



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт механики сплошных сред
Уральского отделения Российской академии наук

**XI Всероссийская школа-семинар с
международным участием «Физические
основы прогнозирования разрушения горных
пород», 14-18 октября, 2019 г.
ГИ УрО РАН, г. Пермь**

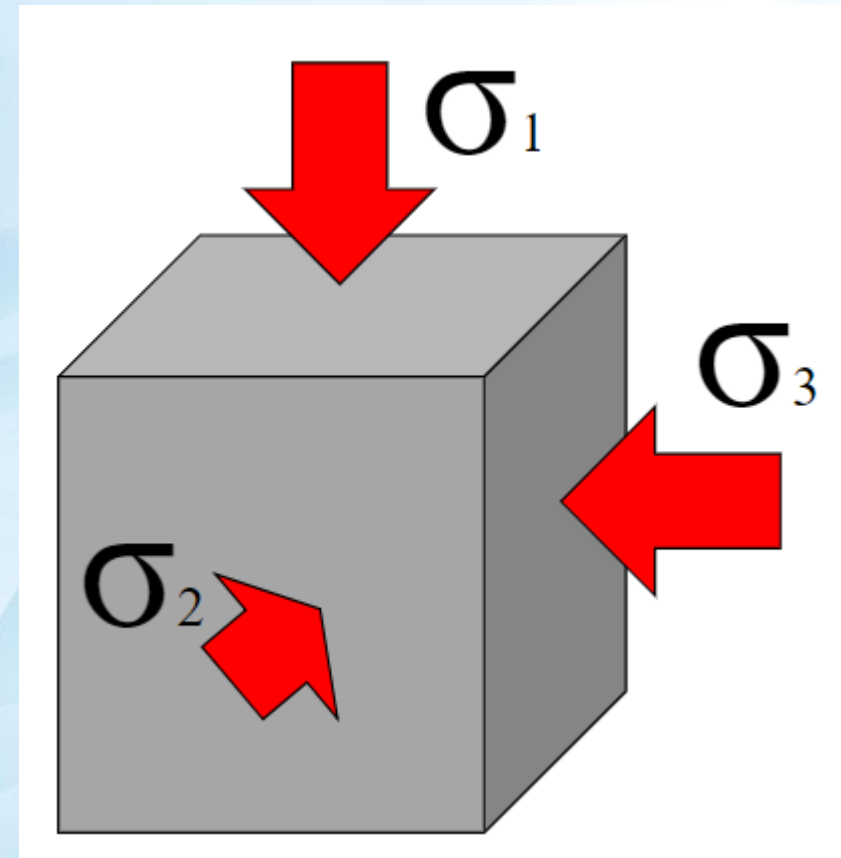
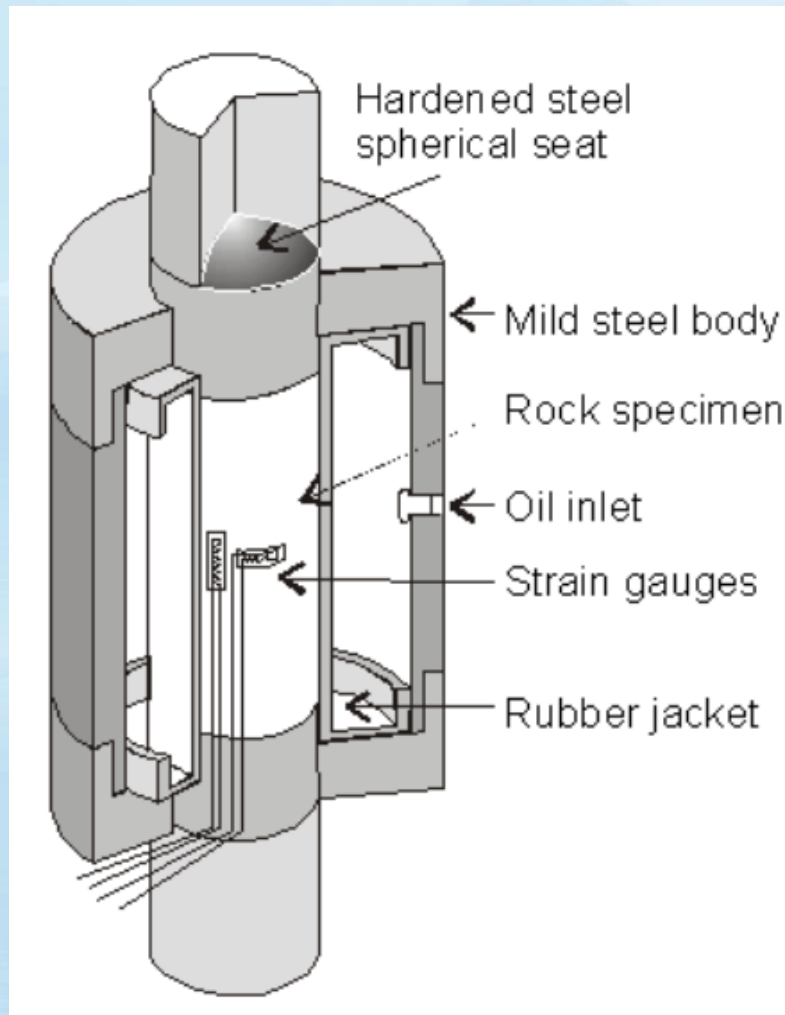
**Механизмы деформирования и
разрушения песчаника при
неравномерном двух- и
трехосном сжатии по данным
акустической эмиссии**

**Пантелеев И.А., Коваленко Ю.Ф., Шевцов
Н.И., Карев В.И., Устинов К.Б., Зайцев А.В.**



- ✓ Введение
- ✓ Постановка эксперимента
- ✓ Результаты:
 - кластерный анализ данных АЭ
 - классификация источников АЭ
 - кинетика накопления повреждений
- ✓ Выводы

Традиционный (стандартный) и истинный тест на трехосное нагружение



Введение

Цель работы: разработка подхода для определения механизмов разрушения песчаника при многоосном нагружении по данным акустической эмиссии.

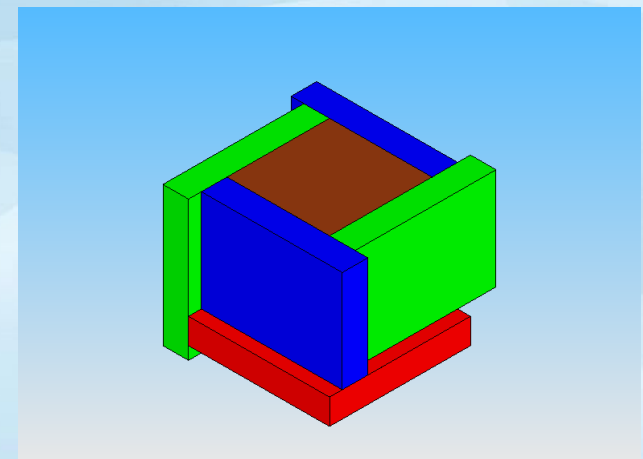
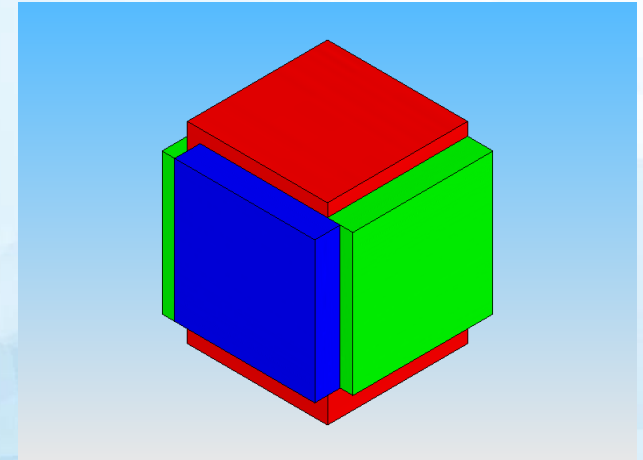
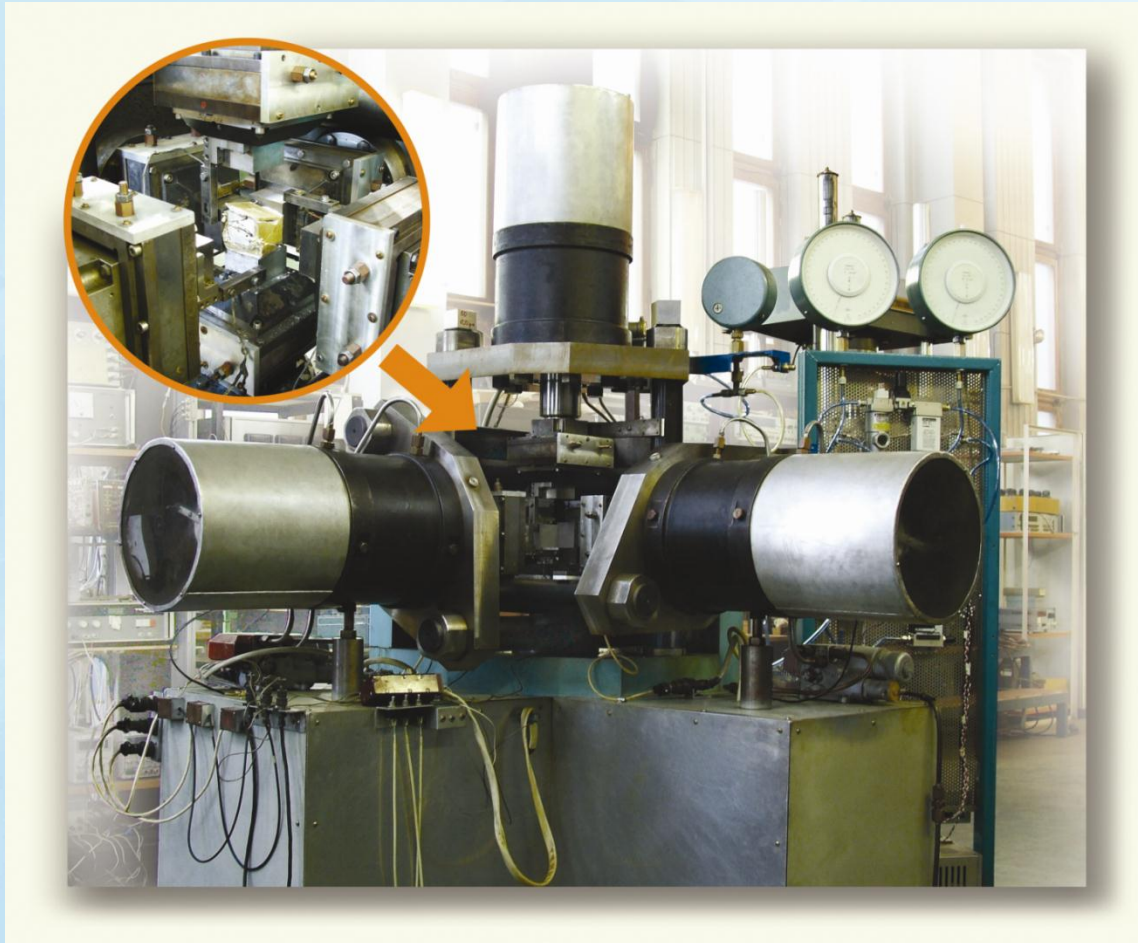
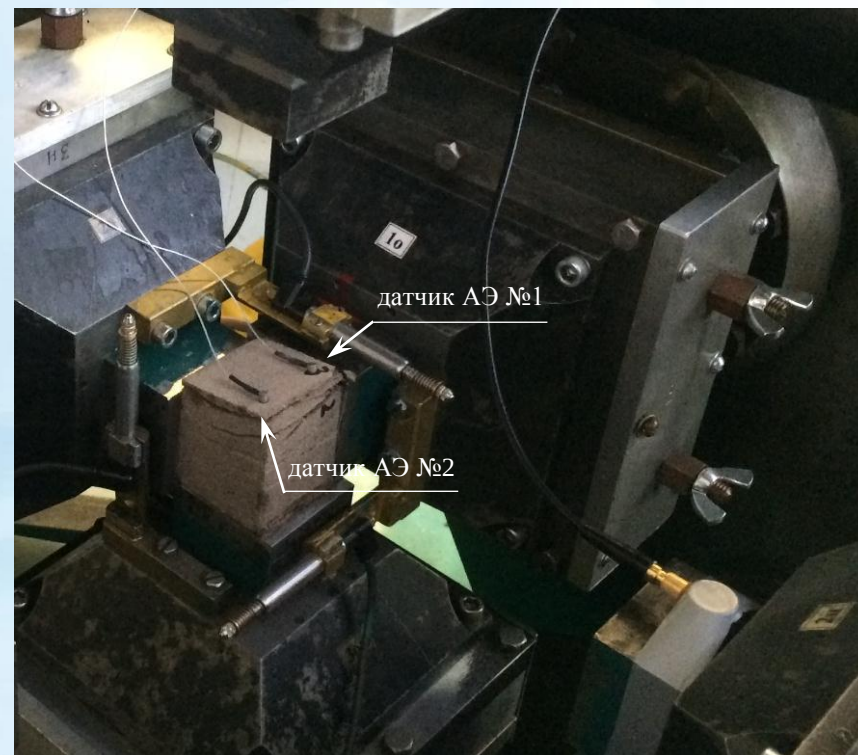
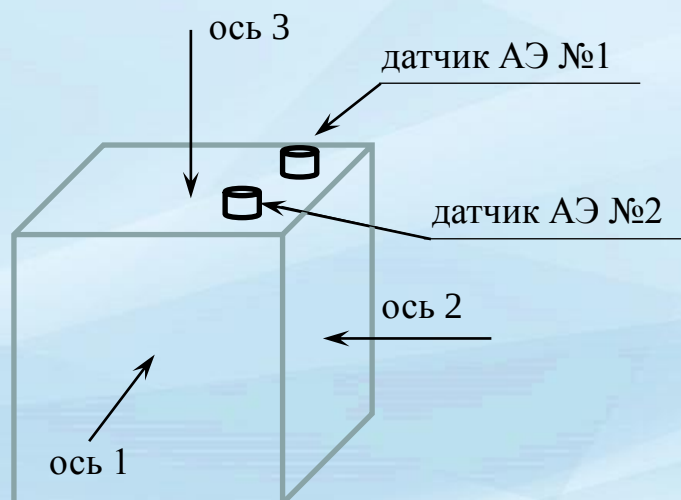


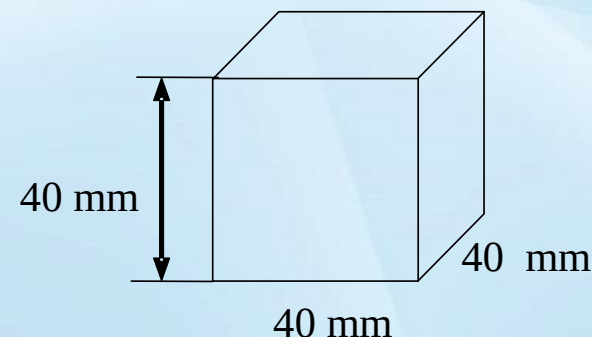
Рис. 1. Стенд и схема, иллюстрирующая кинематику плит: начальное положение и промежуточное состояние при испытании

Постановка эксперимента



Материал: песчаник Верхнекамского региона.
Система регистрации акустической эмиссии:
Amsy-5 Vallen.
Предусиление: 34дБ;
Частотный диапазон:
K1, K2: 300-800 кГц;
Частота дискретизации: 10 МГц.

Геометрия образца



Три типа эксперимента на двухосное сжатие

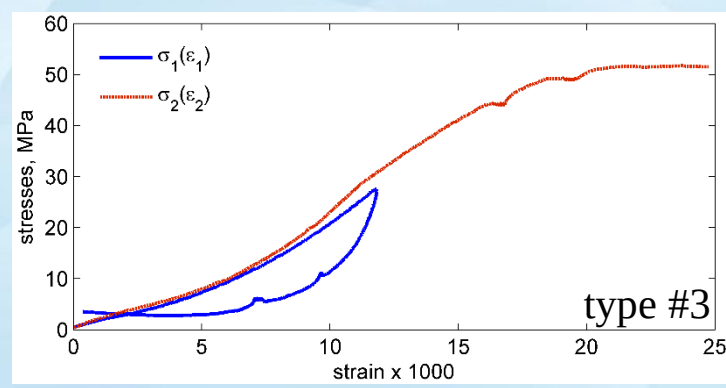
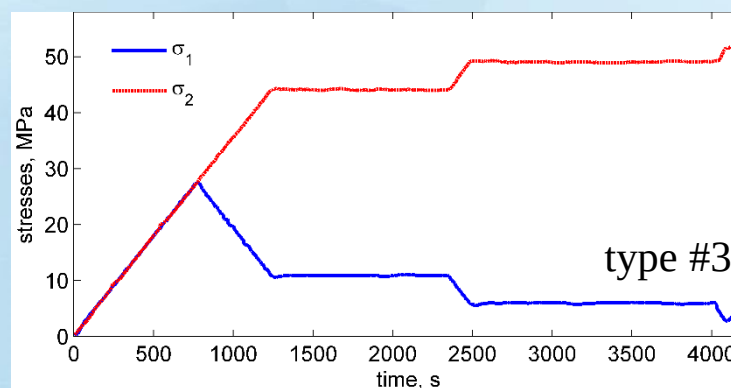
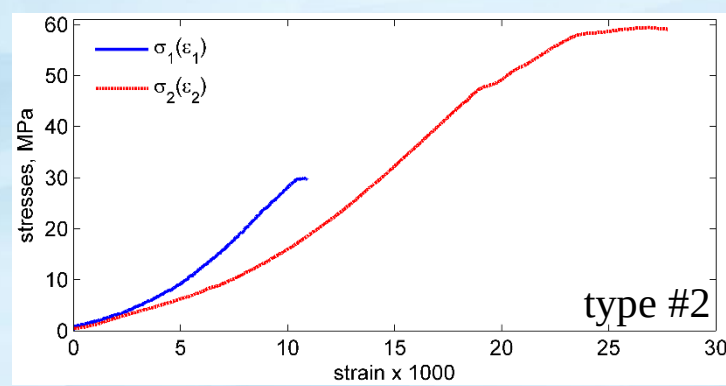
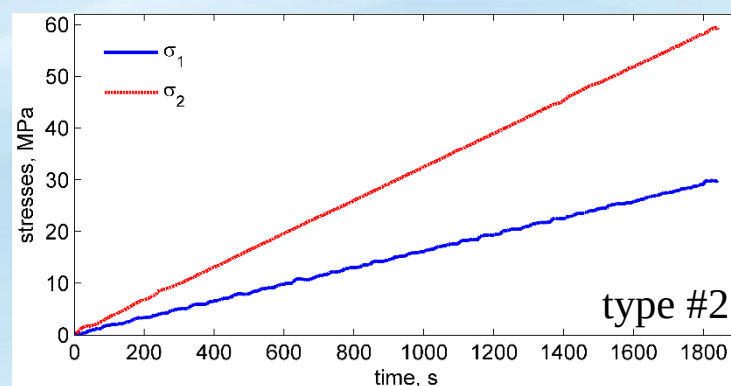
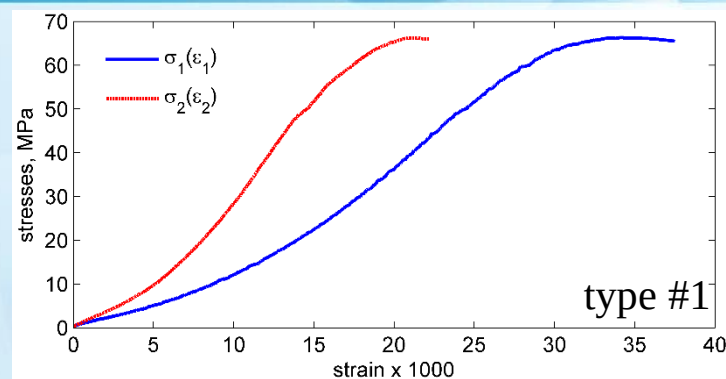
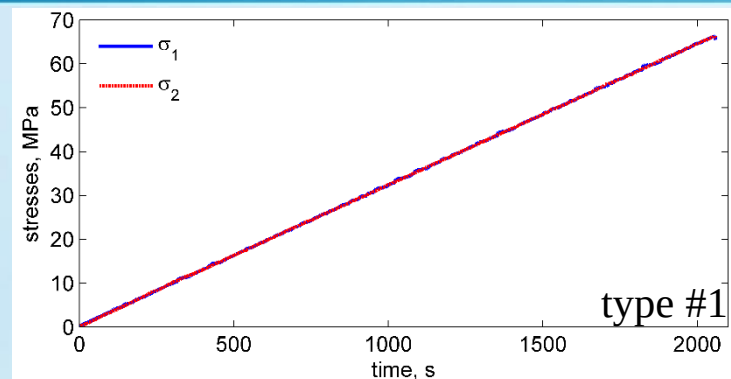
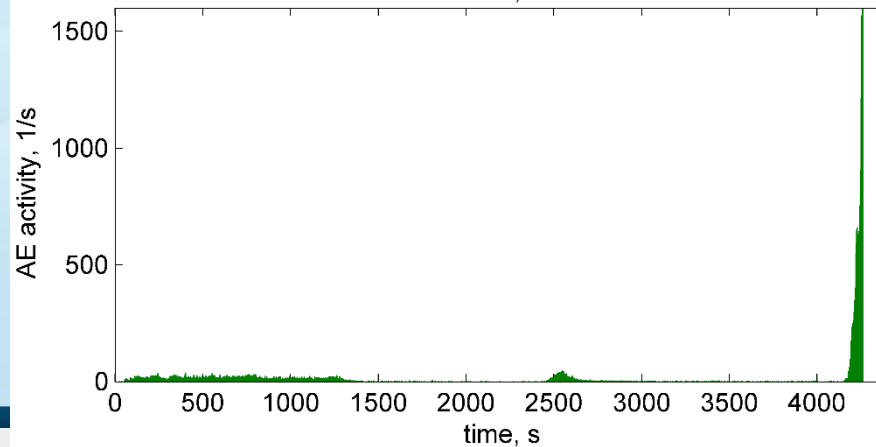
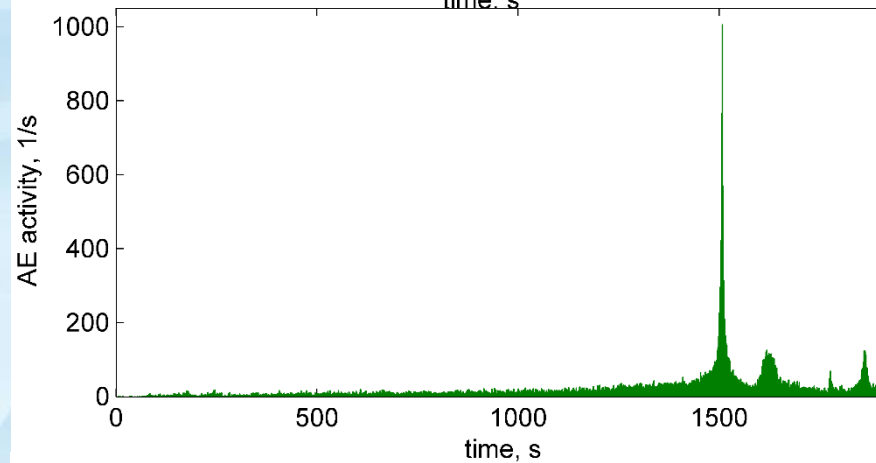
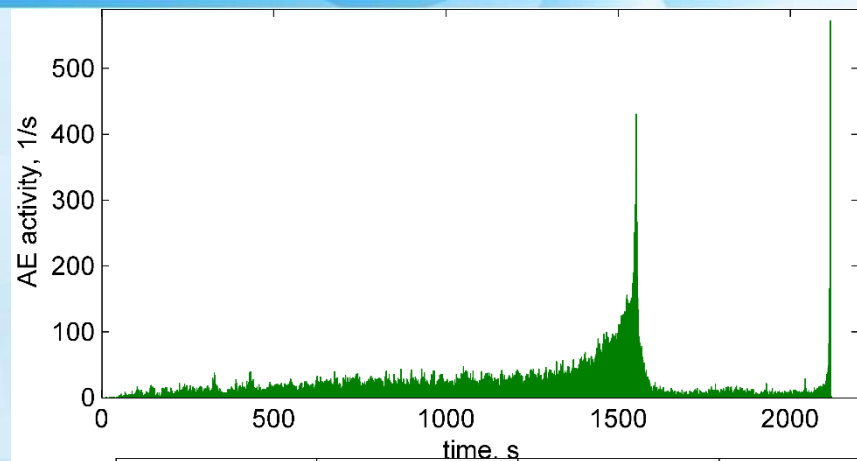
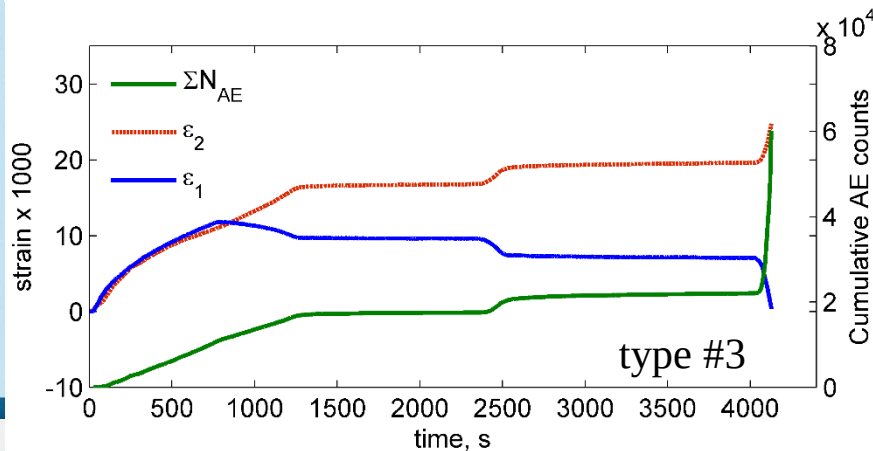
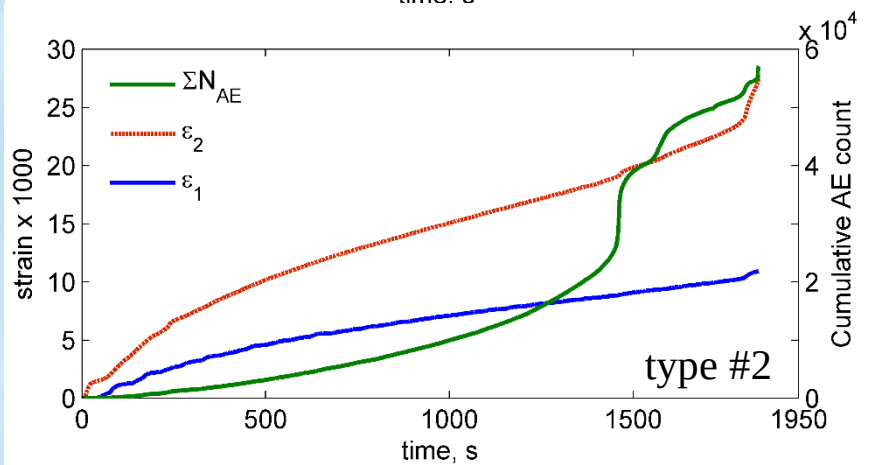
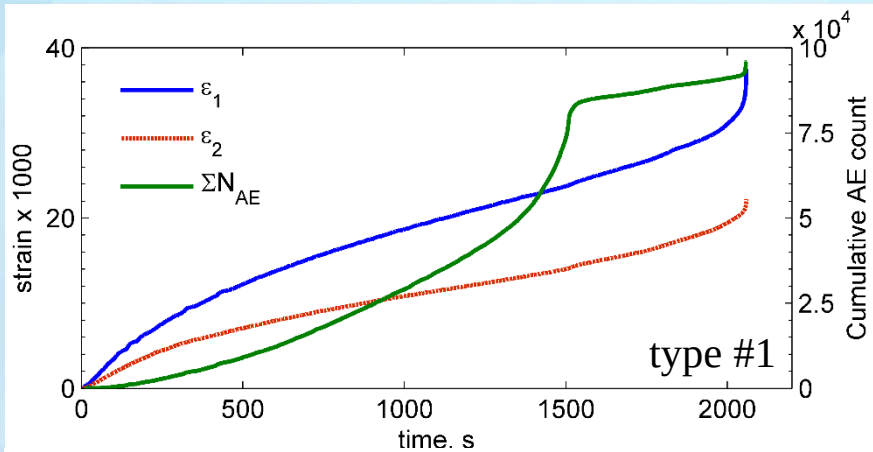


Рис. 2. Зависимости напряжений от времени (слева) и напряжений от деформации (справа) для трех типов экспериментов на двухосное сжатие.



Методы кластерного анализа:

1. *Вероятностный подход.*

- **К-средних**
- К-медиан
- ЕМ-алгоритм
- Алгоритмы семейства FOREL
- Дискриминантный анализ

2. *Подходы на основе систем искусственного интеллекта.*

- Метод нечеткой кластеризации С-средних
- Нейронная сеть Кохонена
- Генетический алгоритм

3. *Логический подход.*

4. *Теоретико-графовый подход.*

- Графовые алгоритмы кластеризации

5. *Иерархический подход.*

- Агломеративные подходы
- Дивизивные подходы.

Этапы кластерного анализа:

1. Выбор множества АЭ параметров, по которым будут оцениваться объекты в выборке;
2. Выбор и реализация алгоритма кластеризации;
3. Валидация найденных кластеров.

Кластерный анализ данных АЭ

Параметры импульса АЭ:

1. Amp – максимальная амплитуда импульса АЭ, дБ.
2. Dur – длительность импульса АЭ, с.
3. Fgrav – медианная частота импульса АЭ, кГц.
4. Fmax – частота максимума спектра импульса АЭ, кГц.
5. Rise – время нарастания, с.
6. Faver – средняя частота импульса: отношение длительности импульса к количеству пересечений порога, кГц.
7. RA – нормированное время нарастания: отношение Rise к Amp.

Метод главных компонент

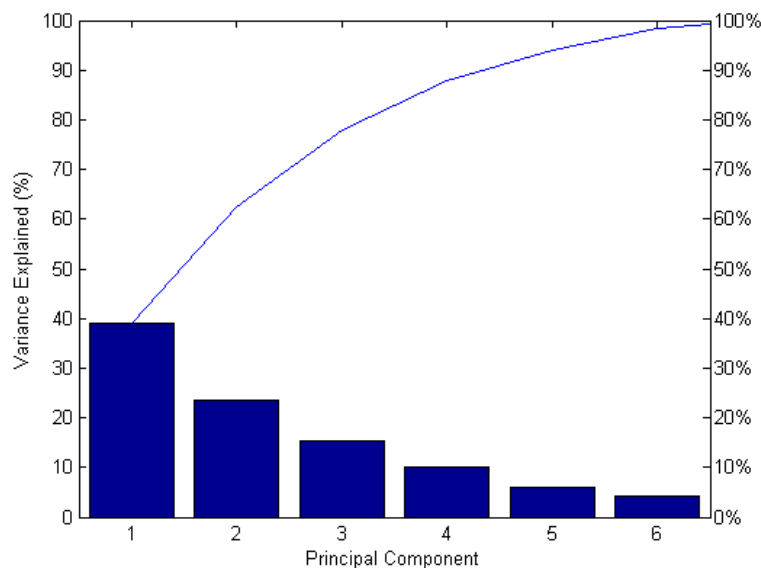


Таблица 1. Суммарная величина коэффициентов перед каждым параметром в трех главных компонентах.

Amp, V	Fmax, kHz	Fgrav, kHz	Faver, kHz	RA
0.8483	1.1371	0.9144	0.5333	1.0990

Dur, s	Energy, Vs
0.9001	0.7967

Оценка количества кластеров

Коэффициент Silhouette:

$$SC = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{b(x) - a(x)}{\max(a(x), b(x))},$$

где $a(x)$ – среднее расстояние от выбранной точки до всех других точек в заданном кластере,
 $b(x)$ – среднее расстояние от выбранной точки до всех точек по всем другим кластерам.

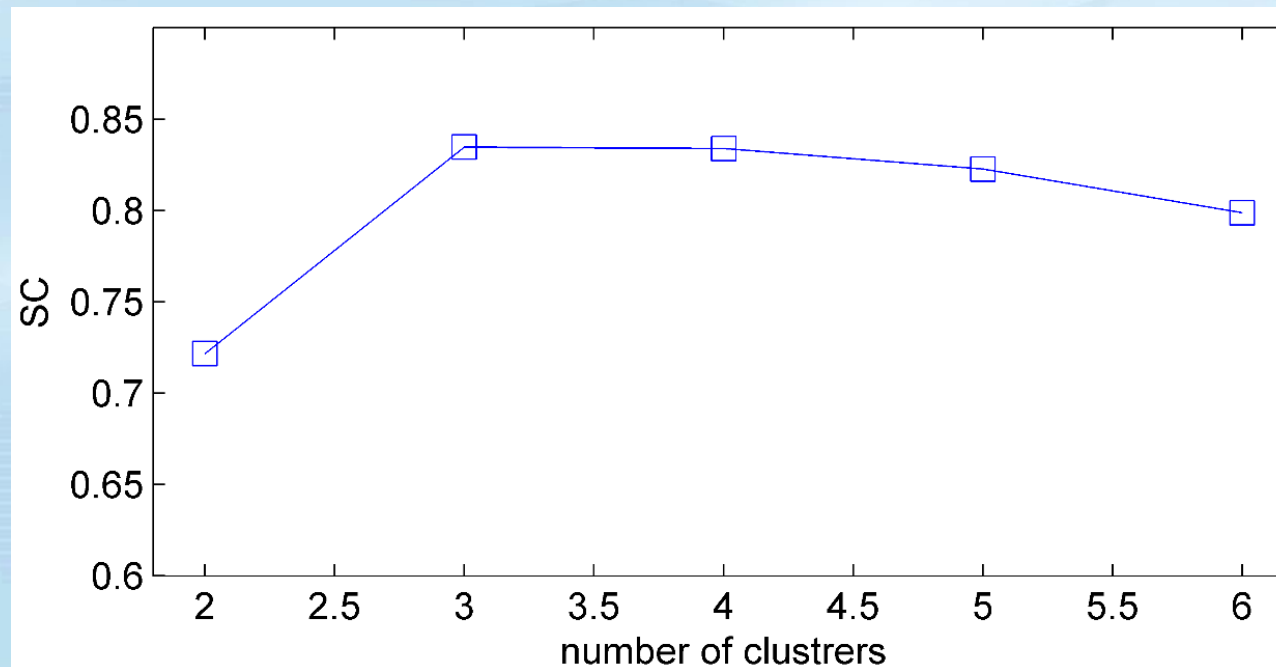


Рис.3. Зависимость среднего коэффициента Silhouette от количества кластеров.

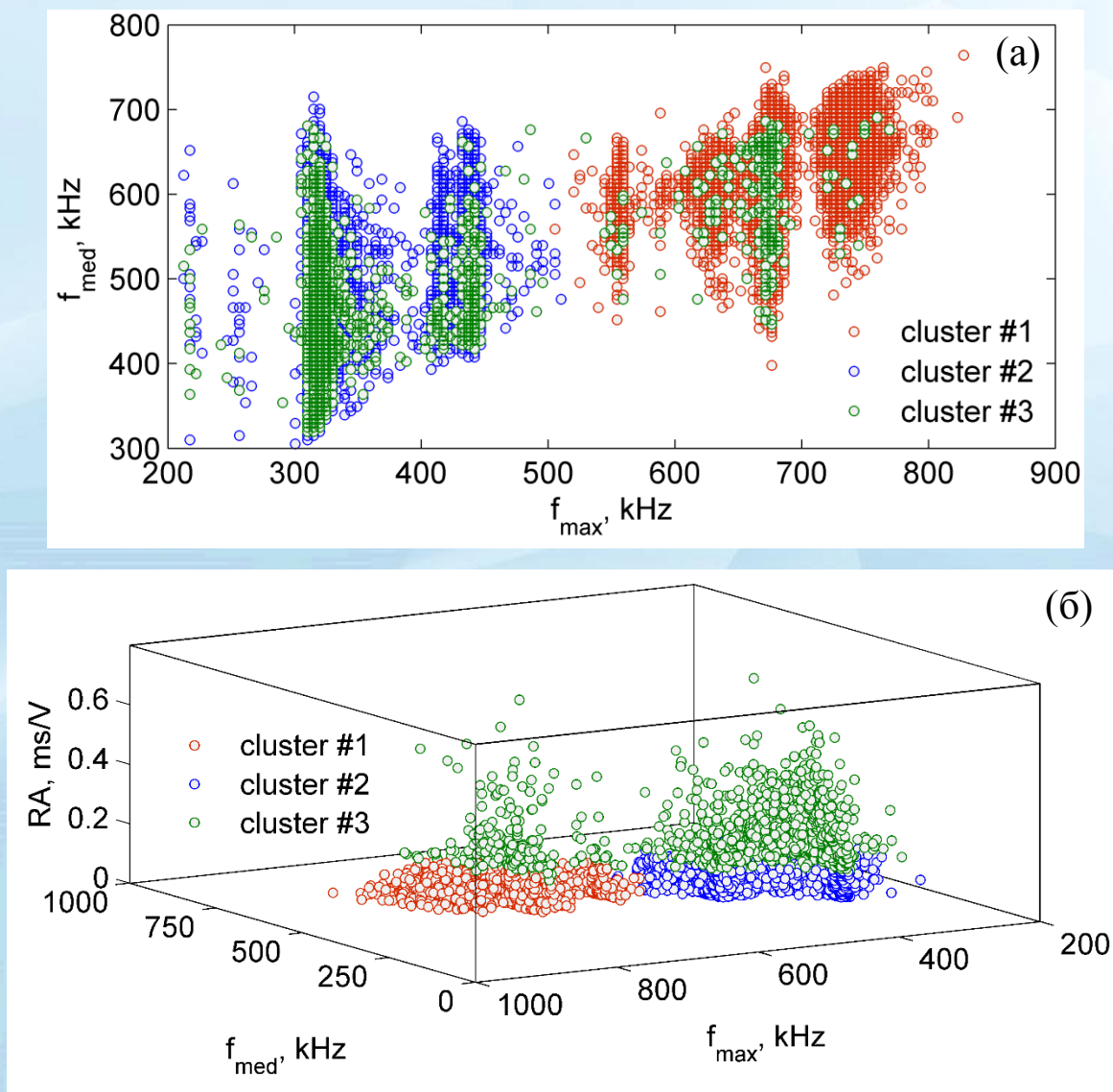


Рис.4. Разделение импульсов АЭ на кластеры в пространстве параметров $f_{\max}$ - f_{med} (a) и $f_{\max}$ - f_{med} - RA (б)

Результаты кластерного анализа. Неравнокомпонентное двухосное сжатие

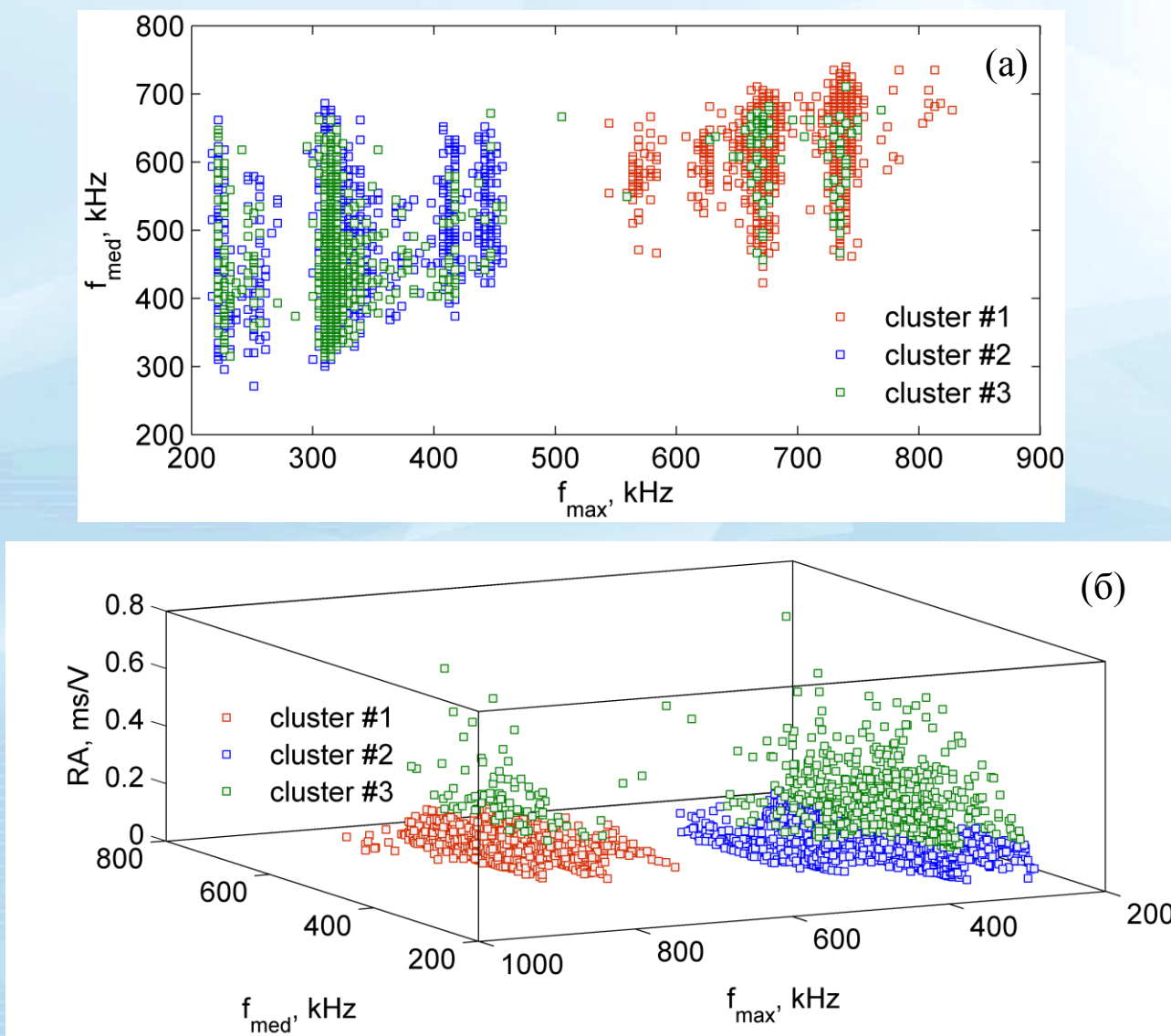


Рис.5. Разделение импульсов АЭ на кластеры в пространстве параметров $f_{\max}$ - f_{med} (а) и $f_{\max}$ - f_{med} - RA (б)

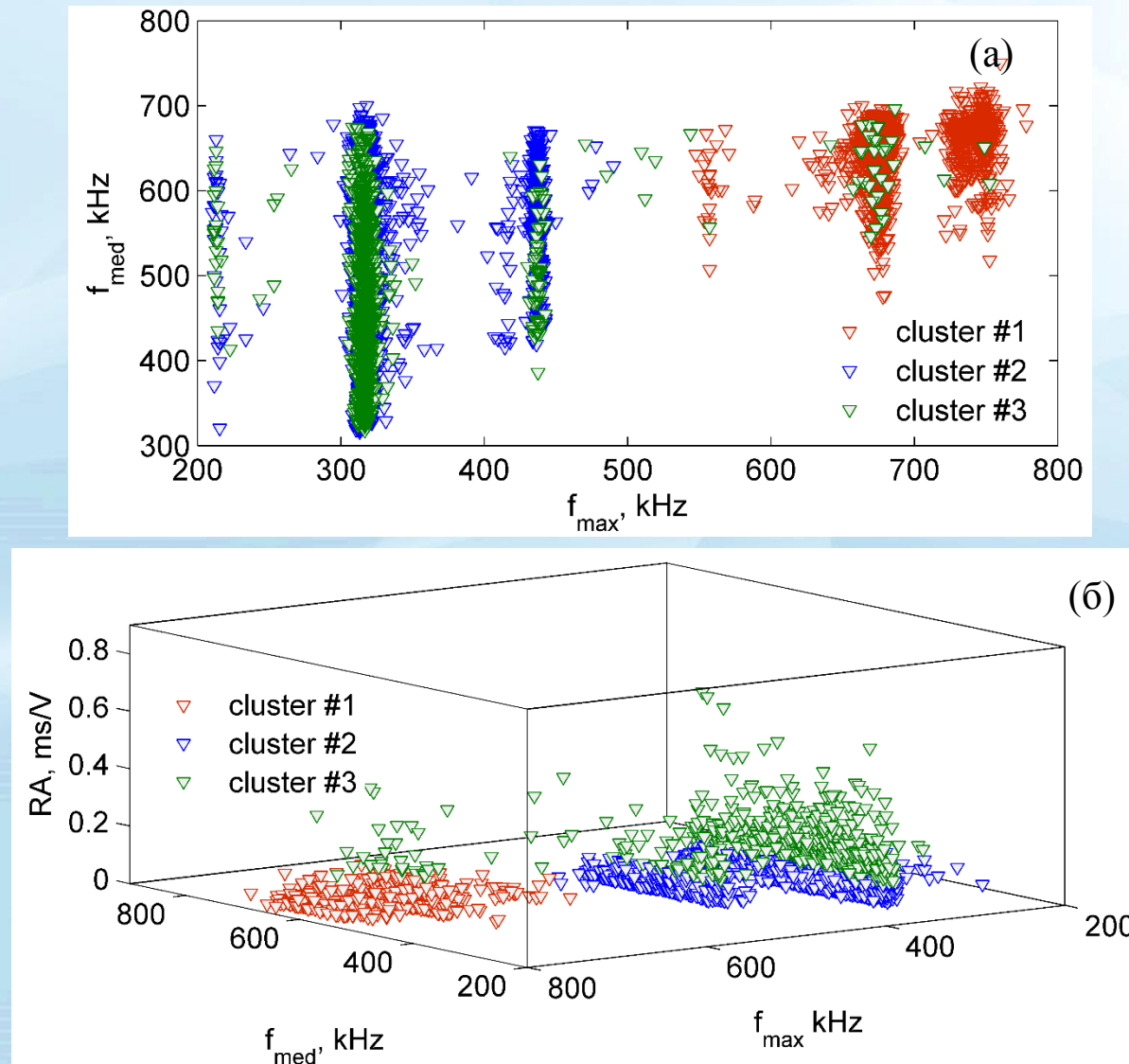
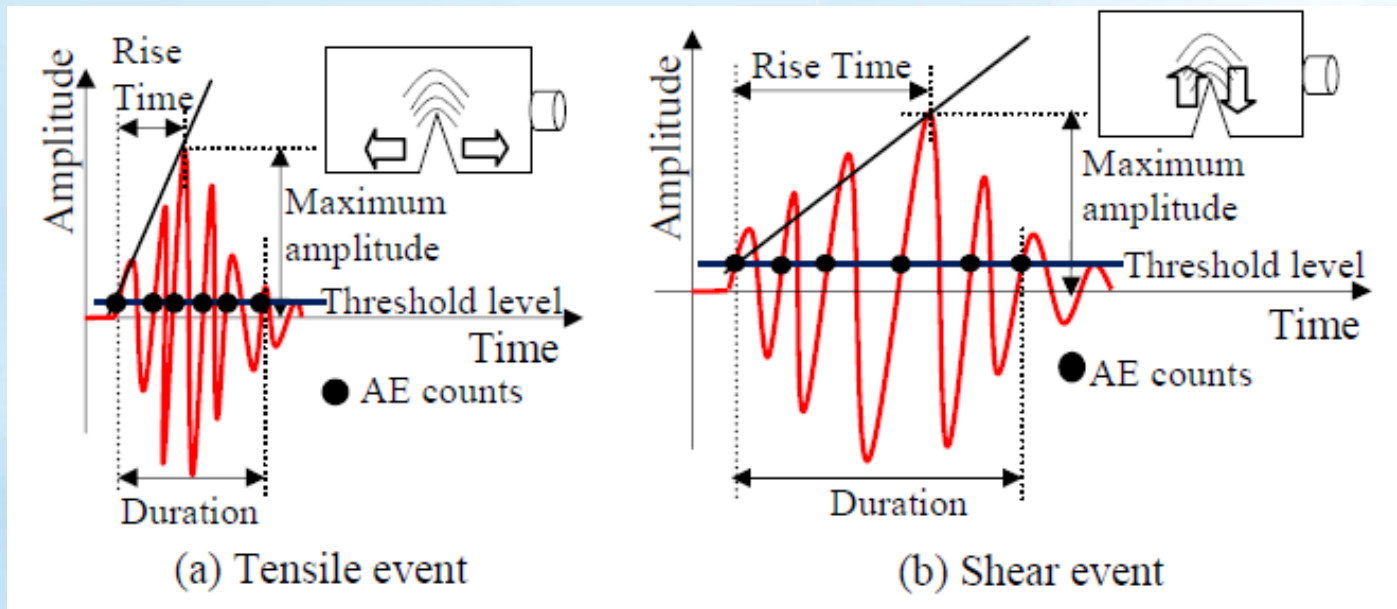


Рис.6. Разделение импульсов АЭ на кластеры в пространстве параметров $f_{\max}-f_{\text{med}}$ (а) и $f_{\max}-f_{\text{med}}-RA$ (б)

Нормативный документ: JCMS-III B5706

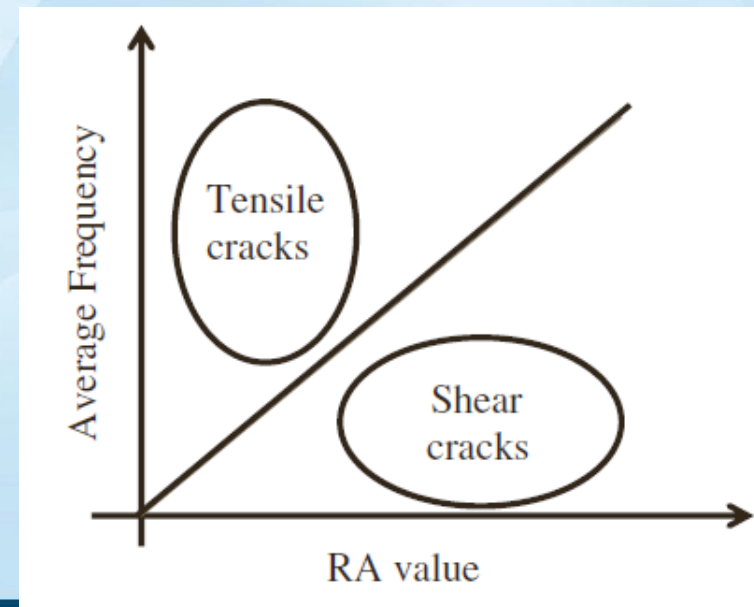


$RA = \text{rise time} / \text{maximum amplitude},$
 $[\text{ms/V}];$

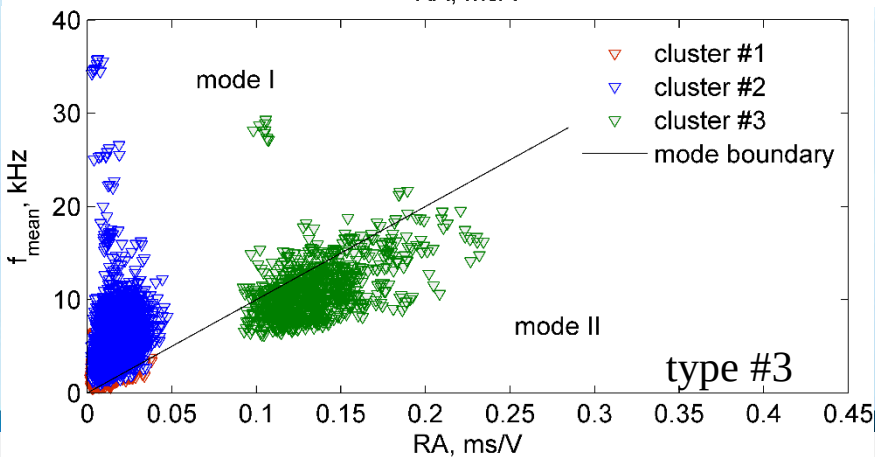
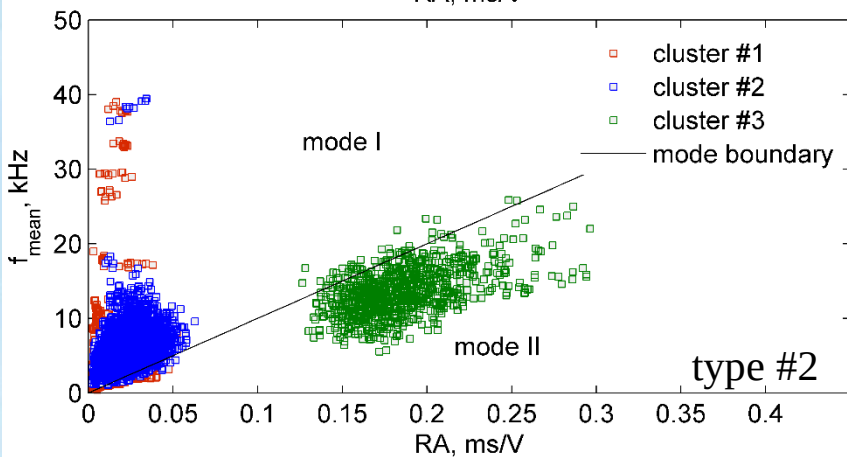
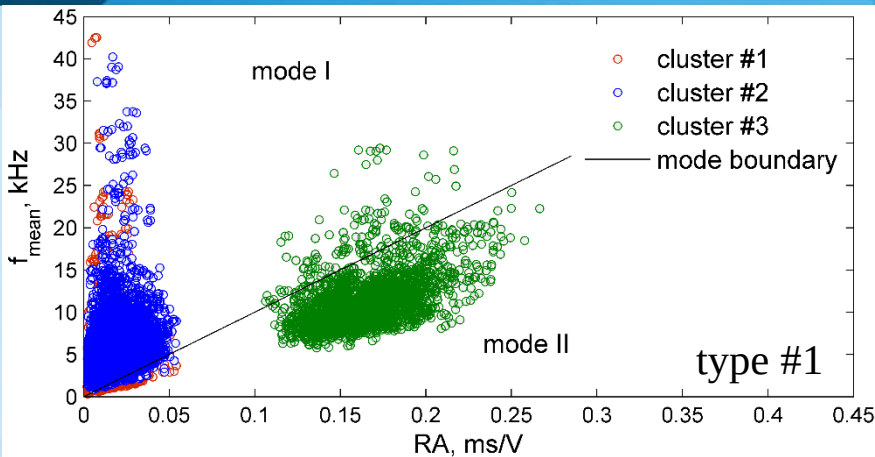
$AF = \text{count} / \text{duration time}, [\text{kHz}];$

Ono K. Application Of Acoustic Emission For Structure Diagnosis
 // Diagnostyka - diagnostics and structural health monitoring.
 2011. V. 2. N. 58. P. 3-18.

Ohtsu M., Isoda T., Tomoda Y. Acoustic emission techniques
 standardized for concrete structures // J. Acoustic Emission. 2007.
 V. 25. P. 21-32.



Классификация источников АЭ



Классификация найденных кластеров:

- 1 – высокочастотные события, источник – трещины нормального отрыва;
- 2 – низкочастотные события, источник – трещины нормального отрыва;
- 3 – низко- и высокочастотные события, источник – трещины сдвига.

Графики повторяемости для импульсов АЭ каждом кластере

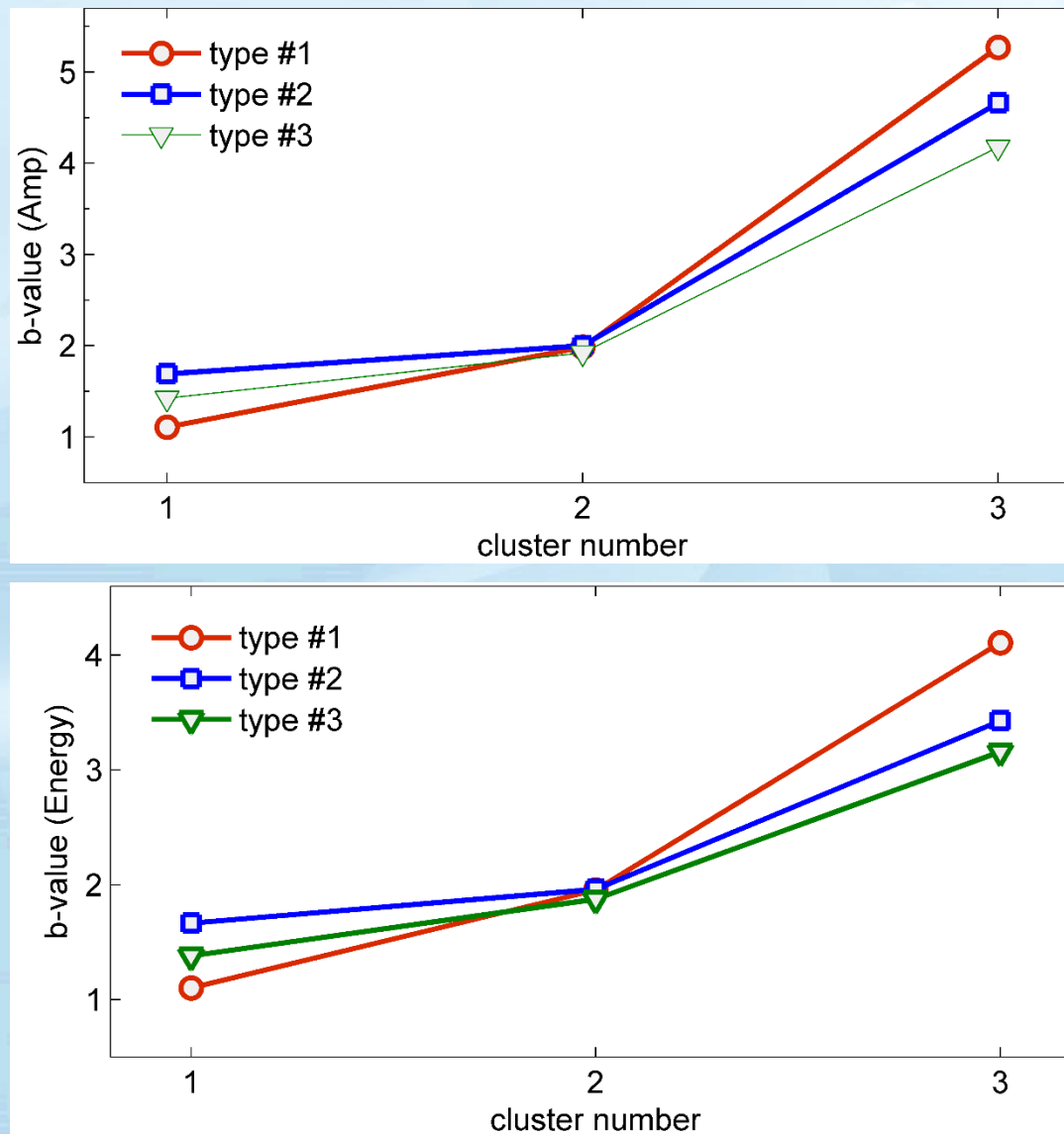
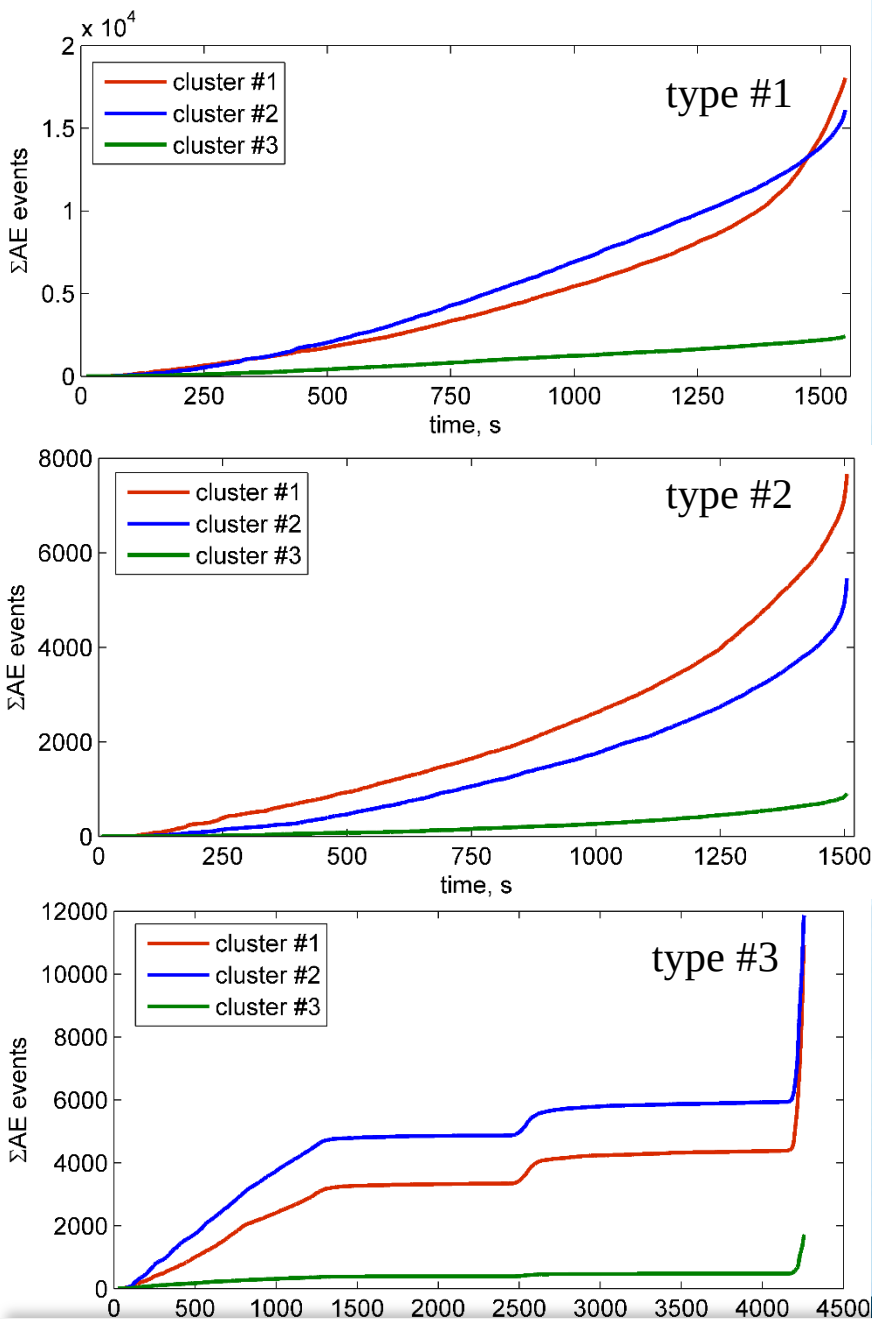


Рис.7. b-value для максимальных амплитуд (а) и энергий (б) импульсов АЭ

Суммарный счет импульсов АЭ в кластерах



Классификация найденных кластеров:

- 1 – высокочастотные события, источник – трещины нормального отрыва;
- 2 – низкочастотные события, источник – трещины нормального отрыва;
- 3 – низко- и высокочастотные события, источник – трещины сдвига.

Относительное разделение сигналов АЭ по кластерам

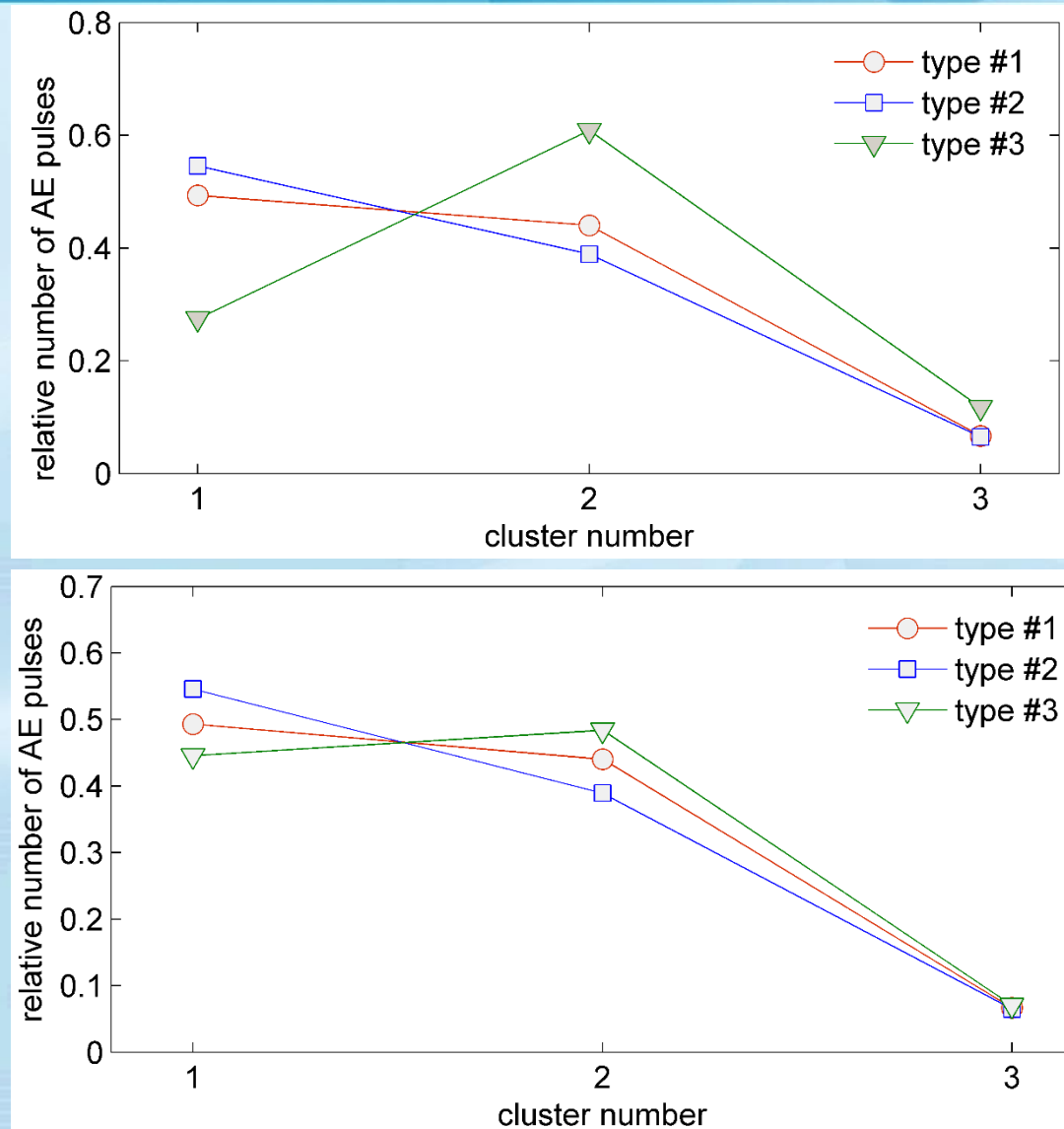
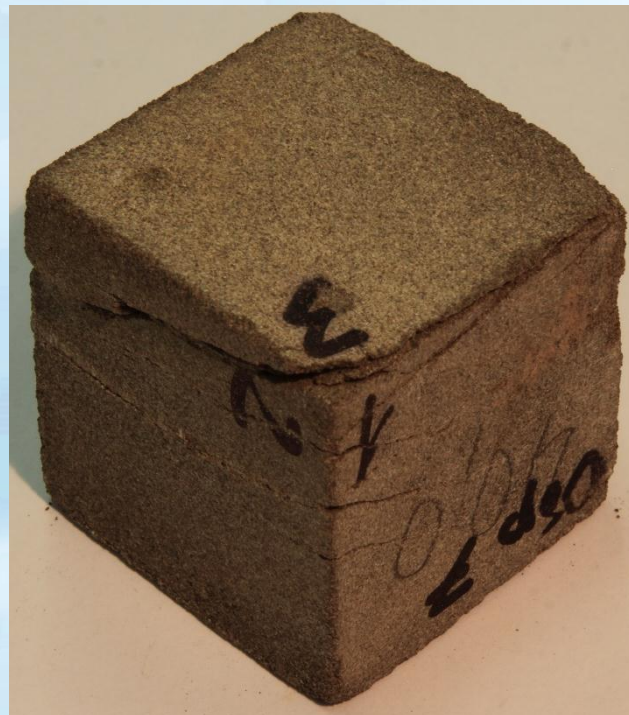


Рис.8. Относительное количество импульсов АЭ в кластерах для трех типов экспериментов (без заключительной стадии (а) и с ней (б) в эксперименте на чистый сдвиг)

type #1 $\sigma_1 = \sigma_2$



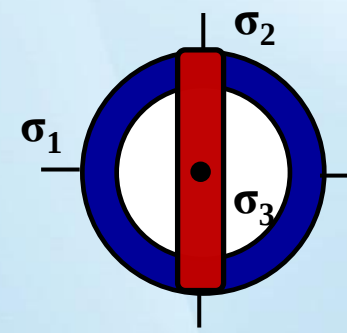
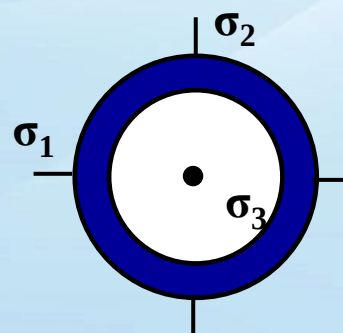
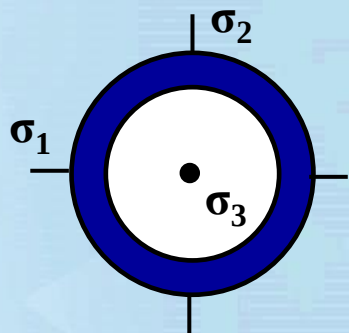
type #2 $\sigma_1 = 0.5 \sigma_2$



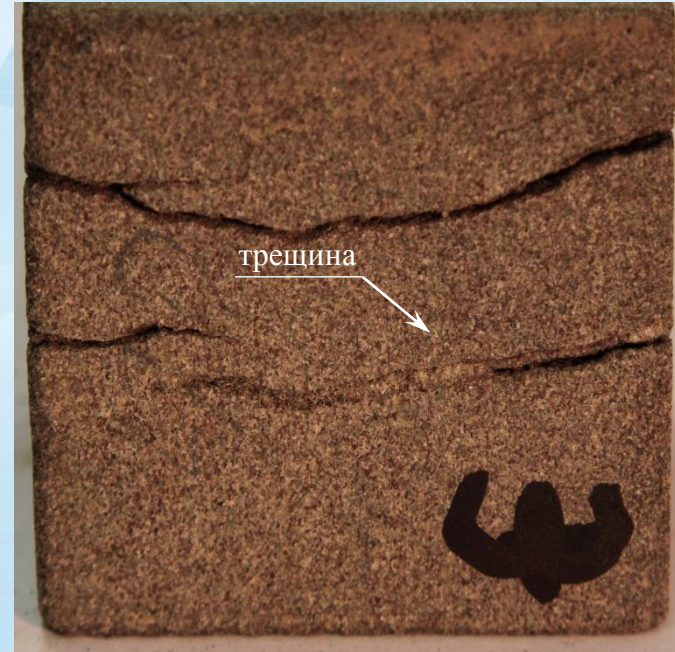
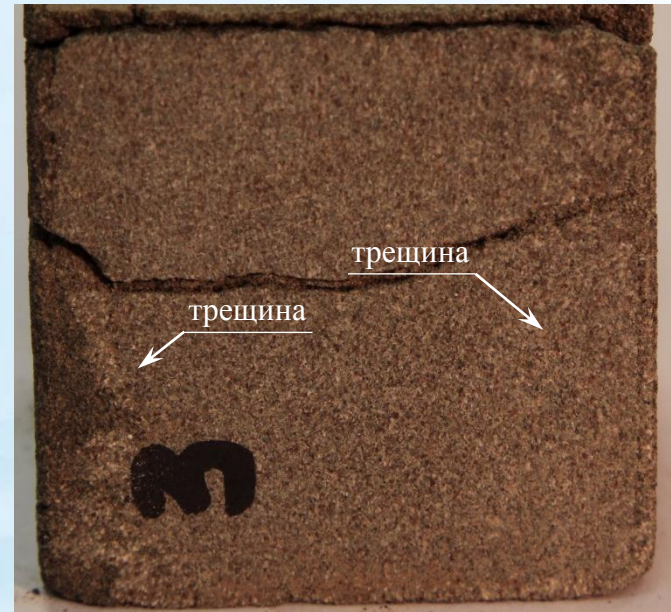
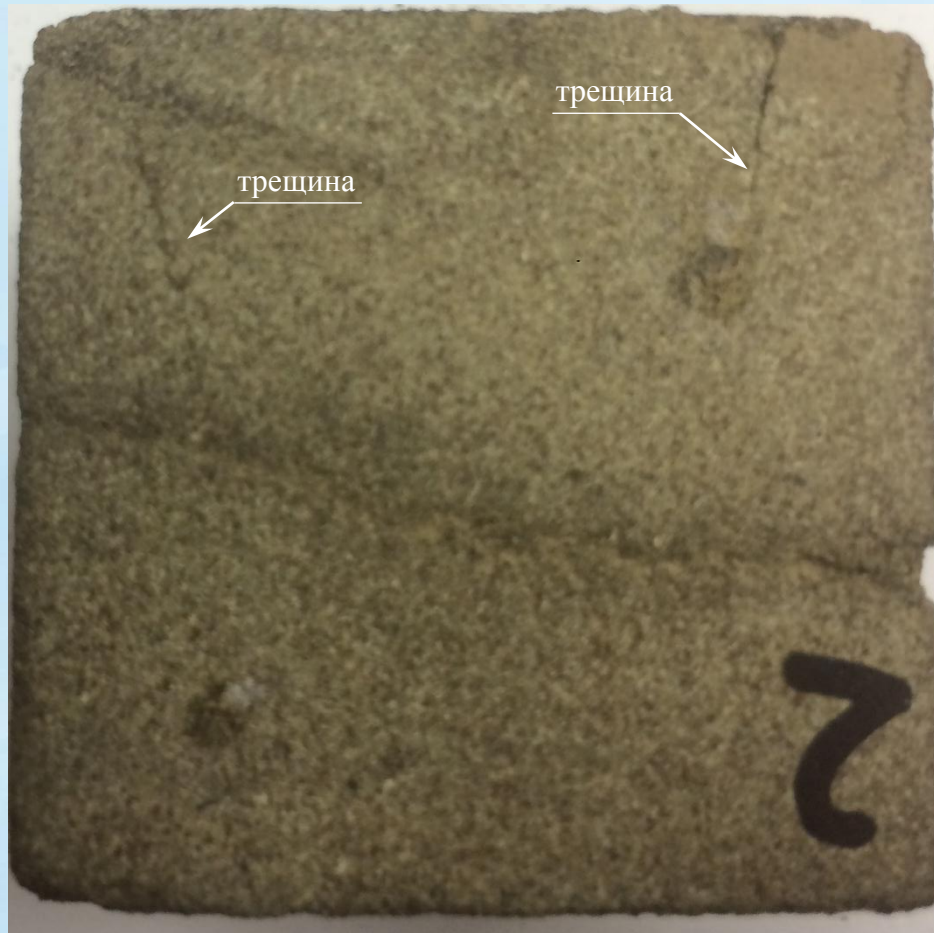
type #3



Стереографические проекции



type #3



1. Проведены эксперименты на равнокомпонентное, неравнокомпонентное двухосное сжатие, а также чистый сдвиг в плоскости образцов песчаника с регистрацией акустической эмиссии.
2. В результате решения задачи кластеризации показано, что все зарегистрированные в экспериментах импульсы АЭ разделяются на три кластера.
3. Проведена классификация найденных кластеров. Показано, что источниками АЭ в двух кластерах являются трещины нормального отрыва, в третьем – трещины сдвига.
4. На основе полученные результатов объяснены механизмы деформирования песчаника в экспериментах на двухосное сжатие.
5. Полученные результаты являются опорными для исследования механизмов накопления повреждений при трехосных истинных испытаниях горных пород.

A wide-angle landscape photograph showing a winding asphalt road that curves through a valley. The valley is filled with a dense forest of trees, some of which are bare and others with green foliage. In the background, rolling hills and mountains are visible under a bright blue sky with scattered white clouds. The text "СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!!" is overlaid in the center of the image.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!!