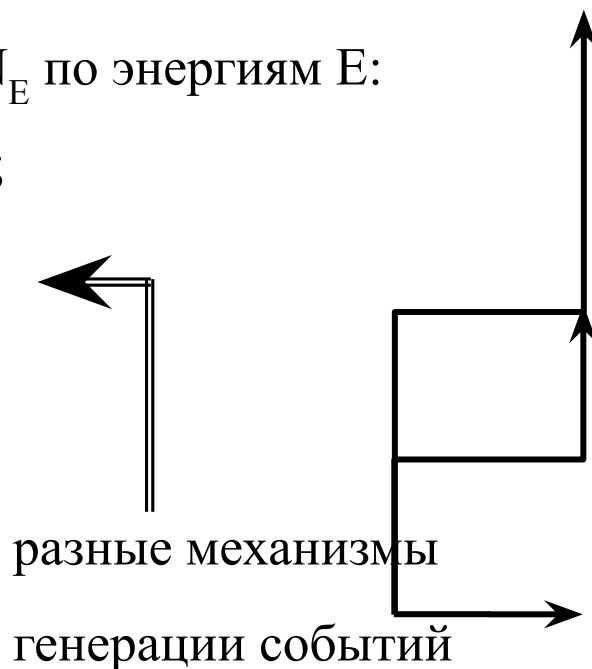


Факторы, влияющие на параметры потока импульсов ТАЭ

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

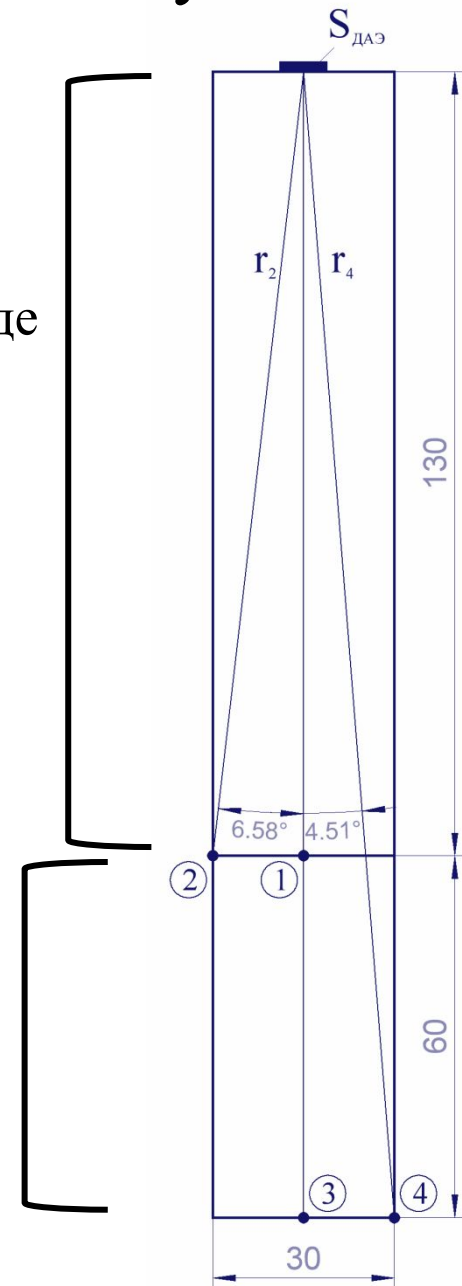
I. Исходный закон распределения числа событий N_E по энергиям E (однозвенный и двухзвенный).

II. Затухание акустического импульса:

- расхождение;
- поглощение.

в волноводе

в образце



Факторы, влияющие на параметры потока импульсов ТАЭ

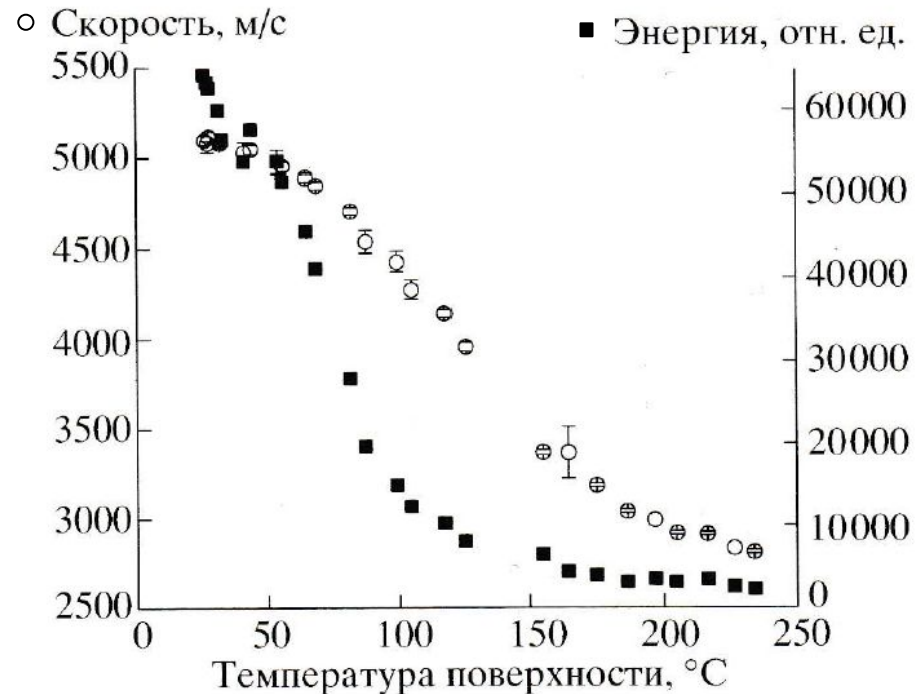
I. Исходный закон распределения числа событий N_E по энергиям E (однозвенный и двухзвенный).

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

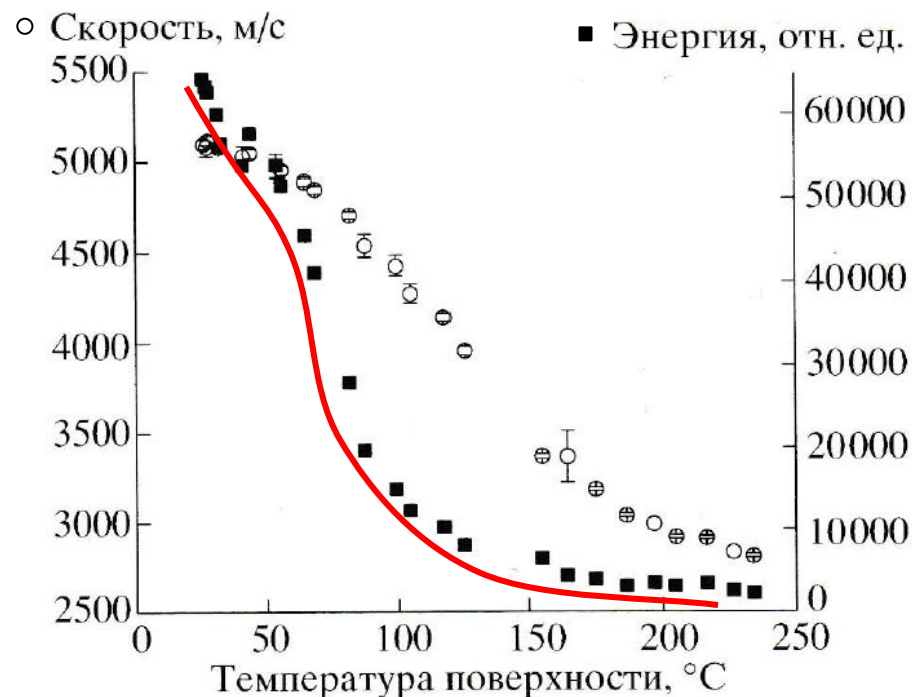
I. Исходный закон распределения
числа событий N_E по энергиям E
(однозвенный и двухзвенный).

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

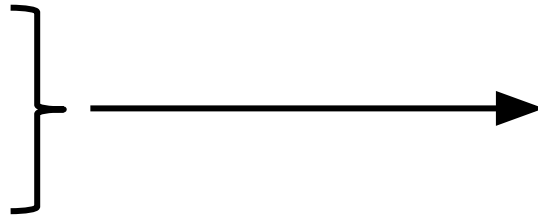
I. Исходный закон распределения

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:

$$K_{\text{осл}} = \beta \cdot z$$

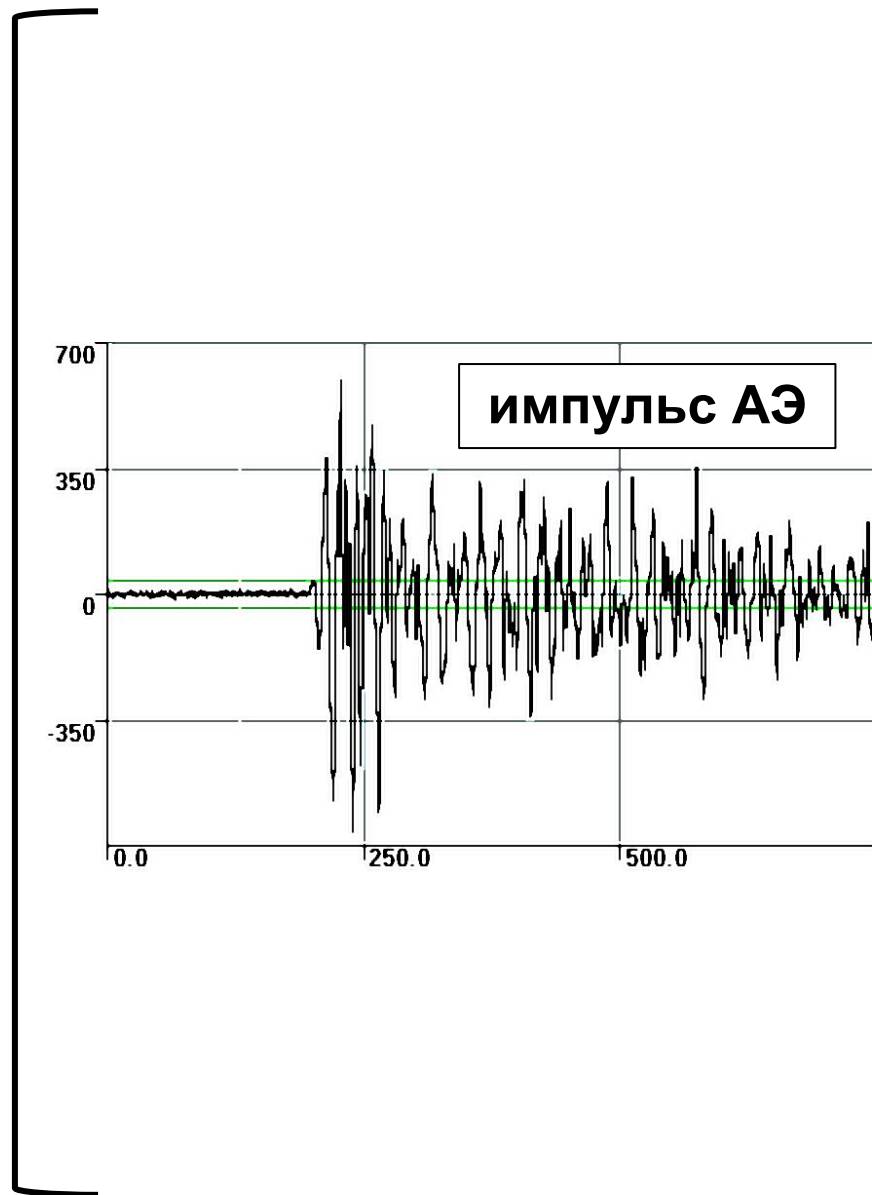
где $K_{\text{осл}}$ [дБ] – суммарный коэффициент ослабления энергии импульса,
 β [дБ/м] – удельный коэффициент затухания,
 z – расстояние, проходимое импульсом вдоль оси образца.

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). →



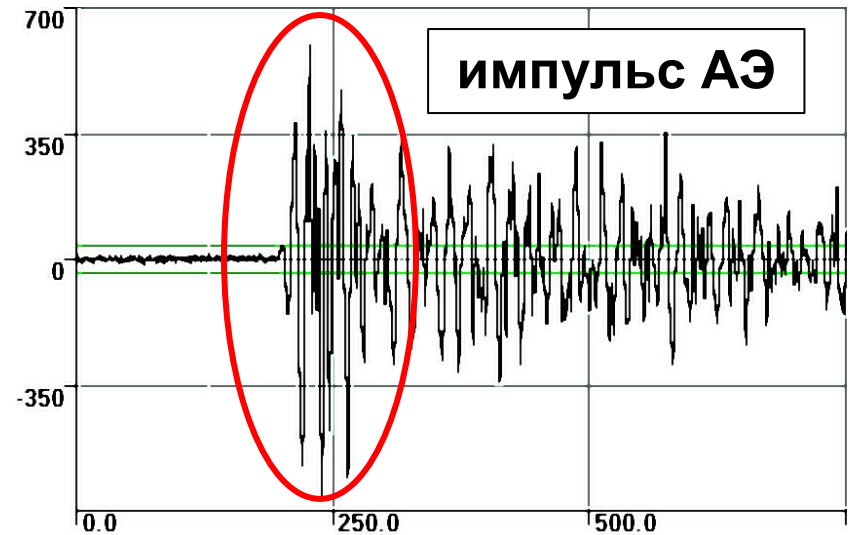
Факторы, влияющие на параметры потока импульсов ТАЗ

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

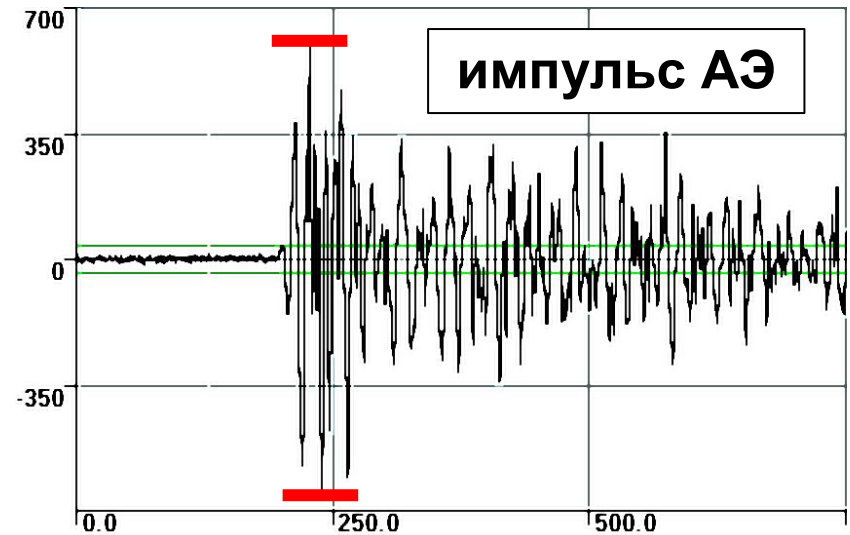
Факторы, влияющие на параметры потока импульсов ТАЗ

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). →

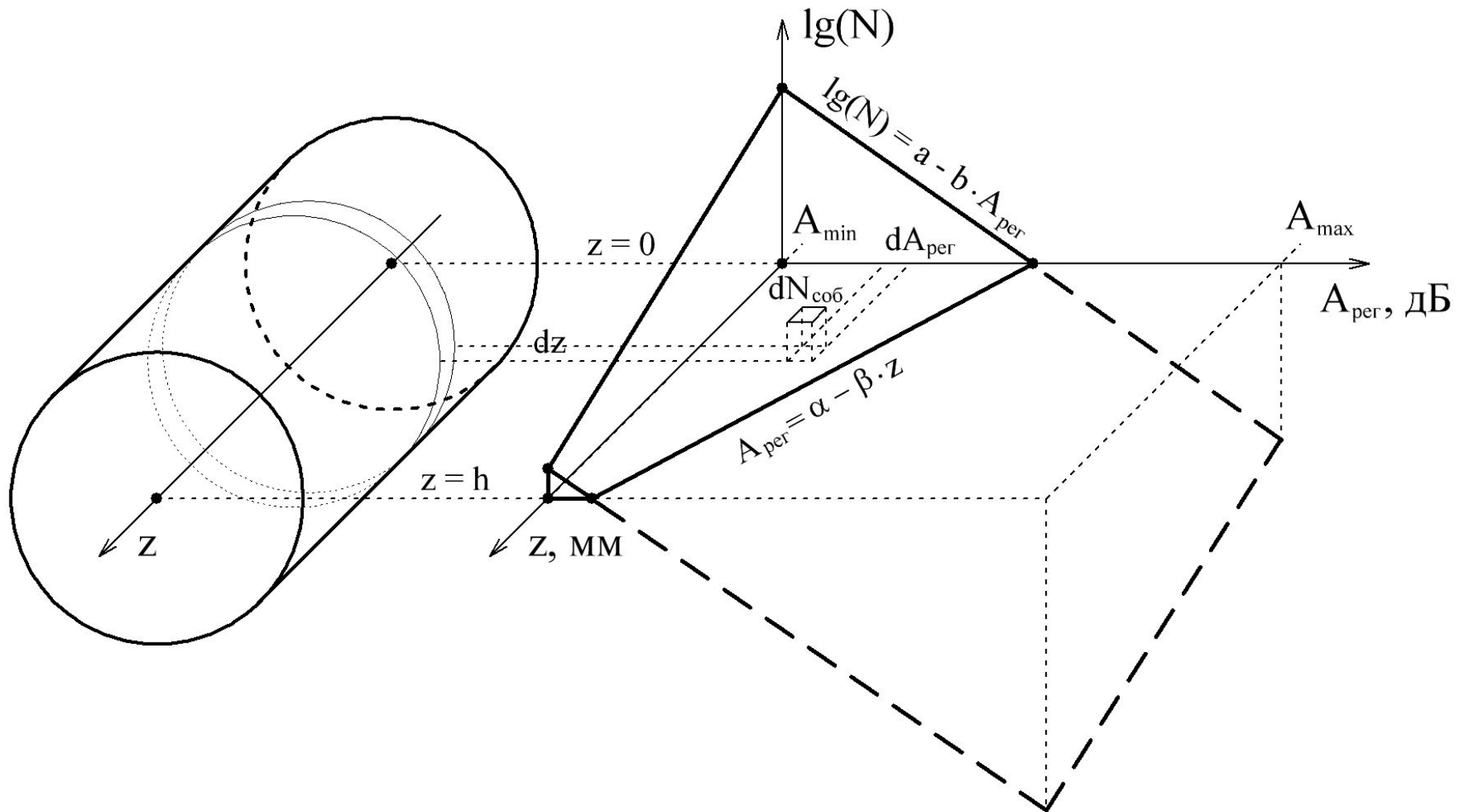
Подавляющее большинство АЭ-систем оценивает энергию импульса по квадрату максимальной амплитуды



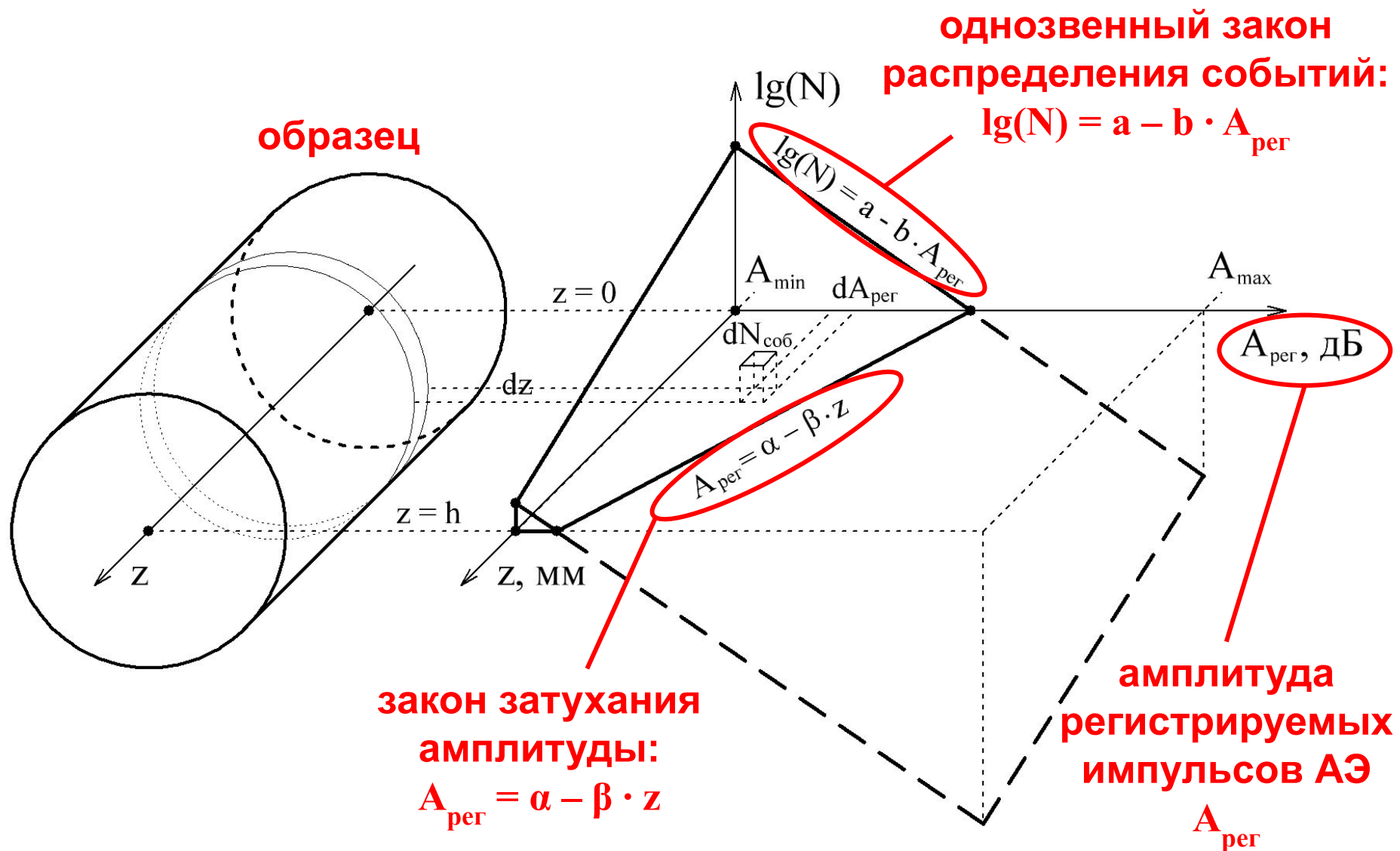
$$E_{\text{имп}} = k_{\text{пр}} \cdot A^2$$

поэтому в первом приближении можно пренебречь наложением волн

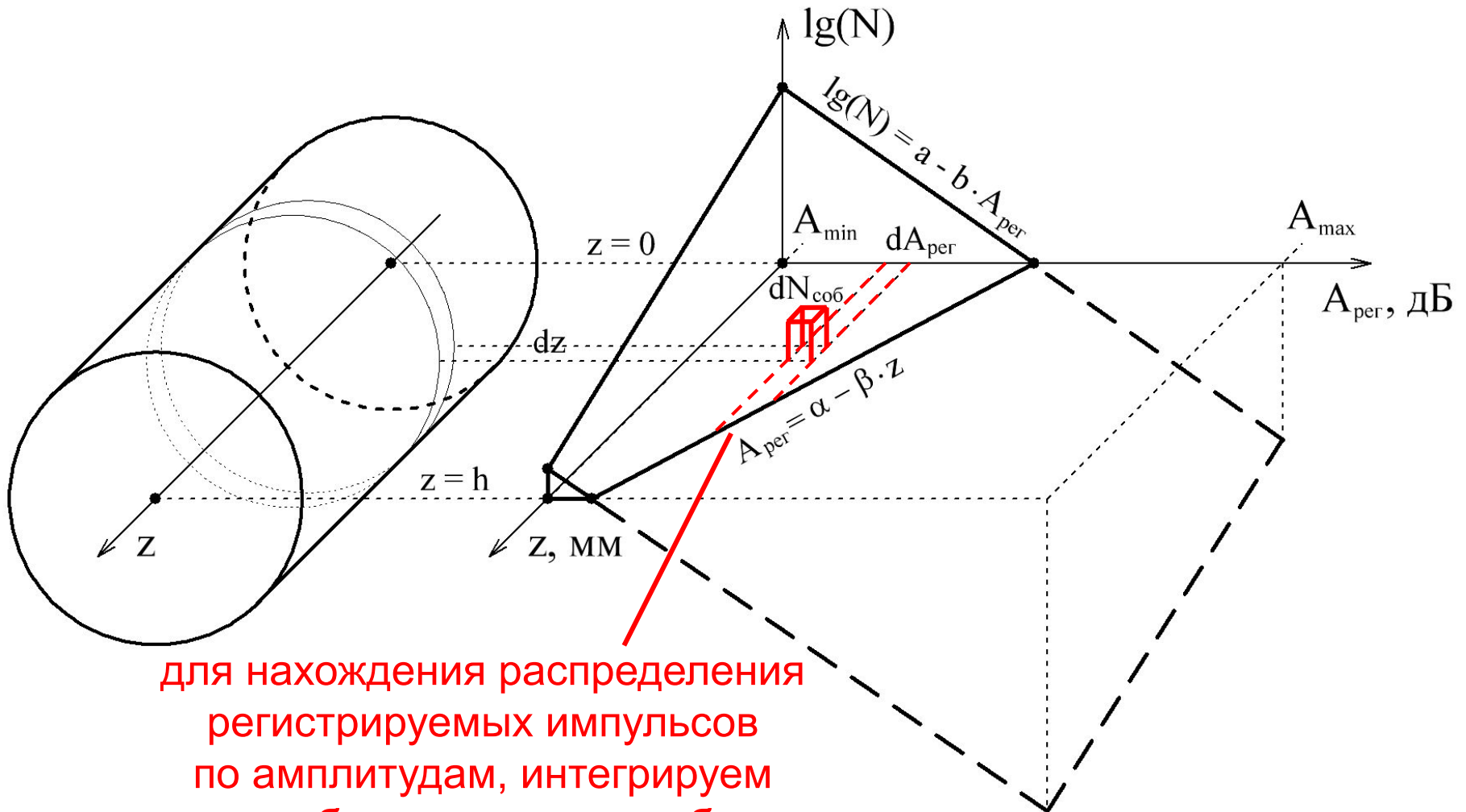
Оценка влияния факторов: расчетная модель



Оценка влияния факторов: расчетная модель



Оценка влияния факторов: расчетная модель

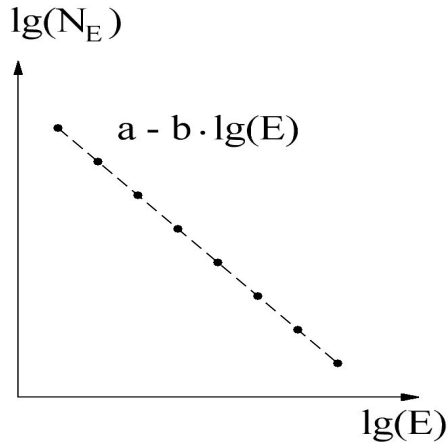


для нахождения распределения регистрируемых импульсов по амплитудам, интегрируем по всему объему вдоль оси образца z

Оценка влияния факторов:

распределение регистрируемых импульсов по амплитудам

исходное распределение событий по энергиям

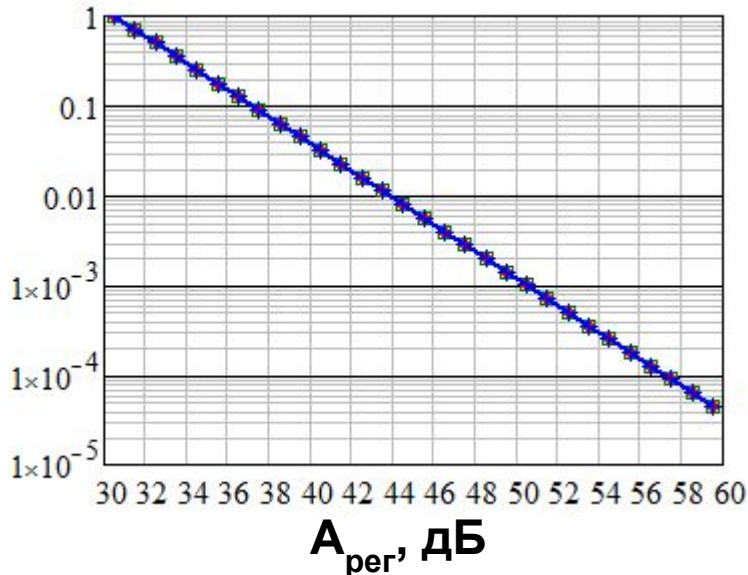


однозвенный
закон

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

затухание (β)

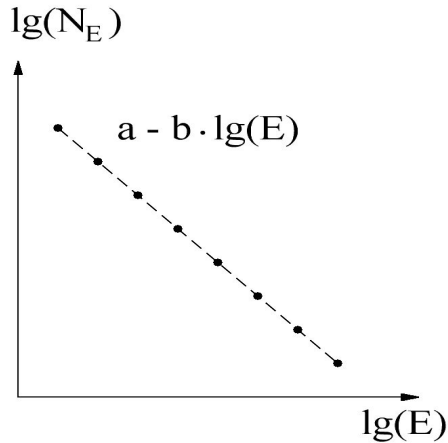
- 0 дБ/м
- 100 дБ/м
- 1000 дБ/м



Оценка влияния факторов:

распределение регистрируемых импульсов по амплитудам

исходное распределение событий по энергиям

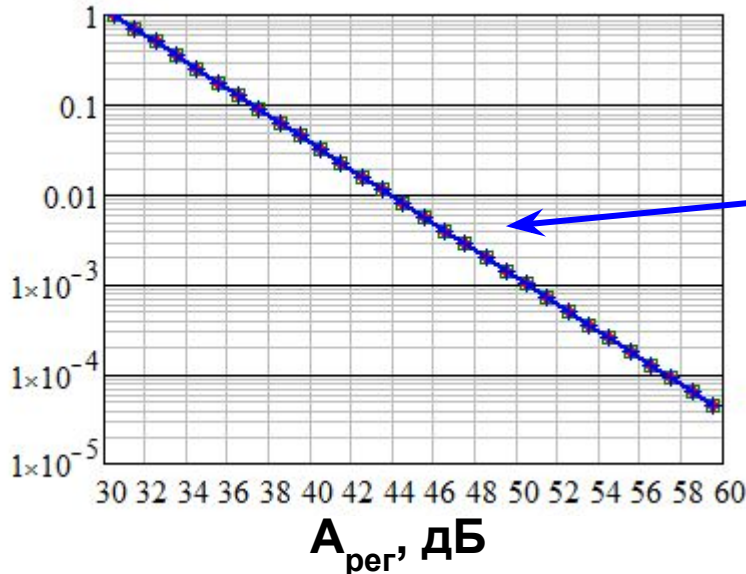


**однозвенный
закон**

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

затухание (β)

- 0 дБ/м
- 100 дБ/м
- 1000 дБ/м



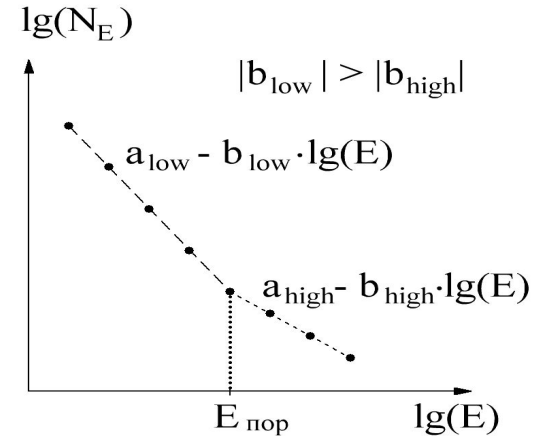
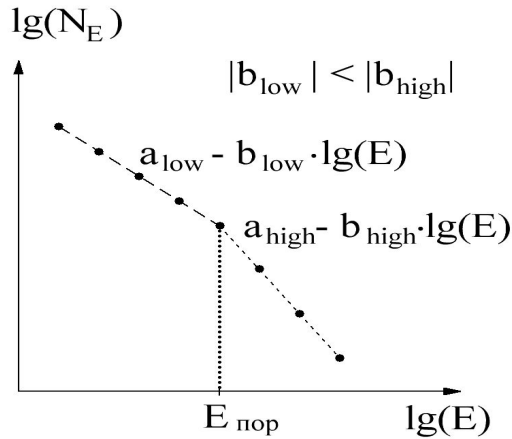
**наклон соответствует
наклону исходного
распределения и не
зависит от затухания**

Оценка влияния факторов:

распределение регистрируемых импульсов по амплитудам

исходное распределение событий по энергиям

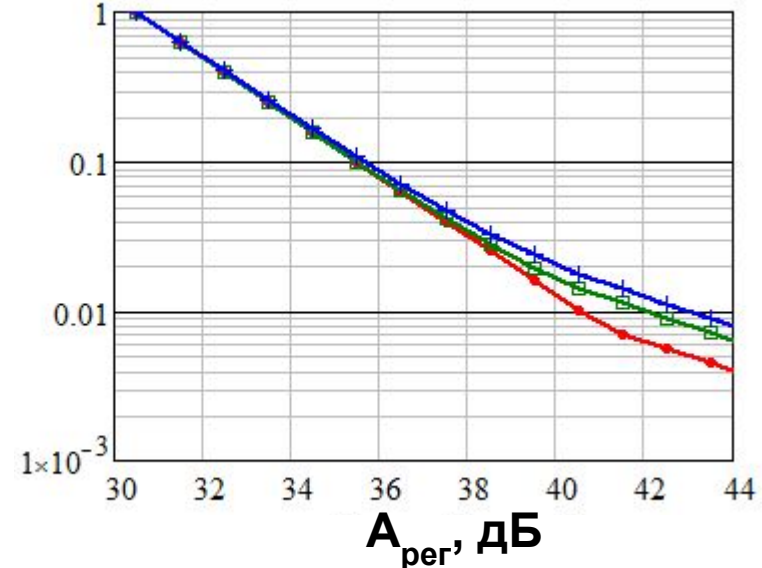
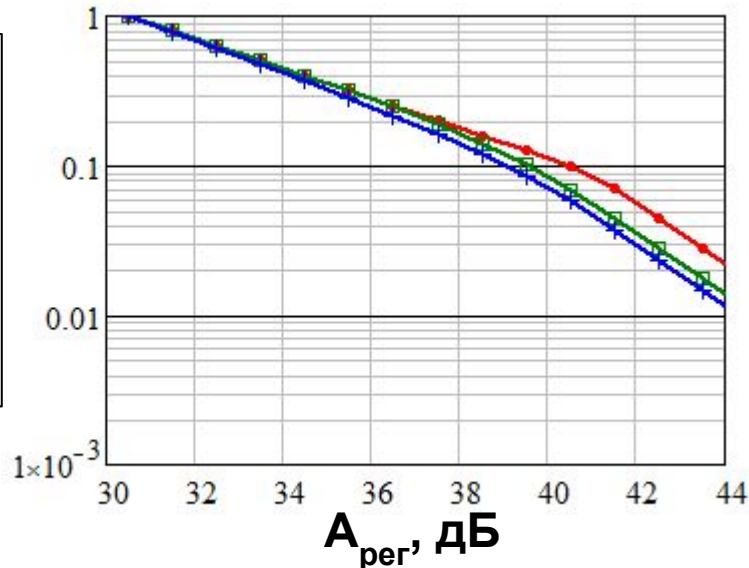
**ДВУХЗВЕННЫЙ
ЗАКОН**



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

затухание (β)

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

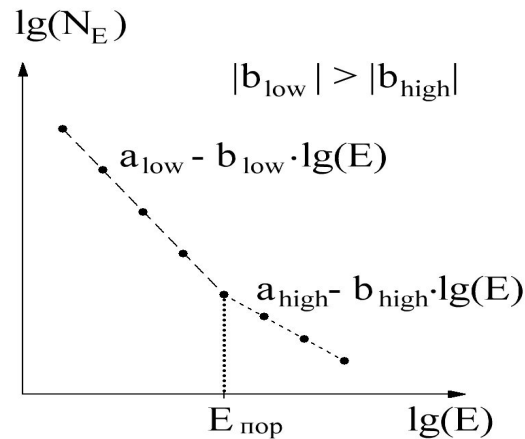
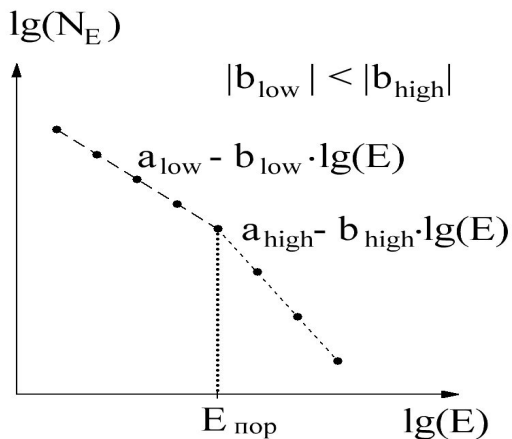


Оценка влияния факторов:

распределение регистрируемых импульсов по амплитудам

исходное распределение событий по энергиям

ДВУХЗВЕННЫЙ
ЗАКОН



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

затухание (β)

0 дБ/м

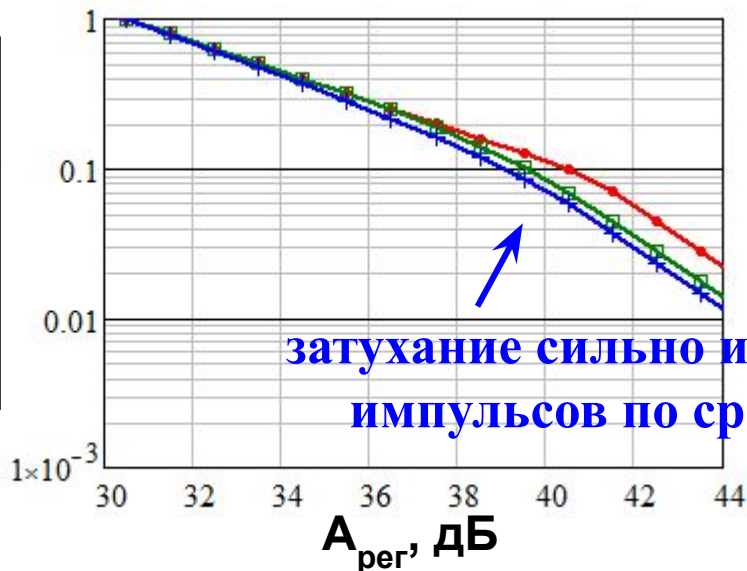
•••••

100 дБ/м

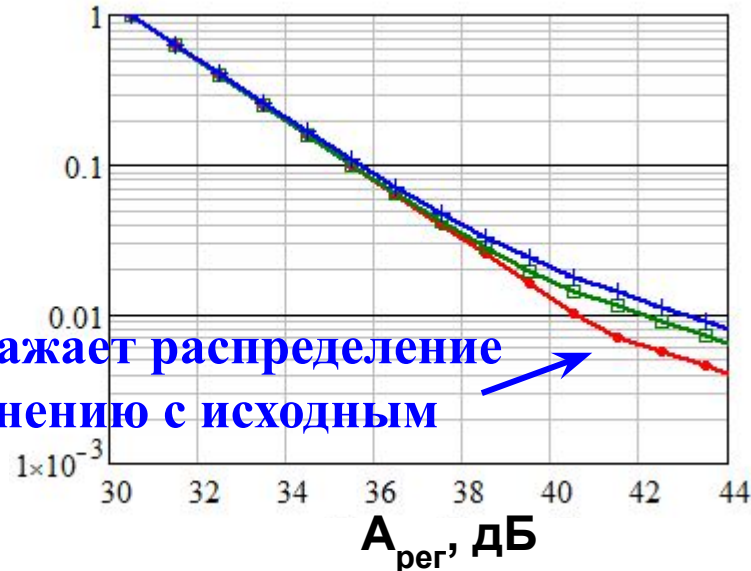
□□□□□

1000 дБ/м

+ + + + +



затухание сильно искажает распределение импульсов по сравнению с исходным



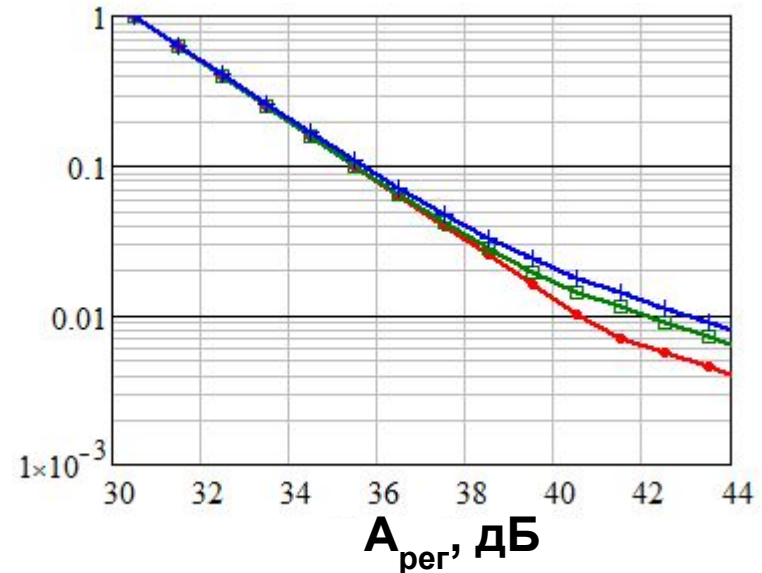
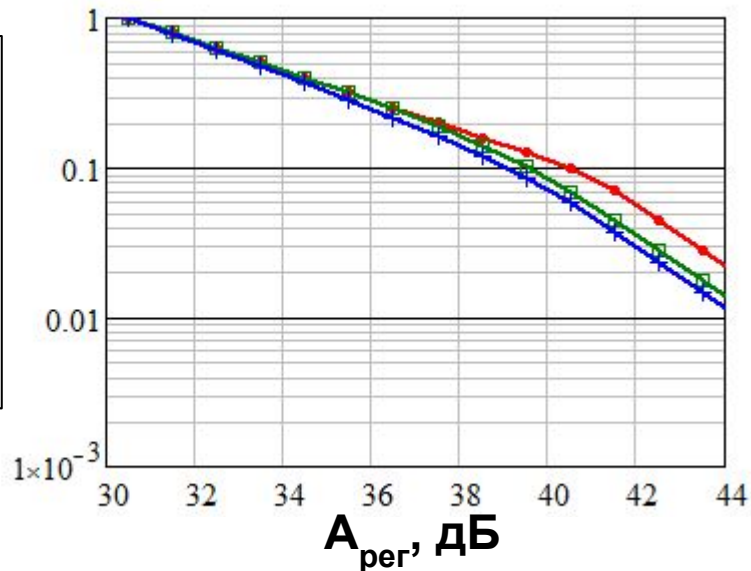
Анализ экспериментальных данных:

методика оценки характера закона распределения и b-value

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

затухание (β)

0 дБ/м
100 дБ/м
1000 дБ/м

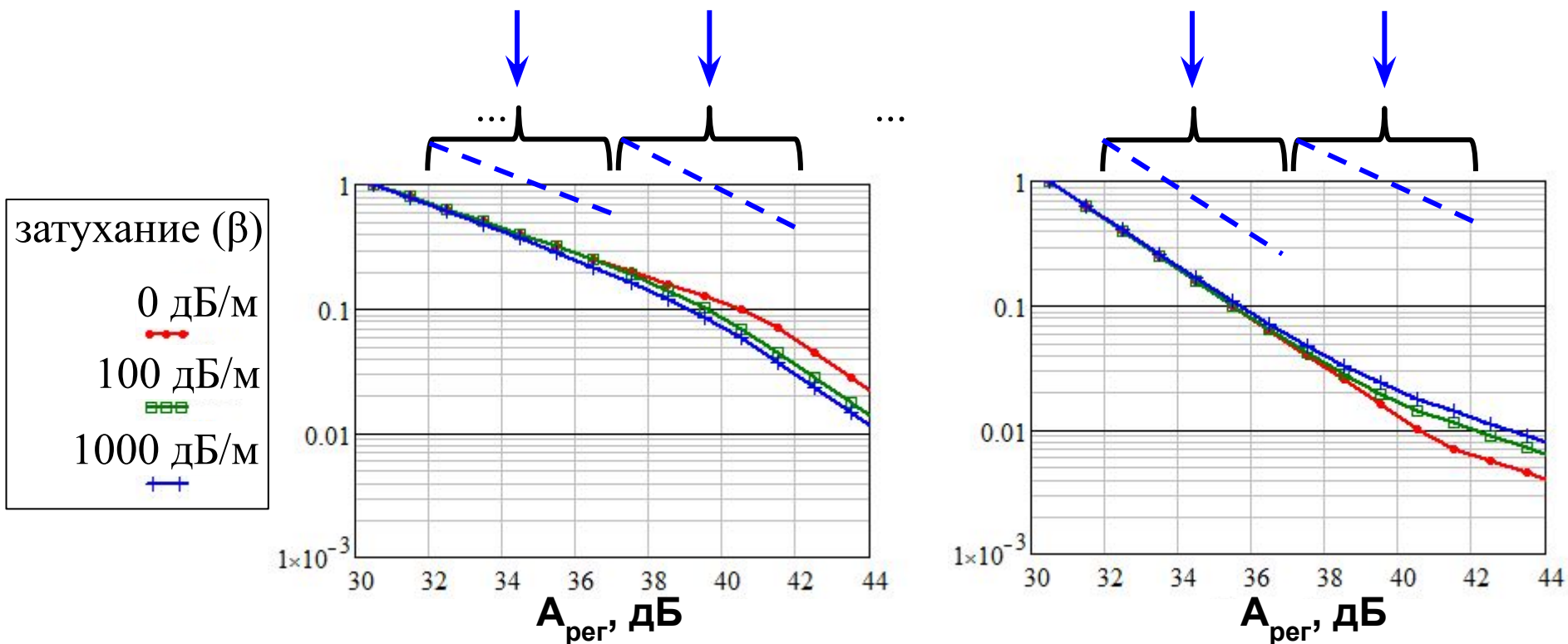


Анализ экспериментальных данных:

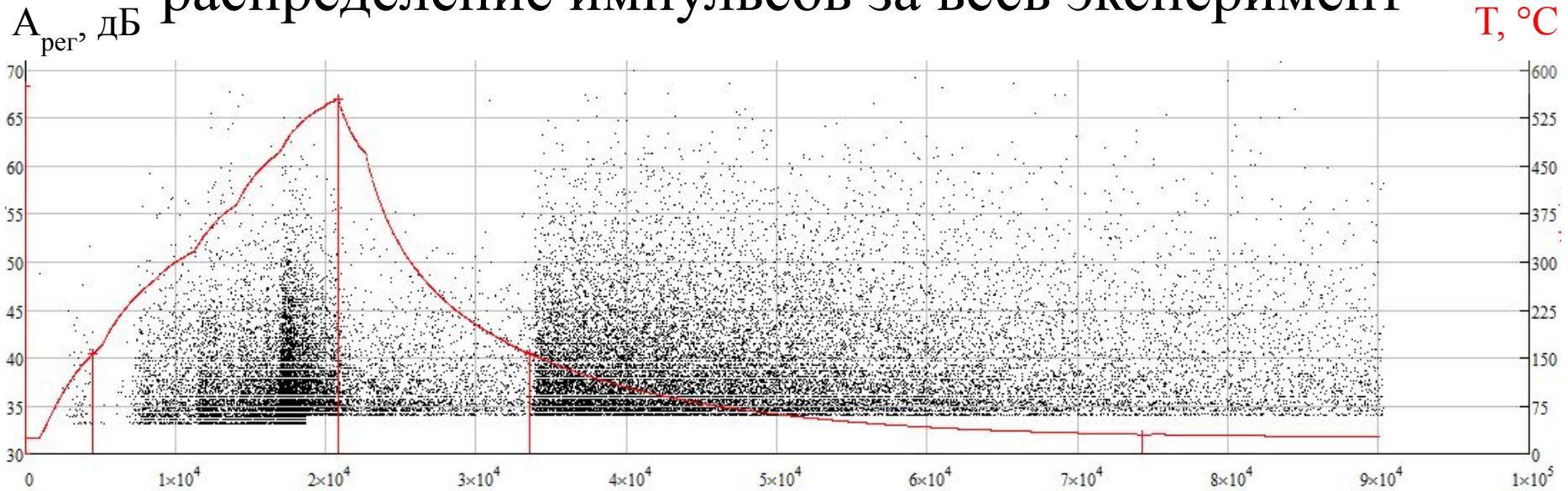
методика оценки характера закона распределения и b-value

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

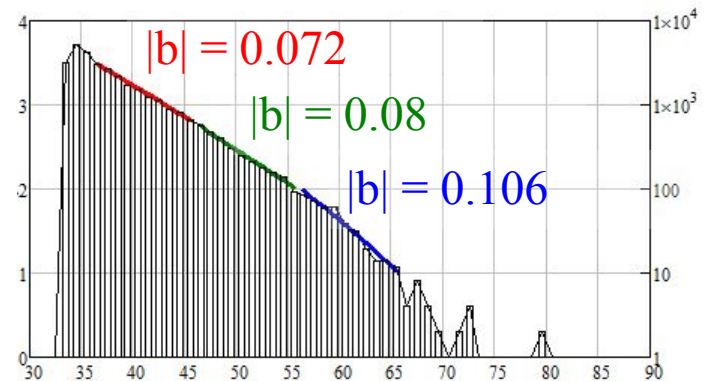
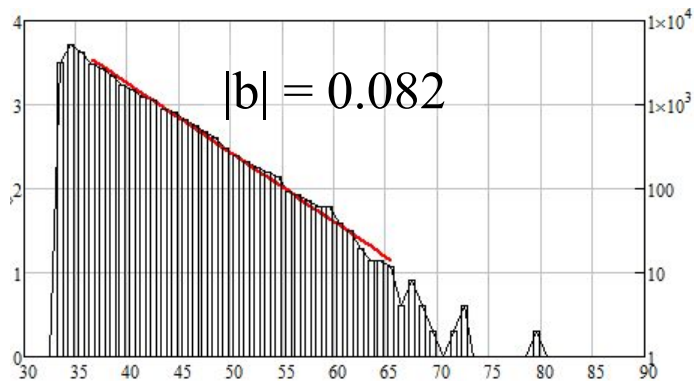
Целесообразен анализ в двух и более соседних поддиапазонах амплитуд



Анализ экспериментальных данных – примеры: распределение импульсов за весь эксперимент



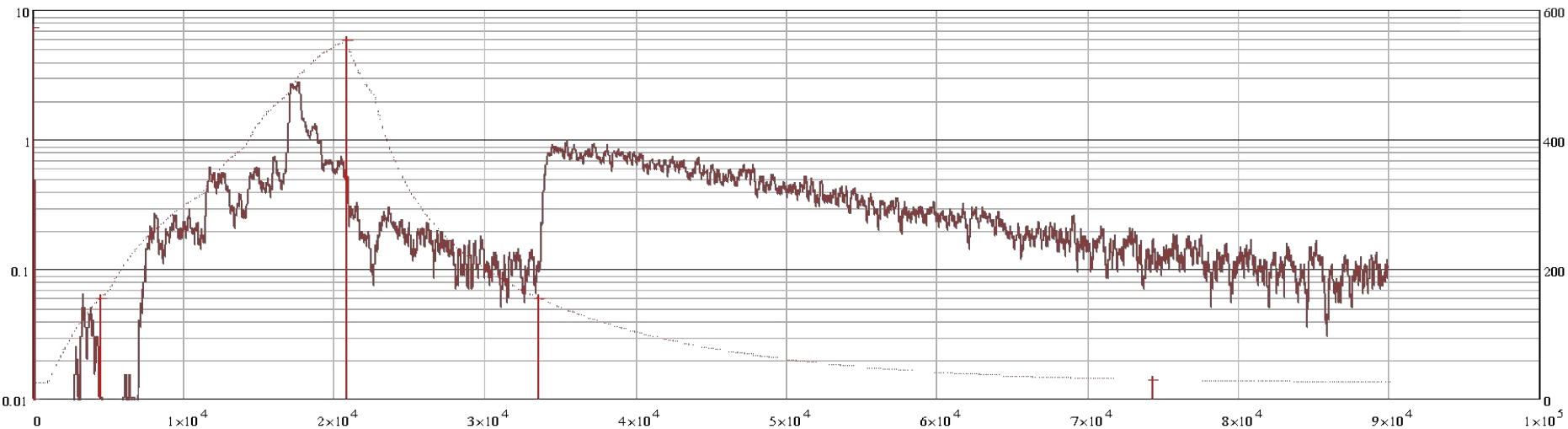
Распределение импульсов по амплитудам за весь эксперимент



Анализ экспериментальных данных – примеры: этапы эксперимента

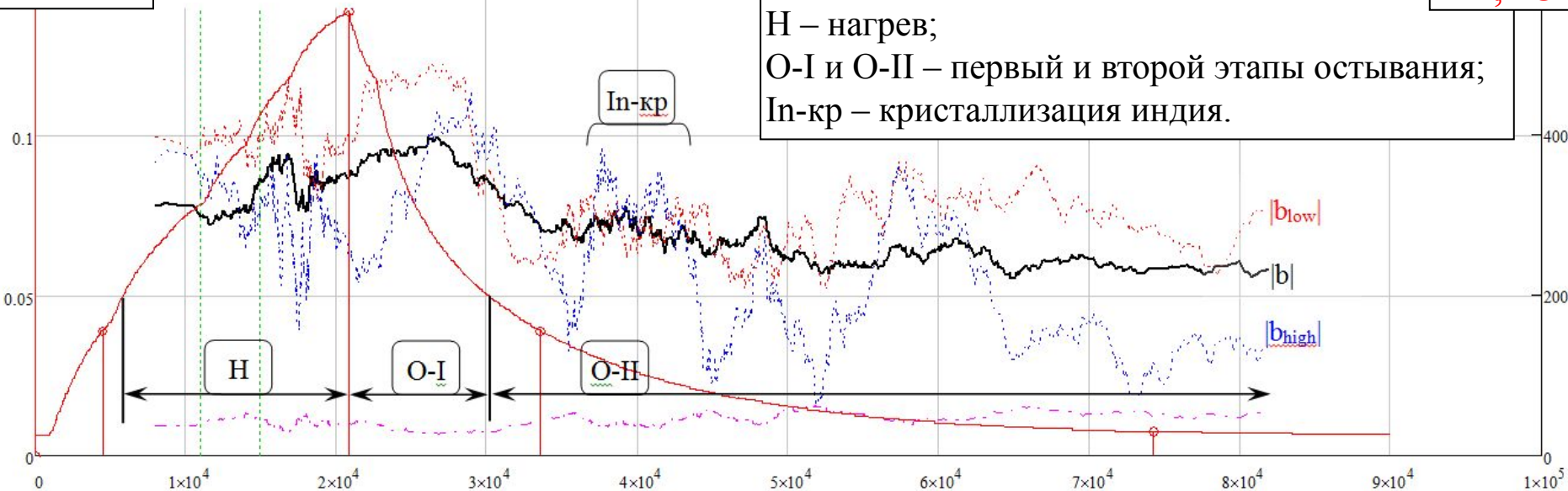
актив. ТАЭ, имп/сек

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

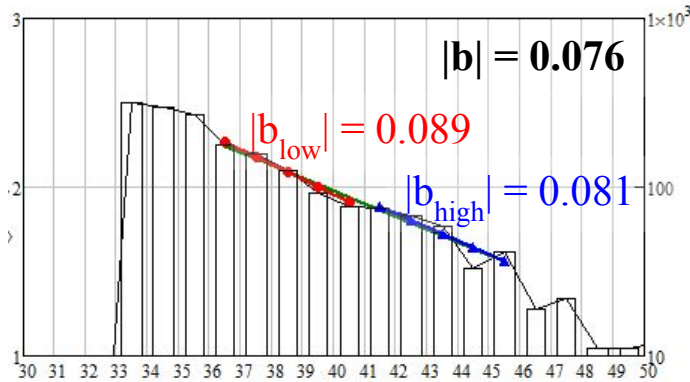


b-value

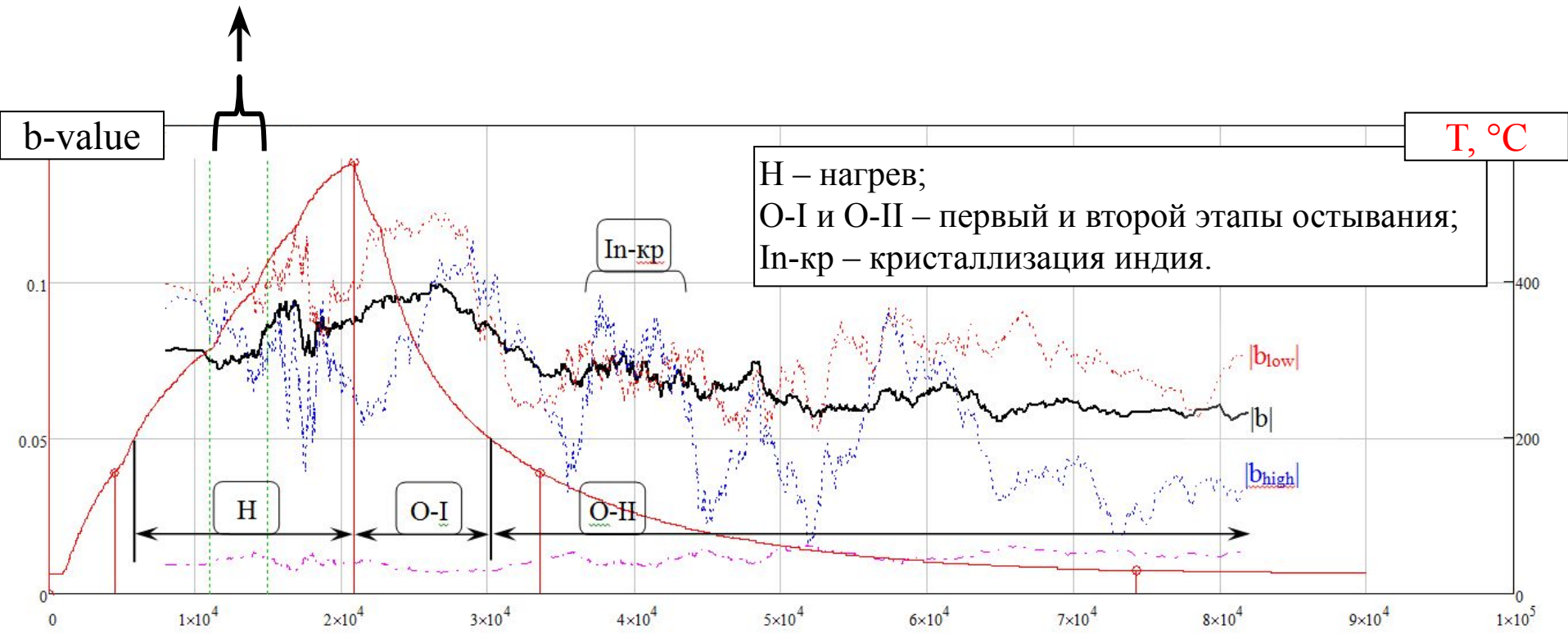
$T, ^\circ\text{C}$



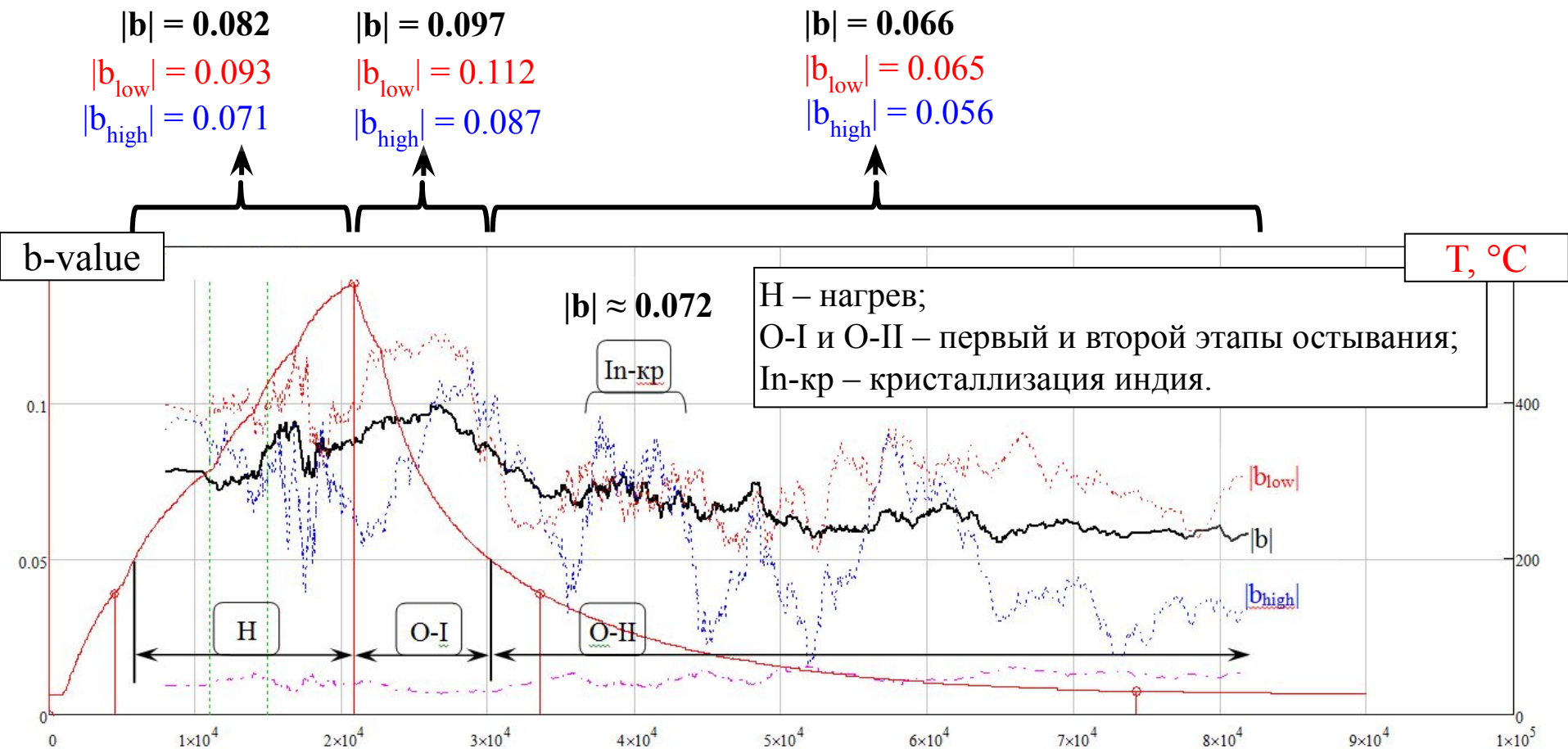
Анализ экспериментальных данных – примеры: этапы эксперимента



выборочная проверка
(~900 импульсов в
выборке)



Анализ экспериментальных данных – примеры: этапы эксперимента



Анализ экспериментальных данных: инициация ТАЭ градиентом температуры



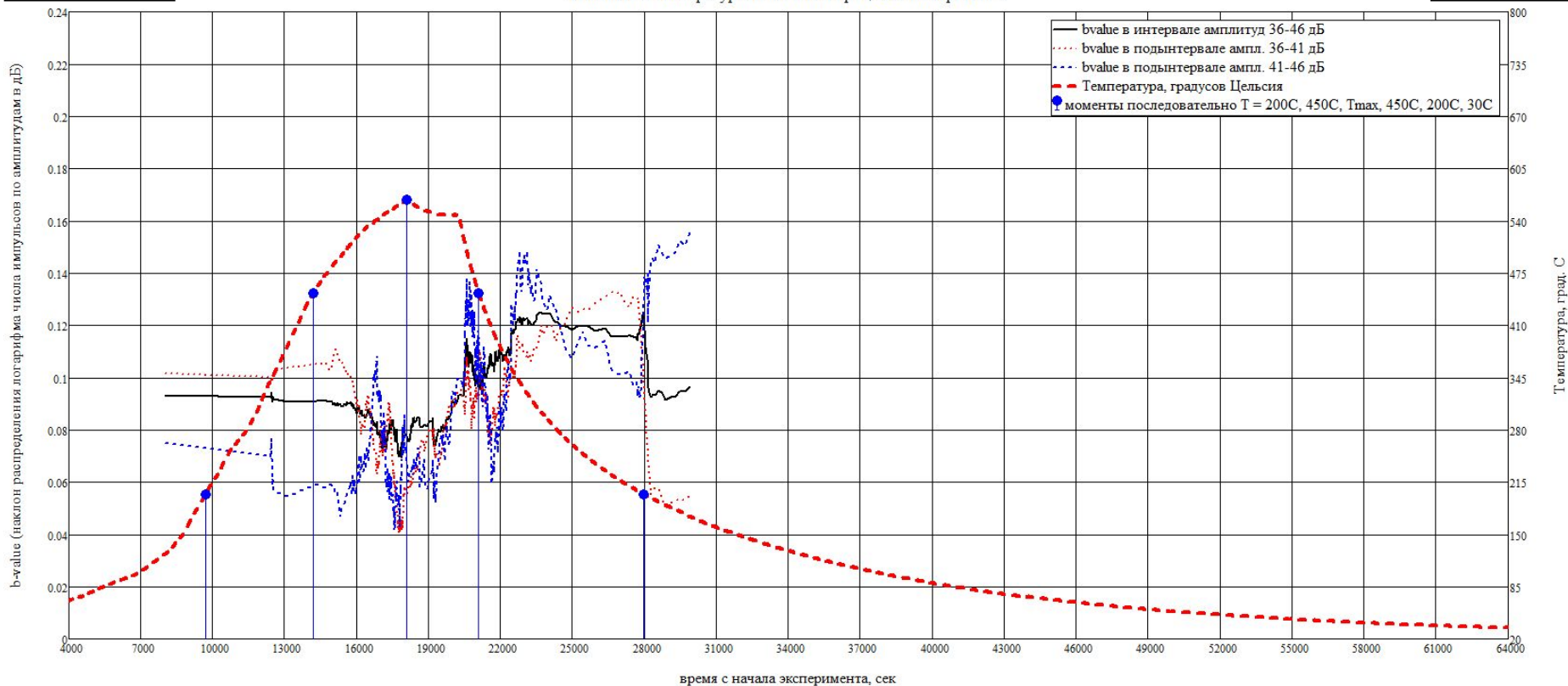
Анализ экспериментальных данных: инициация ТАЭ градиентом температуры

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



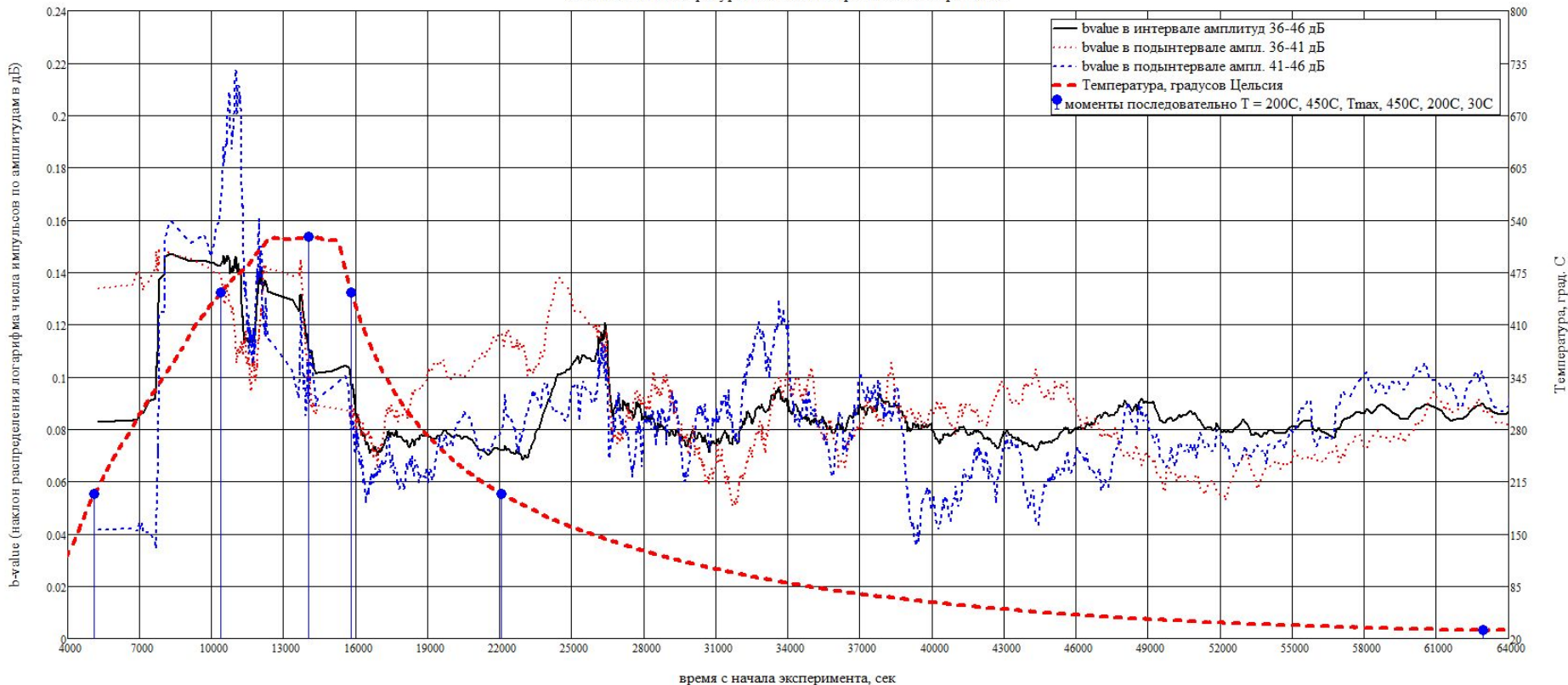
Анализ экспериментальных данных: инициация ТАЭ градиентом температуры

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

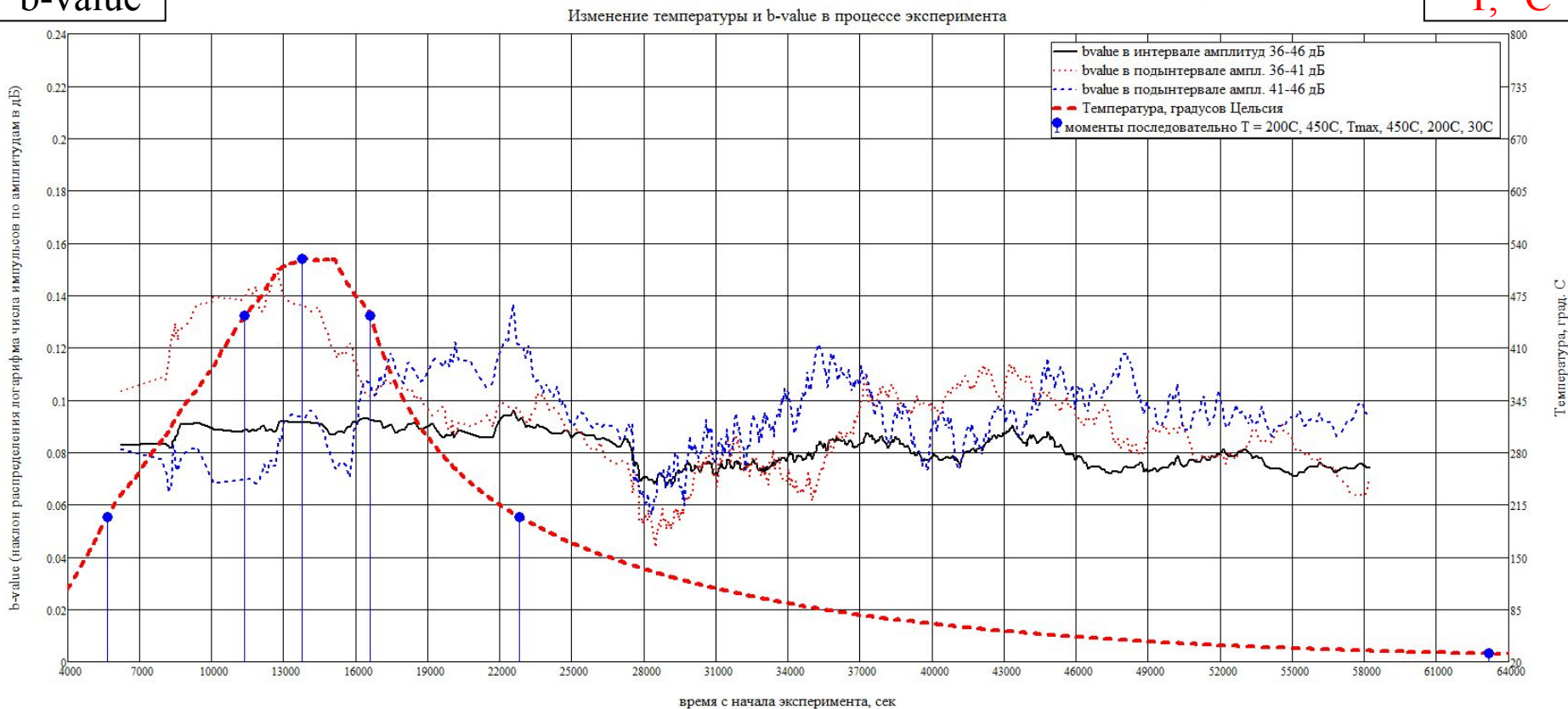


Анализ экспериментальных данных: инициация ТАЭ градиентом температуры

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

b-value

T, °C



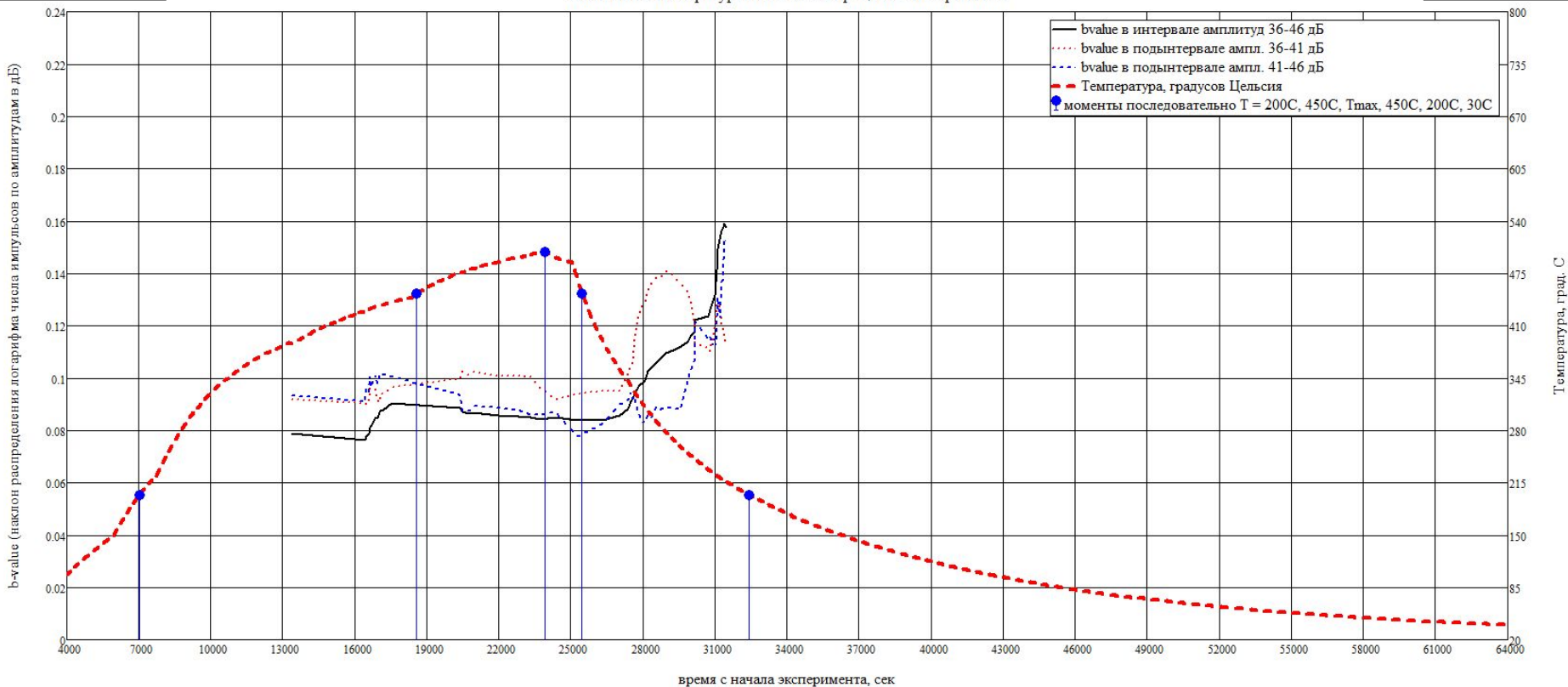
Анализ экспериментальных данных: инициация ТАЭ градиентом температуры

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

b-value

T, °C

Изменение температуры и b-value в процессе эксперимента



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_{per} , дБ

