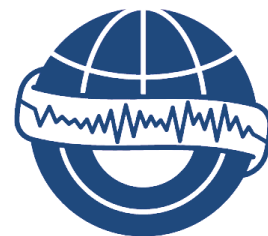


Анализ статистических параметров акустической эмиссии при термическом воздействии на горные породы разного состава и происхождения

Индаков Г.С.^{1,2}, Казначеев П.А.²,
Майбук З.-Ю.Я.², Пономарев А.В.²,
Матвеев М.А.², Морозов Ю.А.²

¹ МГУ им. М.В.Ломоносова, г. Москва, Россия

² Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия



Введение

Цели работы:

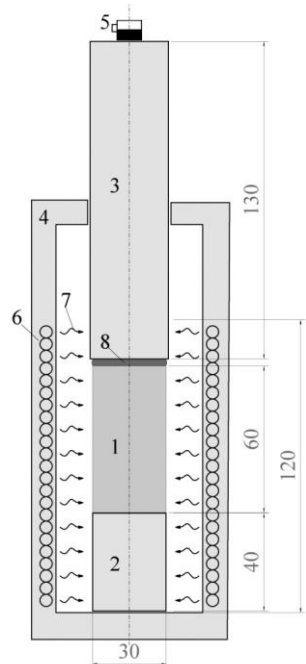
- Сравнительный анализ особенностей процесса термически стимулированного разрушения горных пород разного происхождения на основе статистики импульсов термостимулированной акустической эмиссии* (ТАЭ)
- Выявление возможной взаимосвязи между особенностями ТАЭ в образцах горных пород и параметрами микроструктуры.

Результаты имеют особое значение для:

- Анализа вулканической и глубокофокусной сейсмичности
- Задачи повышения эффективности методов разработки месторождений углеводородов путем термического воздействия на породу-коллектор

* Акустическая эмиссия (АЭ) – излучение упругих волн твёрдым телом, в котором происходят изменения структуры материала.

Эксперименты с гранитами и базальтами



Образцы:

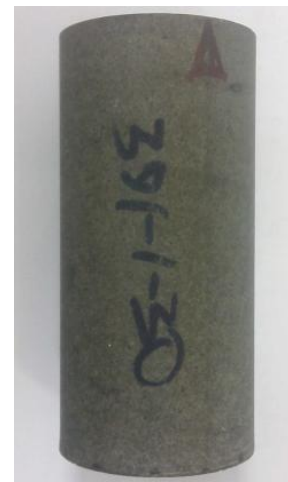
- Граниты (6 шт.)
- Базальты (5 шт.)



а)



б)



в)

Примеры образцов:

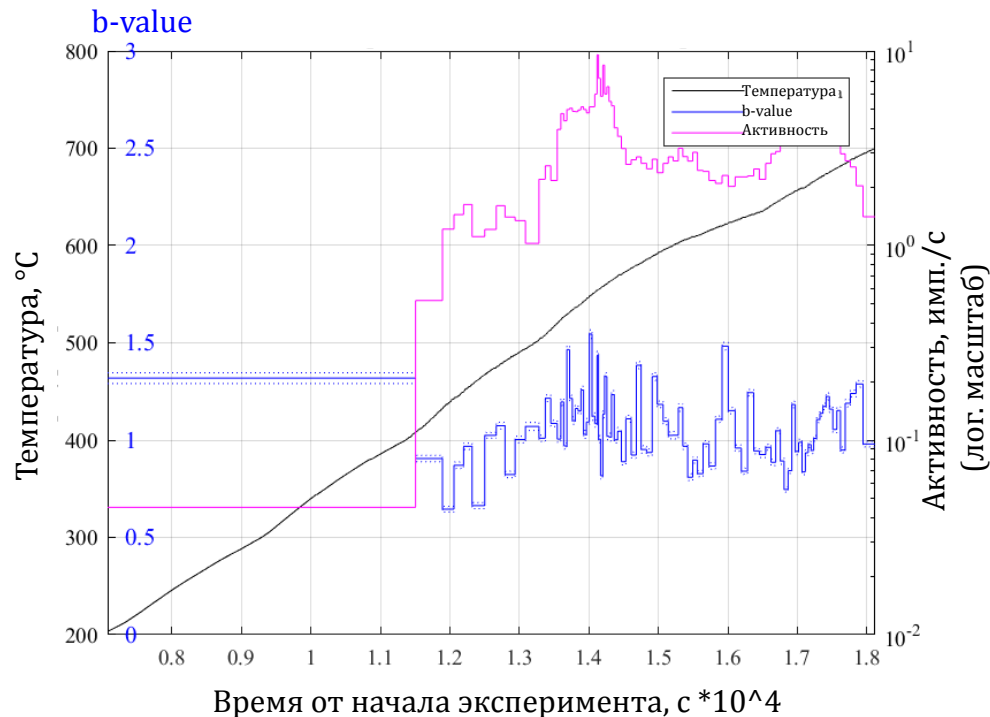
а) – Гранит 167-7-30, б) – Гранит 156-12Г, в) – Базальт 391-big

Схема экспериментальной
установки

АКТИВНОСТЬ АЭ

Активность, рассчитанная в окнах в 200 событий:

Эксперимент sBQ2: образец – basalt LAT0411, нагрев



$$I = \frac{N}{\Delta t}$$

N – число событий в окне,
 Δt – интервал времени между первым и последним событиями в окне.

Систематизация экспериментов:

Тип породы	Гранит	Базальт
Активность, имп./с		
Слабая (менее 0.1)	PHAN0548-4	LAT0209-4-30
Средняя (от 0.1 до 2)	155-1-30 (№1а)	KHA0314-3
	117-1-30	PHAN0487-1
Сильная (от 2 до 10)	167-7-30 (№7)	LAT0411
	156-12Г	
Критическая (обр. разруш.)	393-1-3С	391-big

Закон Гутенберга-Рихтера, b-value

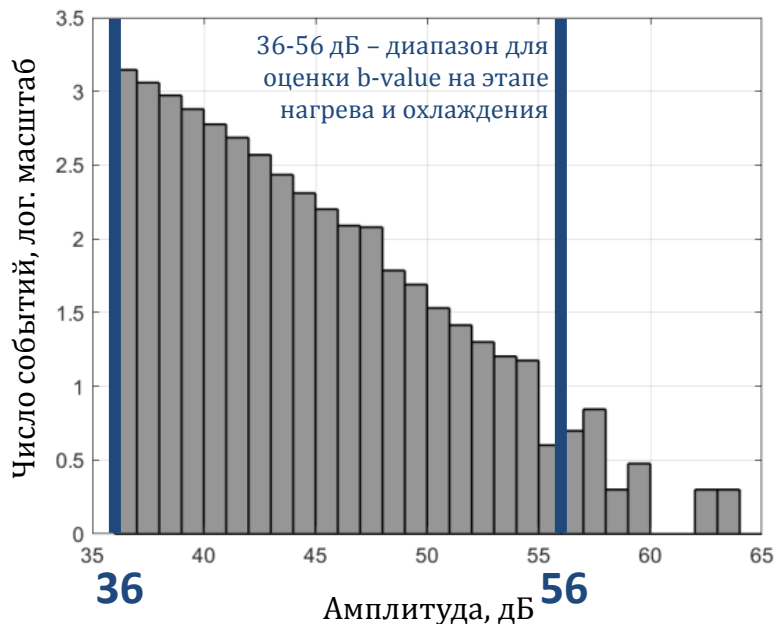
- Закон повторяемости:

$$\log_{10} N = a - bA$$

N – число событий

A – их амплитуда

a, b – параметры регрессии



Методы оценки b-value:

- Линейная регрессия
- Метод максимального правдоподобия для цензурированной выборки
- Метод максимального правдоподобия с оценкой представительной магнитуды по максимальной кривизне

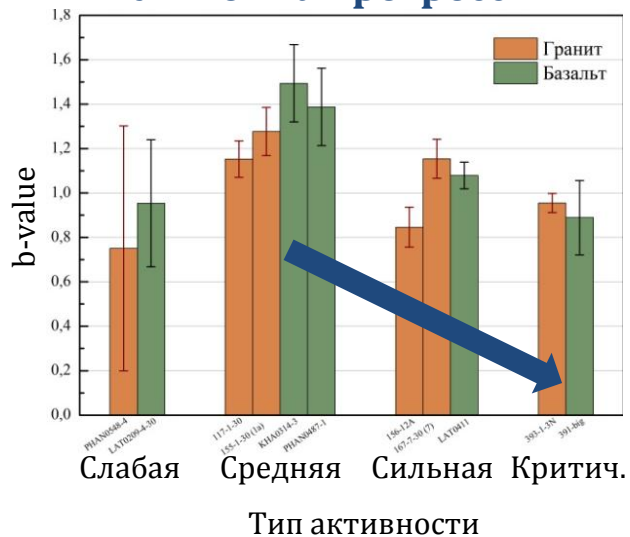
Полученные результаты

[Индаков Г.С., Казначеев П.А, 2021]:

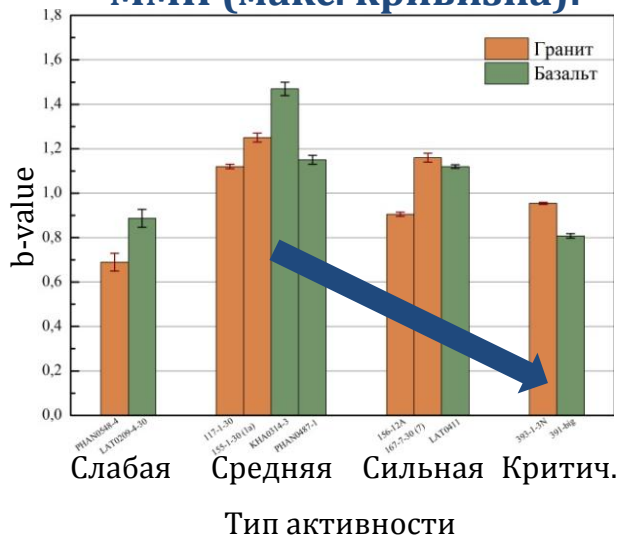
1. Характер развития термически стимулированного разрушения не зависит от типа породы;
2. Чем выше средняя за период нагрева активность ТАЭ, тем ниже b-value (наклон графика повторяемости)

Диаграммы b-value для этапа нагрева

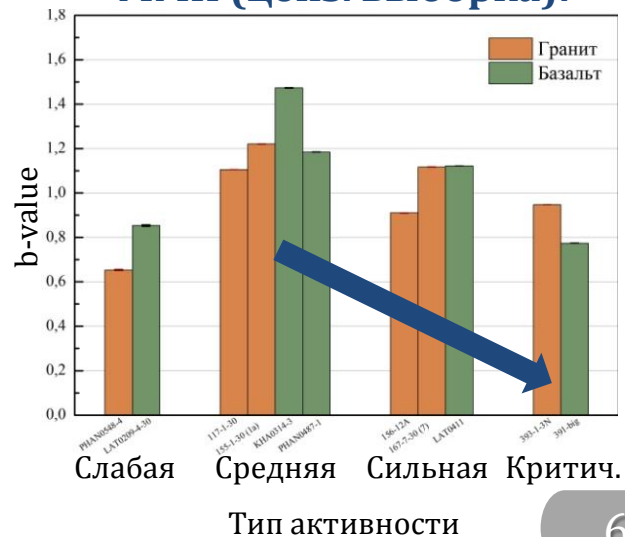
Линейная регрессия:



ММП (макс. кривизна):



ММП (ценз. выборка):



Проблематика

Предполагается, что при термическом воздействии

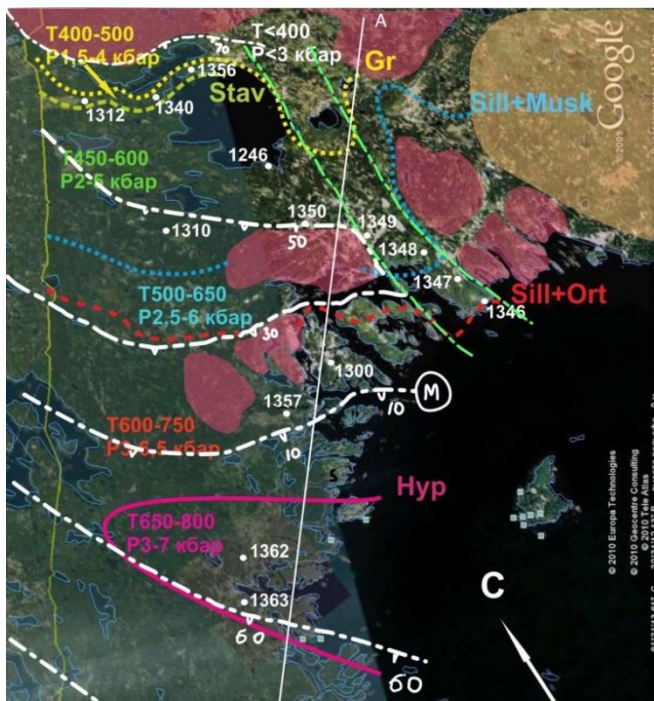
1. Средняя активность разрушения и соотношение слабых и сильных событий (b-value) коррелируют между собой;
2. Тип породы может не оказывать существенного влияния на развитие разрушения;
3. Размер микротрещин, образующихся при разном уровне термомеханических напряжений, связан с характерным размером зерен и (или) длиной межзерновых границ.

Исследуется вопрос о наличии корреляций между

1. Параметрами микроструктуры горных пород (в частности, статистическими параметрами распределения зерен по размерам);
2. Параметрами термически стимулированного разрушения (в частности, активностью АЭ, b-value).

Также планируется привлечение вспомогательных петрофизических данных о трещинно-поровом пространстве, упругих и прочностных параметрах

Эксперименты с метапесчаниками



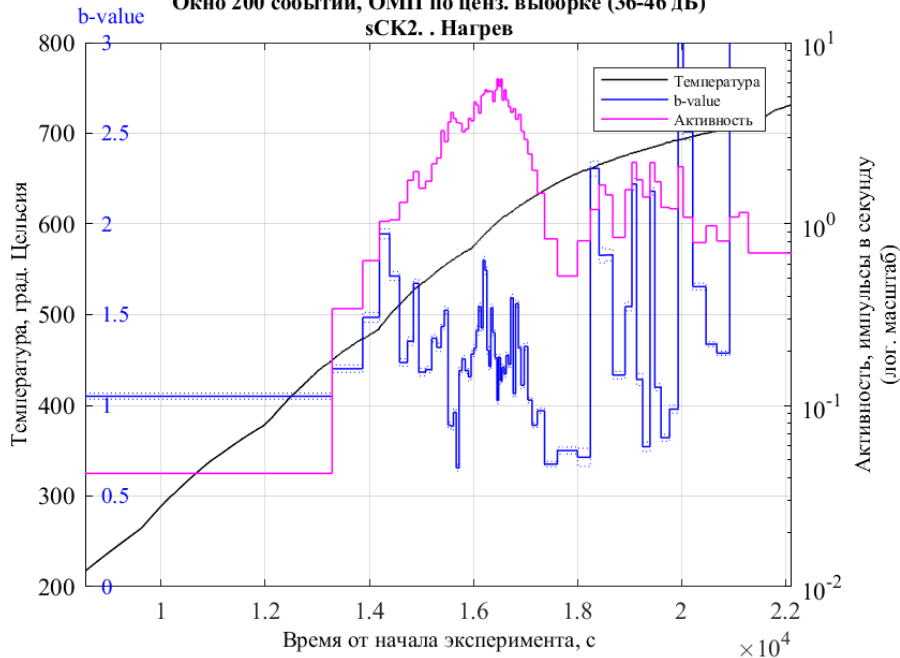
[Морозов Ю.А. и др., 2019]

- 18 образцов метатерригенных горных пород Северного Приладожья различного уровня глубинности (метапесчаники); данные по ТАЭ [Казначеев П.А. и др., 2019]
- Исходные осадочные г.п. претерпели метаморфизм на различных глубинах и при разных рТ-условиях (около 1.5 млрд лет назад), что повлияло на их микроструктуру
- В зависимости от испытанных рТ-условий в ходе метаморфизма образцы классифицированы по зонам отбора (по результатам геотермобарометрических исследований)

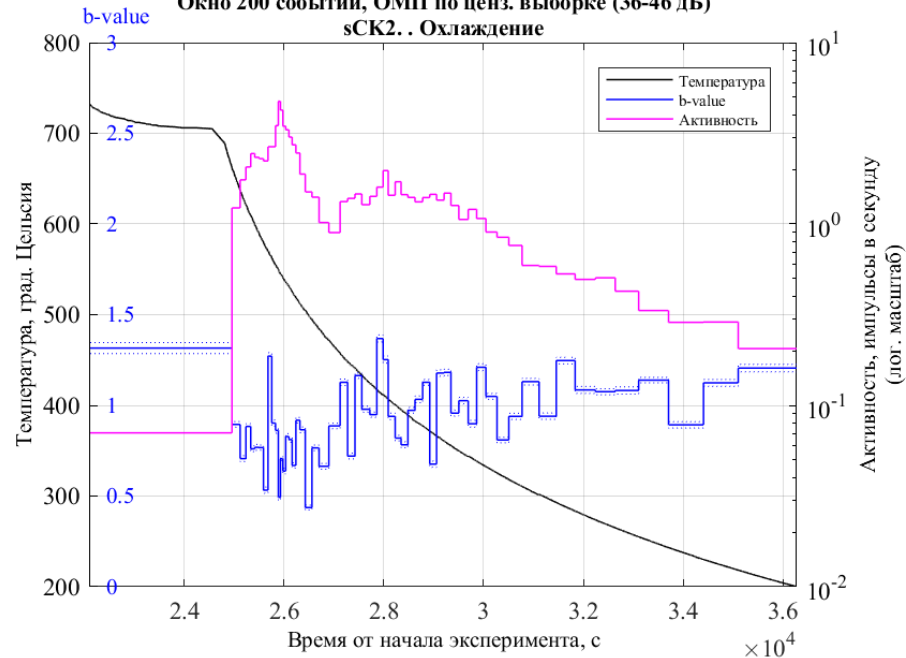
№ зоны отбора	Количество исслед-ых образцов	Параметры метаморфизма	
		Ориентировочные значения давлений, р, кбар	Ориентировочные значения температур, Т, °С
1	3	1.5 - 4	400 - 500
2	5	2 - 5	450 - 600
3	1	2.5 - 6	500 - 650
4	3	3 - 6.5	600 - 750
5	2	3 - 7	650 - 800
6	1	-	-

Активность и b-value

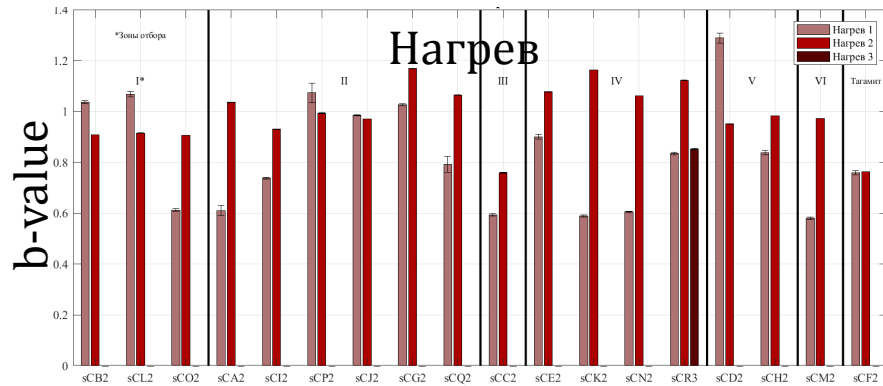
Изменение температуры, b-value и активности в зависимости от времени
Окно 200 событий, ОМП по ценз. выборке (36-46 дБ)
sCK2. . Нагрев



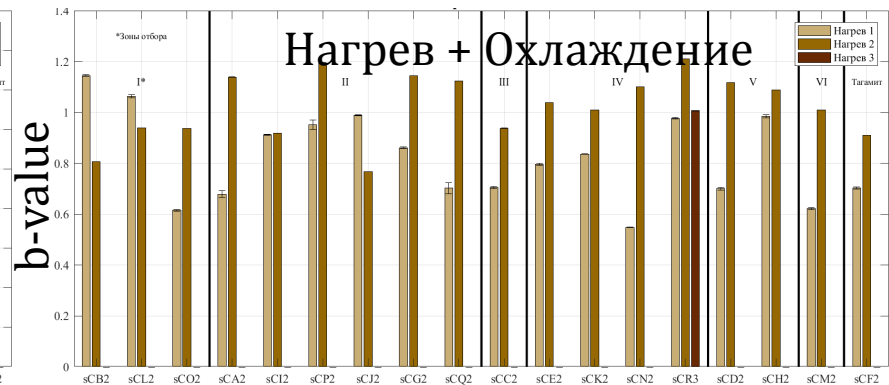
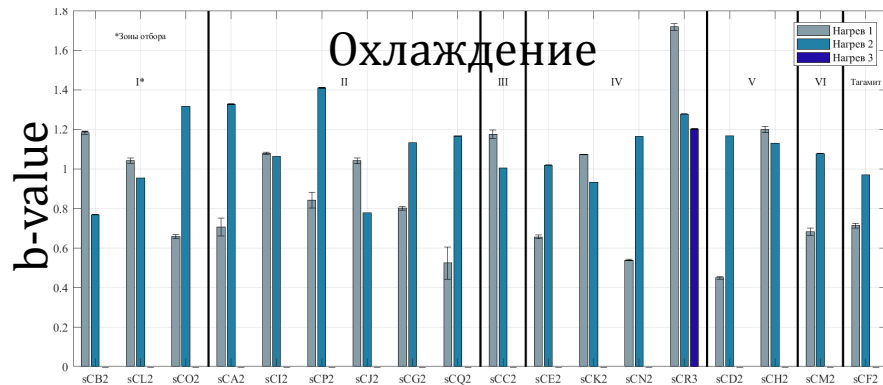
Изменение температуры, b-value и активности в зависимости от времени
Окно 200 событий, ОМП по ценз. выборке (36-46 дБ)
sCK2. . Охлаждение



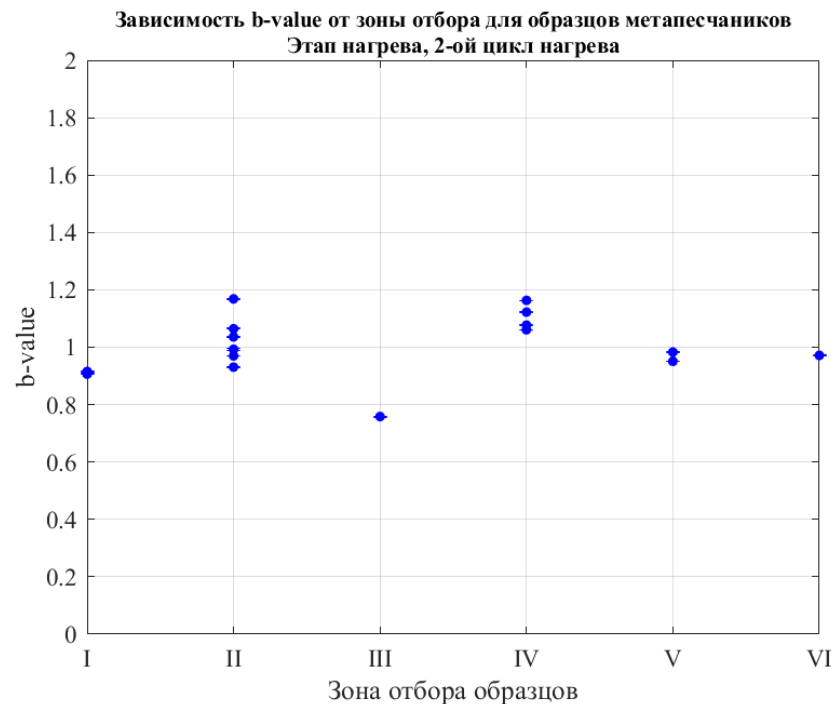
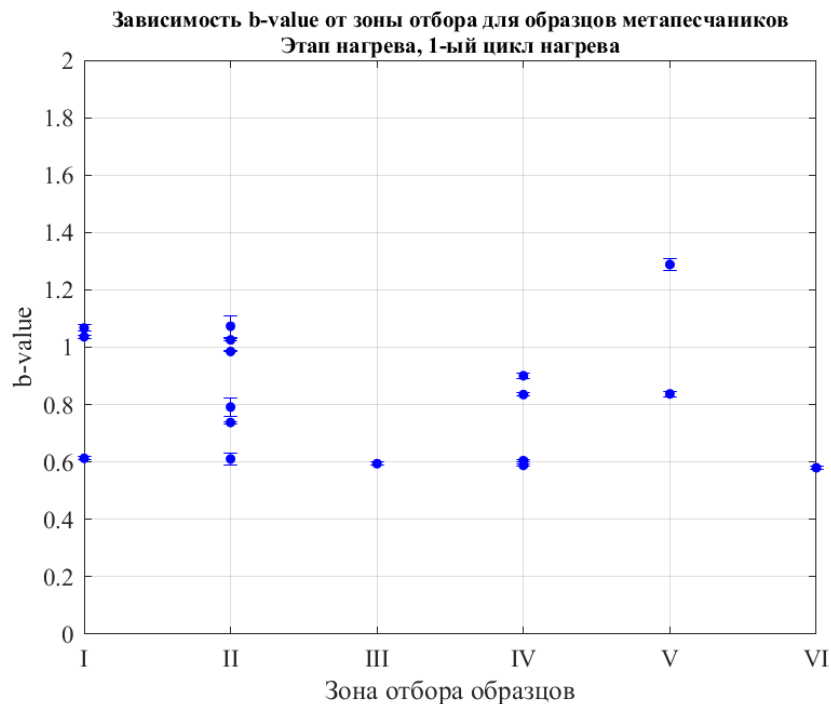
Диаграммы b-value



- Анализ b-value для образцов метапесчаников из различных зон отбора, циклы нагрева 1-3

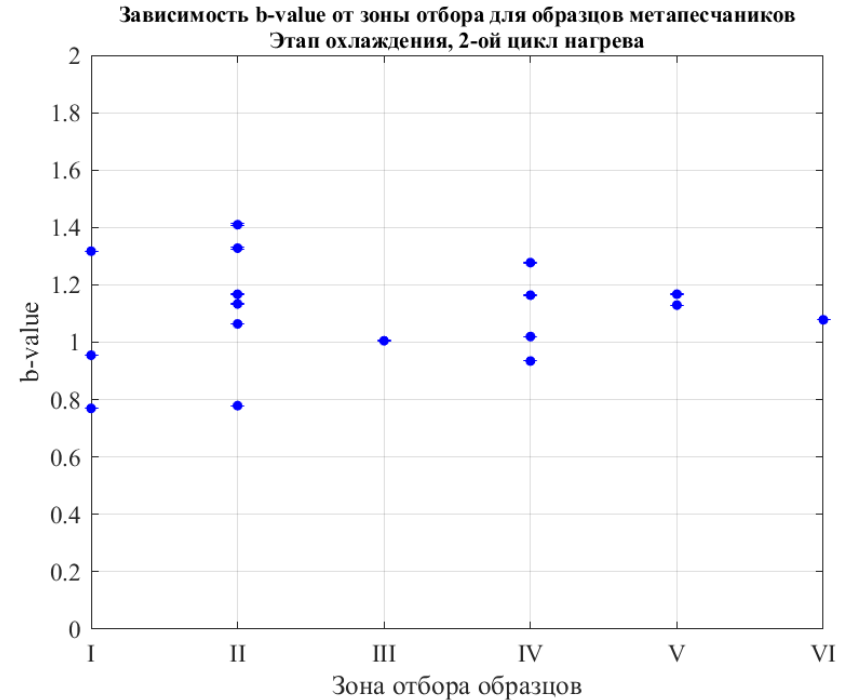
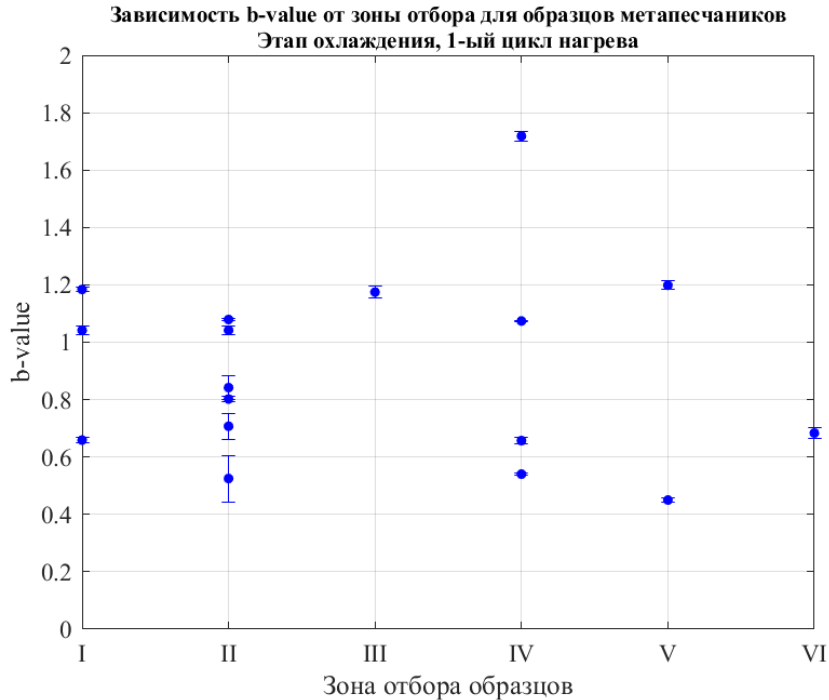


b-value, нагрев



(каждой точке соответствует один эксперимент с образцом)

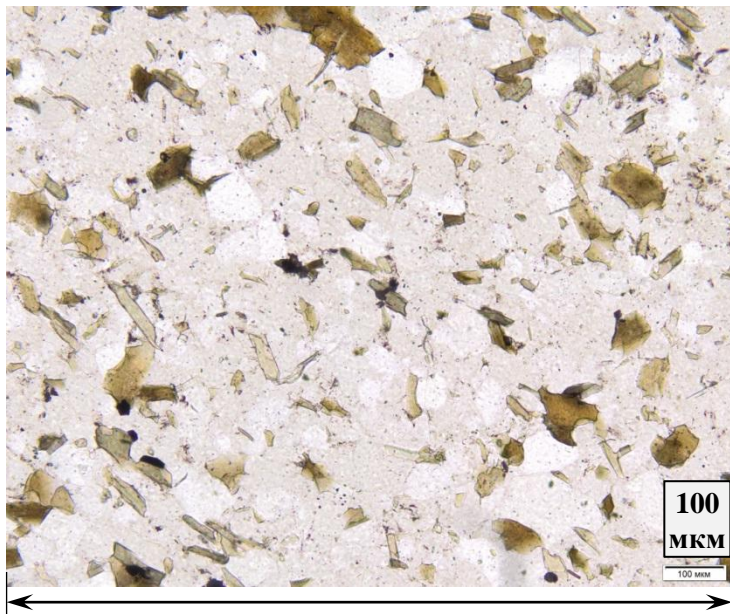
b-value, охлаждение



(каждой точке соответствует один эксперимент с образцом)

Исследование микроструктуры

Для анализа доступны фотографии шлифов образцов, полученные на поляризационном оптическом микроскопе

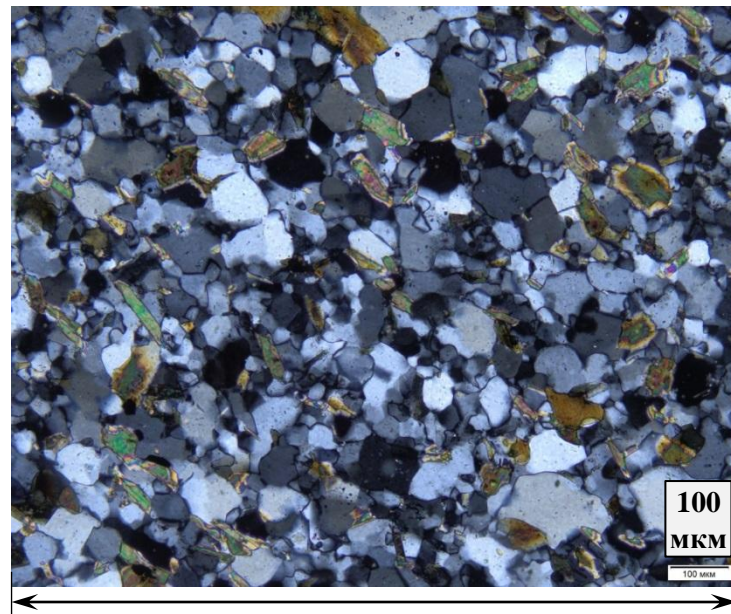


1.25 мм

николи параллельны

Образец метапесчаника LV1356

- микрофотография с Olympus VX53M;
- площадь участка ~ 1 мм²;
- присутствуют зерна кварца и темноцветных минералов.



1.25 мм

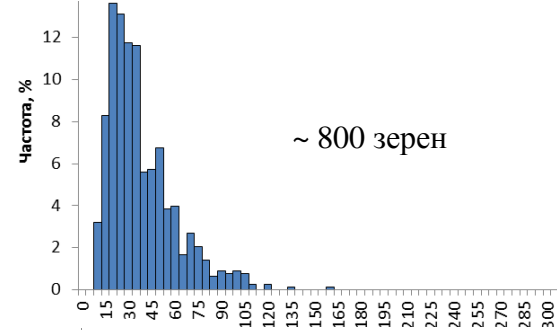
николи скрещены

Методы оценки распределения зерен по размерам

(В данный момент указанные
методы находятся на стадии
освоения)

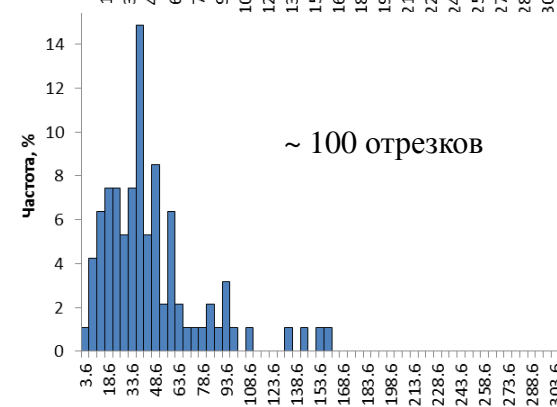
1. Прямое ручное измерение

(размер зерна – это средний
характерный линейный размер
сечения зерна по оценке
эксперта)



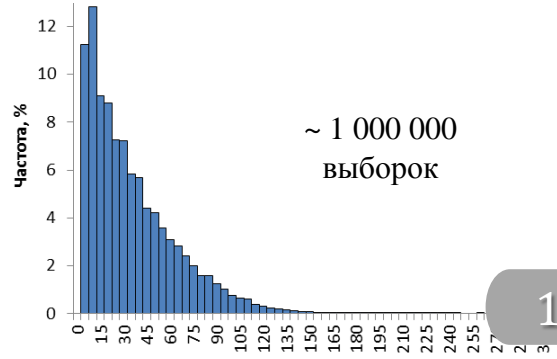
2. Метод пересечения линий ASTM E112-10

(размер зерна – это размер,
эквивалентный отрезку сечения
опорной линии)



3. Планиметрические методы

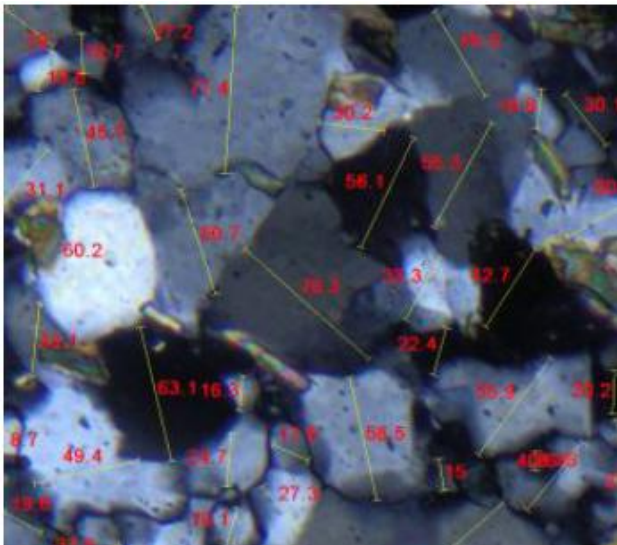
(размер зерна – это объемно-
взвешенный размер зерна,
пересчитанный из площади
сечения зерна)



Спасибо за внимание!

Методы оценки распределения зерен по размерам

1. Прямое ручное измерение видимых размеров зерен



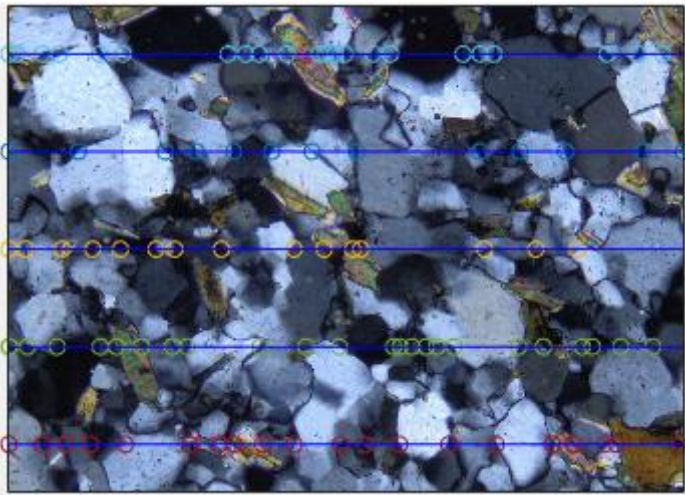
Особенности:

- определяются размеры каждого зерна;
- возможно или измерение одного размера, близкого к среднему, или определение максимального и минимального размеров с последующим расчетом среднего;
- опирается на опыт и глазомер эксперта.

+	-
Возможен учет всех зерен	Чрезвычайно трудоемок
Опыт эксперта	Ошибки эксперта
	Сложно работать с разнополяризованными изображениями

Методы оценки распределения зерен по размерам

2. Метод пересечения опорных линий



ASTM E112-10

(Standard Test Method for Determining Average Grain Size)

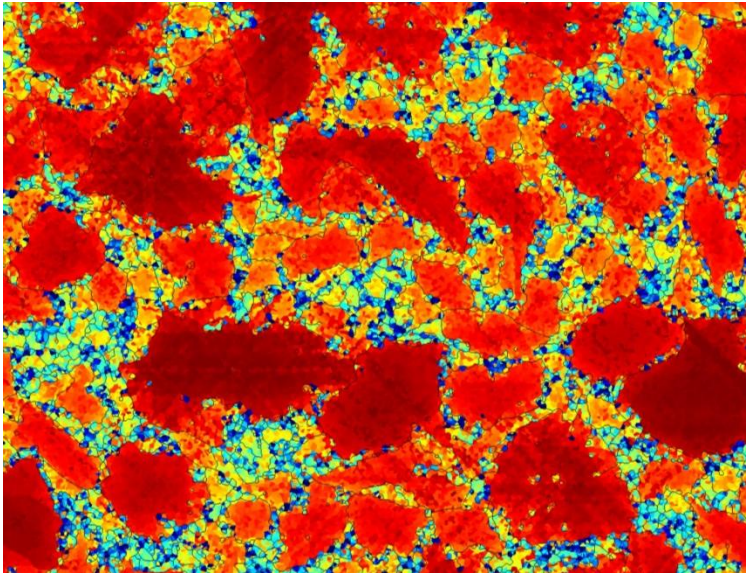
Особенности:

- определяются расстояния между пересечениями границ зерен вдоль опорных линий;
- расстояния пересчитываются в распределение зерен по размерам;
- нужен опыт эксперта в нахождении пересечений.

+	-
Стандартизирован	Ошибки эксперта
Может быть частично автоматизирован	Чувствителен к ориентации изображения и частоте линий
Трудоемкость меньше	Сложно работать с разнополяризованными изображениями

Методы оценки распределения зерен по размерам

3. Планиметрические методы



Особенности:

- определяется площадь зерен;
- площадь пересчитывается в объемно-взвешенный размер зерна;
- не нужен опыт эксперта в минералогии;
- требует изображения-маски границ.

+	-
Возможен учет всех зерен	Очень высокие требования к сплошности границ в маске
Может быть полностью автоматизирован	Чувствителен к алгоритму оценки площади
Трудоемкость мала	
Разнополяризованные изображения помогают улучшить контраст	

Постановка проблемы и научная новизна

Объект исследования:

При изучении **микроструктуры**

- зернистая структура горной породы как совокупность зерен

Предмет исследования:

- характерные величины (прежде всего, максимальный и минимальный размер) отдельных зерен, статистические параметры распределения этих величин

При изучении **термического разрушения**

- акустическая эмиссия, характеризующая процесс разрушения

- статистические параметры потока акустической эмиссии (прежде всего, активность и наклон графика повторяемости)

Пересчет b-value

1) Связь между амплитудой и энергией импульса АЭ

- Связь энергии АЭ с амплитудой в В:

$$E \approx k \cdot (A_V)^2 \quad (8)$$

- Связь амплитуды в дБ с амплитудой в мкВ:

$$A_{\text{дБ}} = 20 \cdot \log_{10} A_{\text{uV}} \quad (9)$$

- Для логарифма энергии:

$$\begin{aligned} \log_{10} E &\approx \log_{10} k + 2 \cdot \log_{10} A_V = \log_{10} k + 2 \cdot \log_{10} (A_{\text{uV}} \cdot 10^{-6}) = \\ &= \log_{10} k - 12 + 2 \cdot \log_{10} A_{\text{uV}} = \log_{10} k - 12 + \frac{1}{10} \cdot 20 \cdot \log_{10} A_{\text{uV}} \end{aligned} \quad (10)$$

- Связь логарифма энергии с амплитудой в мкВ:

$$\log_{10} E \approx c_1 + \frac{1}{10} A_{\text{дБ}} \quad (11)$$

Пересчет b-value

2) Закон повторяемости

- Аналогия с законом Гутенберга-Рихтера для энергий:

$$\log_{10} N = a - b \cdot \log_{10} E \quad (12)$$

$$\log_{10} N = a - b \cdot \log_{10} E = a - b \cdot c_1 - b \cdot \frac{1}{10} A_{\text{dB}} = a_{\text{AdB}} - b_{\text{AdB}} \cdot A_{\text{dB}}$$

- Связь энергии и магнитуды:

$$\log_{10} E_{\text{EQ}} \approx 4.8 + 1.5 \cdot M_s$$

$$\log_{10} E_{\text{EQ}} \approx -1.2 + 2.4 \cdot m_b$$

$$\log_{10} E \approx c_1 + \frac{1}{10} A_{\text{dB}}$$

- Законы повторяемости:

$$\log_{10} N_{\text{EQ}} = a_{M_s} - b_{M_s} \cdot M_s \quad (13)$$

$$\log_{10} N_{\text{EQ}} = a_{m_b} - b_{m_b} \cdot m_b \quad (14)$$

$$\log_{10} N = a_{\text{AdB}} - b_{\text{AdB}} \cdot A_{\text{dB}} \quad (15)$$

Пересчет b-value

3) Связь параметров b между собой

$$b_{\text{EQ}} = \frac{1}{1.5} \cdot b_{\text{Ms}} \quad (16)$$

$$b_{\text{EQ}} = \frac{1}{2.4} \cdot b_{\text{mb}} \quad (17)$$

$$b = 10 \cdot b_{\text{AdB}} \quad (18)$$



b-value, рассчитанное по амплитудам [дБ], в 10 раз меньше b-value, рассчитанного по энергиям [Дж]



b-value ~ 1

ОМП по цензурированной выборке

- Цензурированное распределение $p(x)$ с параметром α :

$$p = \frac{\alpha e^{\alpha X_1}}{1 - e^{-\alpha(X_2 - X_1)}} e^{-\alpha x} \quad x \in [X_1, X_2]$$

- Логарифм функции правдоподобия ($\ln L$):

$$\ln L = N \ln \alpha + N \alpha X_1 - \alpha \sum_{i=1}^N x_i - N \ln(1 - e^{-\alpha(X_2 - X_1)})$$

- Производная $\ln L$:

$$\frac{\partial \ln L}{\partial \alpha} = \frac{N}{\alpha} - N \frac{\Delta X}{e^{\Delta X} - 1} - \frac{N}{\alpha_0}$$

$$\frac{1}{\alpha_0} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i - X_1$$

$$\Delta X = X_2 - X_1$$

- Уравнение для α :

$$\frac{\partial \ln L}{\partial \alpha} = 0 \quad \Rightarrow \quad f(\alpha) = -\frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\alpha_0} + \frac{\Delta X}{e^{\Delta X} - 1} = 0$$

ОМП по цензурированной выборке

- Распределение амплитуд в эксперименте:

$$p \propto 10^{-bA_{\text{dB}}} = e^{-bA_{\text{dB}} \ln 10}$$

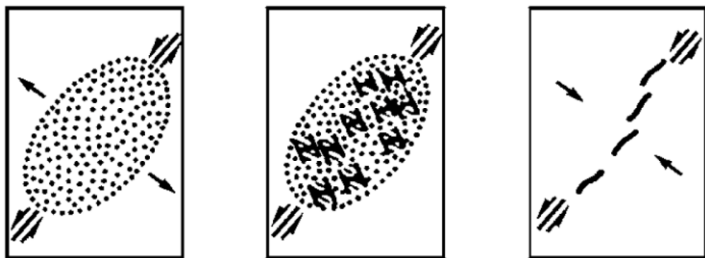
- b-value и погрешность:

$$b = \alpha / \ln 10 \quad S_b = S_a / \ln 10$$

$$S_a = \sqrt{\left(-\frac{\partial^2 \ln L}{\partial \alpha^2} \right)} = \frac{\alpha}{\sqrt{N}} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\alpha \Delta X}{e^{\alpha \Delta X} - 1} \right)^2 e^{\alpha \Delta X}}}$$

Обсуждение результатов

• Модель ЛНТ:



а)

б)

в)

Последовательные стадии образования макротрещины:

а) Накопление микротрещин;

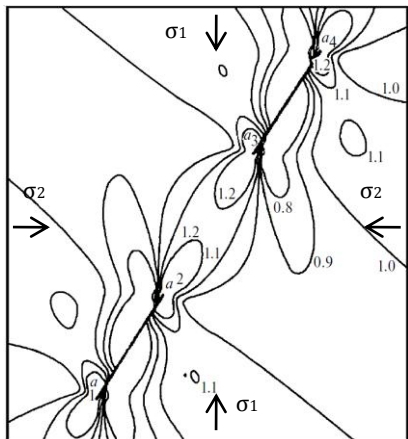
б) Слияние микротрещин;

в) Стягивание трещин к поверхности будущей макротрещины

Снижение b-value с ростом активности:

$$\begin{aligned} \uparrow I &\Rightarrow \uparrow N_{\text{трещ.}} \Rightarrow \\ \Rightarrow \uparrow n_{\text{трещ.}} &\Rightarrow \uparrow P_{\text{слияния}} \Rightarrow \\ \Rightarrow \uparrow N_{\text{высокоамп.соб.}} &\Rightarrow \\ \Rightarrow \downarrow N_{\text{низкоамп.соб.}} &\Rightarrow \\ &\Rightarrow \downarrow b \end{aligned}$$

Модель ЛНТ и термическое воздействие



Структура поля напряжений плоскости трещин a_1 - a_2 и a_3 - a_4 , находящихся в поле напряжений двухосного сжатия

[Г. А. Соболев,
Физика Земли, № 1, 2019]

- Отсутствуют внешние силы, нет глобального поля напряжений с преобладающим компонентом тензора напряжений
- Возможно наличие несимметричных зерен и преобладающей ориентации границ зерен
- Возможно распределение зерен, при котором поле условно однородно с преобладающим компонентом тензора напряжений (локально)
- Трещинообразование происходит во всем объеме



- Модель ЛНТ применима на масштабах зёрен и кластеров зёрен