

ХI международная школа-семинар
“Физические основы прогнозирования
разрушения горных пород”

Горный институт УрО РАН, 14 – 18 октября 2019 г.

Выделение стадий термического разрушения
горных пород по данным о статистике импульсов
акустической эмиссии

Казначеев П.А.,
Майбук З.-Ю.Я.,
Пономарев А.В.
(ИФЗ РАН)

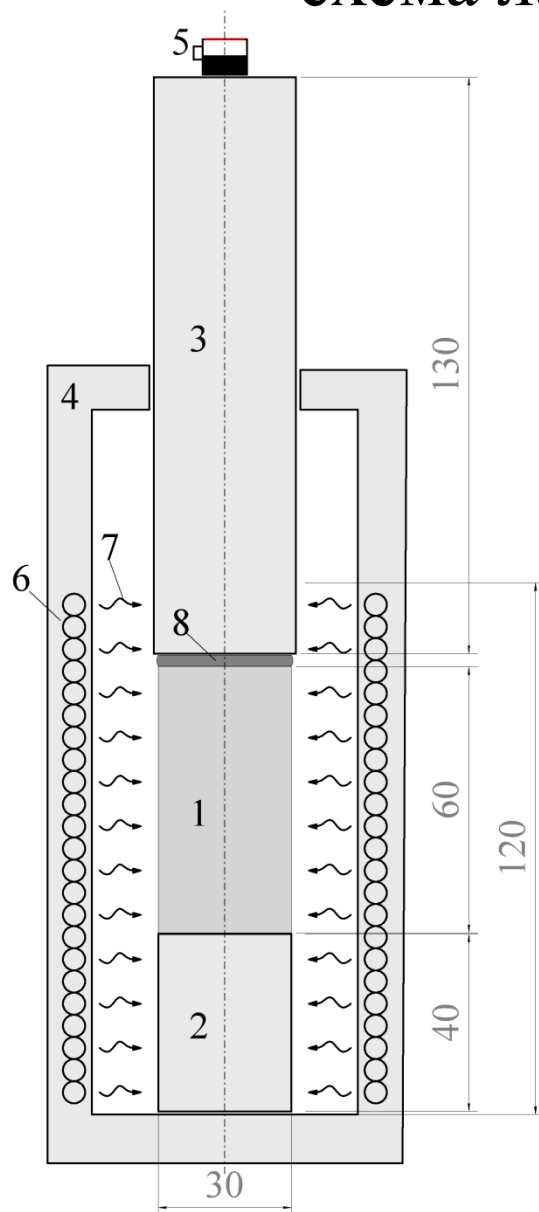
Пермь, 2019

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.

→ Отслеживание эволюции возможно только по статистическим параметрам потока импульсов ТАЭ, регистрируемых одиночным датчиком АЭ.

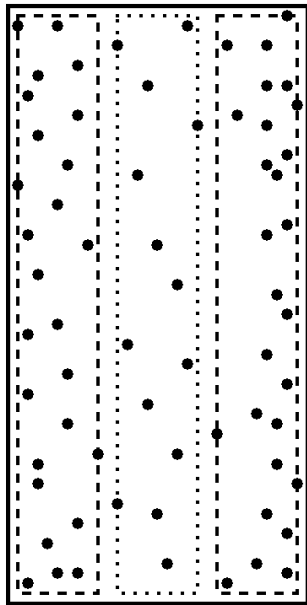
Исследование термических разрушений горных пород: схема лабораторной установки



- 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.

Различные механизмы термически стимулированной ТАЭ

неоднородность распределения
событий в радиальном
направлении



инициация температурой и
инициация скоростью изменения
температуры (градиентом)



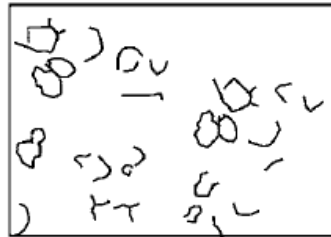
Различные механизмы термически стимулированной ТАЭ

Intragranular microcracks

Grain boundary microcracks

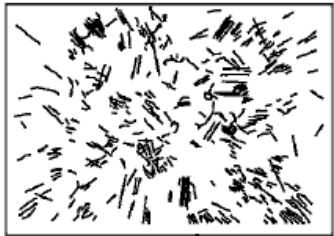


RT

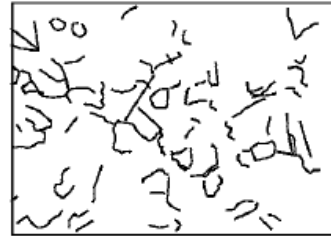


$\rho_{IG} \sim 4 \text{ mm/mm}^2$

$\rho_{GB} = 1.4 \text{ mm/mm}^2$

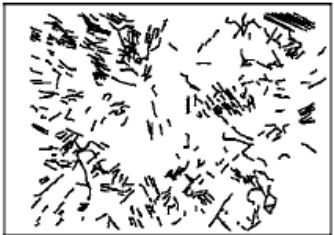


250° C

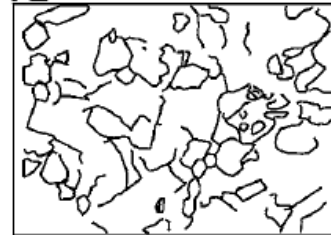


$\rho_{IG} \sim 4 \text{ mm/mm}^2$

$\rho_{GB} = 2.3 \text{ mm/mm}^2$

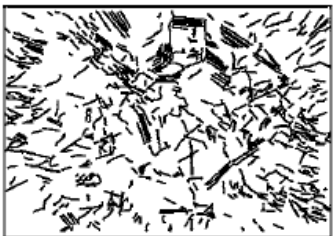


450° C

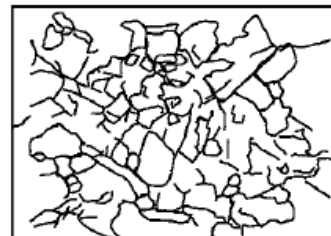


$\rho_{IG} \sim 4 \text{ mm/mm}^2$

$\rho_{GB} = 3.2 \text{ mm/mm}^2$



650° C

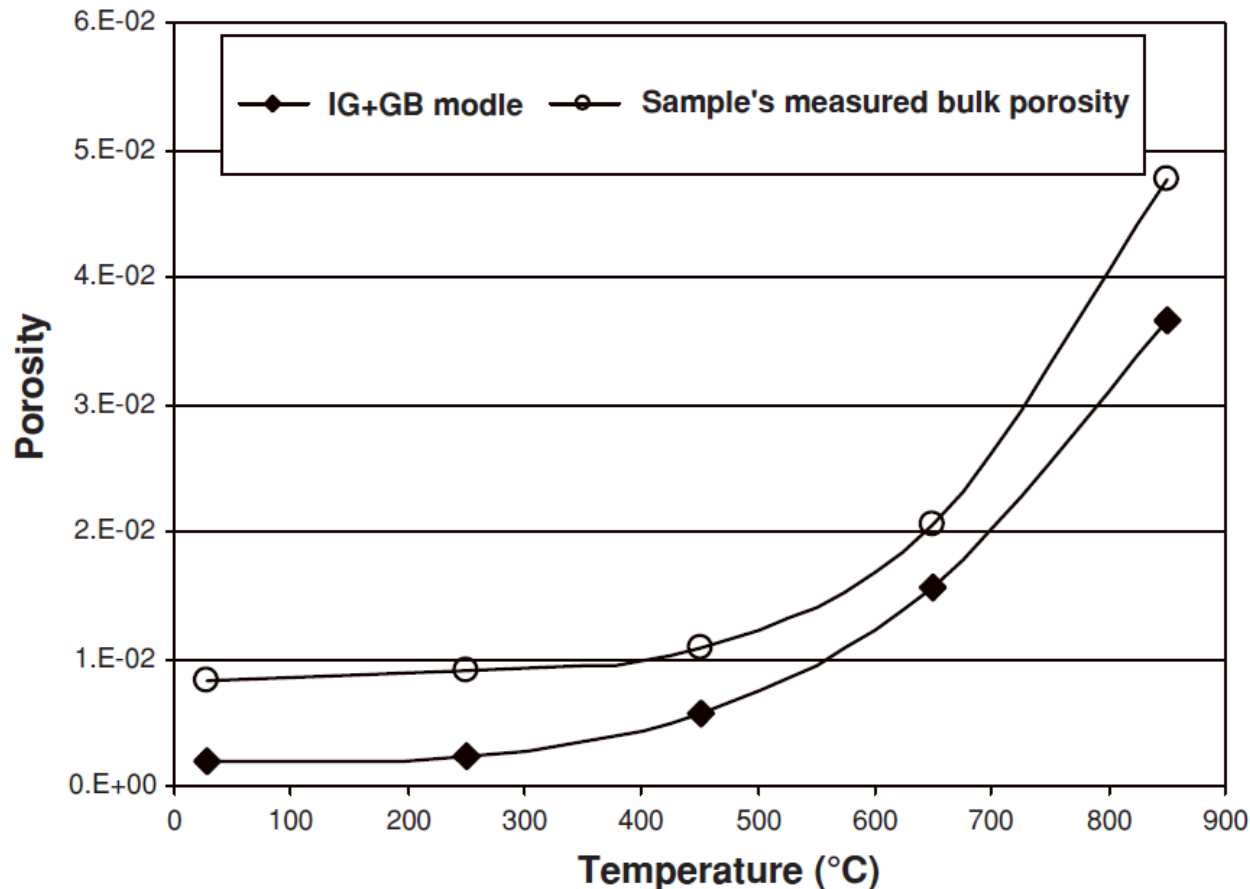


$\rho_{IG} \sim 5.7 \text{ mm/mm}^2$

$\rho_{GB} = 3.7 \text{ mm/mm}^2$

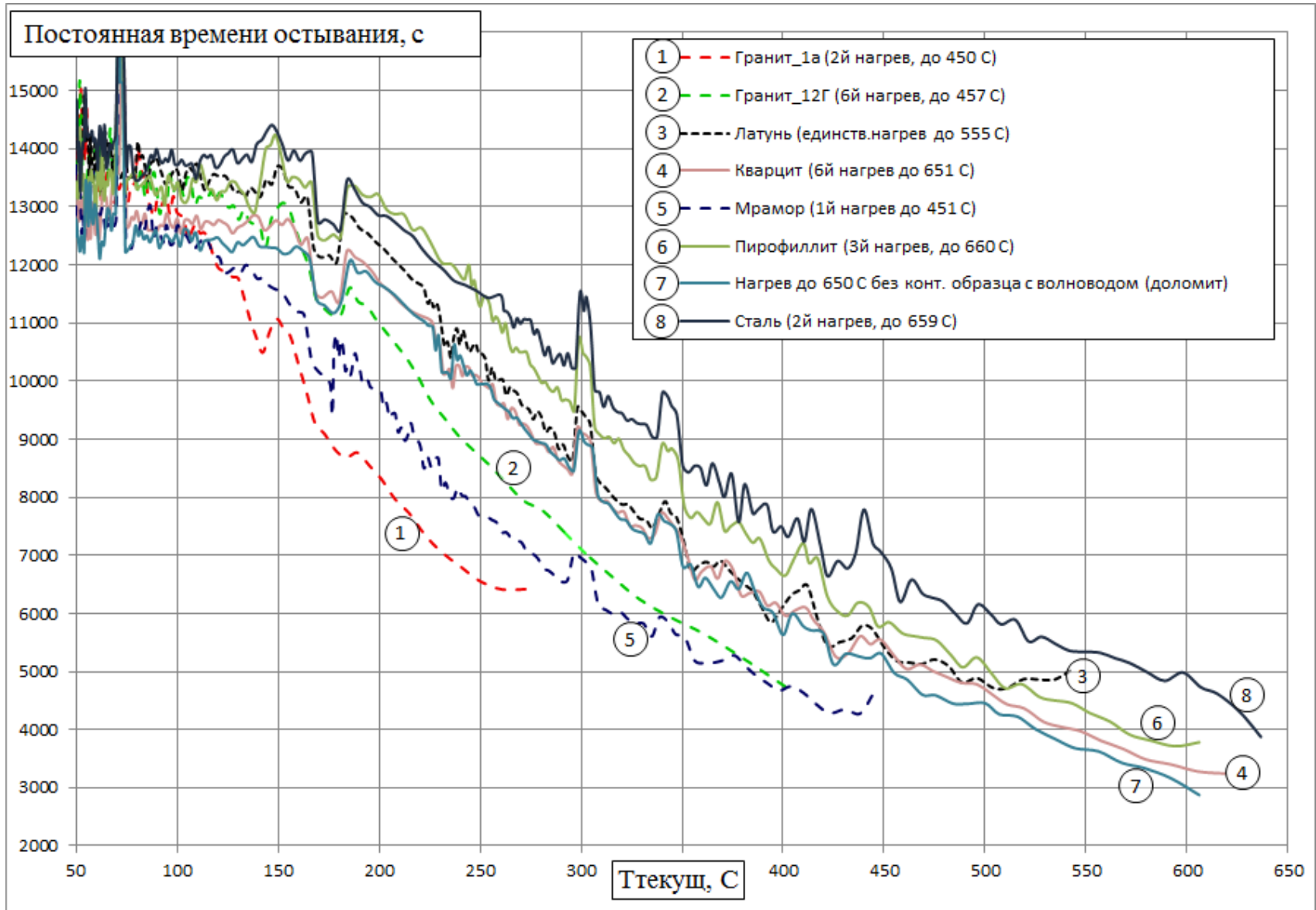
Изменение плотности внутризерновых (слева) и межзерновых (справа) трещин в зависимости от максимальной температуры нагрева, для гранита Вестерли (по [Nasseri M.H.B., Schubnel A., Benson P.M. et al., 2009])

Различные механизмы термически стимулированной ТАЭ

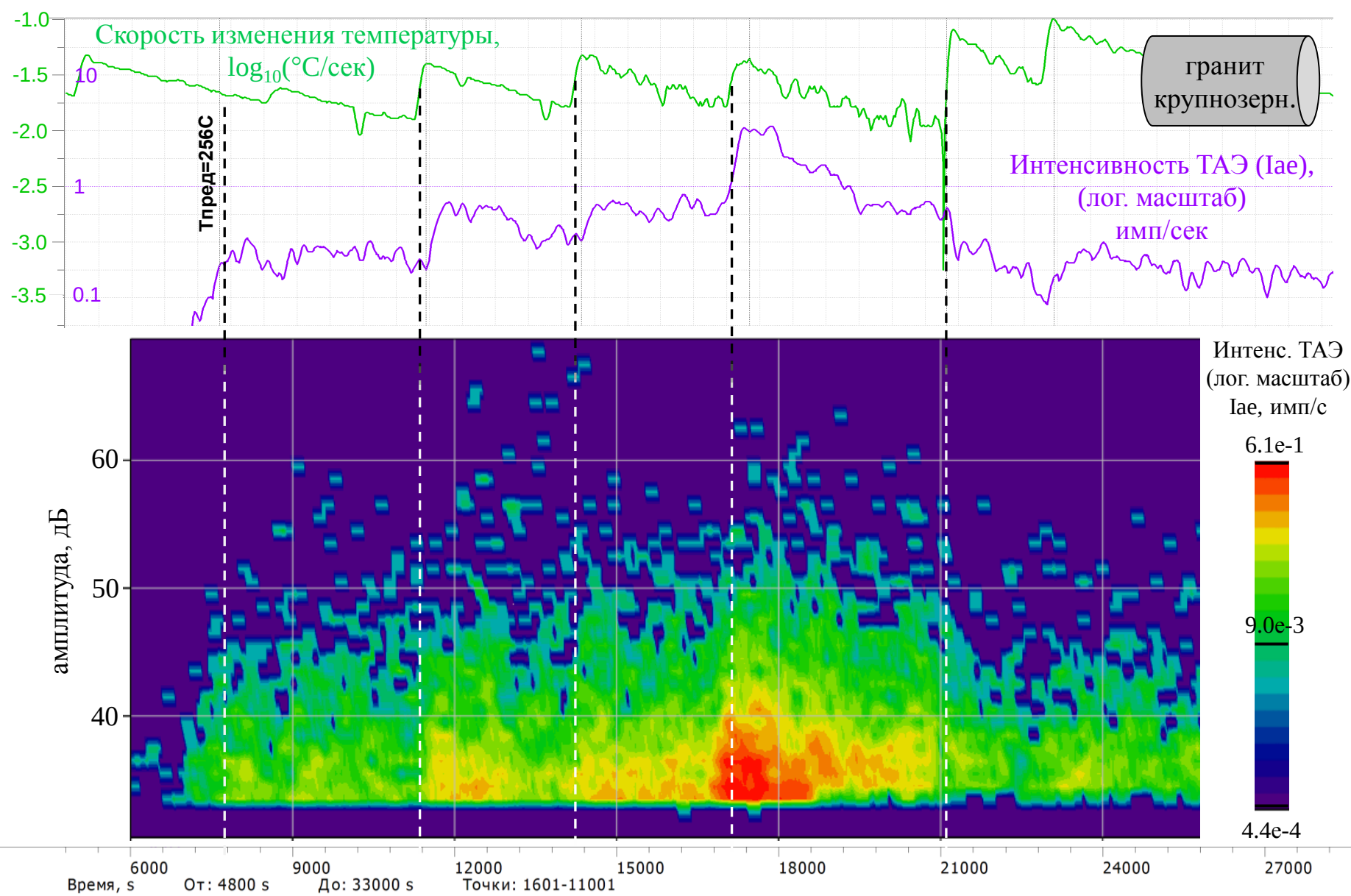


Изменение пористости (расчетное и измеренное – залитые ромбики и полые кружочки соответственно) по результатам исследования гранита Вестерли (по [Nasseri M.H.B., Schubnel A., Benson P.M. et al., 2009])

Различные механизмы термически стимулированной ТАЗ: фазовые переходы



Различные механизмы термически стимулированной ТЭЭ: модуляция интенсивности эмиссии скоростью нагрева

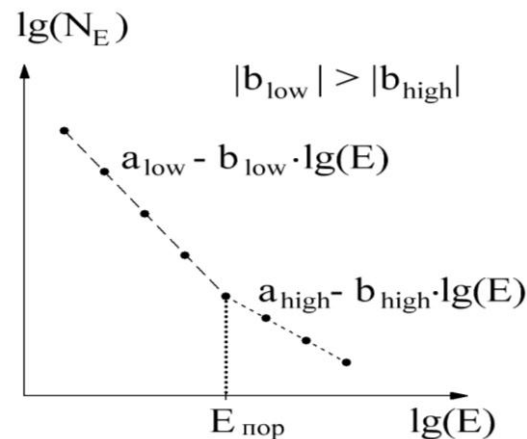
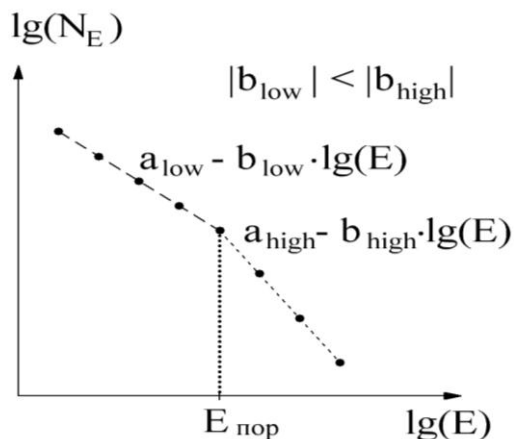


Оценка влияния факторов:

распределение регистрируемых импульсов по амплитудам

исходное распределение событий по энергиям

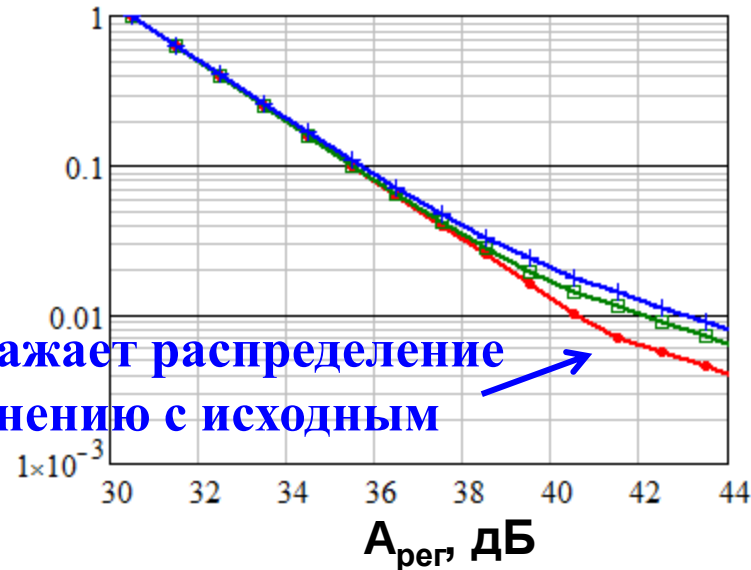
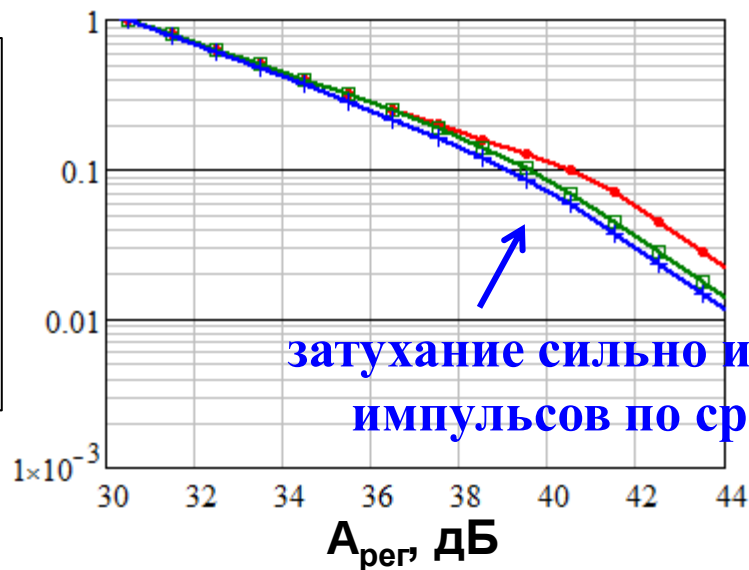
двухзвенный
закон



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

затухание (β)

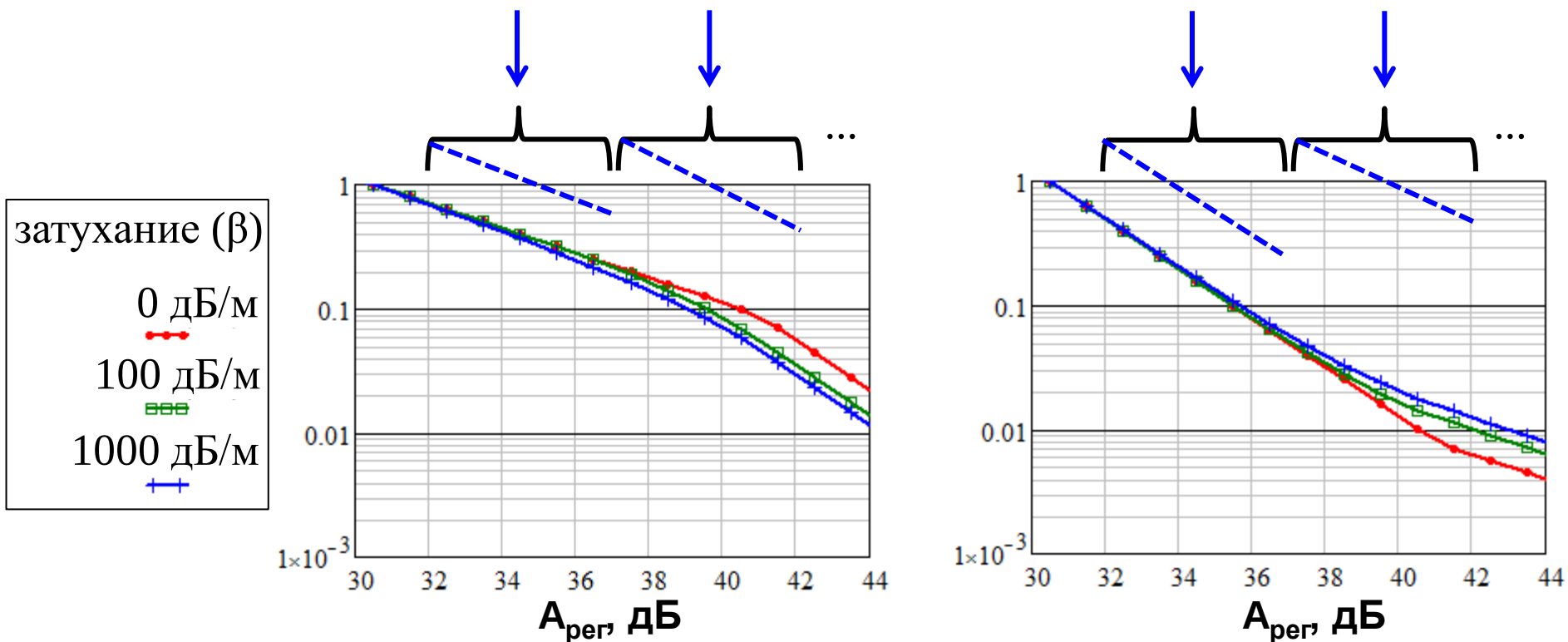
- 0 дБ/м (red dots)
- 100 дБ/м (green squares)
- 1000 дБ/м (blue pluses)



Анализ экспериментальных данных: методика оценки характера закона распределения и b-value

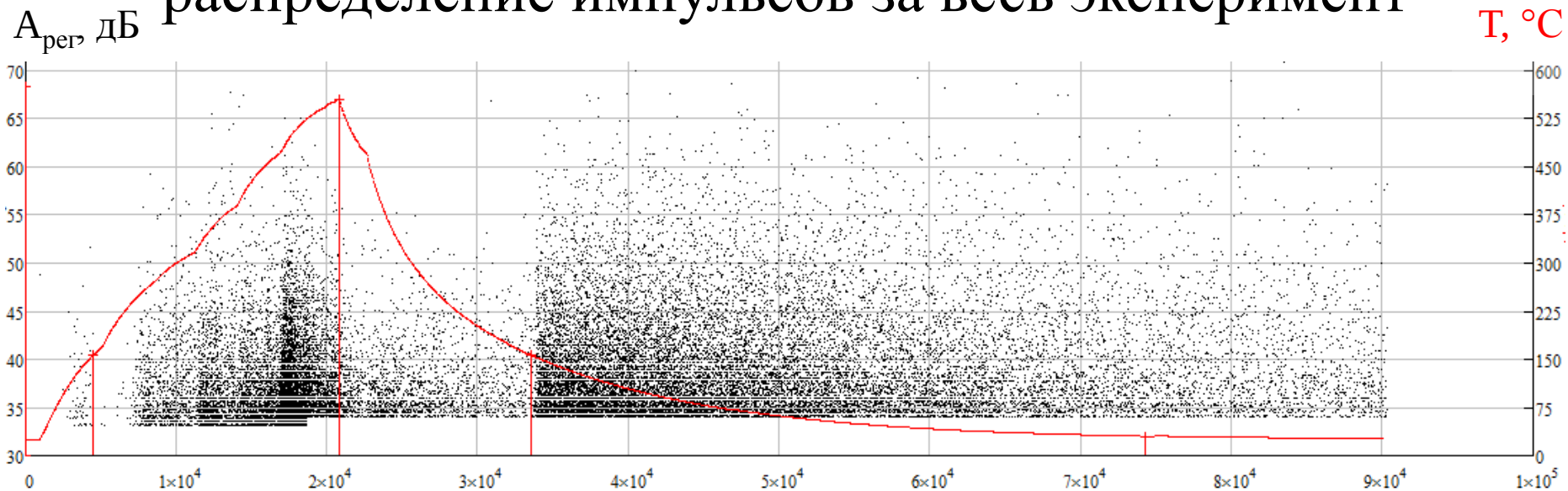
- Выявление характера распределения – однозвенный или более сложный
- Оценка b-value

Целесообразен анализ в двух и более соседних поддиапазонах амплитуд

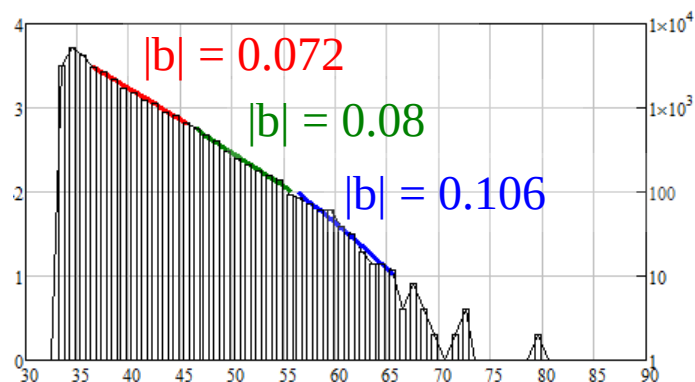
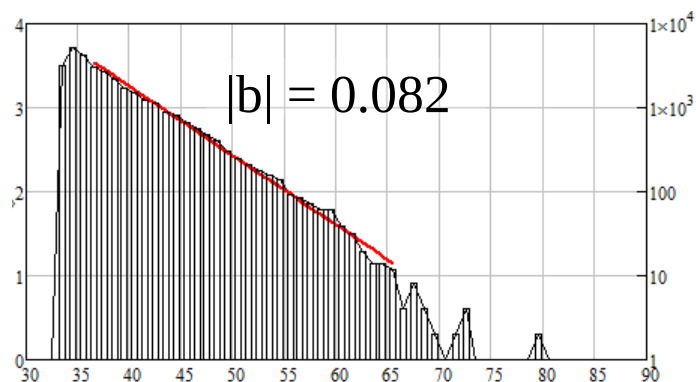


Анализ экспериментальных:

распределение импульсов за весь эксперимент



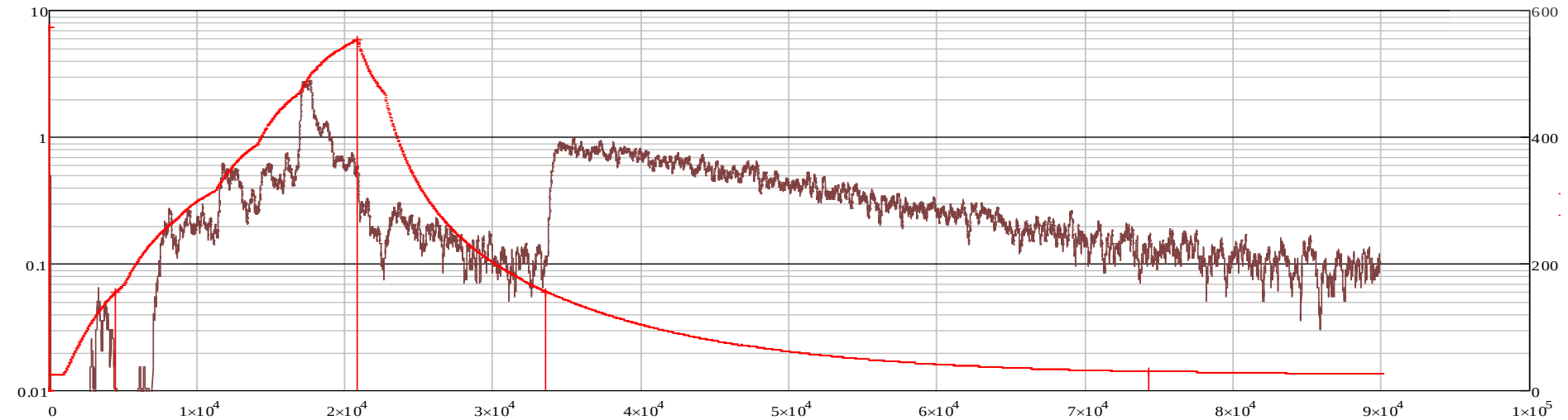
Распределение импульсов по амплитудам за весь эксперимент



Анализ экспериментальных данных: этапы развития термического разрушения

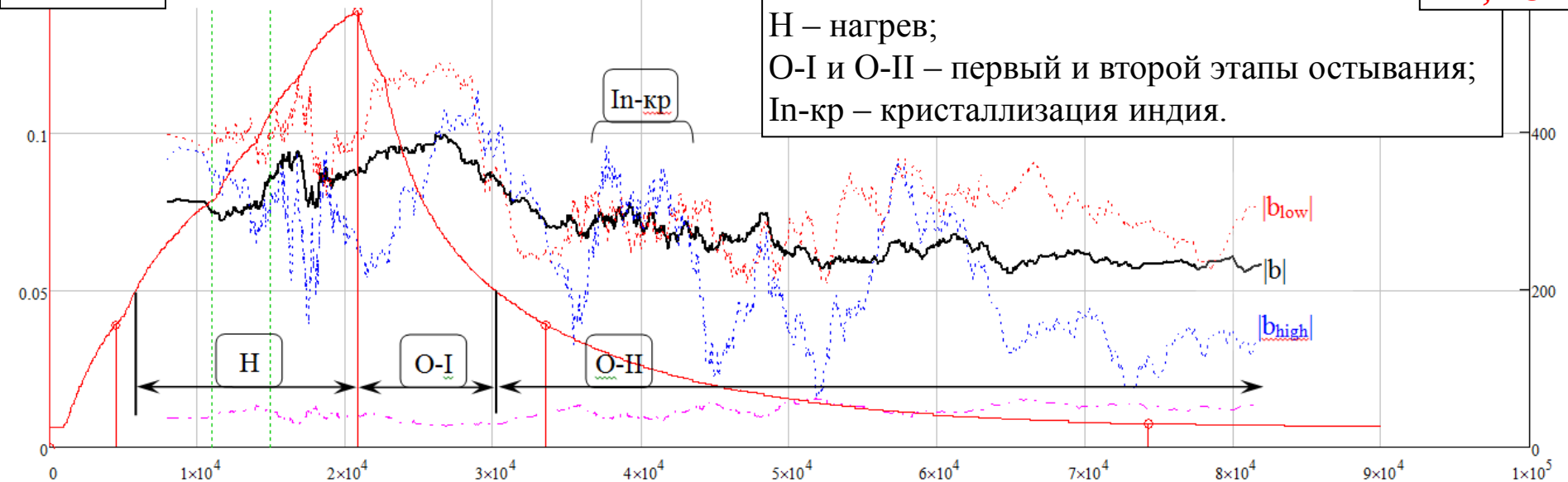
актив. ТАЭ, имп/сек

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

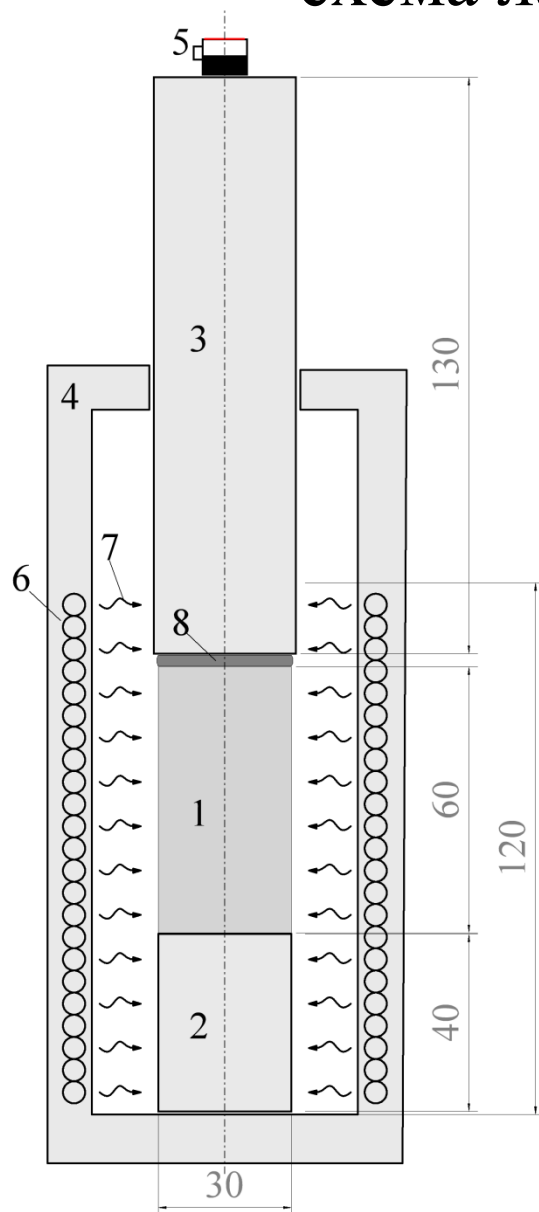


b-value

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



Исследование термических разрушений горных пород: схема лабораторной установки

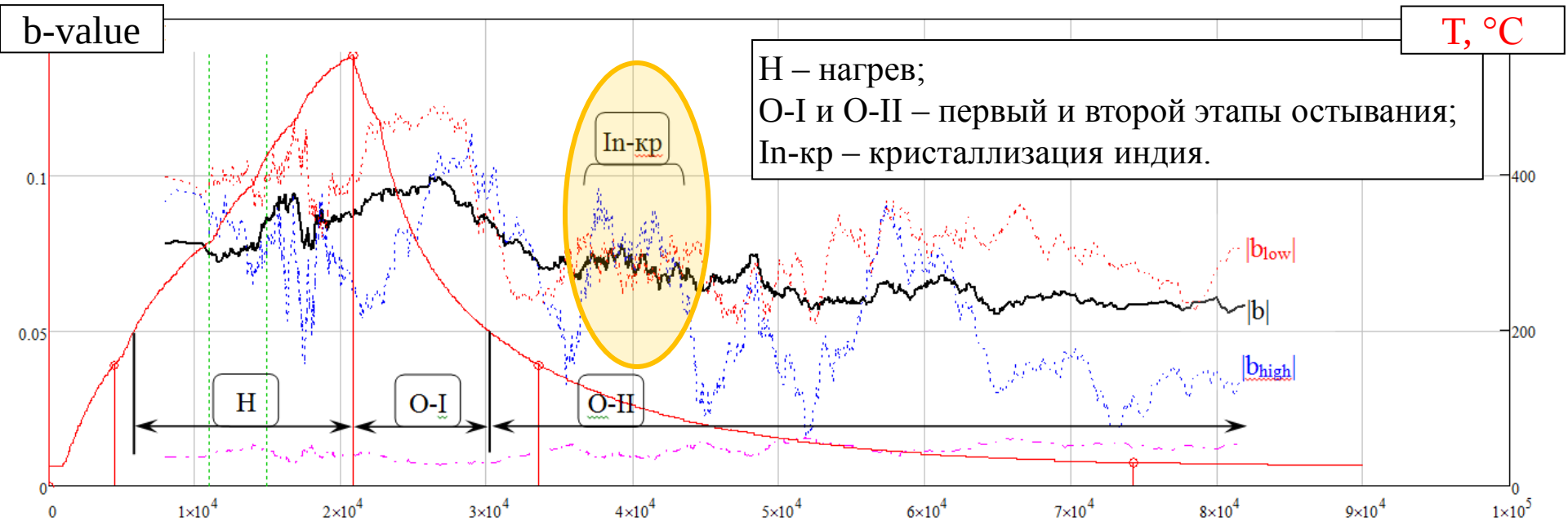
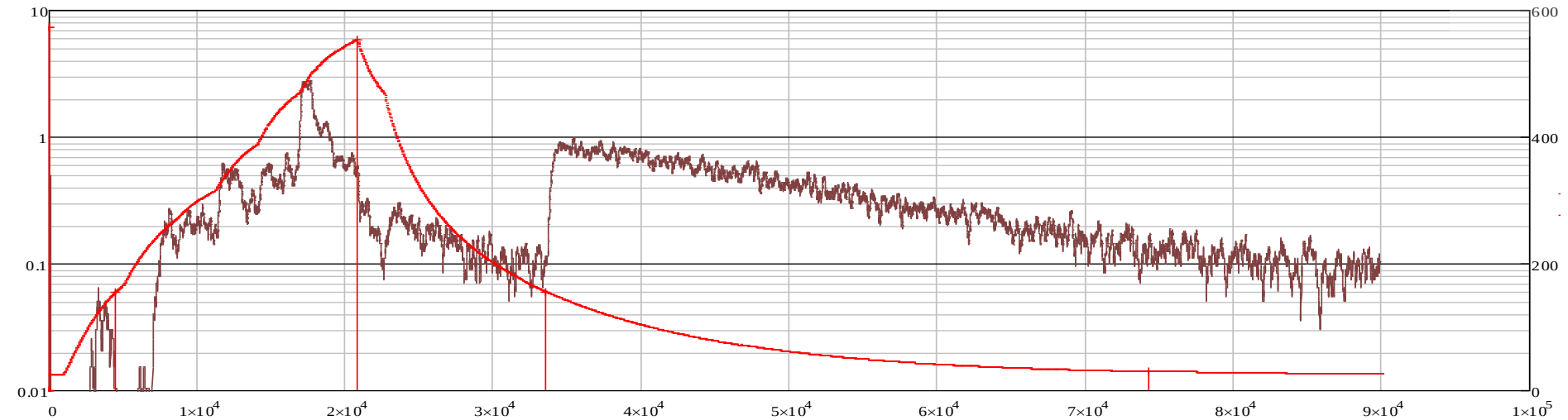


- 1 - исследуемый цилиндрический образец горной породы;
- 2 - подставка;
- 3 - цилиндрический акустический волновод;
- 4 - корпус печи;
- 5 - датчик интегральной акустики;
- 6 - нагревательный элемент;
- 7 - тепловое излучение (условно);
- 8 - прослойка из индия.

Анализ экспериментальных данных: этапы развития термического разрушения

актив. ТАЭ, имп/сек

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



Анализ экспериментальных данных: этапы развития термического разрушения



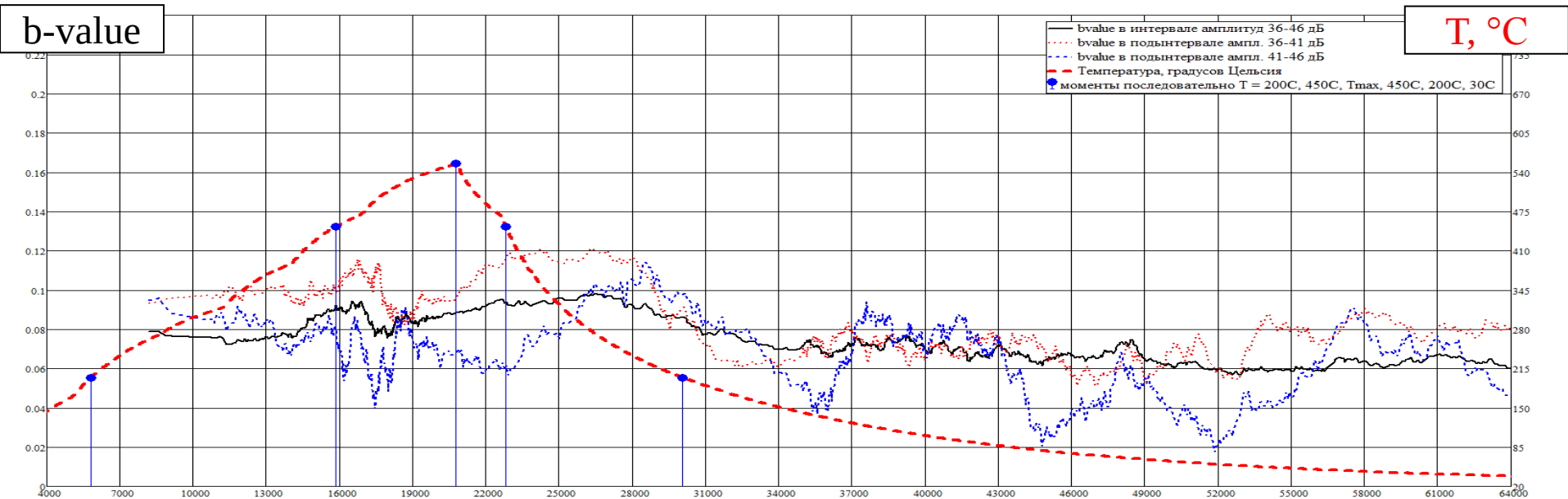
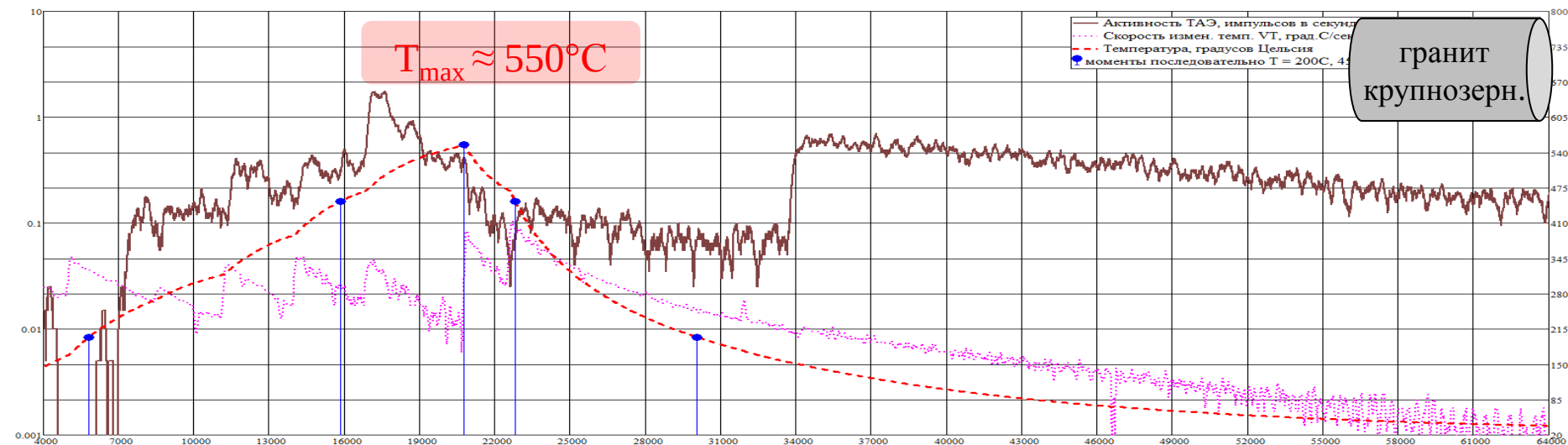
Анализ экспериментальных данных: инициация ТАЭ градиентом температуры



Анализ экспериментальных данных: изменение b-value при повторных нагревах

актив. ТАЭ, имп/сек

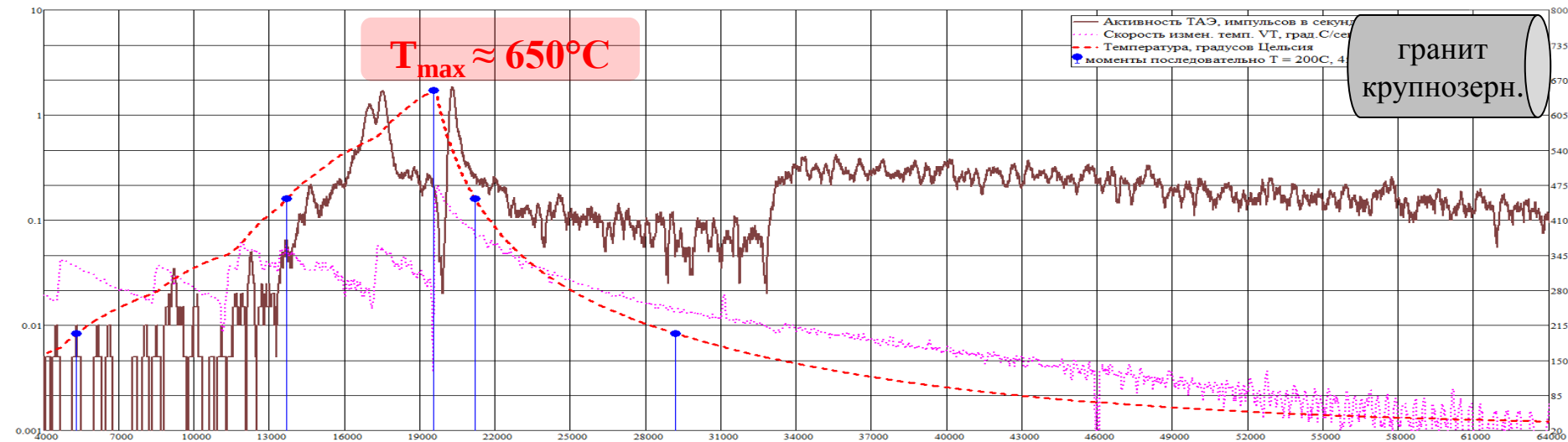
T, °C



Анализ экспериментальных данных: изменение b-value при повторных нагревах

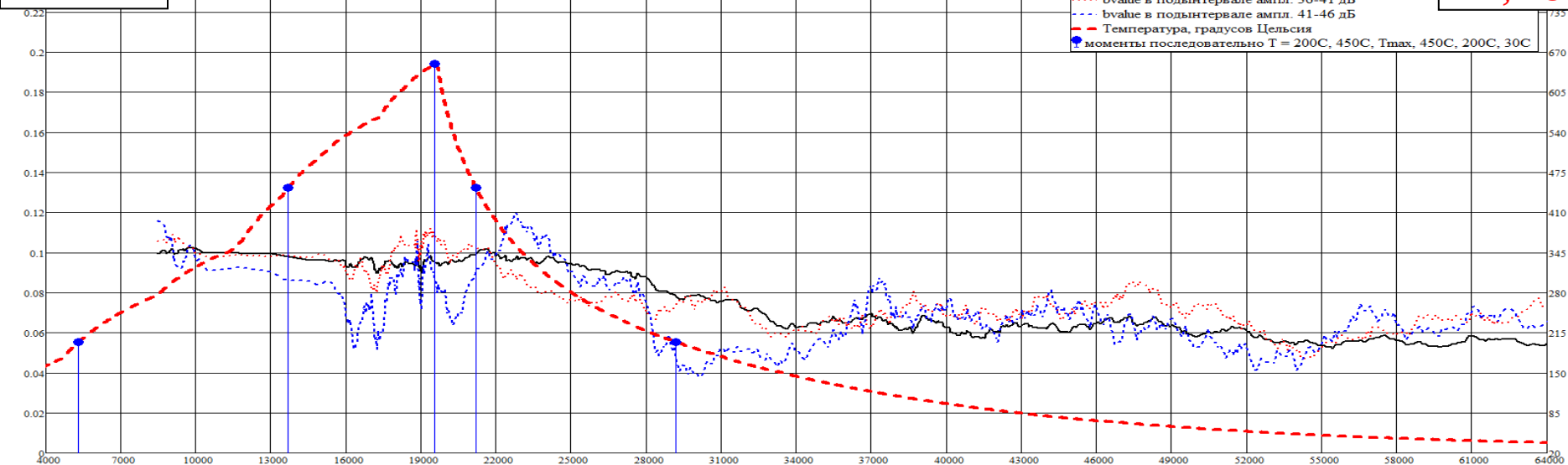
актив. ТАЭ, имп/сек

T, °C



b-value

T, °C



Анализ экспериментальных данных: изменение b-value при повторных нагревах

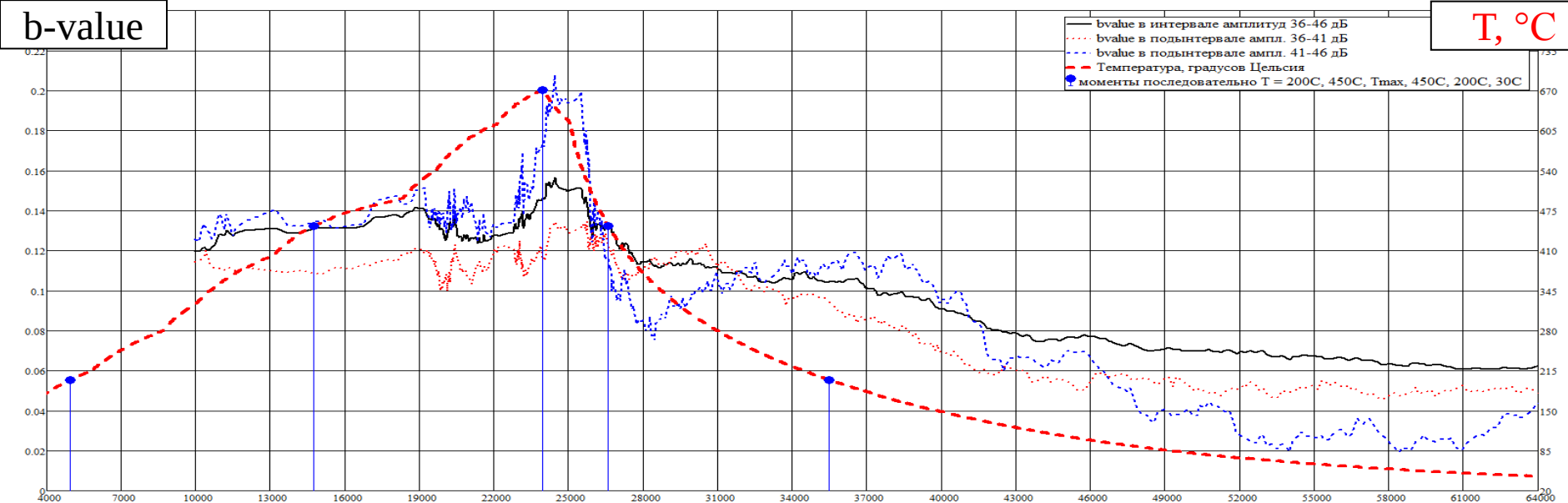
актив. ТАЭ, имп/сек

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



b-value

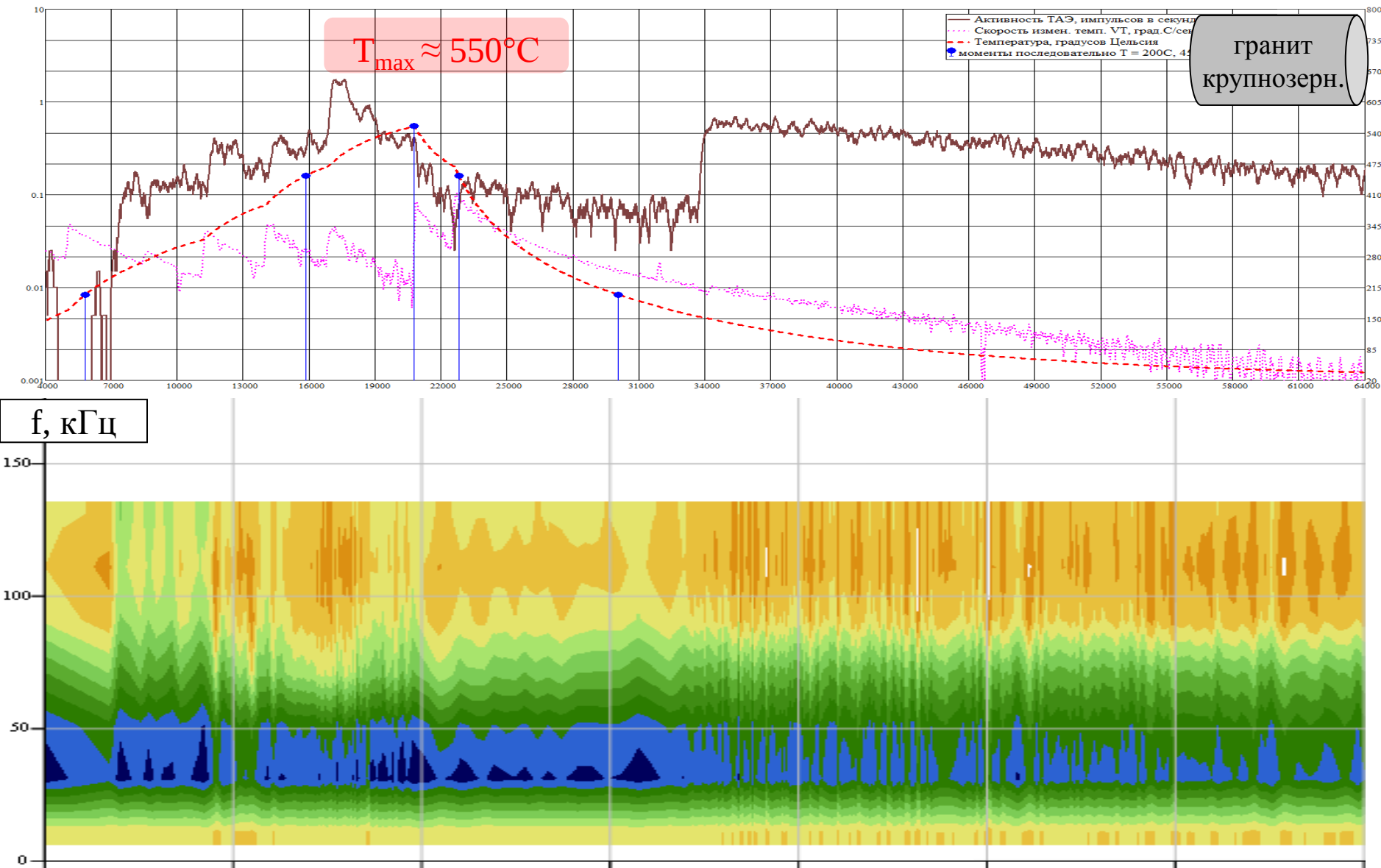
$T, ^\circ\text{C}$



Анализ экспериментальных данных: изменение усредненного спектра

актив. ТАЭ, имп/сек

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



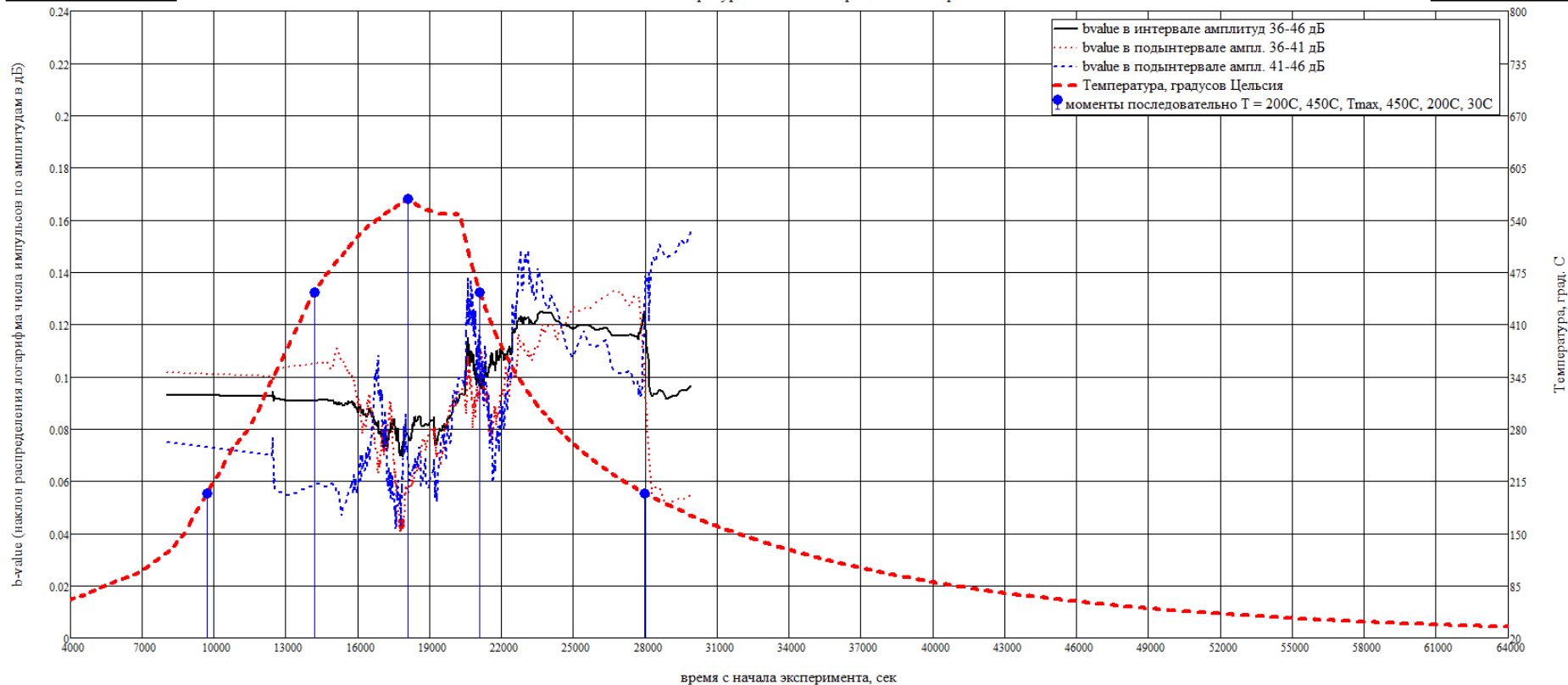
Анализ экспериментальных данных: различный характер статистики АЭ у разных образцов

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

b-value

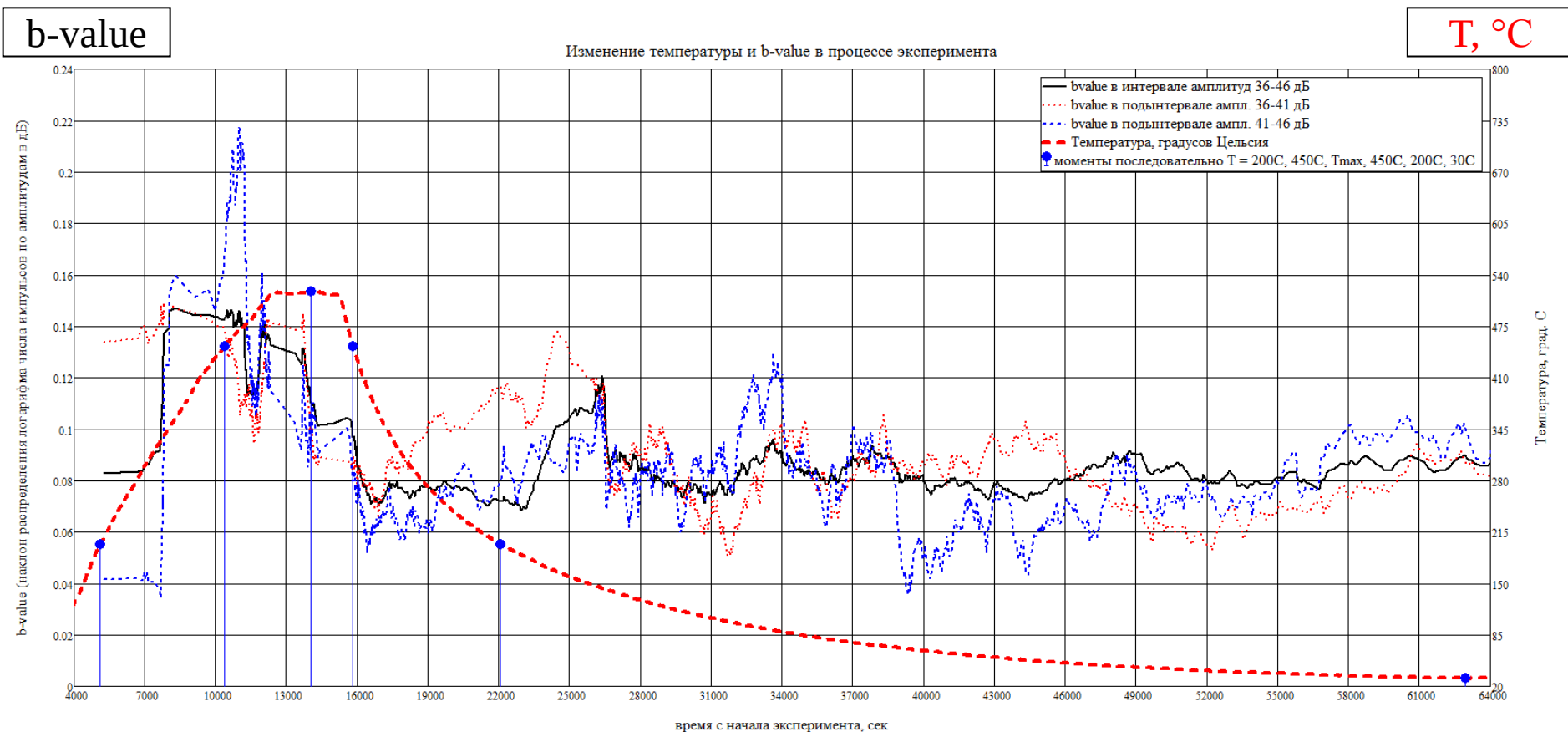
T, °C

Изменение температуры и b-value в процессе эксперимента



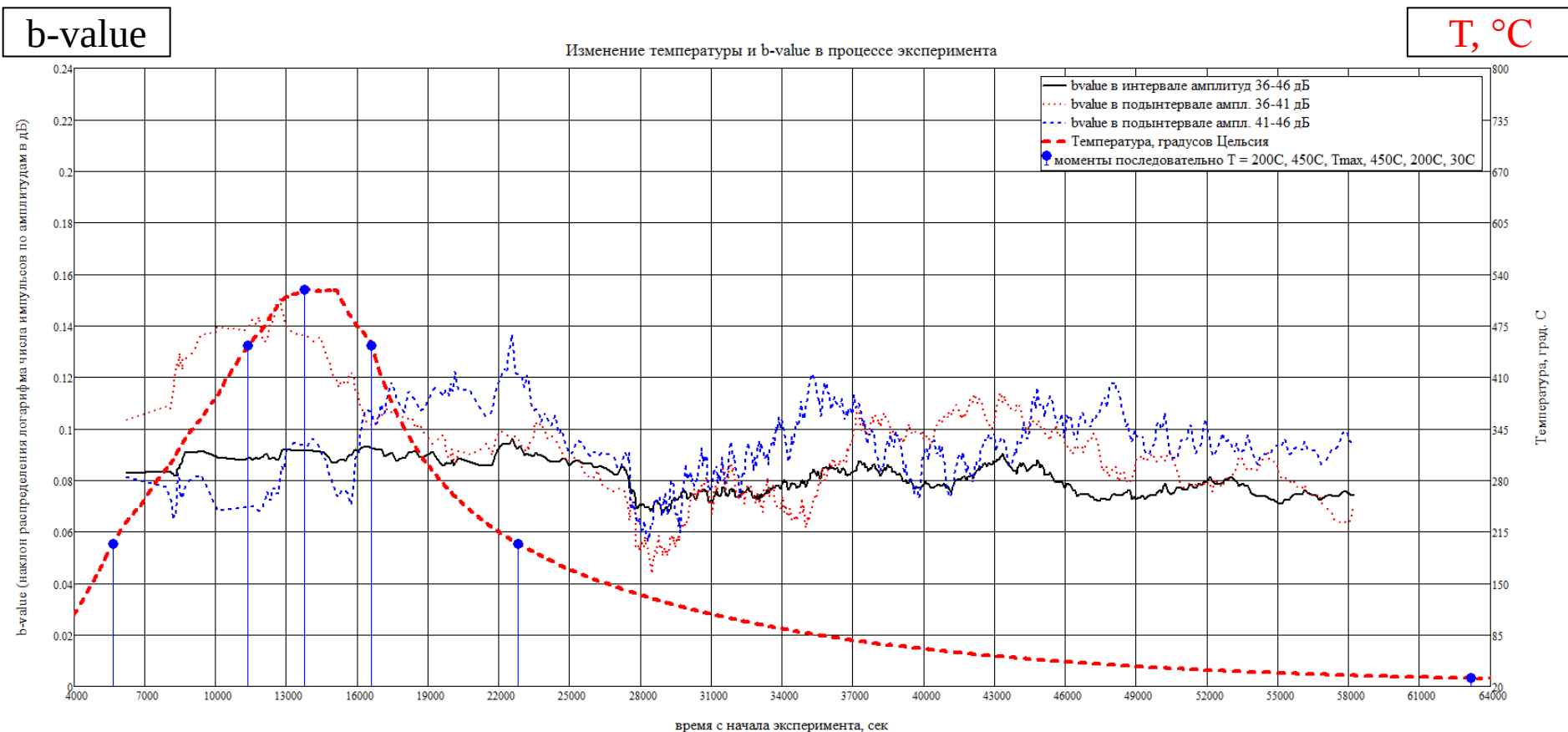
Анализ экспериментальных данных: различный характер статистики АЭ у разных образцов

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



Анализ экспериментальных данных: различный характер статистики АЭ у разных образцов

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



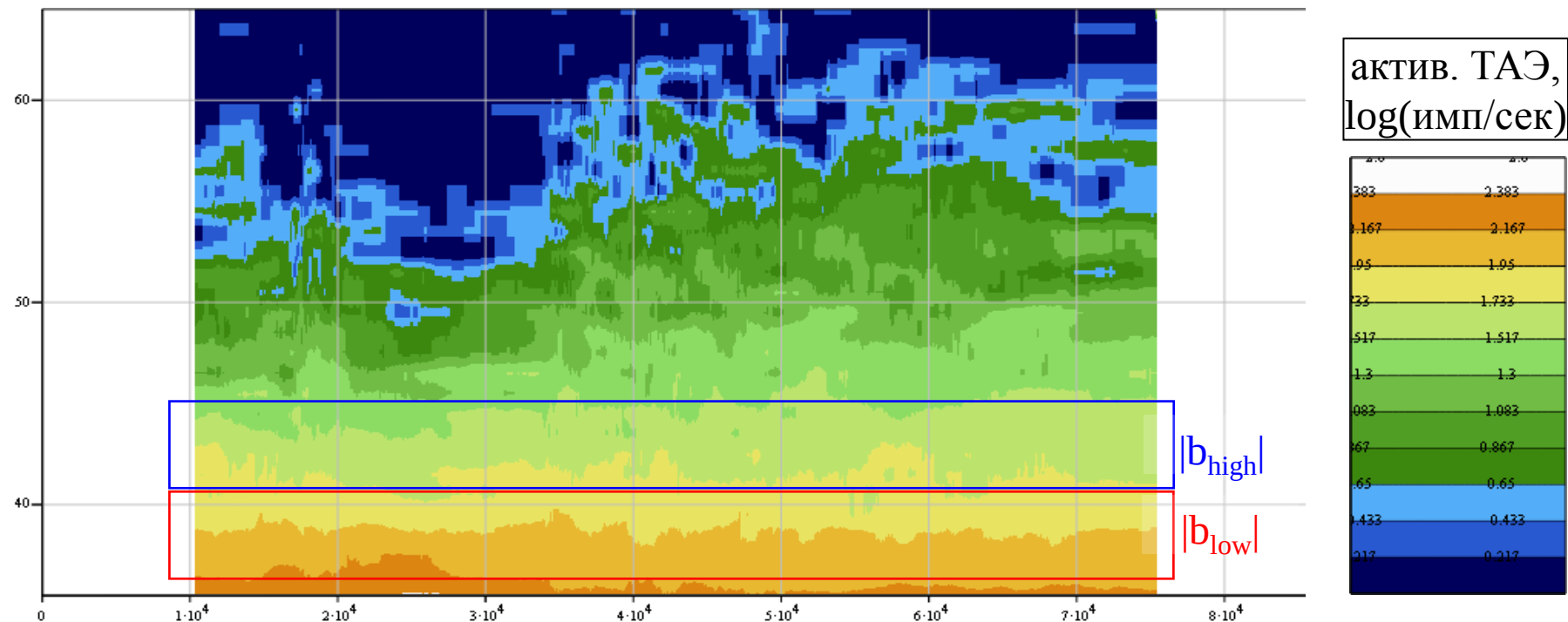
Выводы

- По данным о статистических параметрах потока импульсов термически стимулированной АЭ удастся выделить отдельные этапы термического разрушения, за которые ответственны различные механизмы, что согласуется с характером изменения активности АЭ и для чего используется анализ в поддиапазонах амплитуд.
- Анализ статистических параметров показывает качественное различие в процессах разрушения при первичном и повторном нагревах.
- По данным о частотных характеристиках импульсов АЭ выделить этапы термического разрушения не удастся в явном виде, необходим дополнительный анализ.
- Дальнейшее развитие исследования термически стимулированной возможно при возможности «нормирования» импульсов АЭ, прежде всего, за счет контроля упругих параметров – скоростей и затухания упругих волн (в общем случае, частотнозависимых).

Спасибо за внимание!

Распределение импульсов по амплитудам в скользящем окне

A_{per} , дБ



Анализ экспериментальных данных: первичный и повторный нагревы

Интенсивность ТАЭ, имп/сек

