

Математическое моделирование взаимосвязей упругих свойств и характеристик пустотного пространства для обоснования методики определения хрупкости пород-коллекторов

Дубиня Никита Владиславович
Баяк Ирина Олеговна

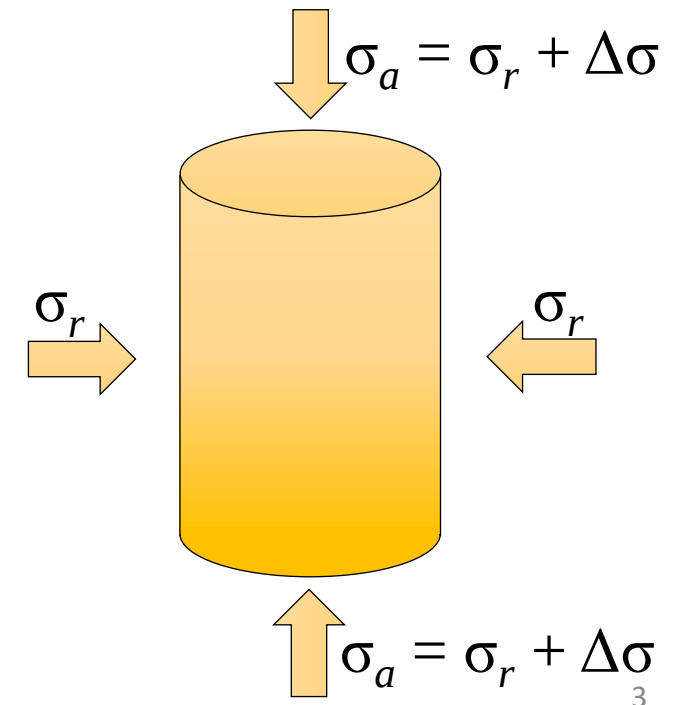
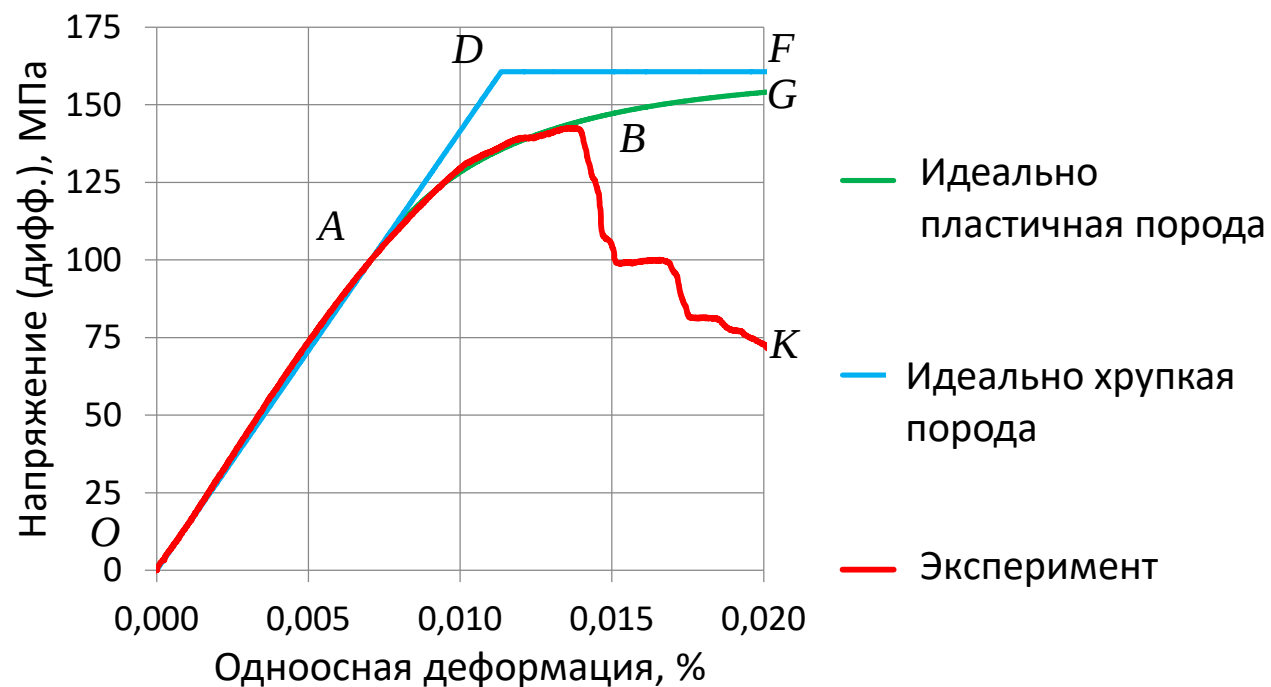
Dubinya.NV@gmail.com ibayuk@yandex.ru

План доклада

1. Понятие хрупкости. Различные определения индекса хрупкости. Сходство и различие результатов.
2. Определение индекса хрупкости на основе петроупругого моделирования (rock physics).
3. Особенности поведения индекса хрупкости в анизотропных породах.

Введение

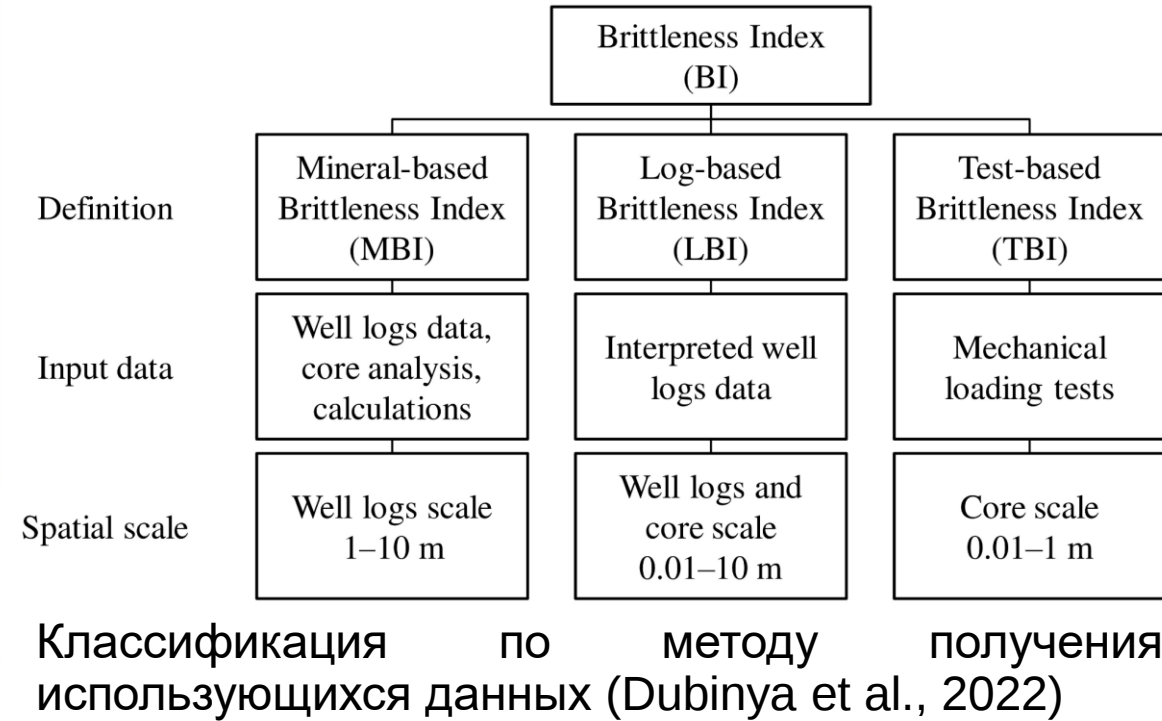
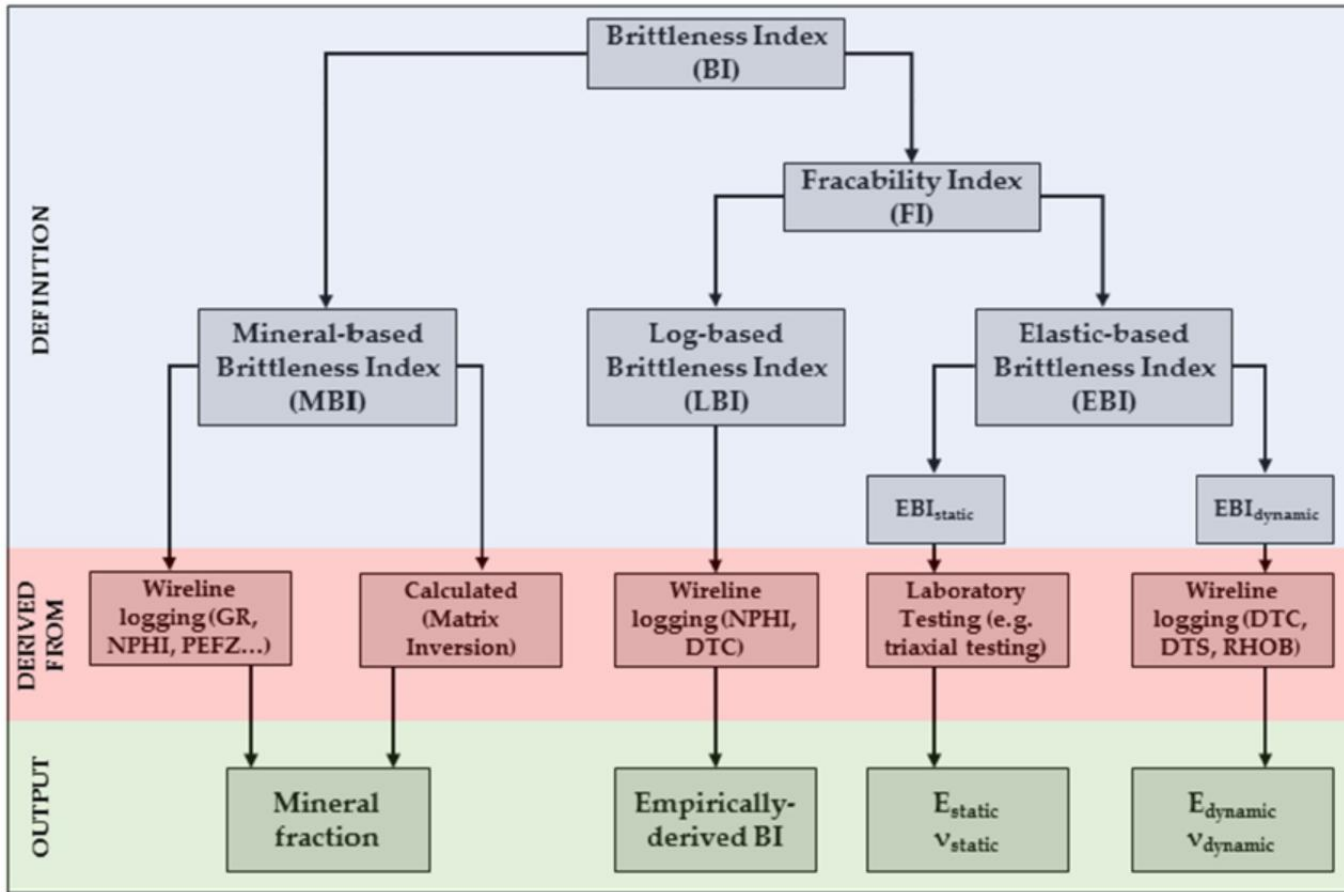
- «**Хрупкость** — свойство материала разрушаться без образования заметных пластических деформаций. Является противоположным свойству пластичности»
- В задачах геомеханики **индекс хрупкости** может быть использован для выбора интервала для проведения ГРП
- В отличие от упругих модулей, прочностных свойств у **индекса хрупкости** нет единого строгого математического определения
- Существует проблема выбора «правильного» определения **индекса хрупкости** для конкретного объекта



Основные подходы

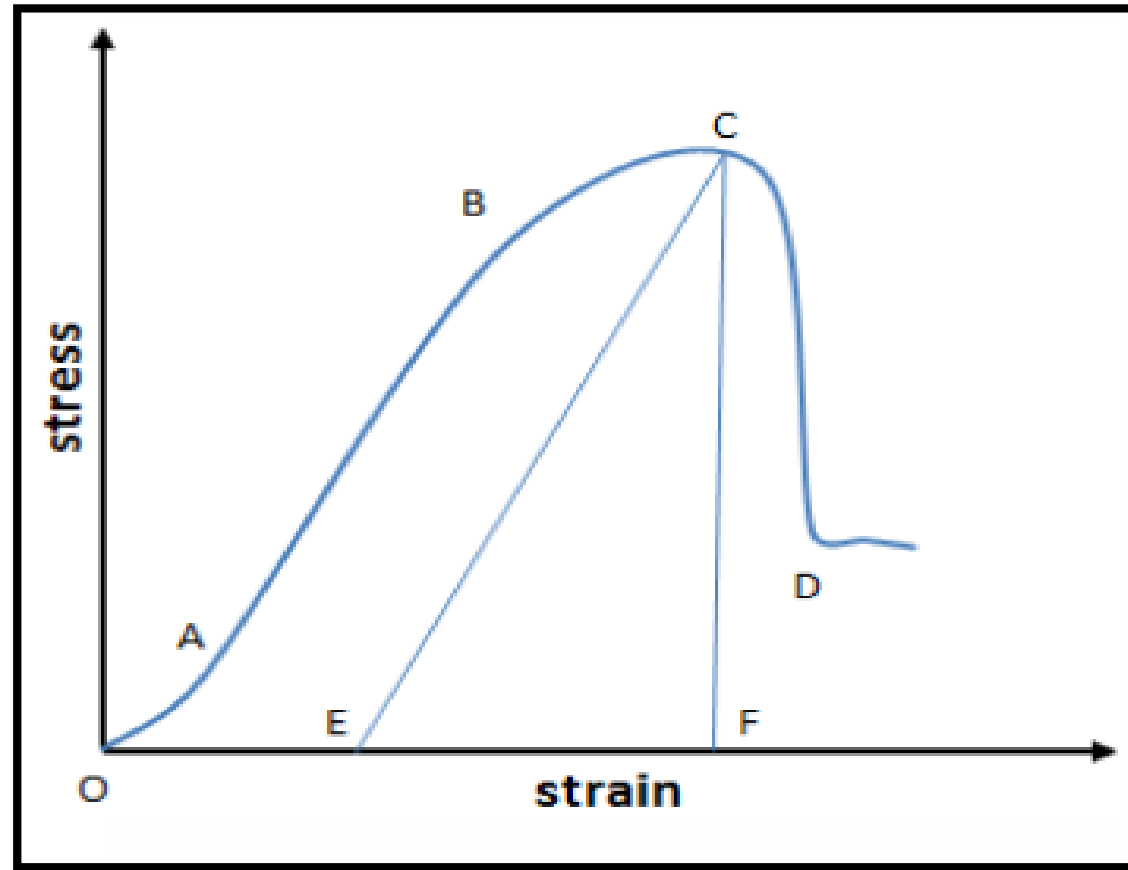
- 1. Mineral-based Brittleness Index (MBI)** – расчет индекса хрупкости породы по соотношению эмпирически установленных индексов хрупкостей минералов. Пример: $MBI = \text{Quartz} / (\text{Quartz} + \text{Carbonate} + \text{Clay})$ [Jarvie et al., 2007]. Все коэффициенты равным массовым долям минералов;
- 2. Log-based Brittleness Index (LBI)** – расчет индекса хрупкости по данным геофизических исследований скважин. Пример: $LBI = \alpha \cdot NPHI + \beta$ [Jin et al., 2014]. NPHI – нейтронная пористость, α и β – эмпирические параметры для породы;
- 3. Elastic-based Brittleness Index (EBI)** – расчет индекса хрупкости по значениям упругих модулей. Пример (очень популярный): $EBI = (E_{\text{stat,norm}} + \nu_{\text{stat,norm}}) / 2$ [Rickman et al., 2008]. $E_{\text{stat,norm}}$, $\nu_{\text{stat,norm}}$ – нормированные упругие модули.

Классификация индексов хрупкости



Классификация по виду использующихся данных (Mews et al., 2019)

Индекс хрупкости, основанный на лабораторных испытаниях на прессе – test-based index (TBI)



$$B1 = \frac{\text{reversible strain}}{\text{total strain}} = \frac{EF}{OF}$$

$$B2 = \frac{\text{reversible energy}}{\text{total energy}} = \frac{S(ECF)}{S(ABCF)}$$

Индекс хрупкости, основанный на минеральном составе

Mineral-based Brittleness Index (MBI)

Correlation for MBI	Formation	Age	Lithology	Φ (%)	TOC (%)	Reference
$\frac{Q}{Q+Carb+Cly}$	Barnett	Carb.	Shale bounded by limestone	6	1–3	Jarvie et al.
$\frac{Q+Dol}{Q+D+Cal+Cly+TOC}$	Barnett	Carb.	Shale bounded by limestone	6	1–3	Wang and Gale
$\frac{Q+Cal+D}{Q+Cal+D+Cly+TOC}$	Neuquén Basin, Argentina	Jur.	Mudstones	8	2.5–3.5	Glorioso and Rattia
$\frac{(abM1+abM2...)}{(abM1+abM2+abM3...)}$	Haynes-ville	Jur.	Calcite to silica-rich shale	8	3–6	Buller et al.
$\frac{Q+F+M+Carb}{tot}$	Barnett	Carb.	Shale bounded by limestone	6	1–3	Jin et al.
$\left(\frac{1.09 \times Q+F+P}{Q+F+P+Cal+D+Cly} \right) + \left(\frac{1}{8.8} \right)$	Wolf-camp	Carb. - Perm.	Shale, minor limestone	10	2.3	Alzahabi et al.
$\frac{Q+F+P}{Q+F+P+(0.5 \times (Cal+D))+PHIT}$	Shales in Europe and Barnett	Camb. – Jur.	Shale bounded by limestone	0.6–11	15	Rybacki et al.

Mews K.S., Alhubail M.M., Barati R.Gh., 2019. doi:10.3390/geosciences9070319

Индекс хрупкости, основанный на данных ГИС (эмпирические зависимости)

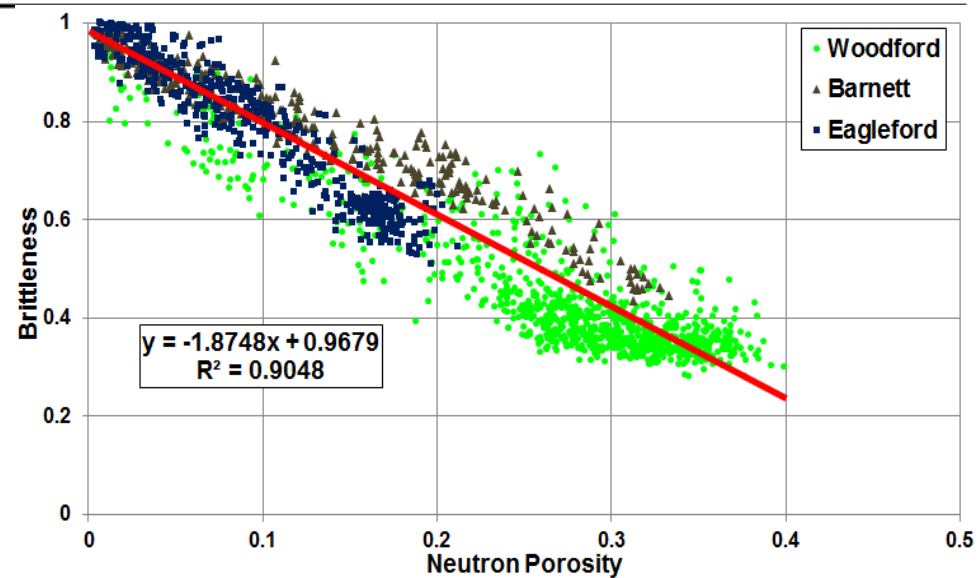
Log-based Brittleness Index (LBI)

Correlation for LBI	Formation	Age	Lithology	Φ (%)	TOC (%)	Reference
$-0.012 \times \text{DTC} + 1.4921$ $-1.5314 \times \phi + 0.8575$	Woodford	Dev.	Shale bounded by limestone	0.5–3	5.01–14.81	Jin et al.
$-0.01104 \times \text{DTC} + 1.4941$ $-1.4956 \times \phi + 0.9763$	Barnett	Carb.	Shale bounded by limestone	6	1–3	Jin et al.
$-0.0116 \times \text{DTC} + 1.6231$ $-2.3115 \times \phi + 1.0104$	Eagle Ford	Creta.	Mudstones	2–9	2.1–6.86	Jin et al.
$-0.0142 \times \text{DTC} + 1.7439$ $-1.8748 \times \phi + 0.9679$	Global Correlation	-	-	-	-	Jin et al.

DTC – обратная скорость
пробега продольных
упругих волн, мс/фут

ϕ – нейтронная пористость,
д.е.

Характерный разброс ± 0.1 д.е.



Уменьшение
индекса
хрупкости с
ростом
общей
пористости

Mews K.S., Alhubail M.M., Barati R.Gh., 2019. doi:10.3390/geosciences9070319

Jin X., Shah S., Truax J., Roegiers J.-C., 2014. doi:10.2118/170972-MS

Индекс хрупкости, основанный на данных об упругих свойствах

Elastic-based Brittleness Index (EBI)

Два варианта: анализ динамики и кривых нагружения

Вариант 1 аналогичен LBI (в таблице: $FI = EBI_{Rickman\ et\ al.,norm}$)

	Correlation	Formation	Age	Lithology	Φ (%)	TOC (%)	Reference
	$EBI = \frac{E_{stat,norm} + \nu_{stat,norm}}{2}$	Barnett	Carb.	Shale bounded by limestone	6	1–3	Rickmann et al.
	$EBI = E_{dyn} \times RHO B$	Western Canadian Basin	Jur.	Shale and Sandstone	5–10	-	Sharma and Chopra
	$EBI = \frac{E_{dyn} \times RHO B}{\nu_{dyn}}$	Liahoe, China	Paleogene	Shale		2.39	Sun et al.
	$EBI = \frac{E}{\lambda}$	-	-	Shale and Sandstone	<10	-	Chen et al.
	$KIC = 0.313 + 0.027 \times E_{dyn}$	Woodford	Dev.	Shale bounded by limestone	0.5–3	5.01–14.81	Jin et al.
	$GC = \frac{(1 - (\nu_{dyn})^2) \times (\frac{KIC^2}{E_{dyn}})}{\times 10^3}$	Barnett	Carb.	Shale bounded by limestone	6	1–3	Jin et al.
	$EBI = \frac{FI + GC_{norm}}{2}$	Barnett	Carb.	Shale, bounded by limestone	6	1–3	Jin et al.
	$EBI = \frac{FI + KIC_{norm}}{2}$	Barnett	Carb.	Shale bounded by limestone	6	1–3	Jin et al.
	$EBI = \frac{FI + E_{dyn,norm}}{2}$	Barnett	Carb.	Shale bounded by limestone	6	1–3	Jin et al.

Mews K.S., Alhubail M.M., Barati R.Gh., 2019. doi:10.3390/geosciences9070319

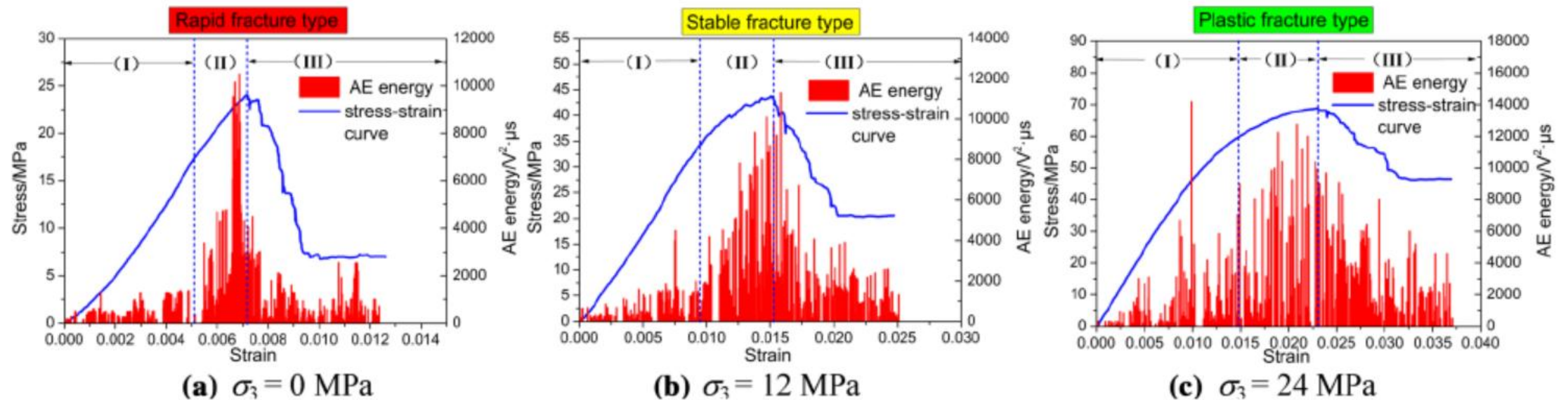
GC – критическая скорость высвобождения энергии

KIC - трещиностойкость

FI – frackability index

Энергетический подход

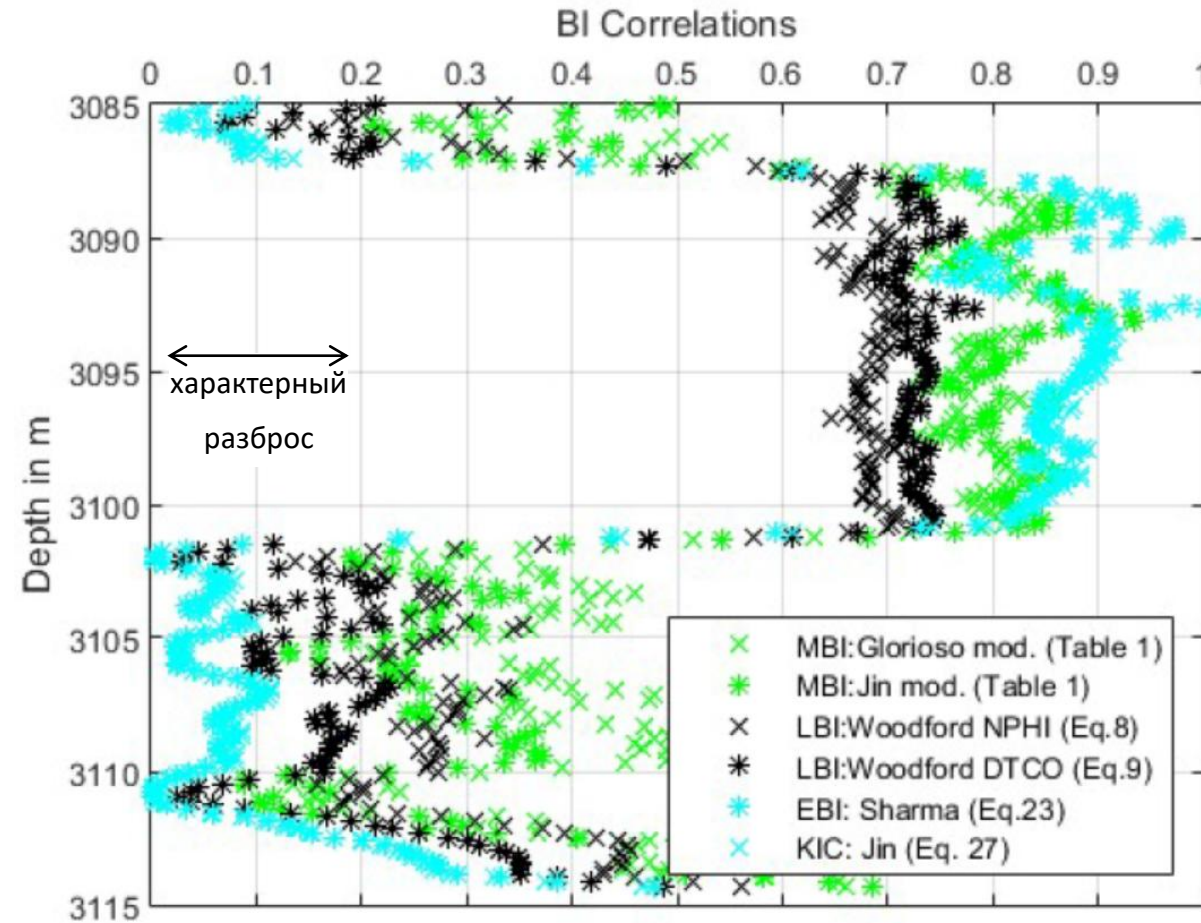
Имеет теоретическое обоснование: нелинейность кривой напряжение-деформация обусловлена пластическим деформированием и затратами энергии на хрупкое развитие трещин (акустическая эмиссия) – образование в среде дополнительной свободной поверхности



Zhang J., Ai C., Li Y.-W., Che M.-G., Gao R., Zeng J. 2018. doi:10.1007/s00603-018-1535-9

Сравнение индексов хрупкости

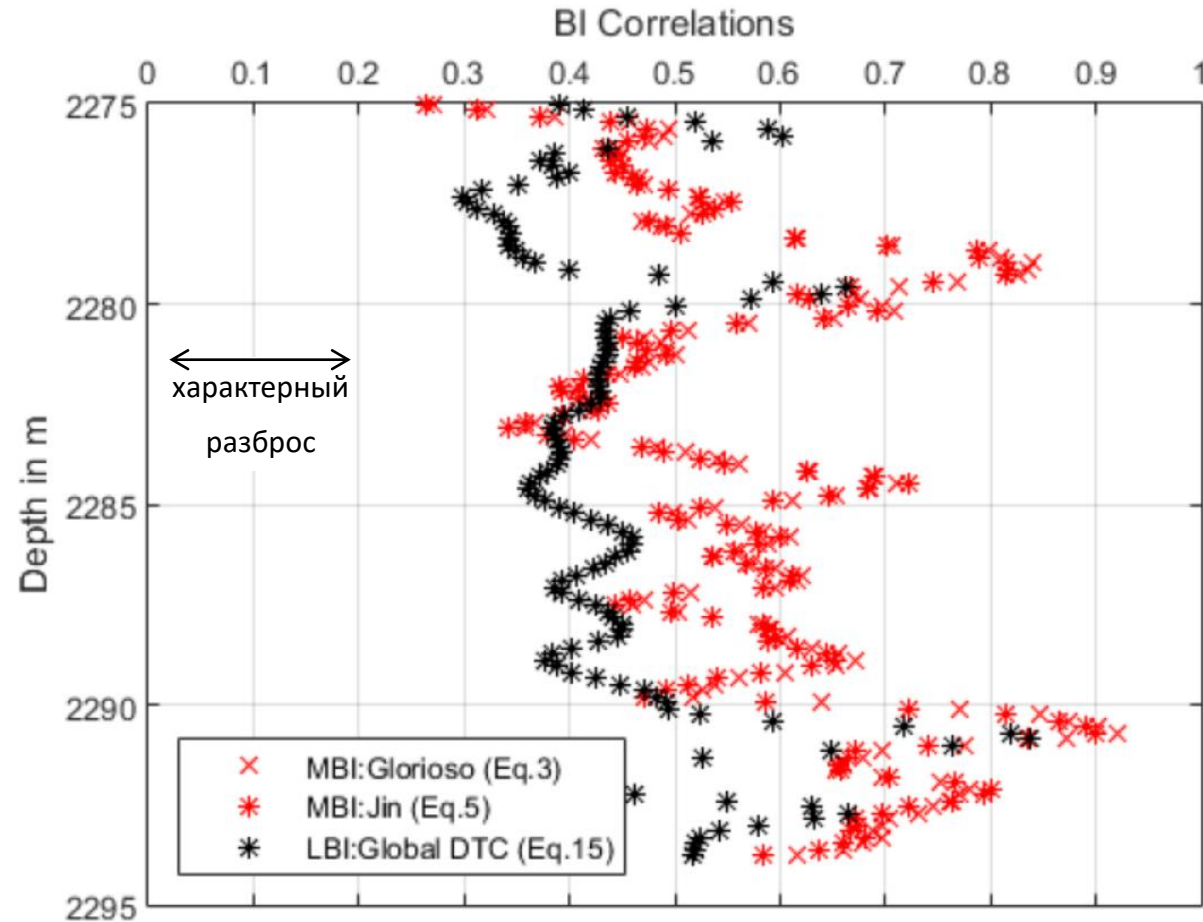
Использование разных MBI и LBI на одних данных.



Mews K.S., Alhubail M.M., Barati R.Gh., 2019. doi:10.3390/geosciences9070319

Сравнение индексов хрупкости

Использование двух разных MBI и одного LBI на одних данных.



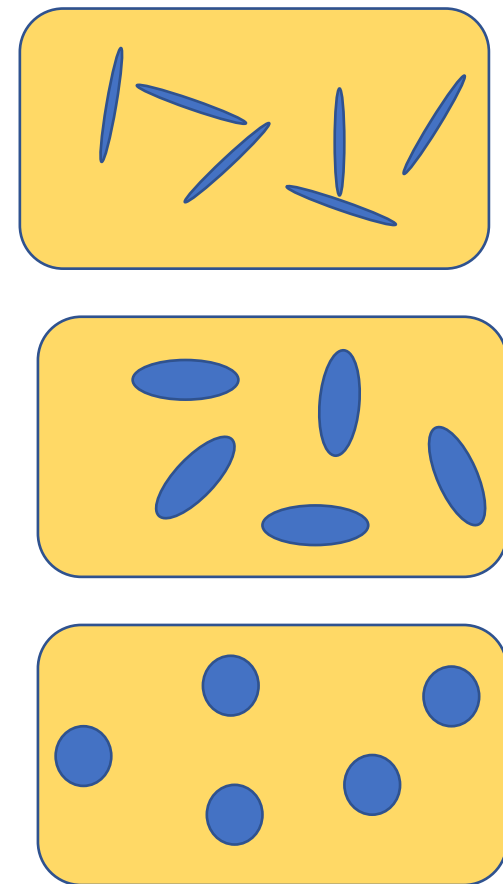
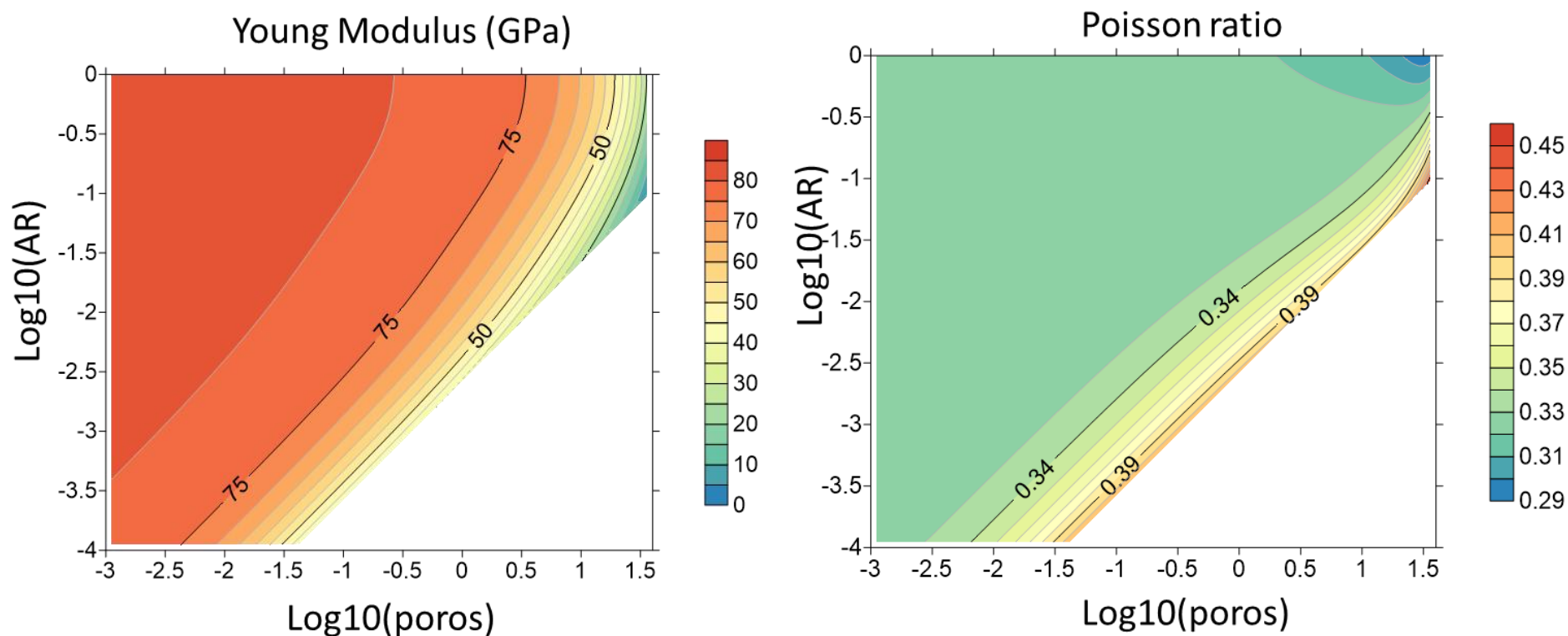
Mews K.S., Alhubail M.M., Barati R.Gh., 2019. doi:10.3390/geosciences9070319

Взаимосвязь хрупкости и внутреннего строения породы-коллектора на основе подходов Rock Physics

Модель эффективной среды, расчет эффективной хрупкости

Модельная среда – карбонатная изотропная матрица со случайно ориентированными пустотами (форма – эллипсоиды вращения), заполненными пластовым флюидом

Параметры модели – аспектное отношение пустот, трещинная пористость



Свойства матрицы: $V_p = 6.54$ км/с, $V_s = 3.35$ км/с, $\rho = 2.71$ г/см³.

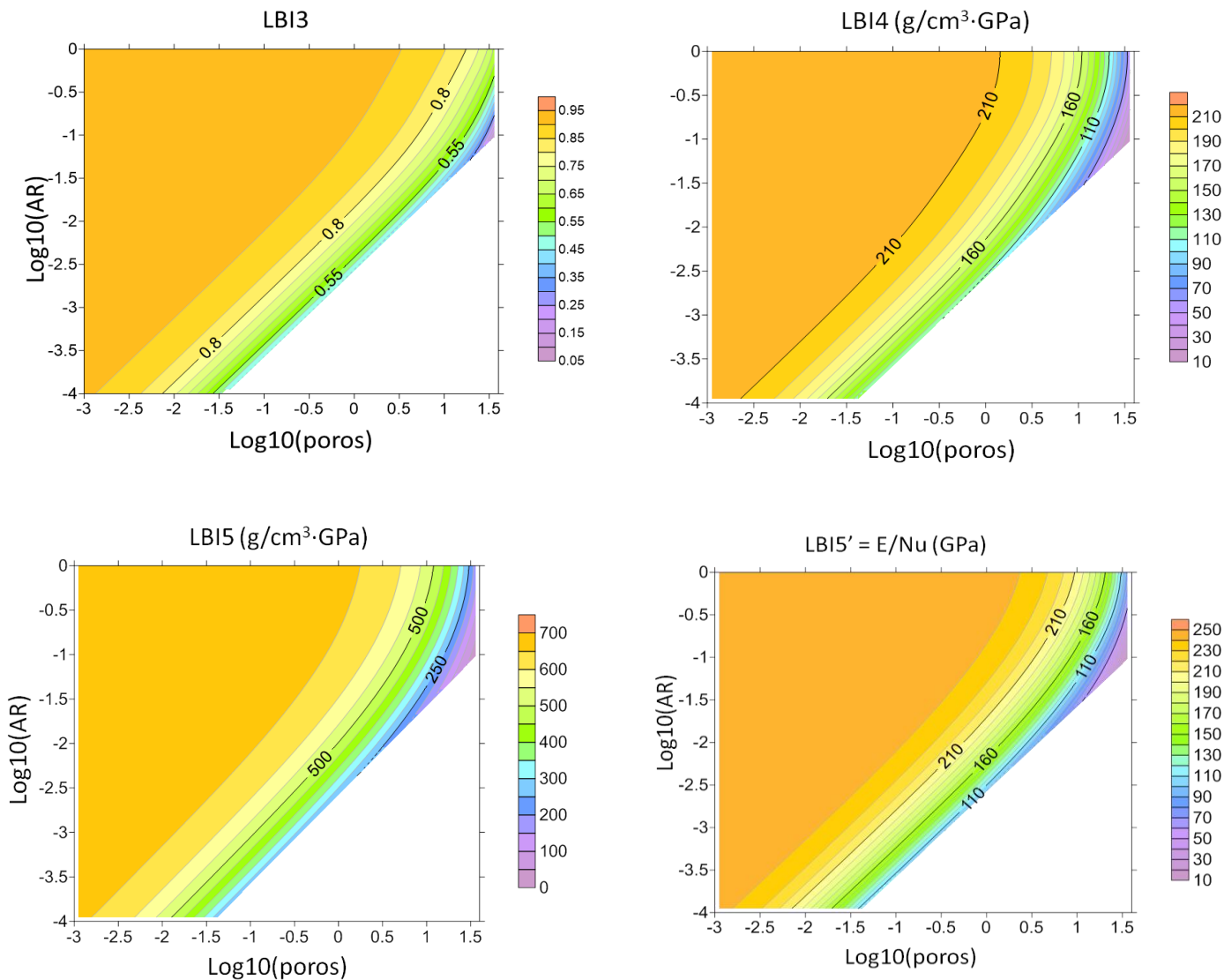
Свойства флюида: $V_p = 1.6$ км/с, $\rho = 1.1$ г/см³.

Аспектное отношение (AR) изменяется от 0.0001 до 0.01.

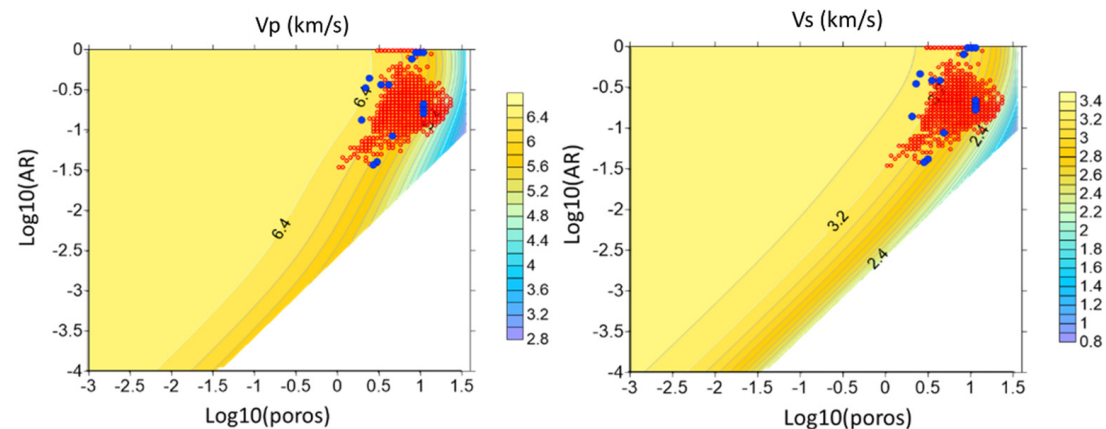
Трещинная пористость варьирует от 0 до 2 %.

Эффективный индекс хрупкости

Расчет индексов хрупкости по эффективным модулям



Правила нормировки



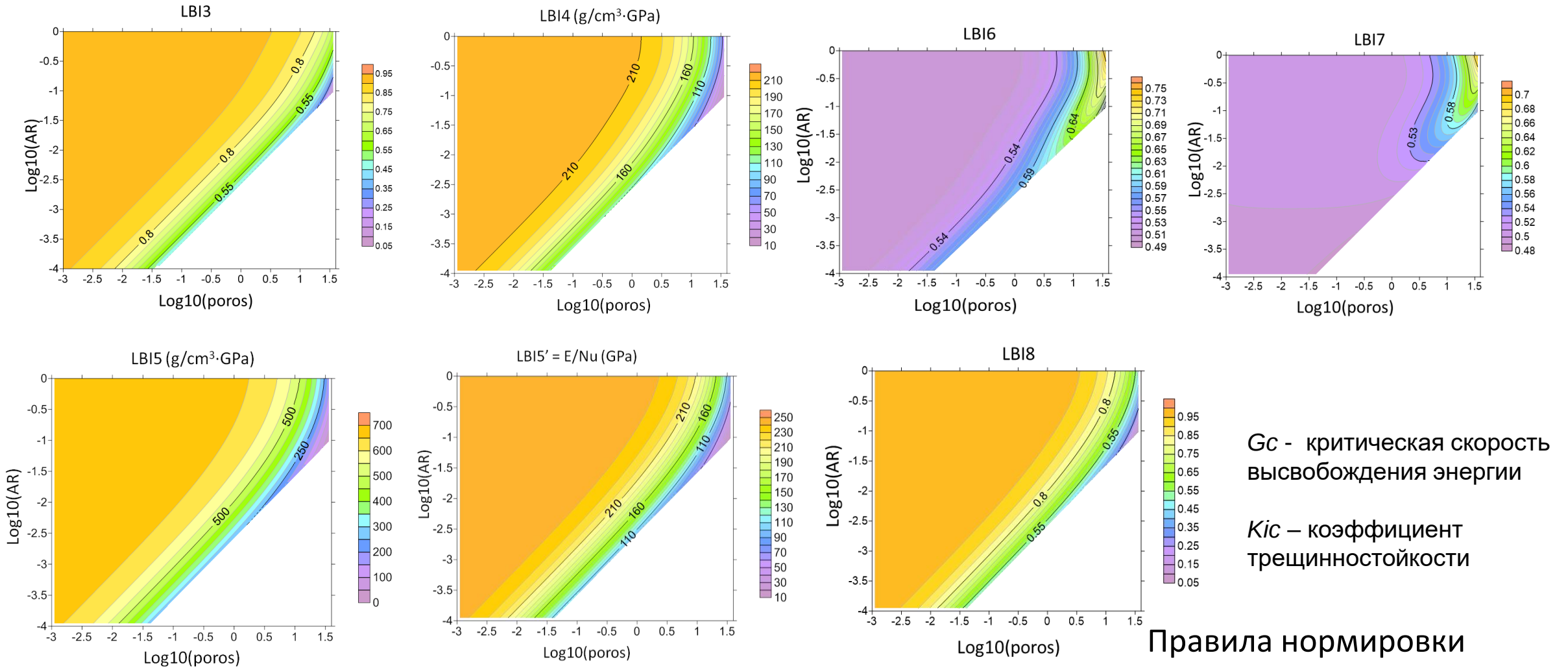
Индексы хрупкости падают с ростом пористости для фиксированного аспектного отношения (относительного раскрытия пустот)

Для фиксированной пористости индексы хрупкости растут с ростом относительного раскрытия пустот

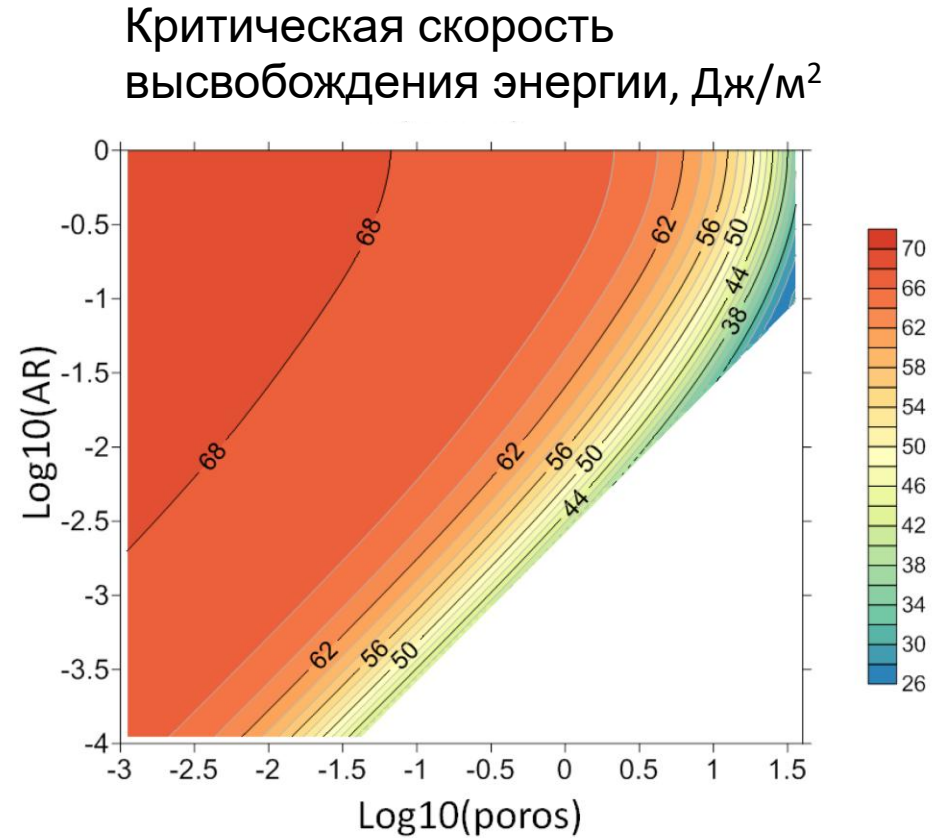
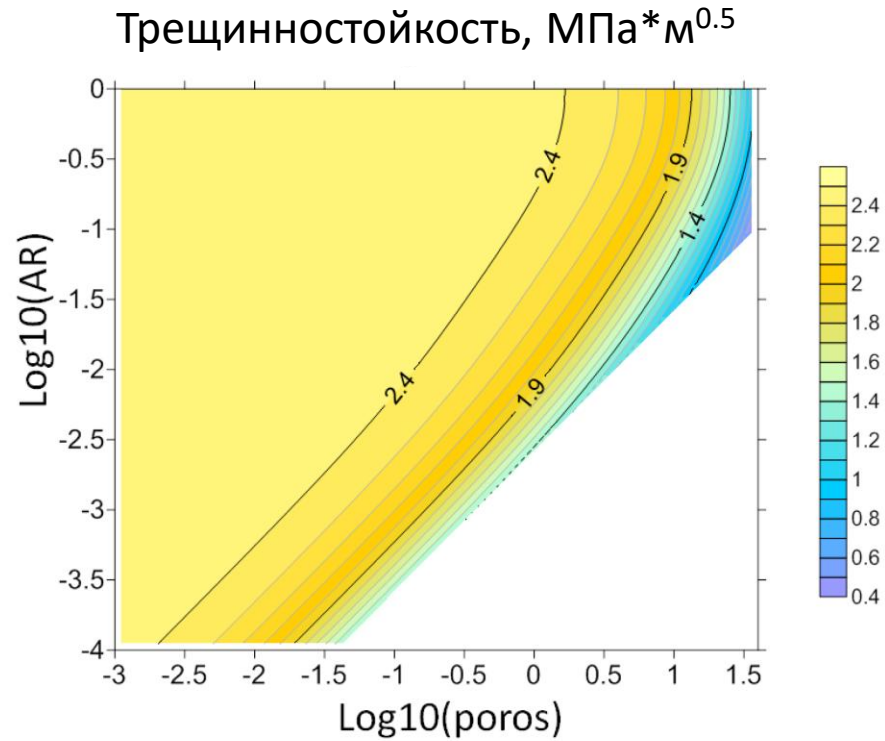
Высокие значения индексов хрупкости коррелируют с высокими значениями скоростей

Эффективный индекс хрупкости

Расчет индексов хрупкости по эффективным модулям

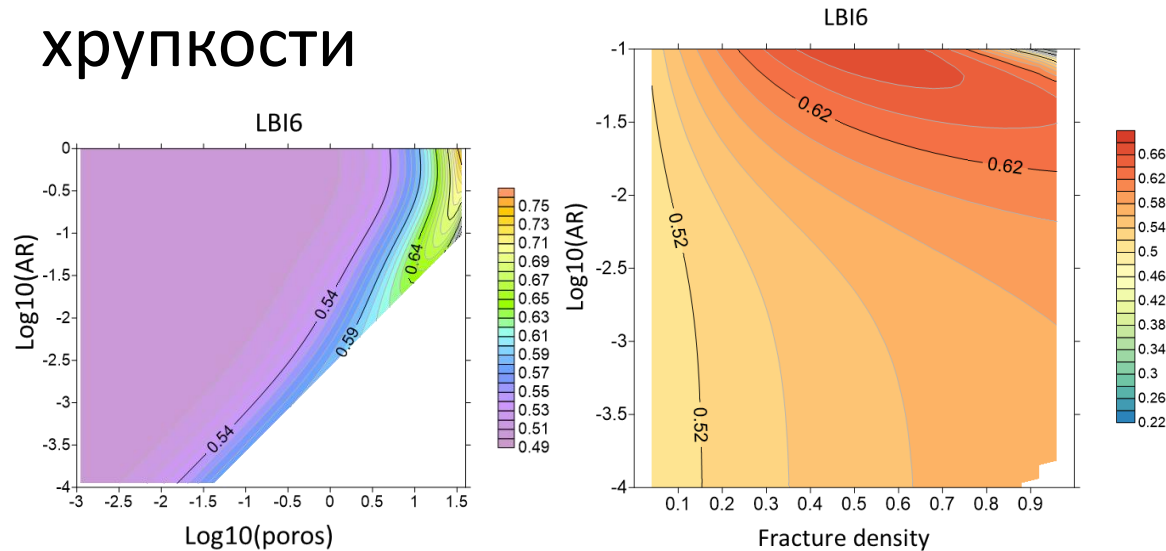


Расчет трещиностойкости и критической скорости высвобождения энергии по результатам петроупругого моделирования

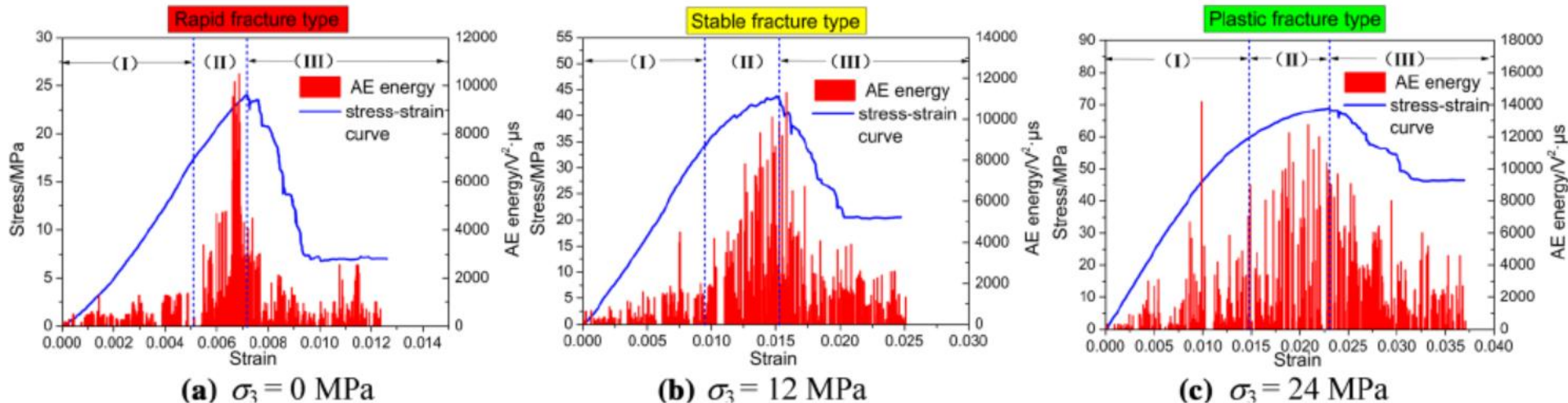


Энергетический баланс

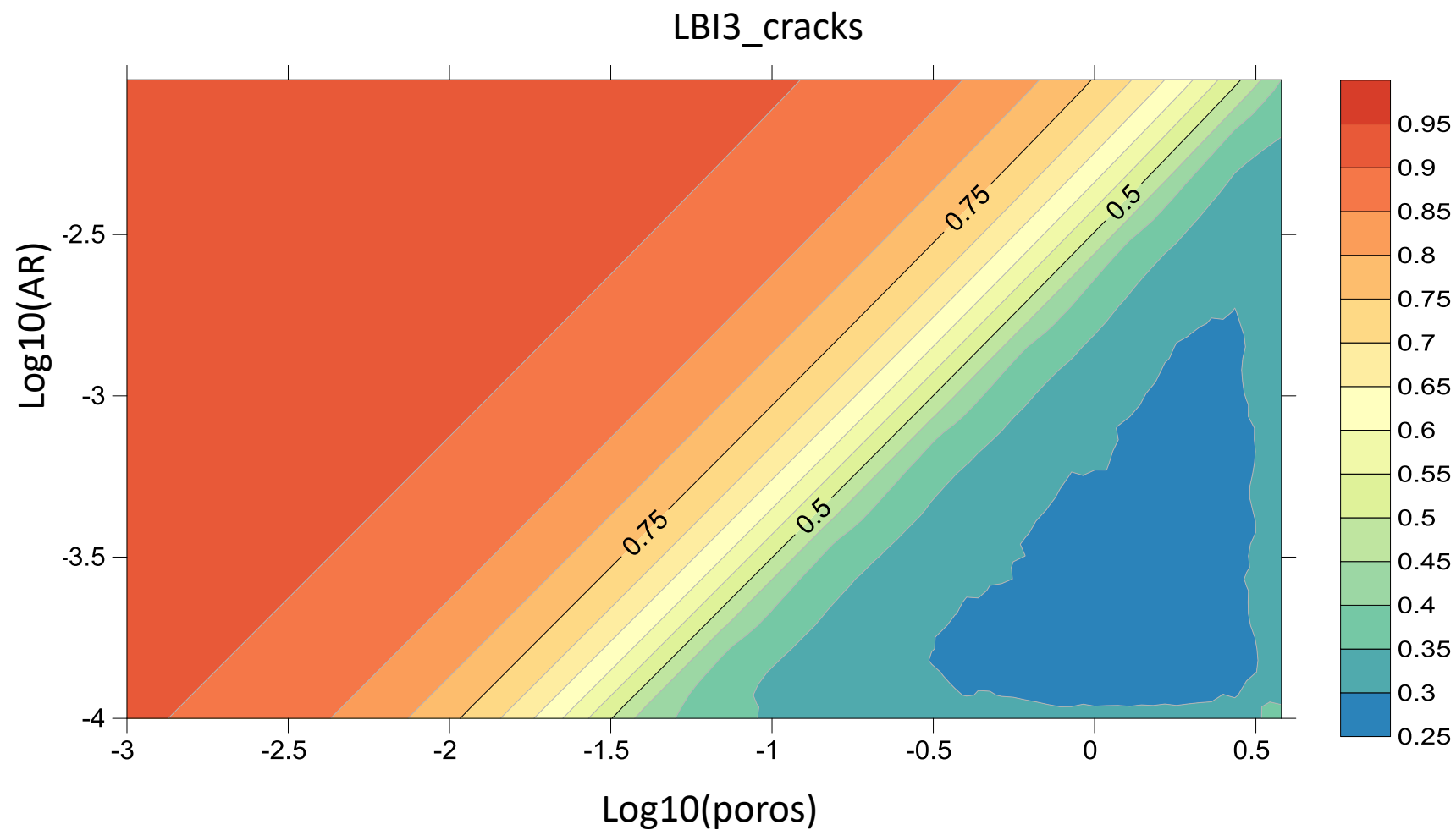
Учет особенностей затрат свободной энергии – ключ к пониманию хрупкости



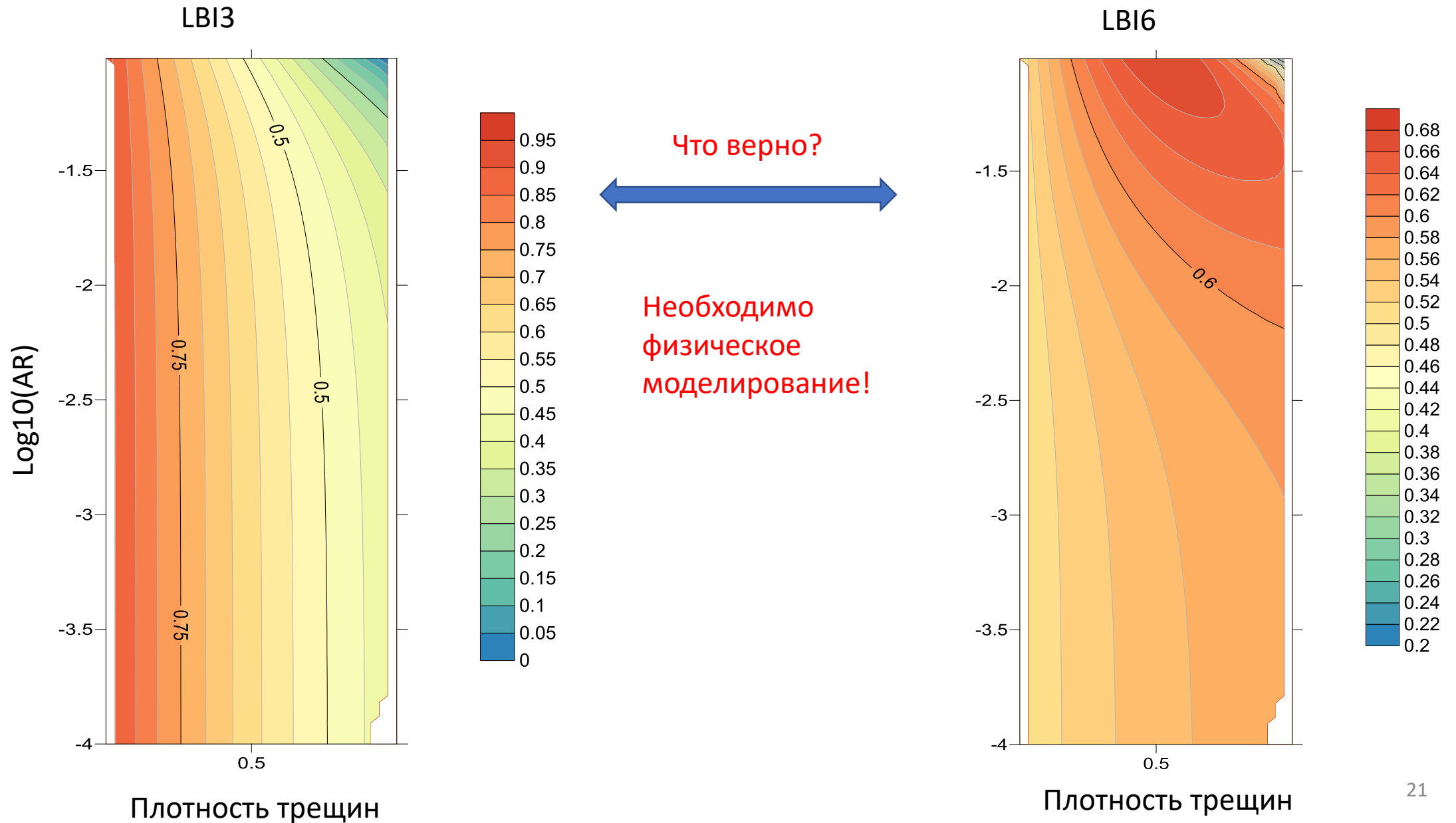
Энергия при неупругом деформировании тратится на растрескивание и развитие дислокаций.
Резкий рост свободной поверхности при достижении предела прочности – признак высокой хрупкости.



Поведение индекса хрупкости по LBI3 (по Рикману) в трещинных породах



Влияние плотности трещин на индексы хрупкости



Особенности поведения индекса хрупкости в анизотропных породах

Модель: кальцитовая матрица с ориентированными трещинами, насыщенными пластовым флюидом

Свойства матрицы: $V_p = 6.54$ км/с, $V_s = 3.35$ км/с, $Rho = 2.71$ г/см³.
Свойства флюида: $V_p = 1.6$ км/с, $Rho = 1.1$ г/см³.

Аспектное отношение (AR) изменяется от 0.0001 до 0.01.

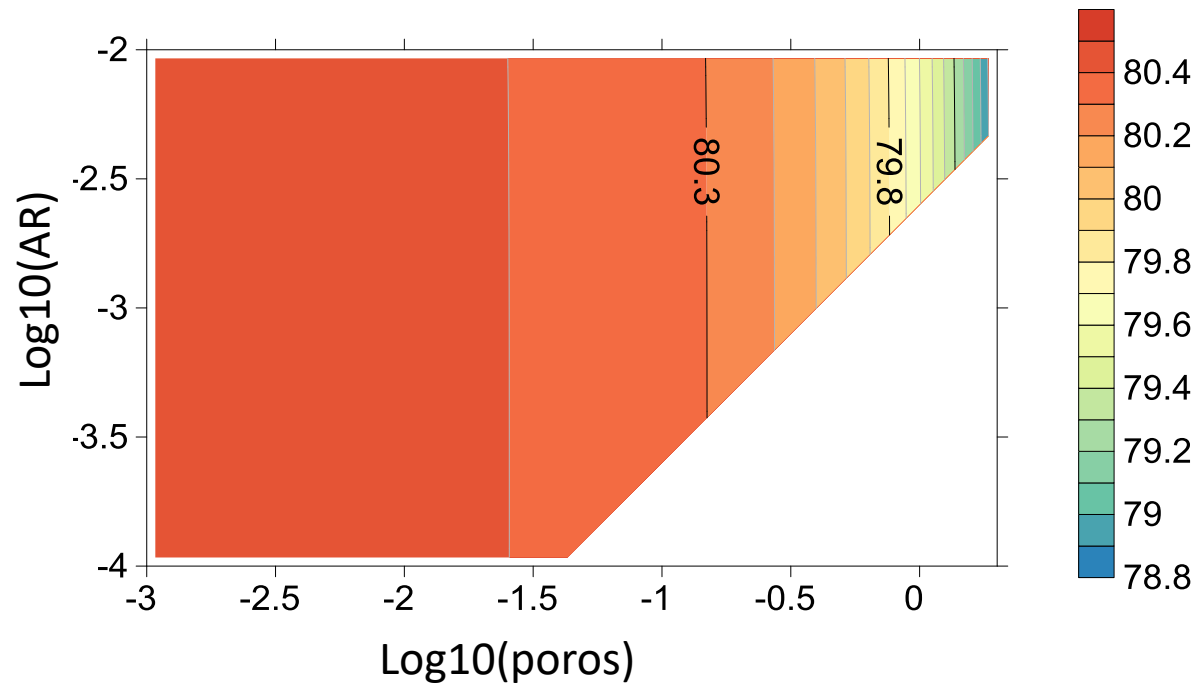
Трещинная пористость варьирует от 0 до 2 %.

Общая пористость варьирует от 0 до 40%.

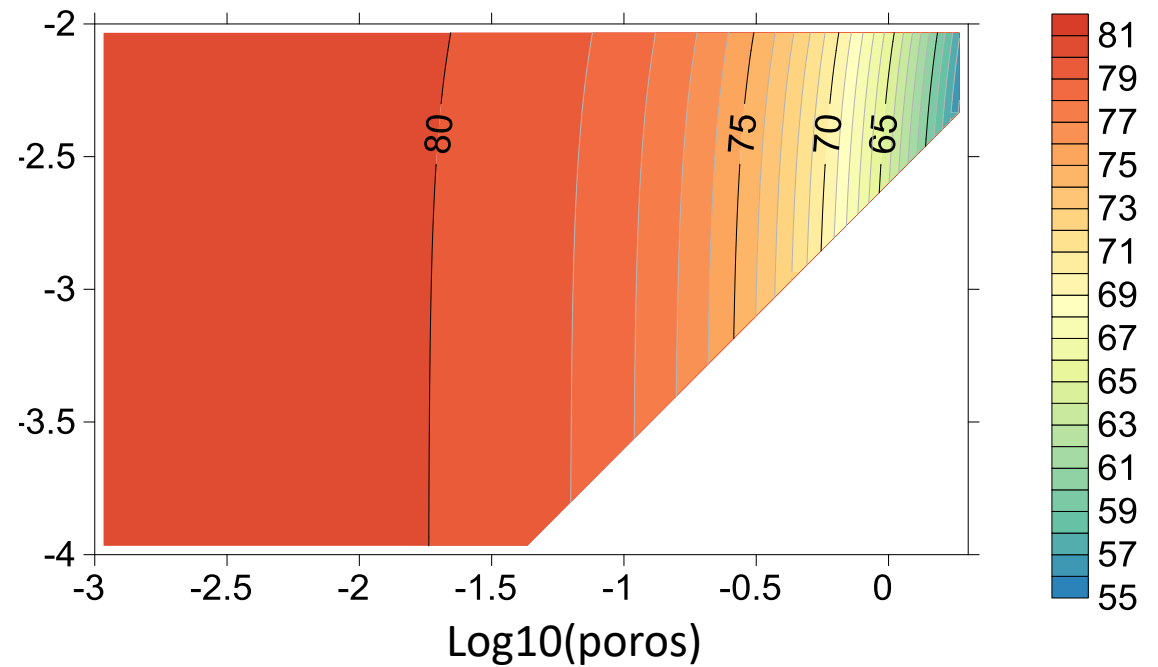
Модель: кальцитовая матрица с ориентированными трещинами, насыщенными пластовым флюидом

Модуль Юнга (ГПа)

$E_{11}=E_{22}$



E_{33}

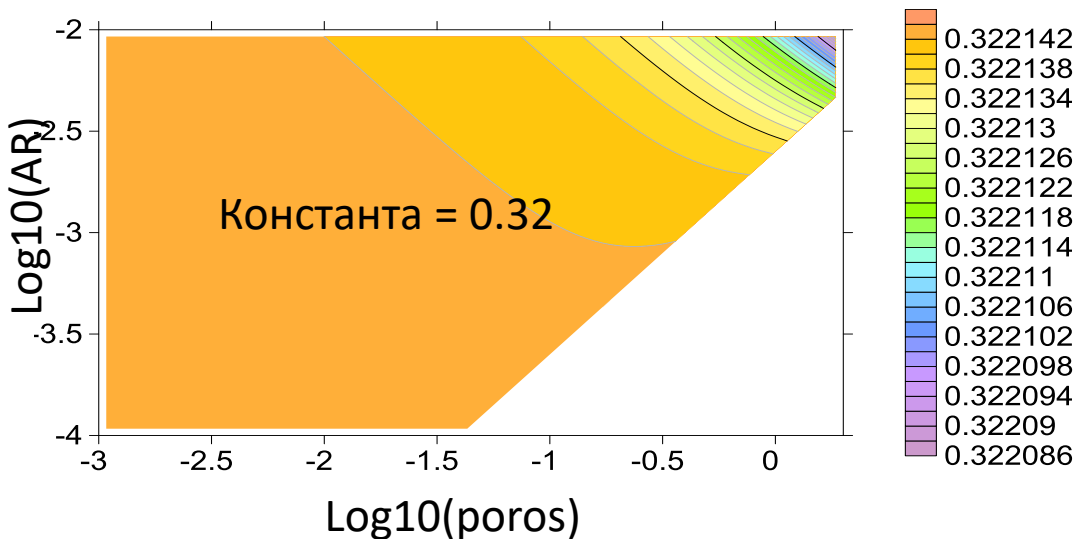


Оси 1 и 2 расположены в плоскости трещин, ось 3 – перпендикулярна плоскости трещин.

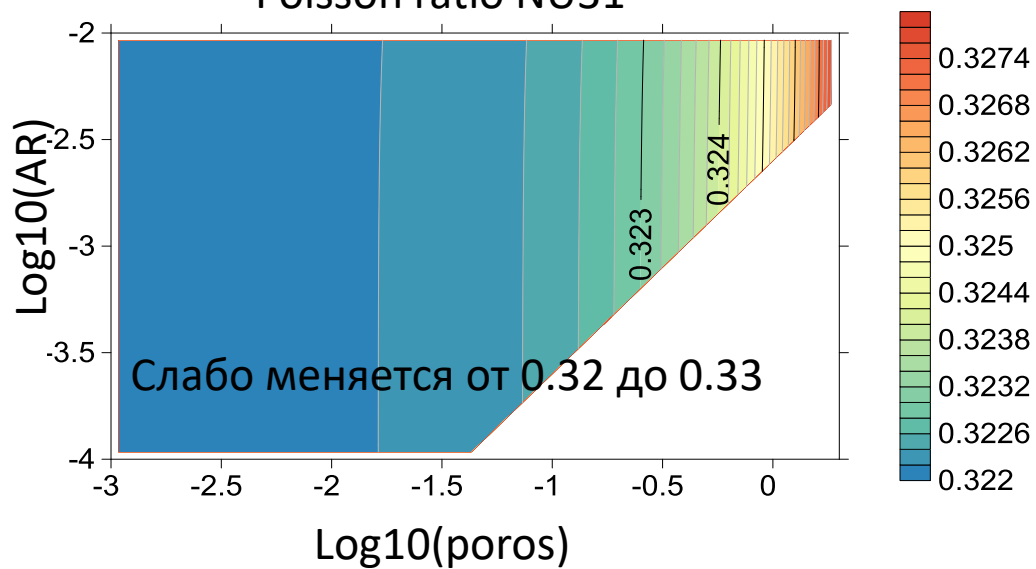
Модель: кальцитовая матрица с ориентированными трещинами, насыщенными пластовым флюидом

Коэффициент Пуассона

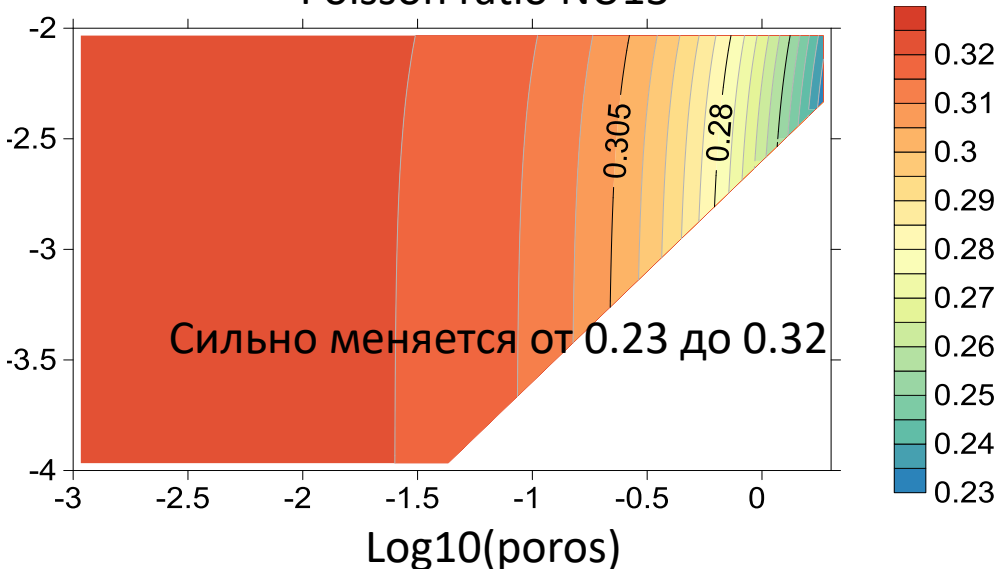
Poisson ratio NU12



Poisson ratio NU31



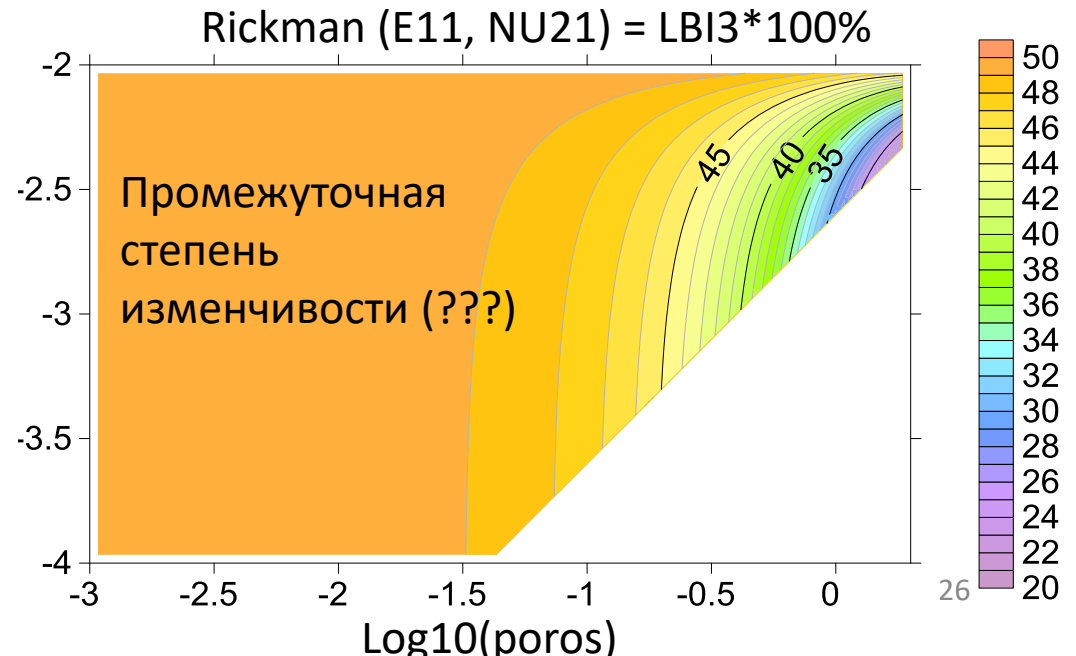
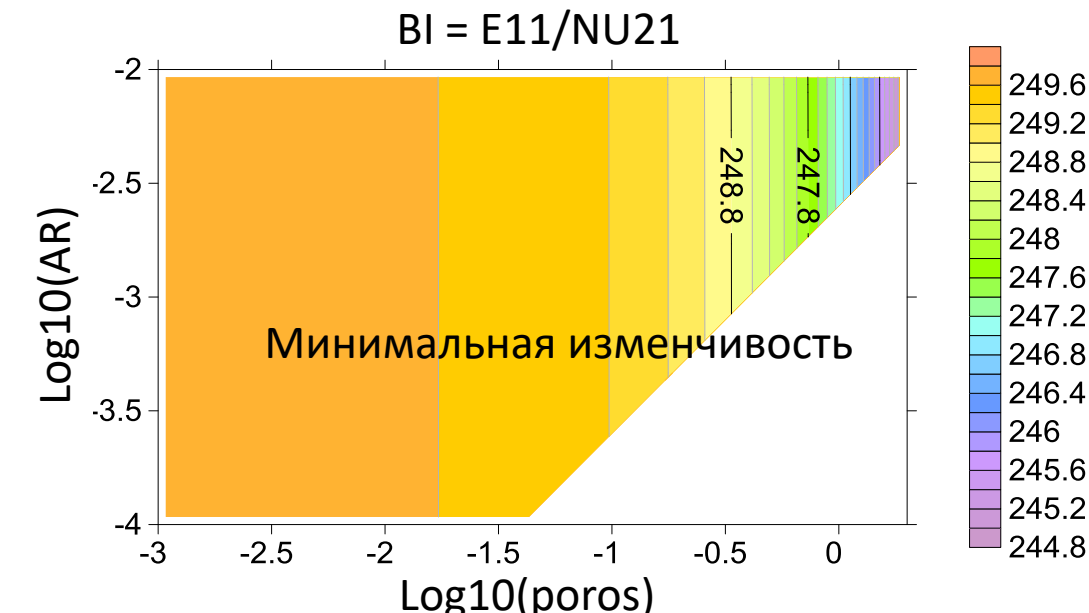
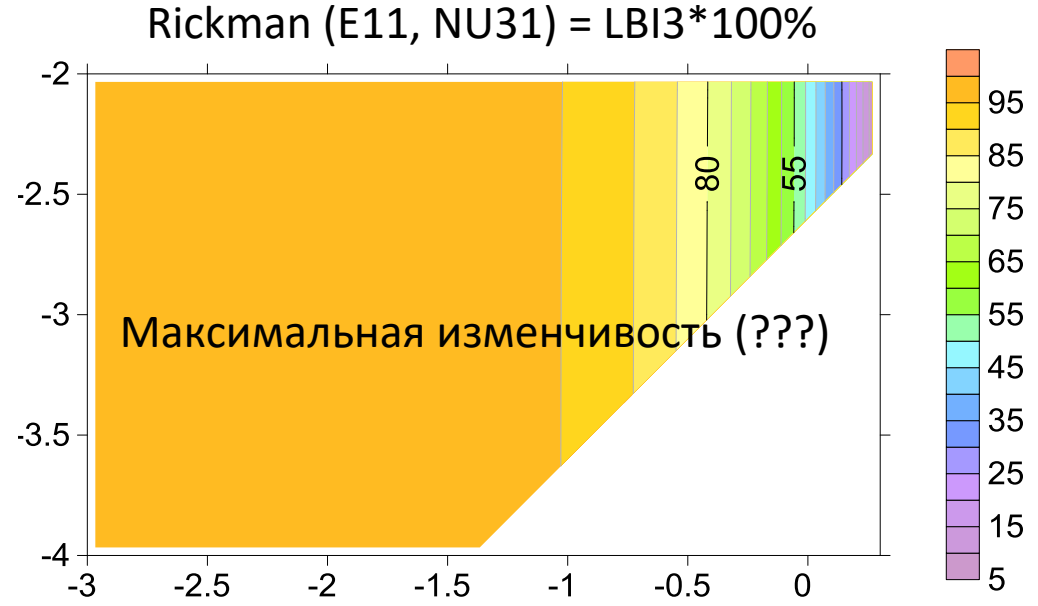
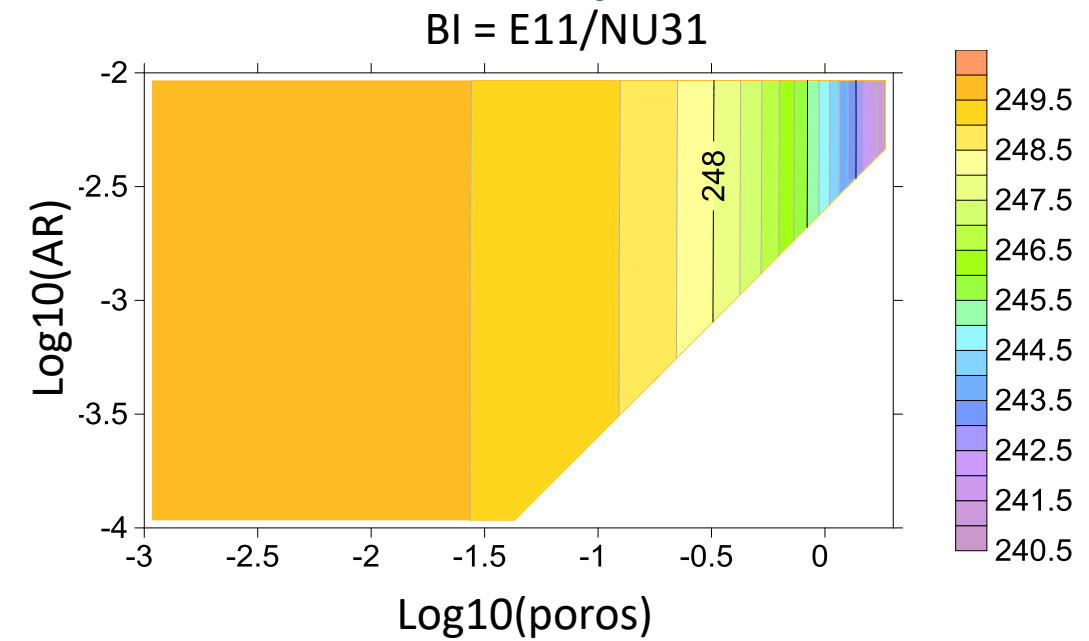
Poisson ratio NU13



Второй индекс –
направление действия
силы

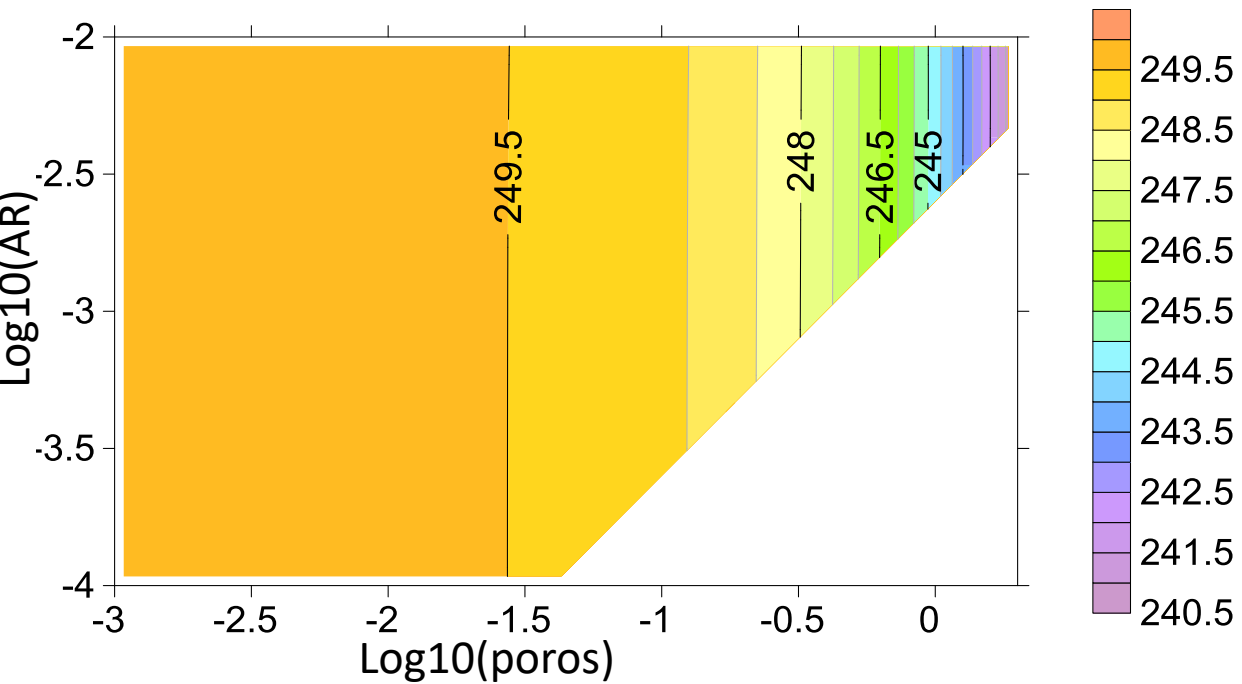
Кальцитовая матрица с ориентированными трещинами, насыщенными пластовым флюидом

Для метода Рикмана максимумы и минимумы взяты для каждого направления: E11_min, E11_max, NU12_min, NU12_max etc.

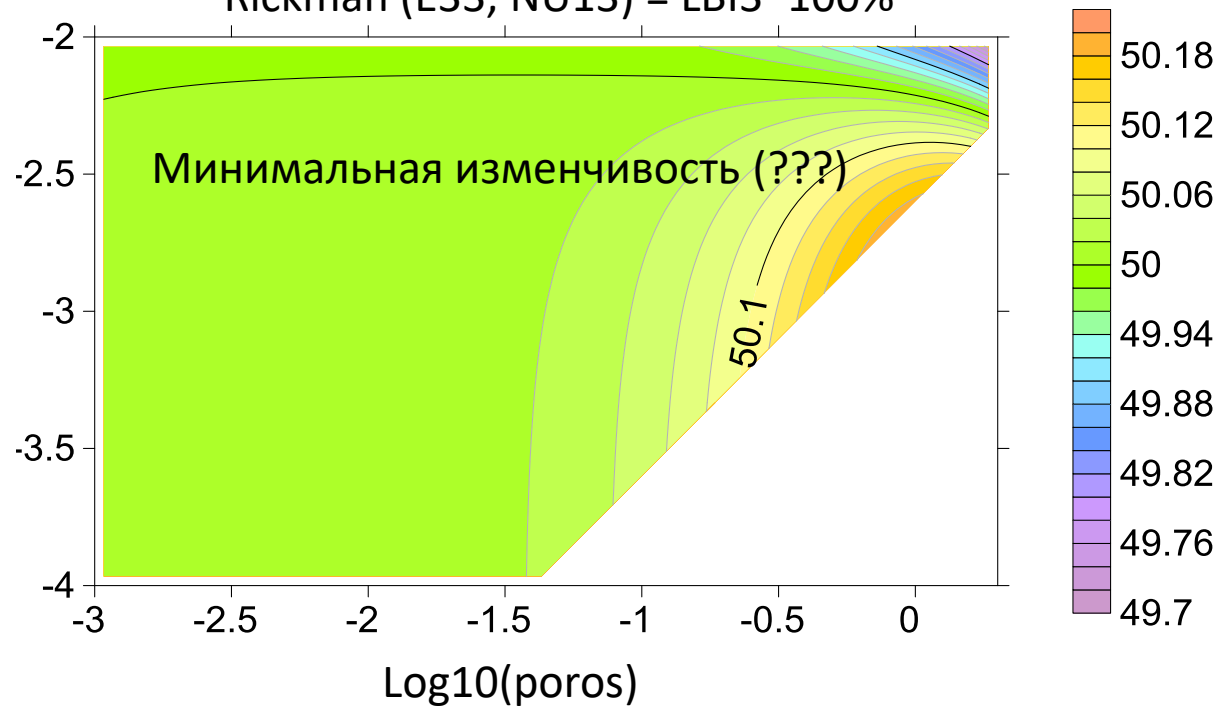


Кальцитовая матрица с
ориентированными трещинами,
насыщенными пластовым флюидом

BI = E33/13



Rickman (E33, NU13) = LBI3*100%



Результат по Рикману выглядит странно: известно, что трещины практически не меняют свойства породы в направлении плоскости трещин (индексы 1 и 2), однако минимальная изменчивость индекса наблюдается для коэффициента Рикмана (E33, NU13)

Модель: кальцитовая матрица с горизонтальными линзами керогена

Свойства матрицы: $V_p = 6.54$ км/с, $V_s = 3.35$ км/с, $Rho = 2.71$ г/см³.

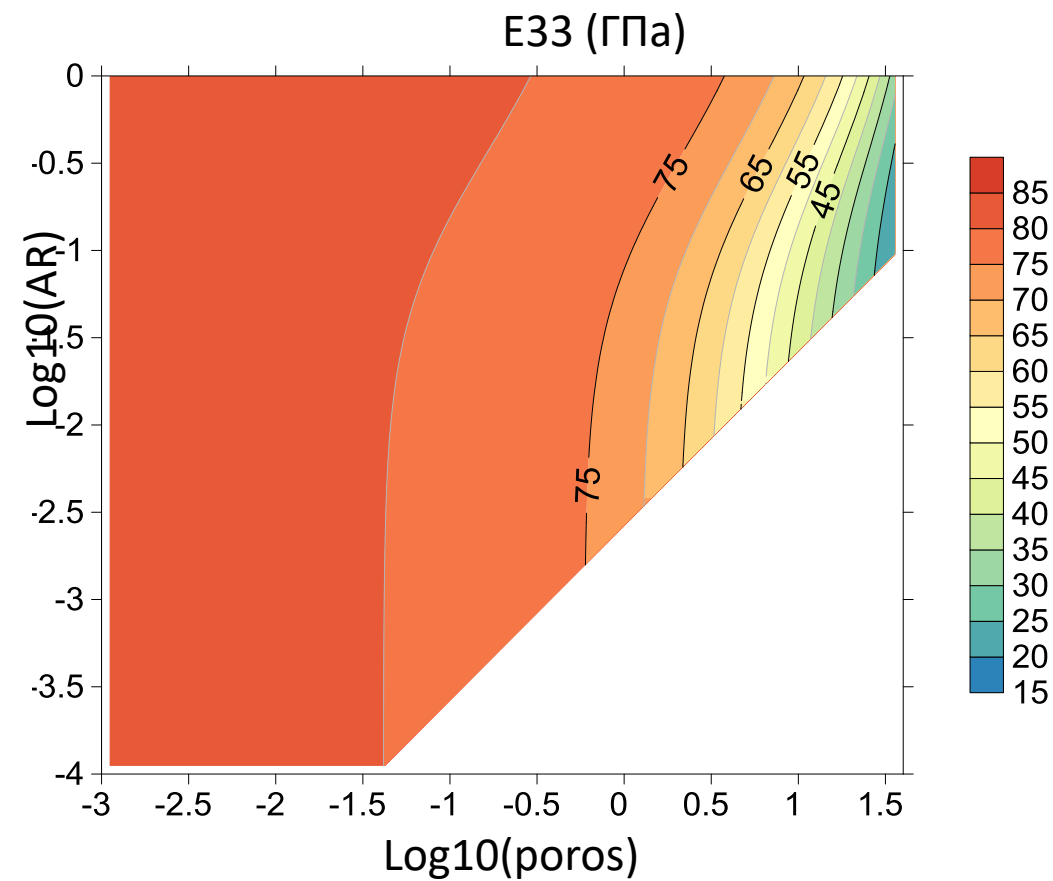
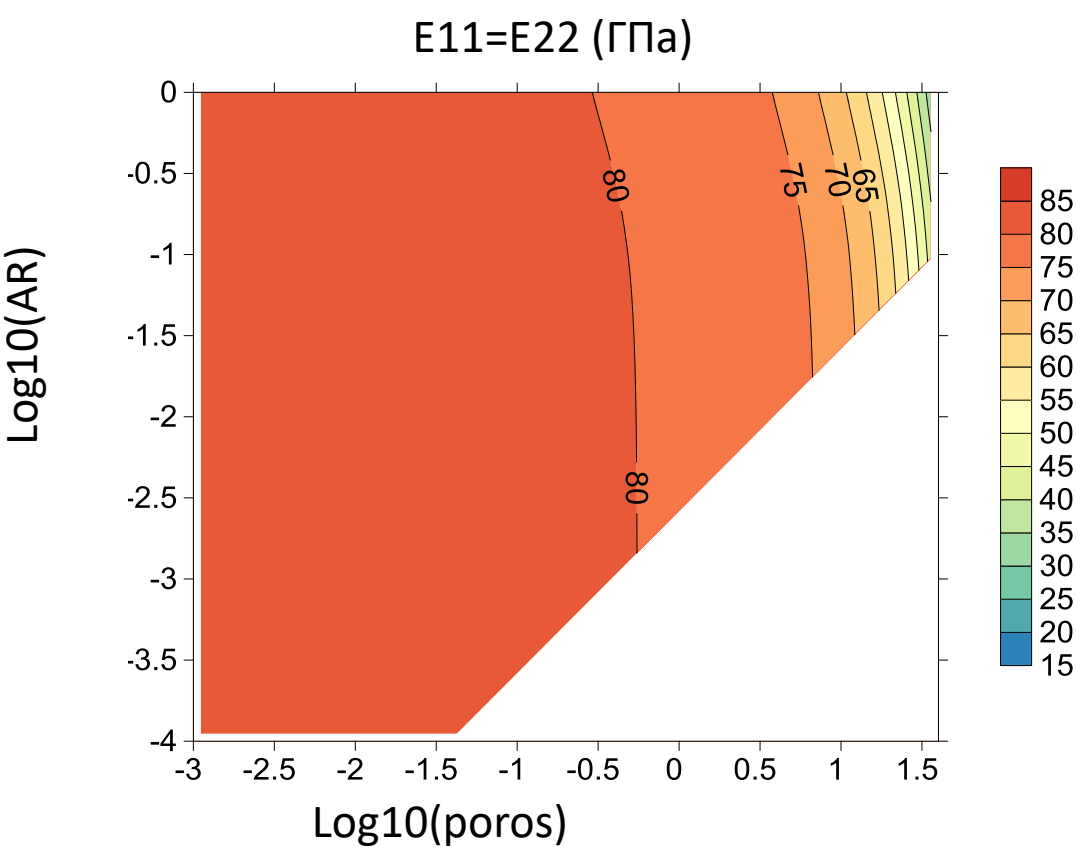
Свойства керогена: $V_p = 2.19$ км/с, $V_s = 1.12$ км/с, $Rho = 1.28$ г/см³.

Аспектное отношение (AR) изменяется от 0.0001 до 0.01.

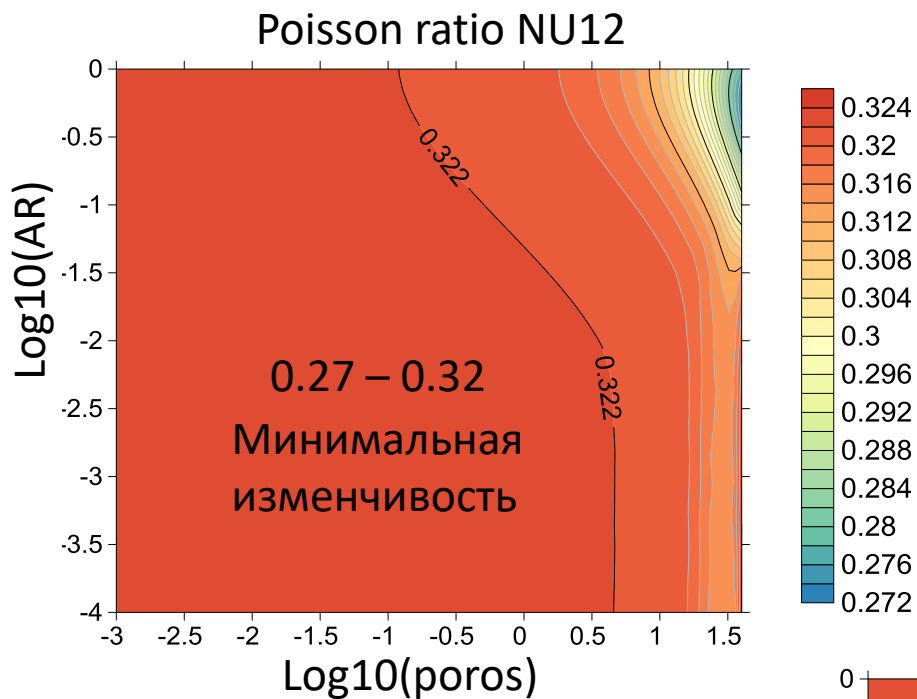
Содержание керогена варьирует от 0 до 40 %.

Горизонтальные линзы керогена в карбонатной матрице

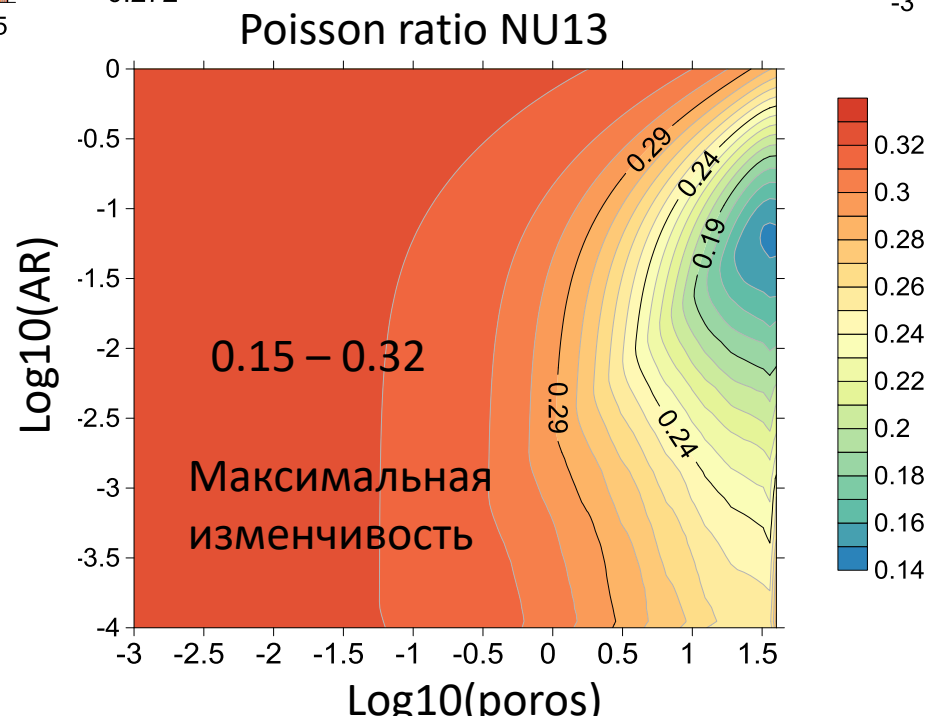
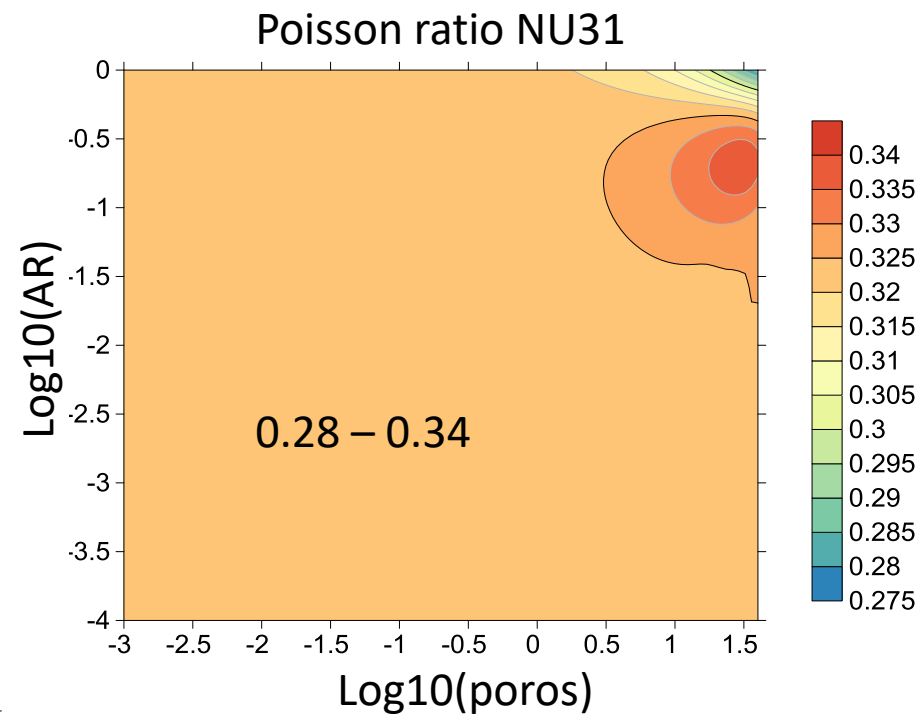
Модуль Юнга



Горизонтальные линзы керогена в карбонатной матрице

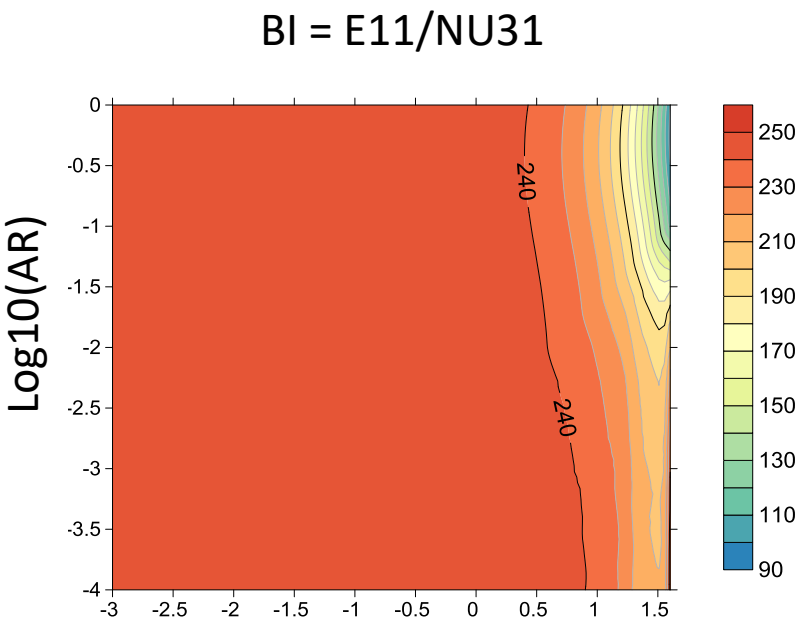


Коэффициент Пуассона

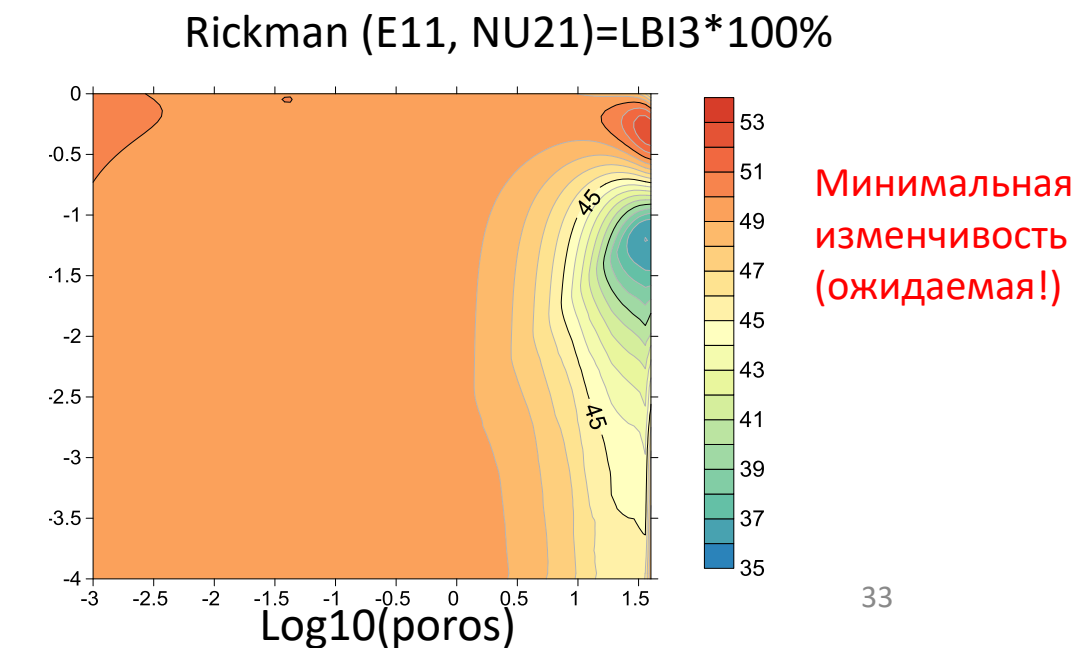
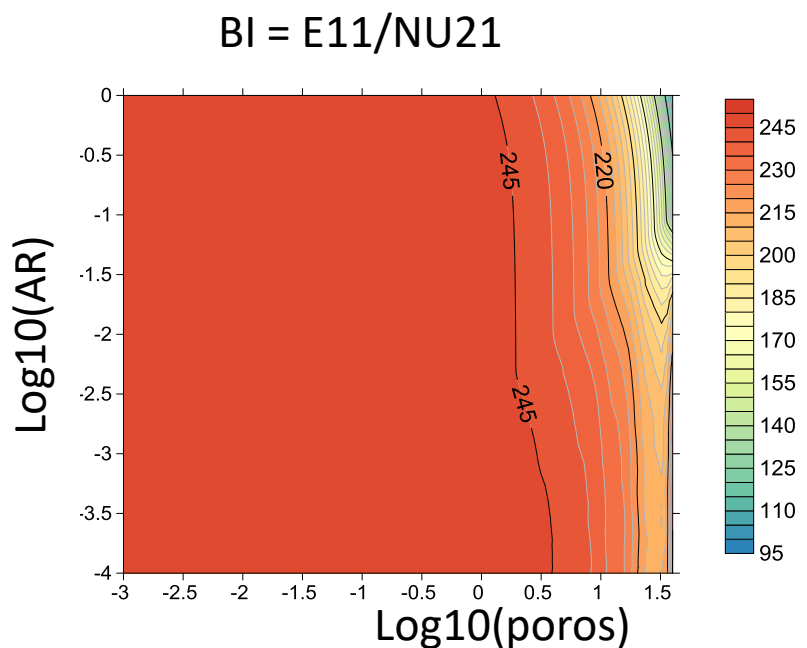
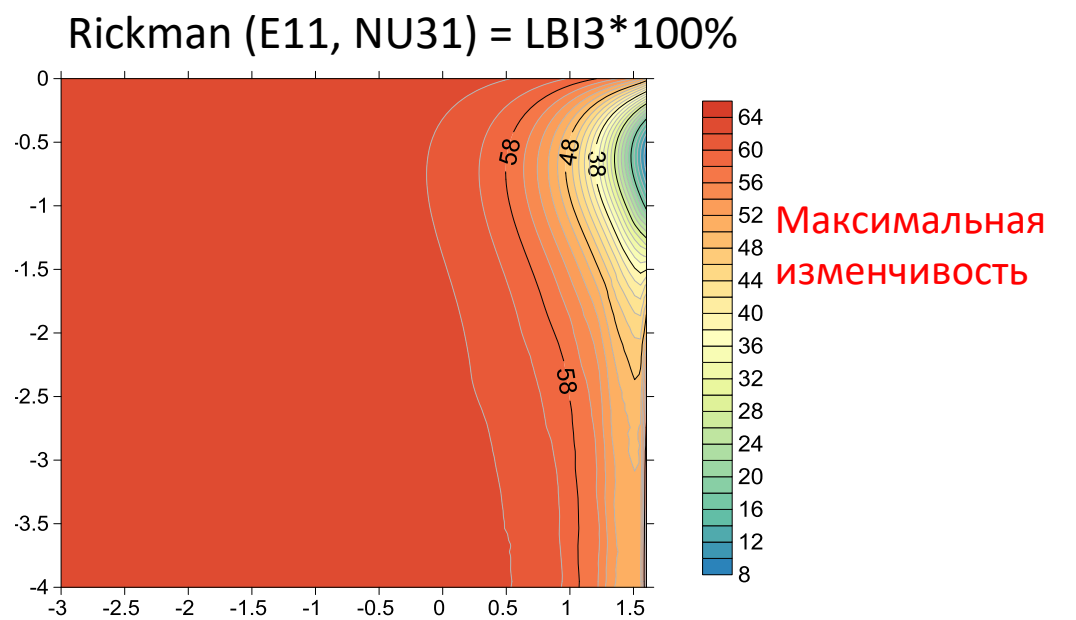


Горизонтальные линзы керогена в карбонатной матрице

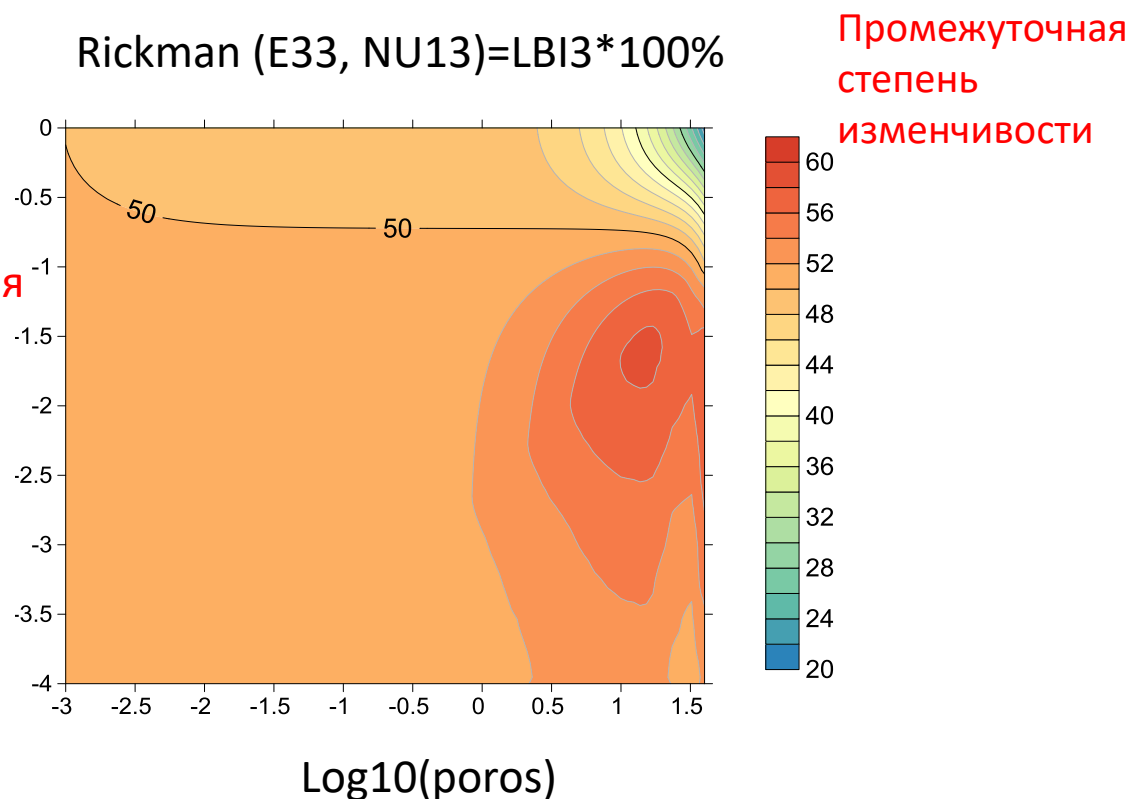
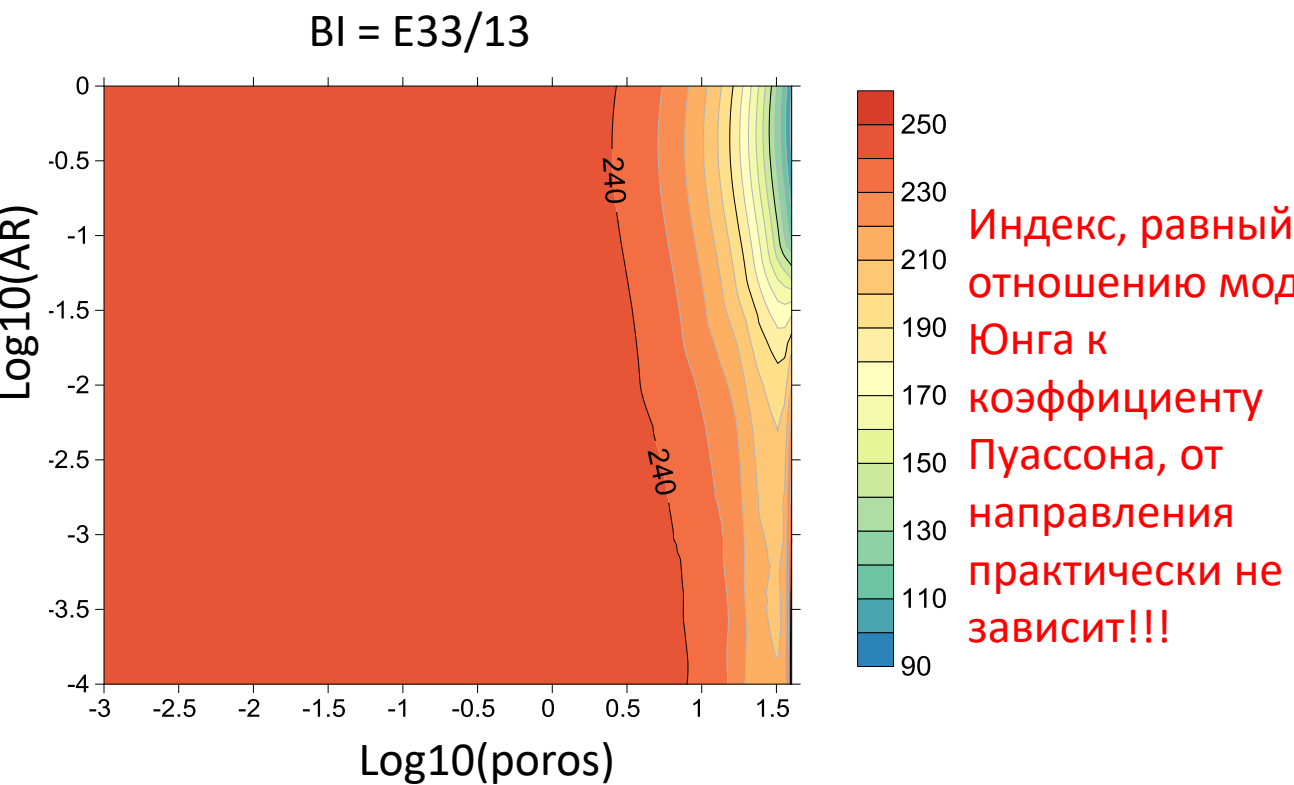
Для метода Рикмана максимумы и минимумы взяты для каждого направления: E11_min, E11_max, NU12_min, NU12_max etc.



Индекс, равный отношению модуля Юнга к коэффициенту Пуассона, от направления практически не зависит!!!



Для метода Рикмана максимумы и минимумы взяты для каждого направления: E11_min, E11_max, NU12_min, NU12_max etc.



Поведение различных индексов (отношения модулей и Рикмана) разное!!!

Выводы

1. При наличии нескольких десятков определений индекса хрупкости, необходимо выбирать то, которое даёт корректные результаты для **данных** пород при использовании **имеющейся** информации.
2. Для корректного выбора индекса хрупкости необходимо учитывать тип породы, особенности её внутренней структуры и минеральный состав.
3. Результаты определение индекса хрупкости не должно противоречить физическому смыслу. В частности, они должны находиться в согласии с энергетическими законами неупругого деформирования. В этом случае противоречия между индексами хрупкости, рассчитанными по данным ГИС и определенными по результатам лабораторных исследований керна, должны быть минимальны.
4. Определение индекса хрупкости для анизотропных пород, которыми являются большинство нетрадиционных низкопроницаемых коллекторов УВ, требует особого внимания. Необходимо учитывать направление, для которого индекс хрупкости определяется.