



Национальный исследовательский технологический
университет «МИСиС»



Горный институт

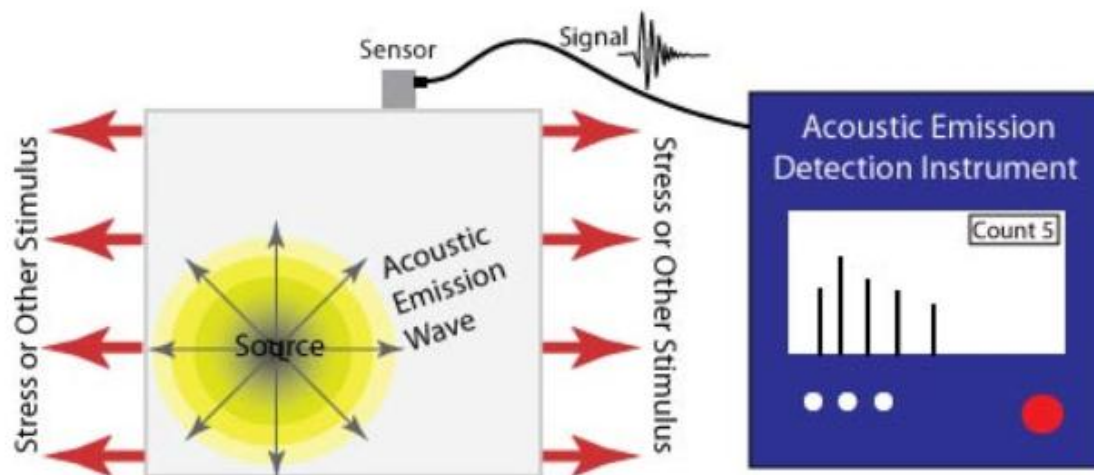
Кафедра Физических процессов горного производства и
геоконтроля

В.Л. Шкуратник, П.В. Николенко

**Прогноз разрушения каменного угля на основе
анализа временных и спектральных характеристик
его акустической эмиссии**

2019

Акустическая эмиссия



Акустическая эмиссия (АЭ) – явление генерации упругих волн, возникающих при внезапном перераспределении напряжения в материале. Когда конструкция подвергается внешнему воздействию (изменению давления, нагрузки или температуры), локализованные источники выделяют энергию в виде упругих волн, которые распространяются до поверхности объекта и могут быть зарегистрированы датчиками.

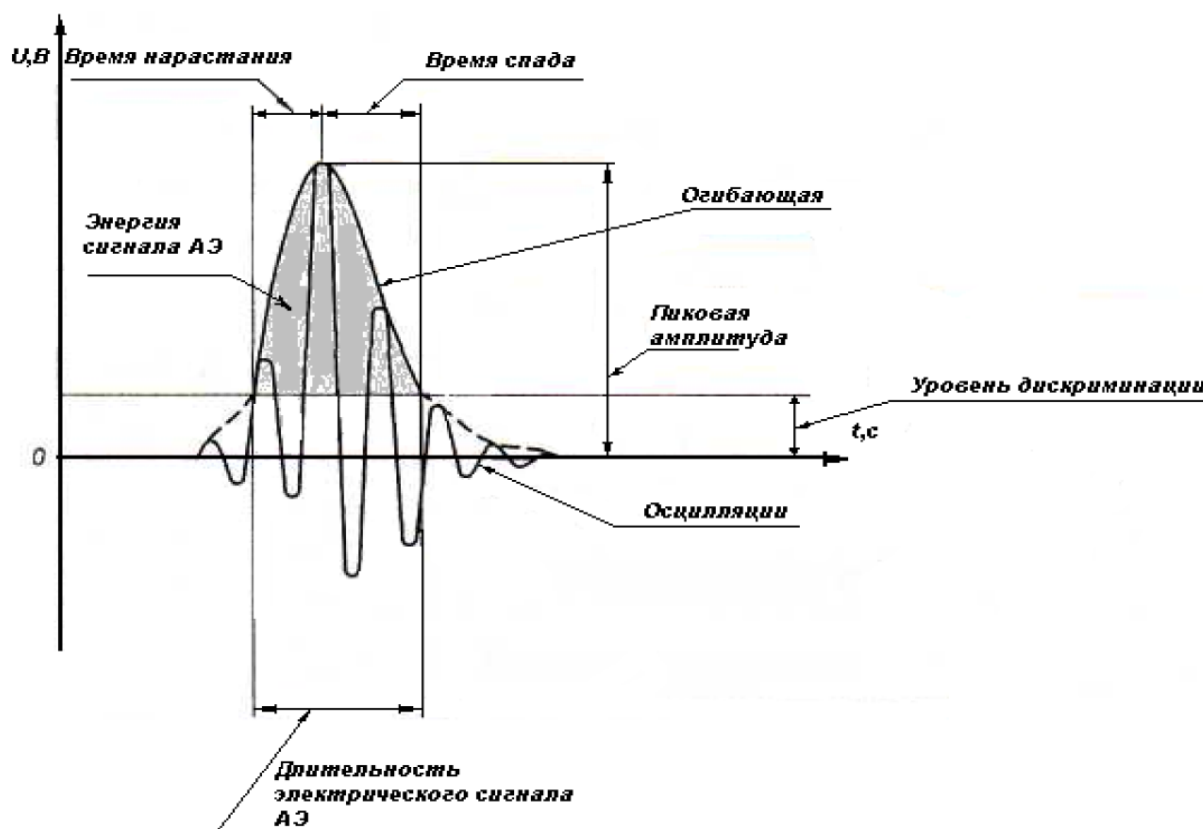
NDT Resource Center: <https://www.nde-ed.org>

Основные регистрируемые параметры акустической эмиссии

2.47 **активность акустической эмиссии** [$\dot{N}_\Sigma$] (rate, event count): Число зарегистрированных импульсов акустической эмиссии за единицу времени.

2.14 **скорость счета акустической эмиссии** [N] (count rate, acoustic emission): Число зарегистрированных выбросов сигнала АЭ в единицу времени.

ГОСТ Р ИСО 12716—2009

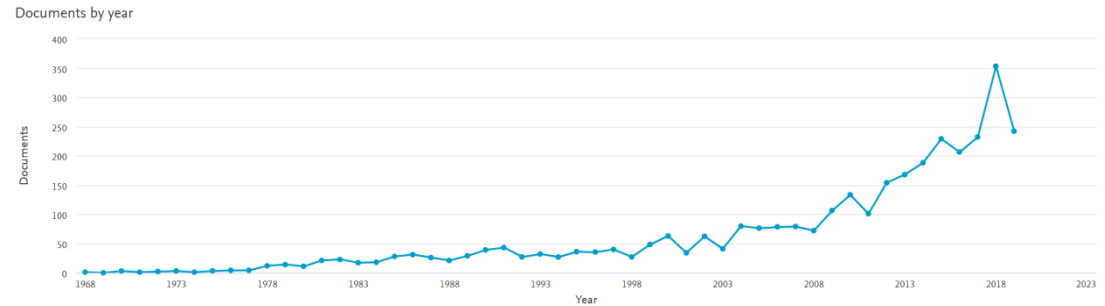


Публикации

Запрос: **acoustic
emission rock**

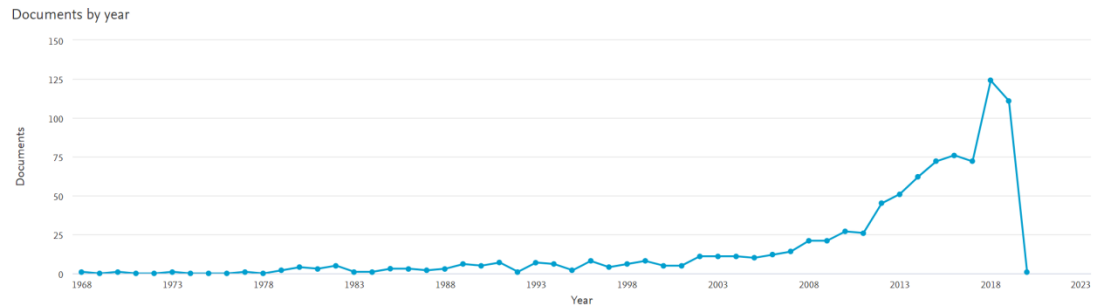
3,327 document results

Scopus



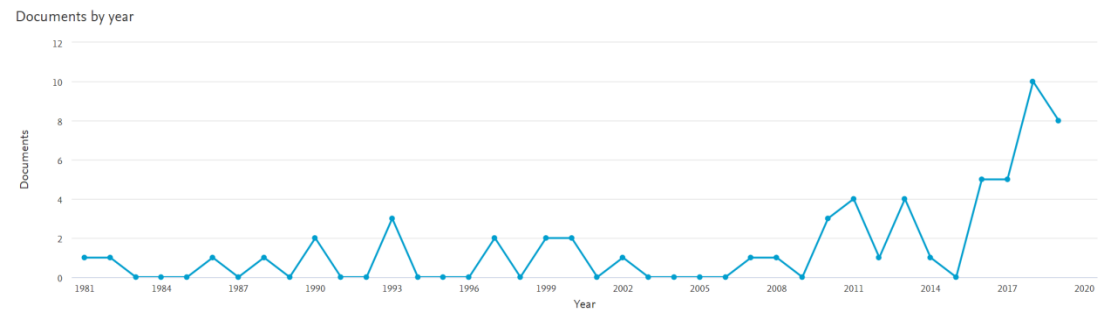
Запрос: **acoustic
emission energy
rock**

879 document results



Запрос: **acoustic
emission spectral
rock**

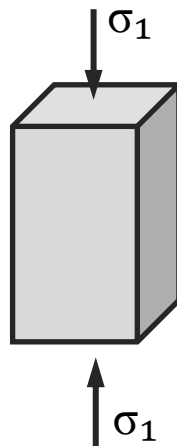
59 document results



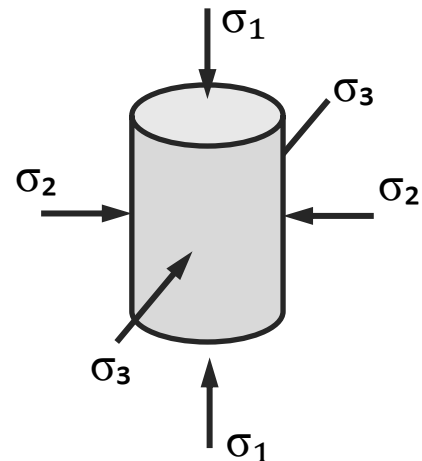
Лабораторные исследования образцов каменных углей



**Образец в термоусадочном рукаве
перед погружением в камеру
всестороннего сжатия**



**Нагружение
призматических образцов
по одноосной схеме**



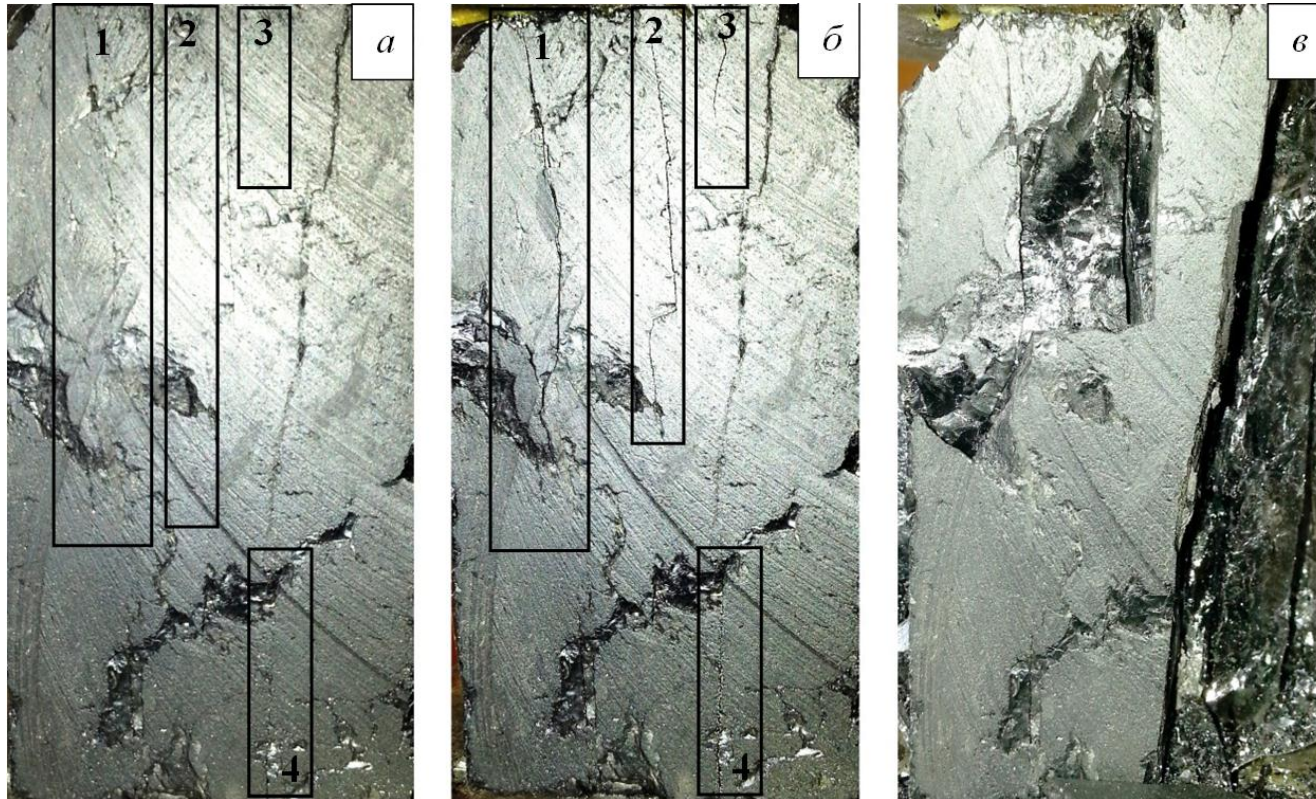
**Нагружение
цилиндрических образцов
по схеме Кармана**

Тип угля	ρ , кг/м ³	V_p , м/с	V_s , м/с	$E_{ст}$, ГПа	$E_{дин}$, ГПа	$M_{ст}$	$\mu_{дин}$	$\sigma_{сж}$, МПа
I	1400	2310	1400	6,0	6,7	0,20	0,21	15,1
II	1420	2420	1420	6,4	6,6	0,20	0,21	16,7

I - угли пласта «Болдыревский» шахты им.
С.М. Кирова Кузнецкого угольного бассейна

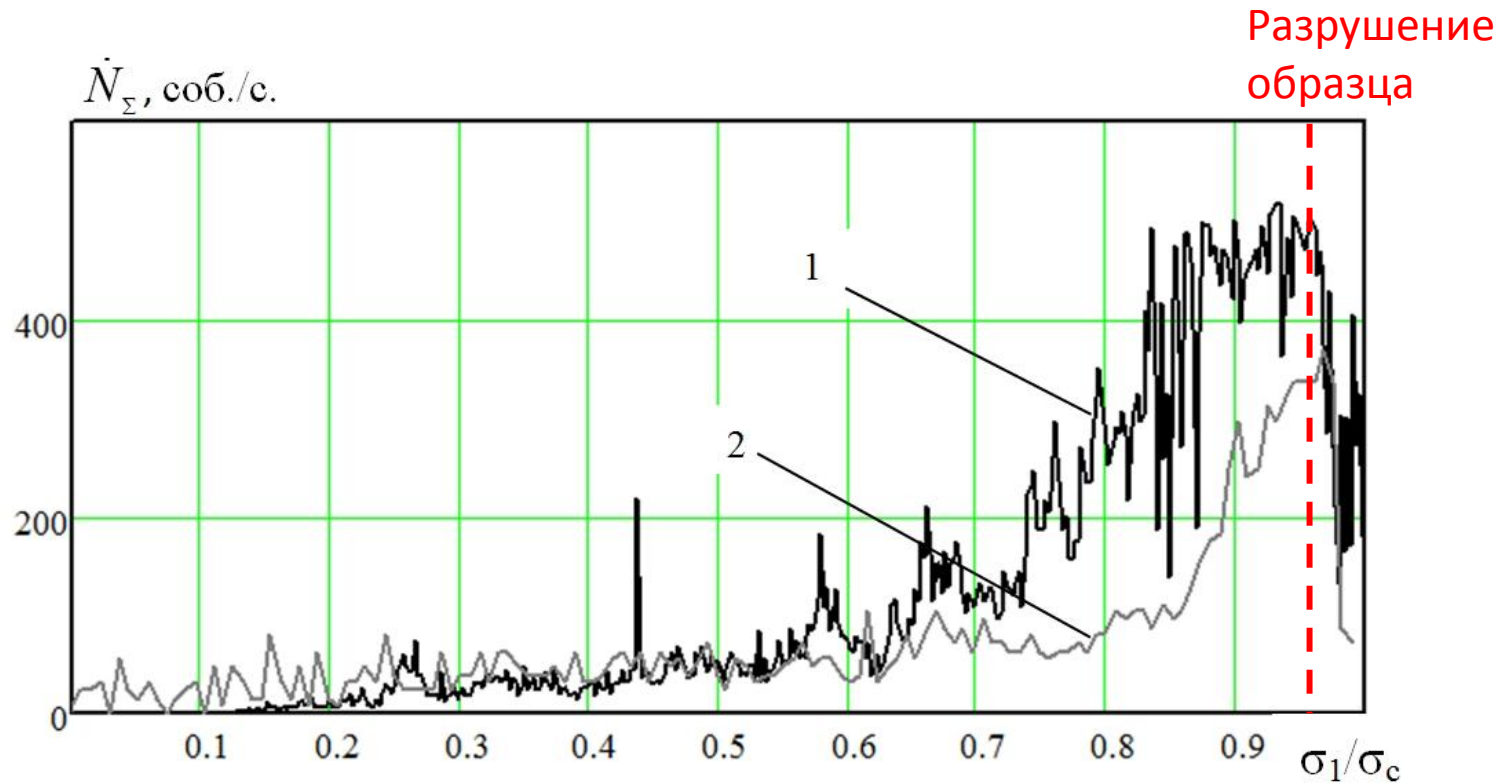
II - угли пласта «Тройной» шахты
«Заполярная» Печерского бассейна

Разрушение призматических образцов



Фотофиксация поверхности образца угля при осевой нагрузке
 $0.6\sigma_{сж}$ (а), $0.8\sigma_{сж}$ (б), $1.0\sigma_{сж}$ (в)
(прямоугольниками выделено образование новых и рост
существующих трещин)

Акустическая эмиссия при разрушении призматических образцов

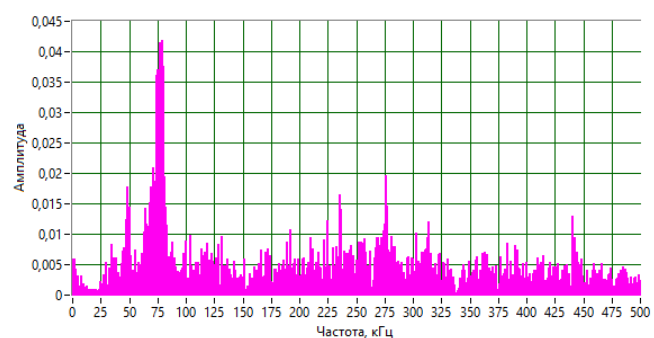
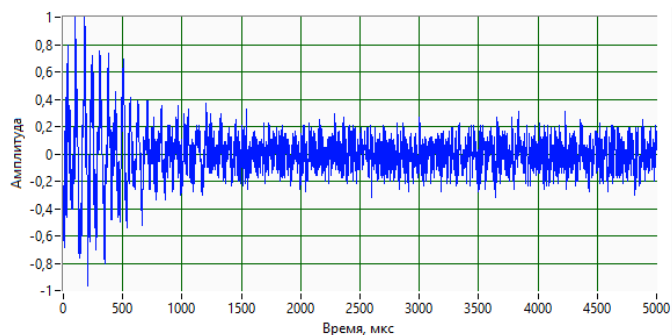


Зависимости $\dot{N}_\Sigma(\sigma)$ для образцов Кузбасского (1) и Печерского (2) углей

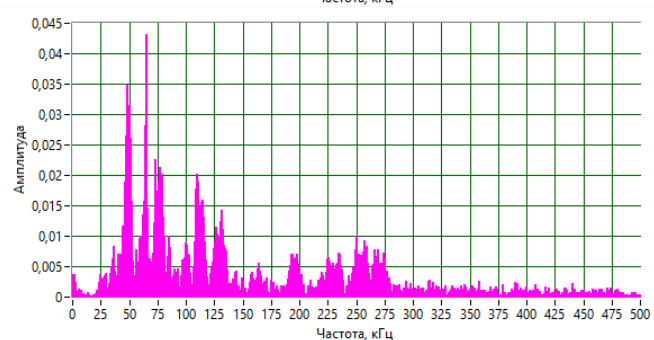
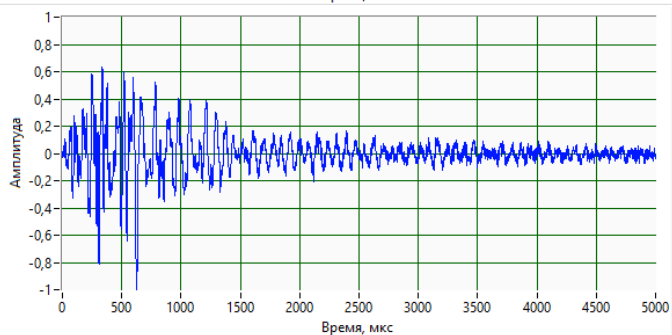
Зарегистрированные АЭ сигналы и их спектры (для образца угля пласта «Болдыревский»)

Спектры сигналов получены алгоритмом FFT, $T = 4096$ отсч.; $dt = 2e-7$ с; $df = 1$ кГц

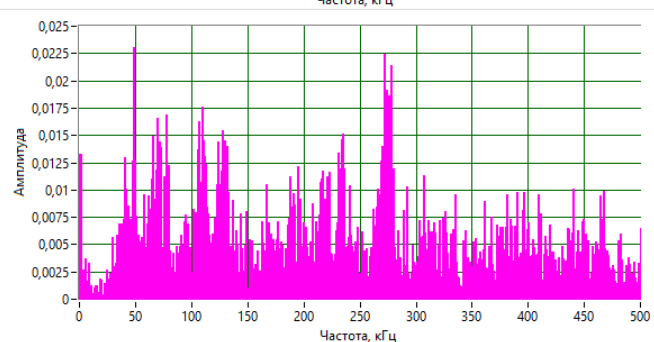
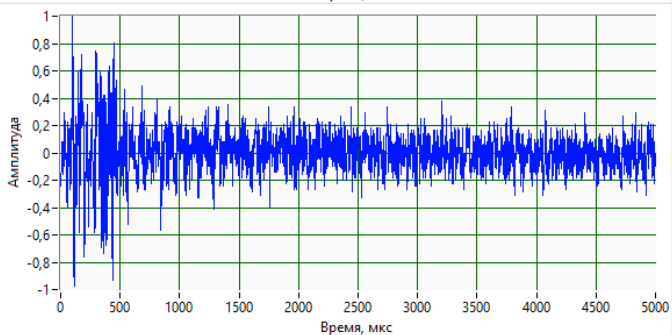
#218



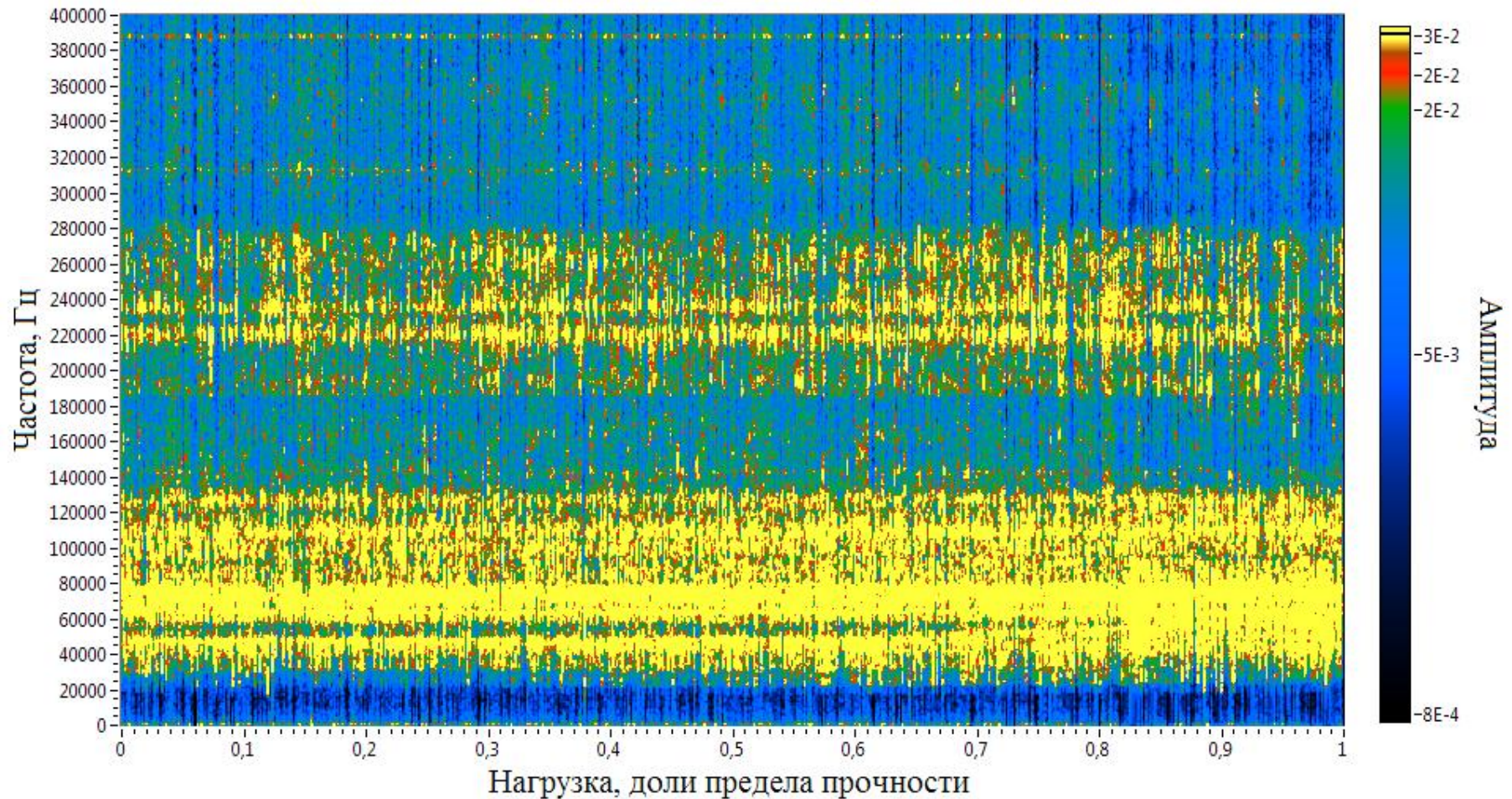
#219



#220



Построение спектрограммы акустической эмиссии для образца угля пласта «Болдыревский»

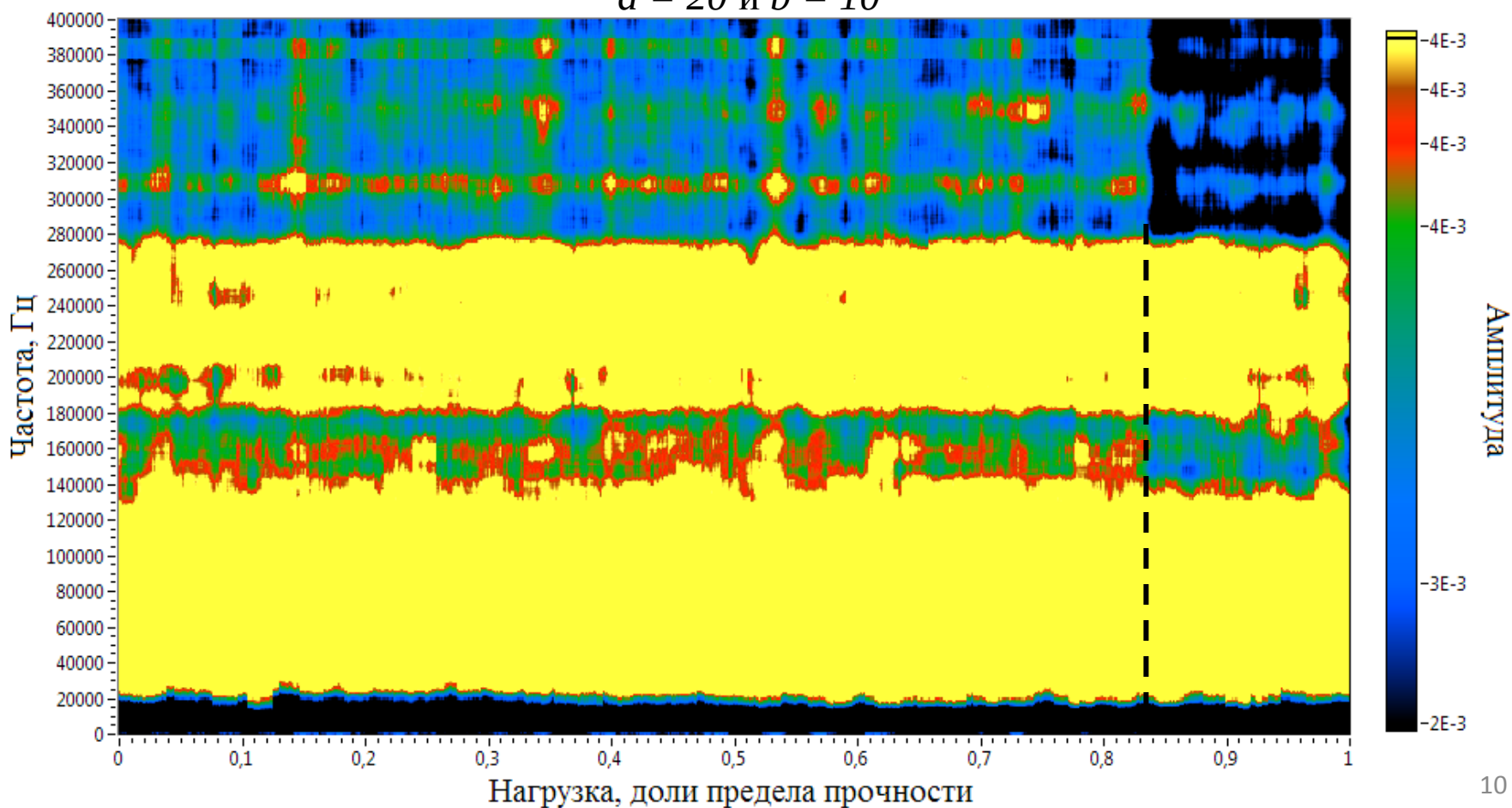


Сглаживание скользящим средним в прямоугольном окне

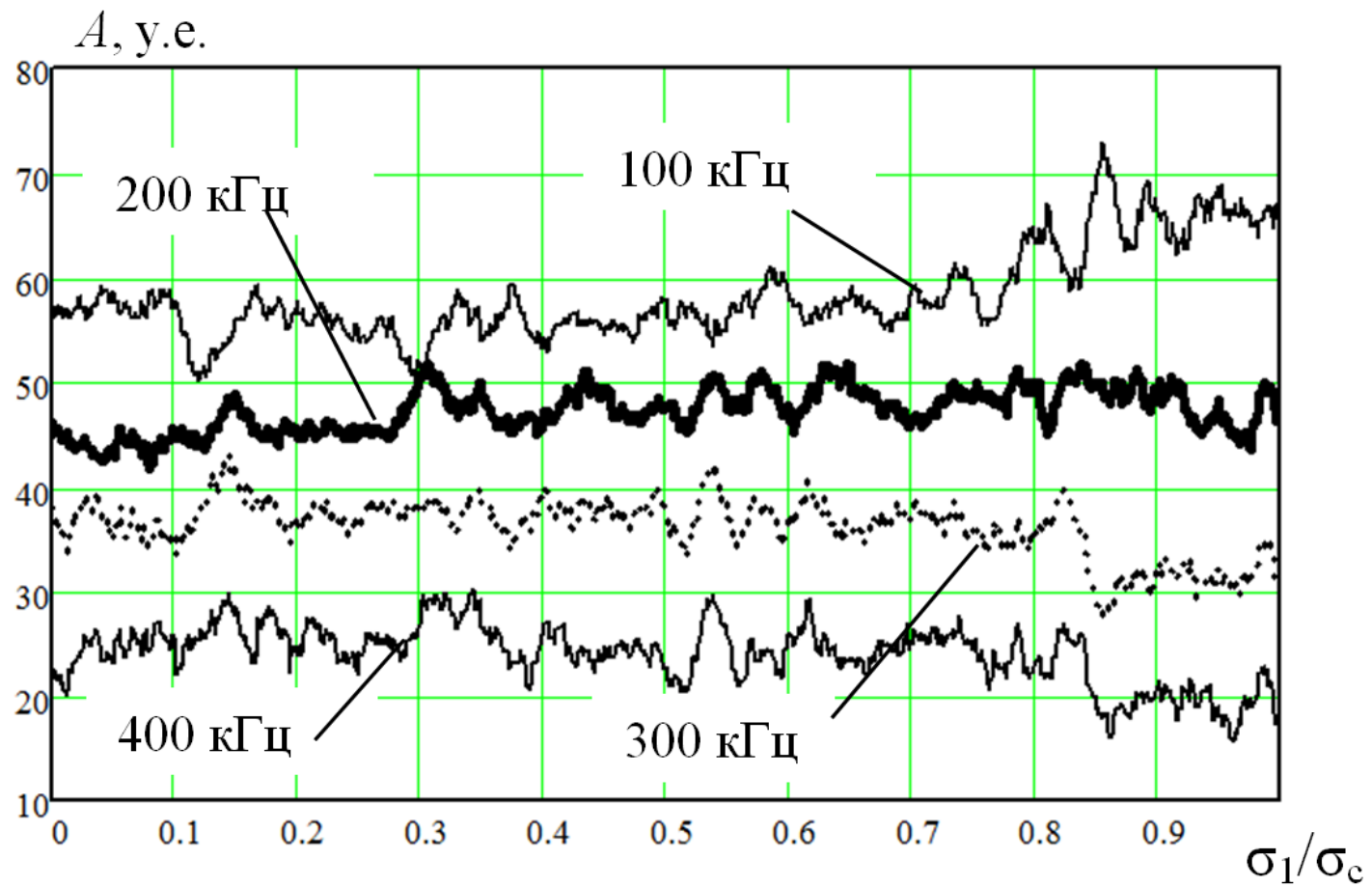
$$m_{i,j} = \frac{1}{a \cdot b} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b A_{i,j},$$

где a и b – ширина и высота окна сглаживания, $A_{i,j}$ – элементы исходной матрицы амплитуд АЭ событий

$$a = 20 \text{ и } b = 10$$



Представление спектрограммы в виде отдельных сечений Уголь Кузбасского бассейна



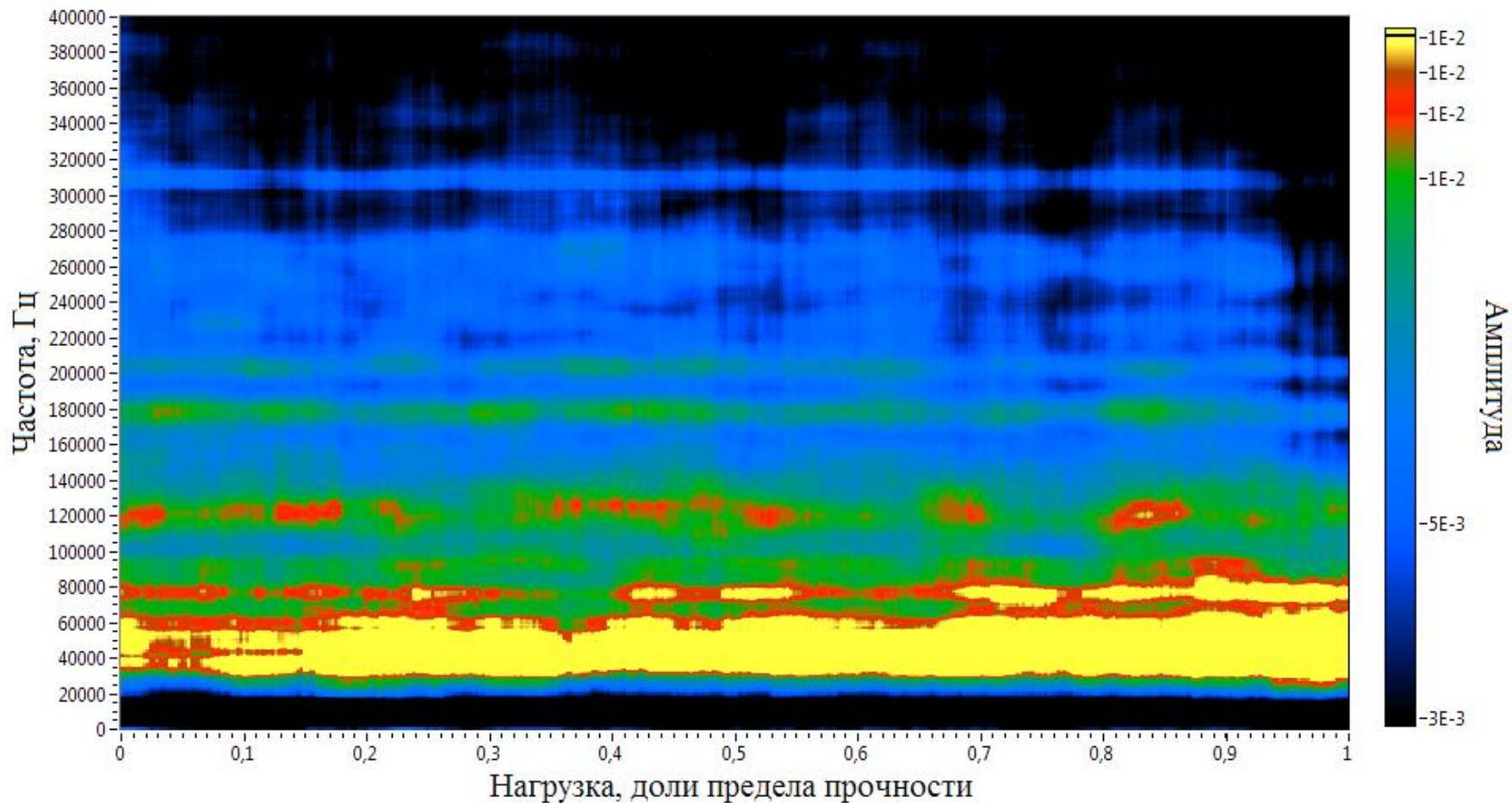
Акустическая эмиссия при разрушении призматических образцов



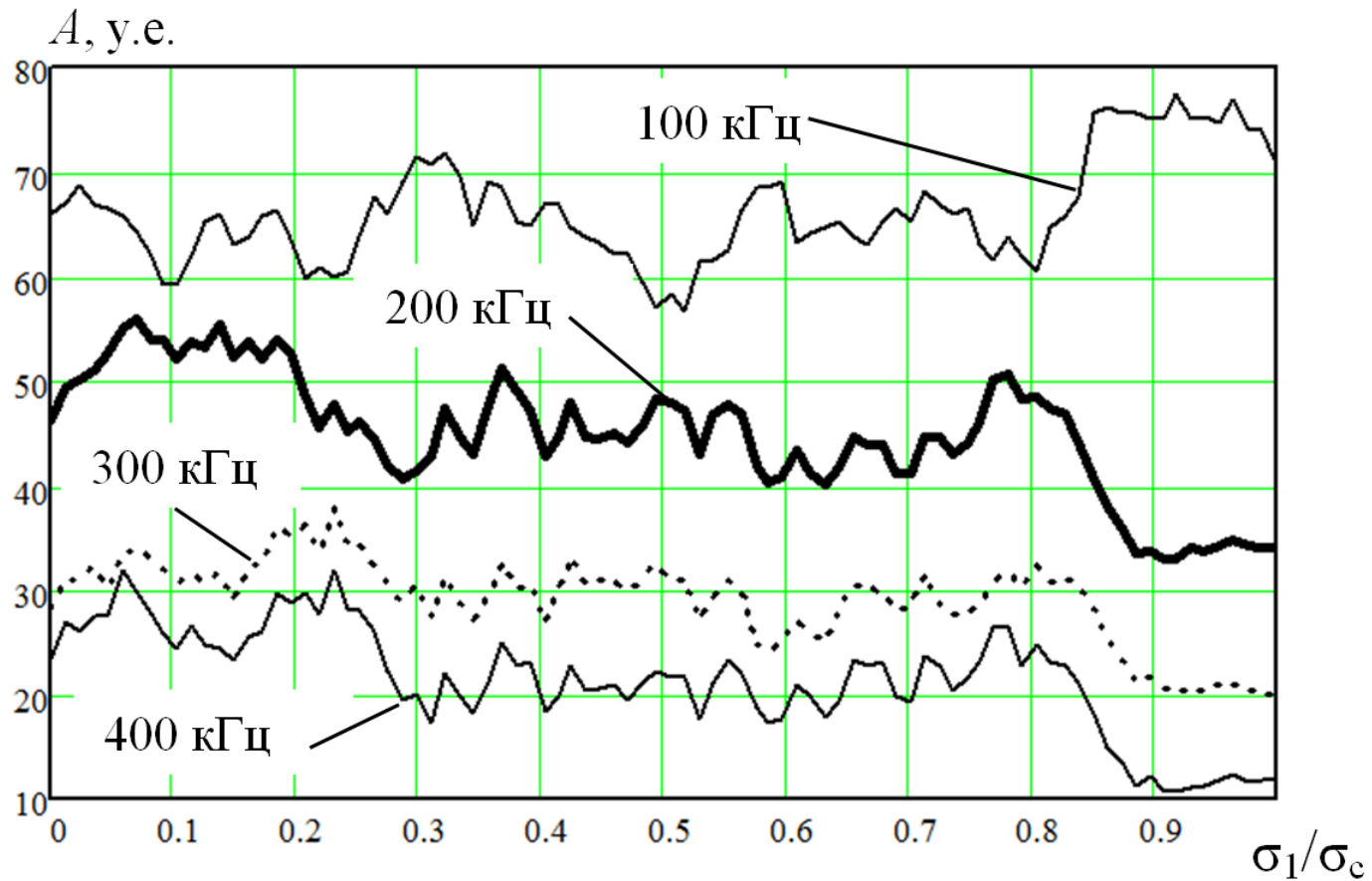
Зависимости $\dot{N}_\Sigma(\sigma)$ для образцов Кузбасского (1) и Печерского (2) углей

Спектрограмма акустической эмиссии для образца угля пласта «Тройной»

$$a = 20 \text{ и } b = 10$$



Представление спектрограммы в виде отдельных сечений Уголь Печерского бассейна (пласт «Тройной»)

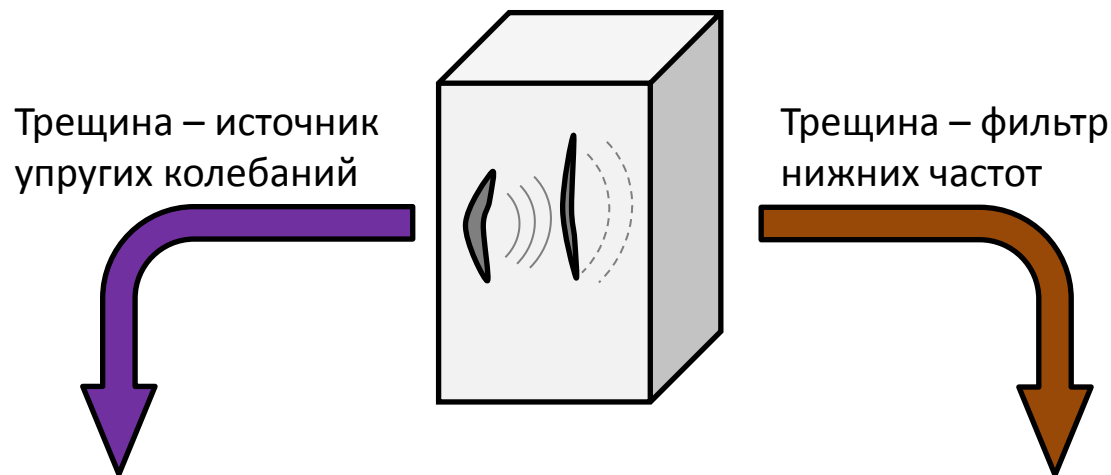


Механизмы влияния трещинообразования на спектральные характеристики сигналов АЭ

Спектр принимаемых АЭ сигналов $G_y(f)$ можно условно представить в виде

$$G_y(f) = G_x(f) \cdot \underbrace{K_t(f)}_{const} \cdot K(f),$$

где $G_x(f)$ – спектр АЭ сигнала, возникающего в результате образования или скачкообразного роста трещины, $K_t(f)$ – амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) акустического тракта измерительной аппаратуры, $K(f)$ – коэффициент передачи геосреды от точки излучения к точке приема, который характеризует ее свойства как акустического фильтра



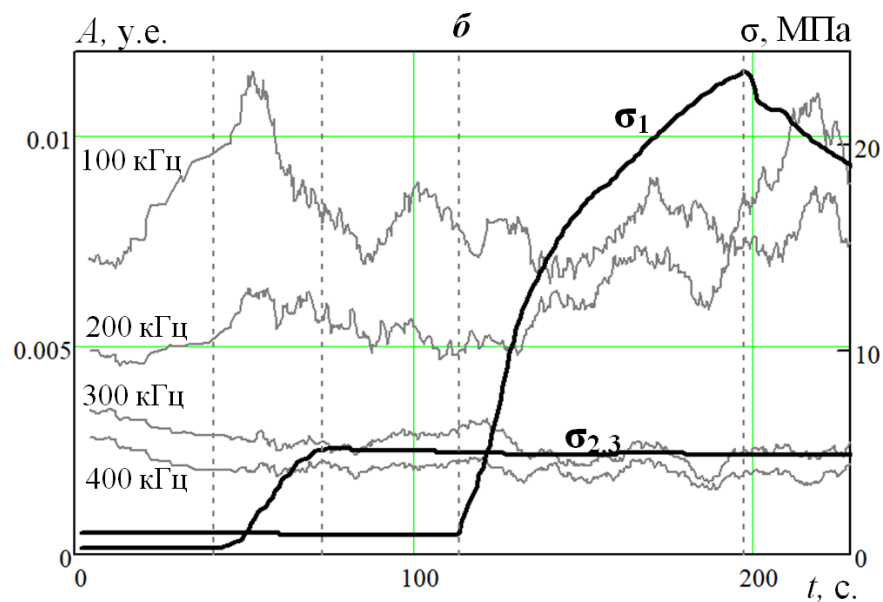
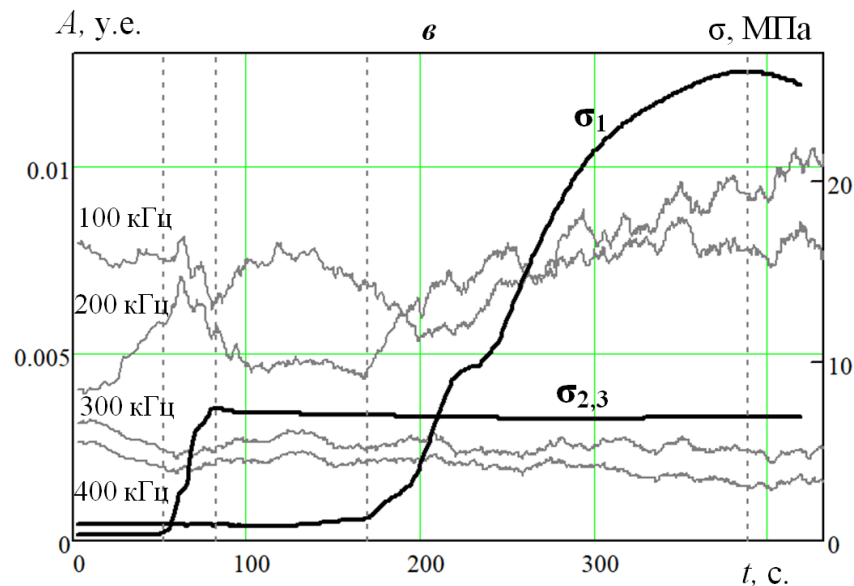
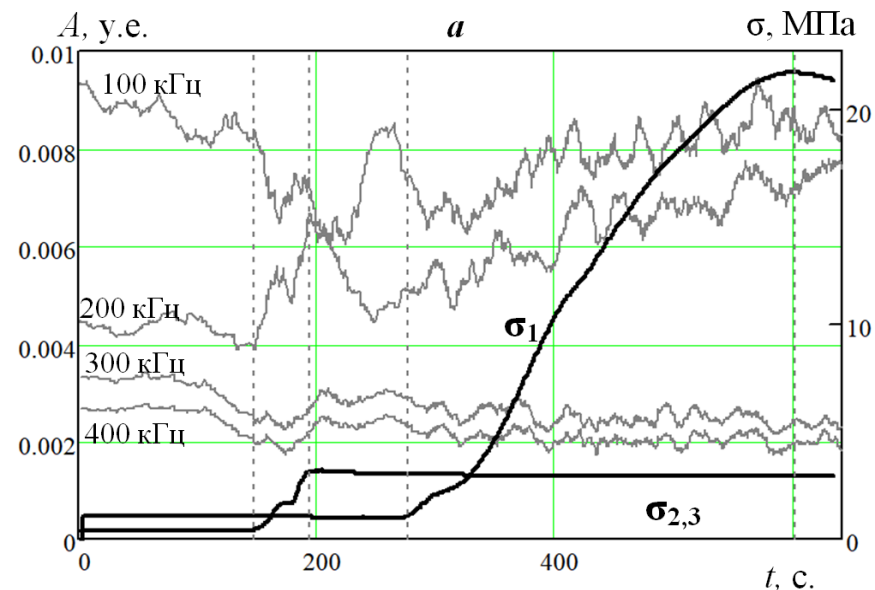
$G_x(f)$ связан с протяженностью трещины L

- [1. Куксенко В.С., Станчиц С.А. Томилини Н.Г. Оценка размеров растущих трещин и областей разгрузки по параметрам акустических сигналов // Мех. комп. мат. – 1983.- №3. – С. 536-543
2. Куксенко В.С., Мансуров В.А., Манжиков Б.Ц., Фролов Д.И., Станчиц С.А., Инжеваткин И.Е. Подобие в процессе разрушения горных пород на различных масштабных уровнях // Изв. АН СССР, Физика Земли.- 1990.-№6.- С. 5]

$K(f)$ отражает частотно-избирательные свойства трещины, которые аналогичны характеристикам фильтра низких частот (ФНЧ)

- [Ямщиков В.С., Шкурятник В.Л. Акустическая спектроскопия массива горных пород // ФТПРПИ. - 19–8. - №2. – С. 116 - 123]

Результаты испытаний угля по схеме Кармана



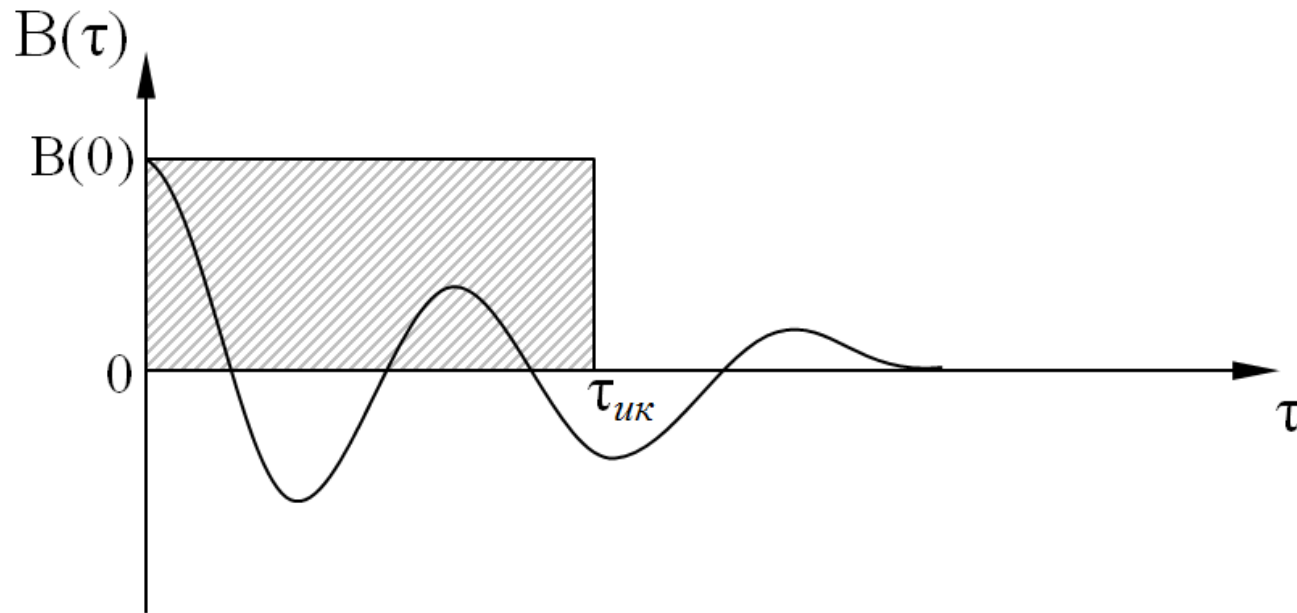
Результаты испытаний образцов угля по схеме Кармана
 $\sigma_{2,3} = 2$ МПа (а),
 $\sigma_{2,3} = 5$ МПа (б)
 $\sigma_{2,3} = 7$ МПа (в)
 (пунктиром показано время начала и конца нагружения)

1. На высоких частотах не происходит резких падений амплитуды – боковое давление не дает раскрыться вертикальным трещинам
2. Плавное увеличение амплитуд на низких частотах соответствует росту линейных размеров трещин

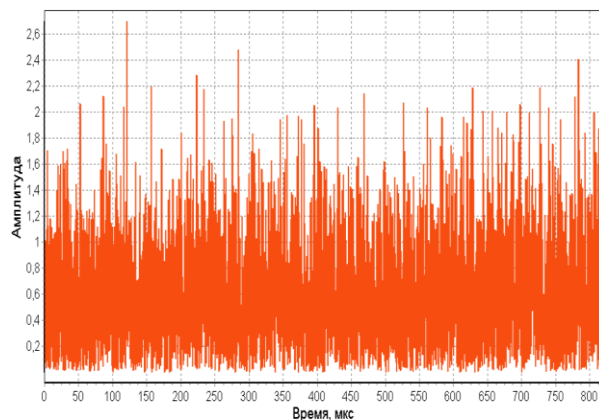
Альтернативные методы «спектральной» обработки сигналов АЭ

Применение интервала корреляции сигнала

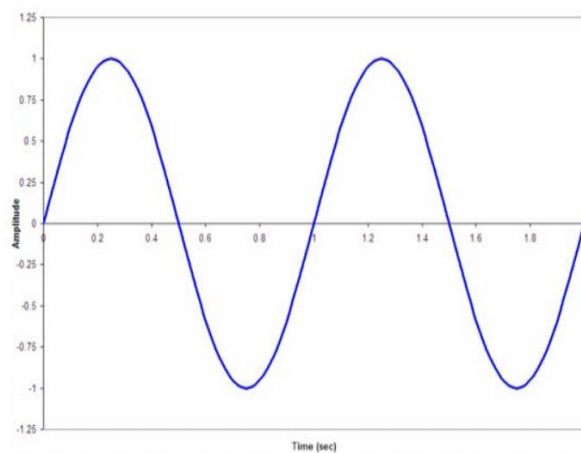
$$\tau_{ик} = \frac{1}{B(0)} \int_0^{\infty} B(\tau) d\tau \quad - \text{интервал корреляции сигналов}$$



Интервал корреляции – инструмент спектрального анализа



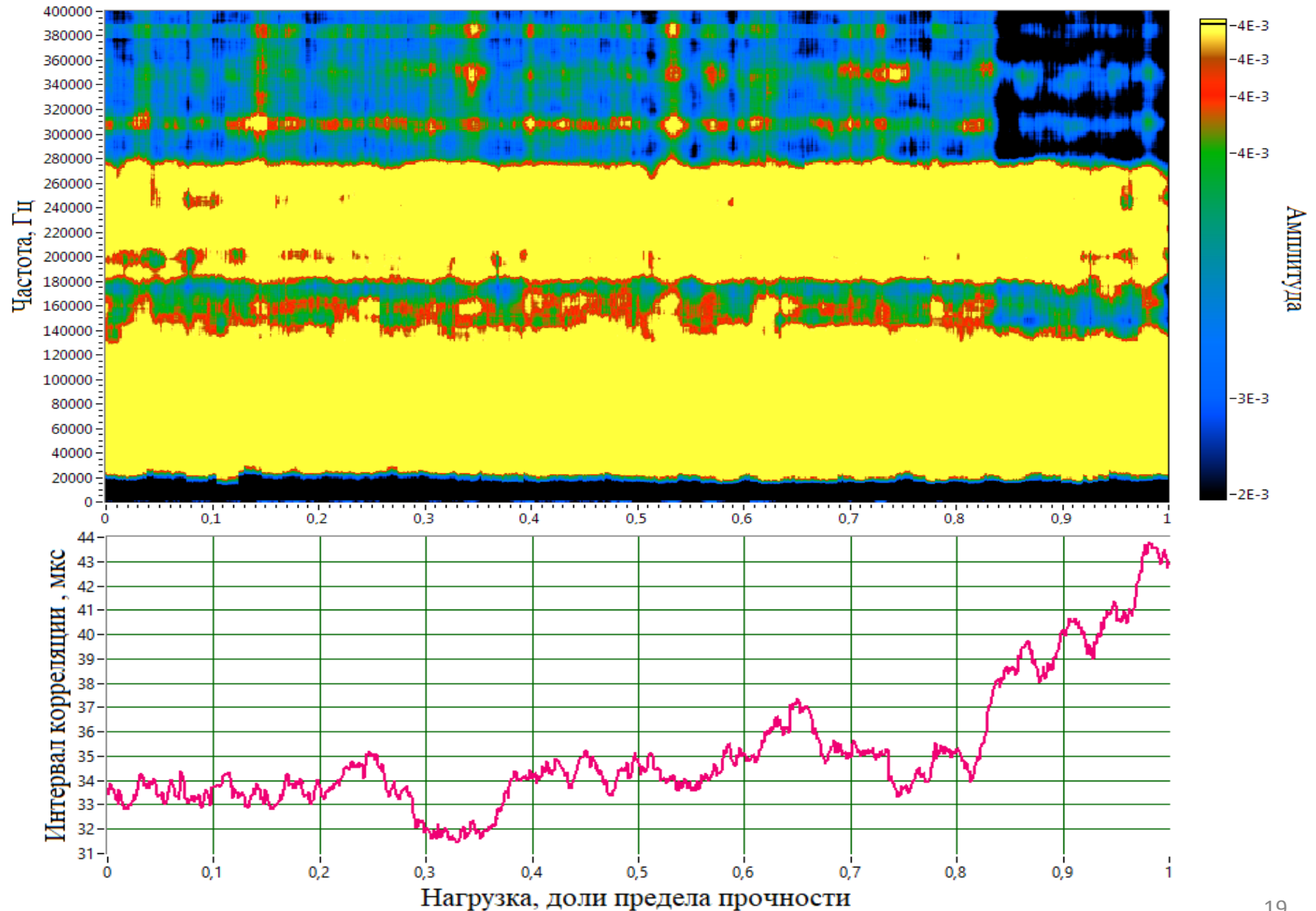
$$\tau_{ик} \rightarrow 0$$



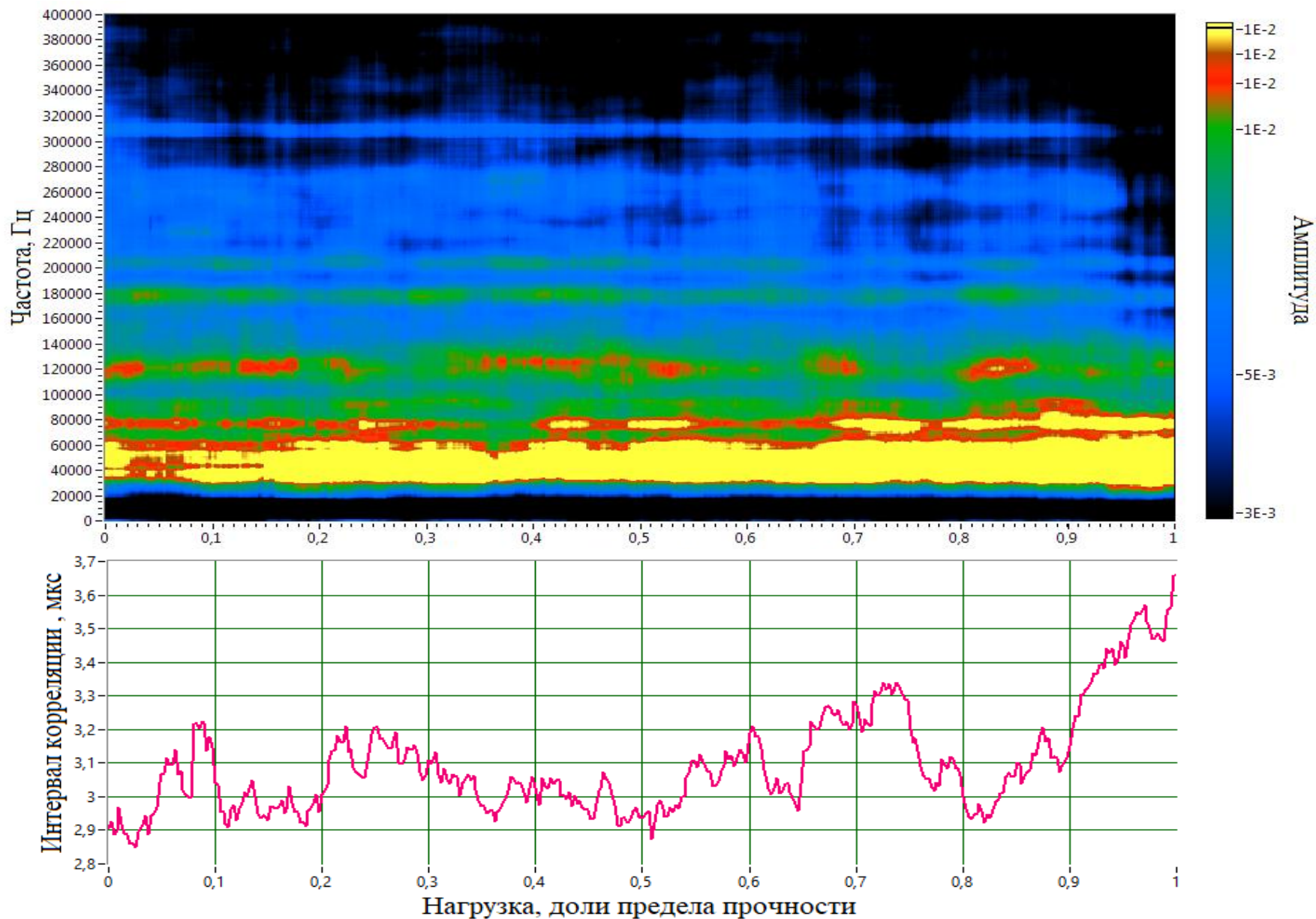
$$\tau_{ик} \rightarrow \infty$$



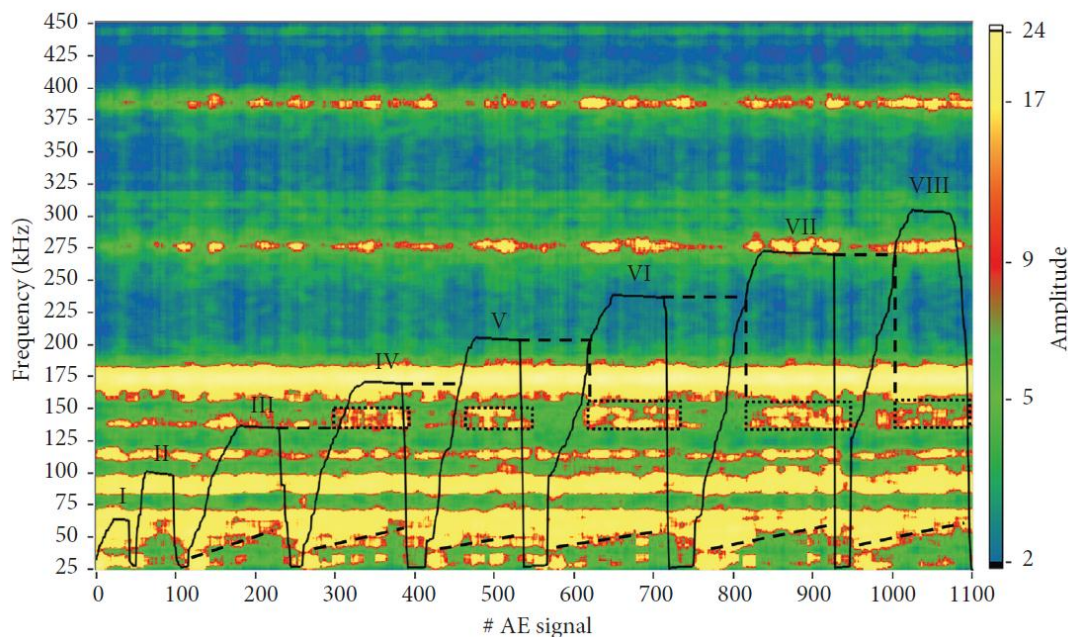
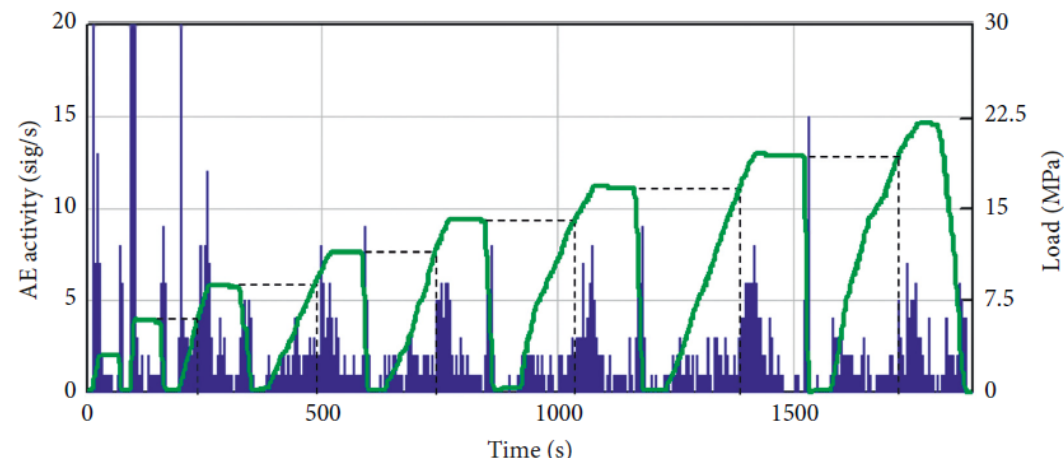
Расчет интервала корреляции сигнала для образца угля пласта «Болдыревский»



Расчет интервала корреляции сигнала для образца угля пласта «Тройной»



Пример спектральной обработки АЭ сигналов на других объектах



Research Article

Spectral Characteristics of Acoustic Emission in Carbon Fiber-Reinforced Composite Materials Subjected to Cyclic Loading

Vladimir L. Shkuratnik and Petr V. Nikolenko

Mining Institute of National University of Science and Technology MISIS, 119991 Moscow, Russia

Hindawi

Advances in Materials Science and Engineering

Volume 2018, Article ID 1962679, 8 pages

<https://doi.org/10.1155/2018/1962679>

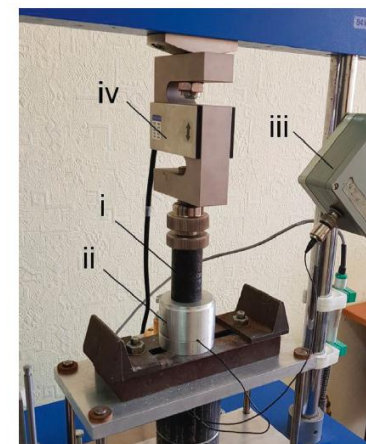


FIGURE 2: Laboratory setup with the tested sample (i), AE transducer (ii), preamplifier (iii), and stress gauge (iv).

Эффект Кайзера при циклическом нагружении образца проявляется как во временной, так и в частотной областях

Основные опасности и недостатки применения спектральной обработки АЭ для прогноза разрушения геоматериалов

1. Необходимость работы с «грязными» данными

Большая доля случайной компоненты в частотных характеристиках АЭ сигналов.

2. Сложность интерпретации данных натурных экспериментов

Необходимо учитывать влияние сложного напряженного состояния.

3. Влияние АЧХ измерительного тракта

Характеристики преобразователей и предусилителей сильно влияют на спектр принимаемой АЭ. Однако остается возможность наблюдать за изменением спектра во времени.

4. Отсутствие софта «под ключ»

Индивидуальная специфика используемого для регистрации АЭ оборудования мешает универсальному подходу к обработке, особенно на этапе синхронизации спектрограмм и временных графиков.

Спасибо за внимание!