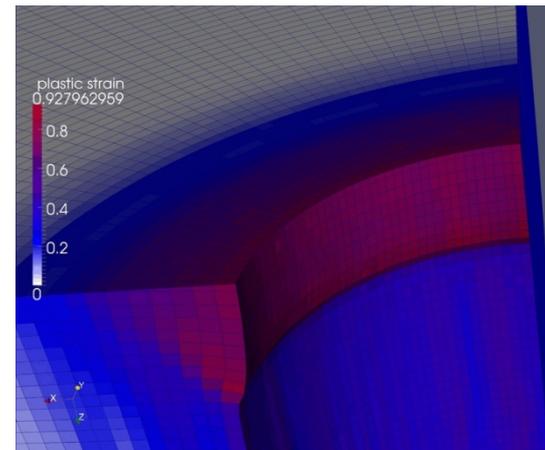
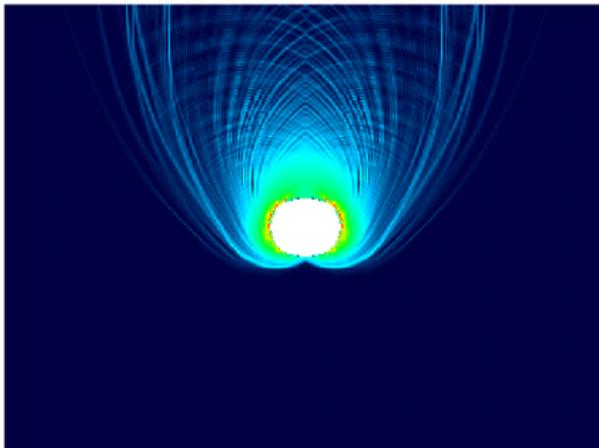
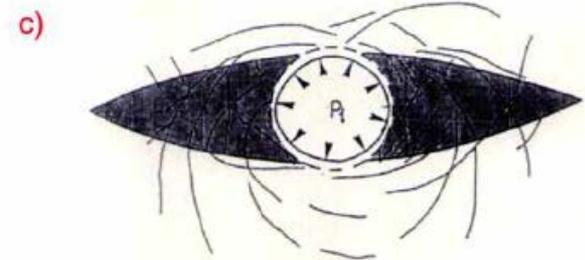
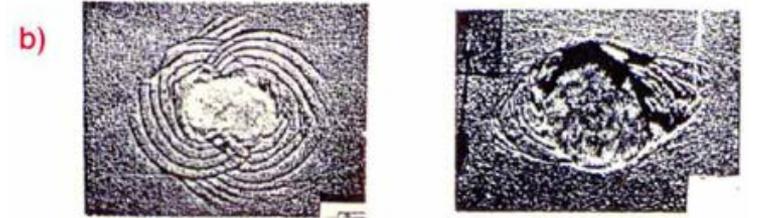
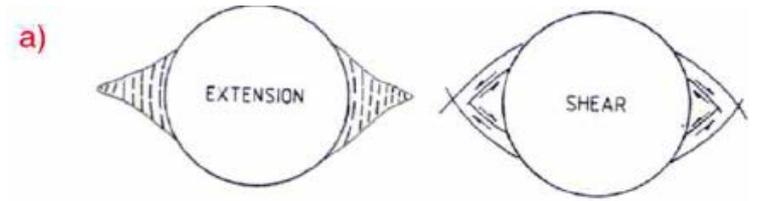
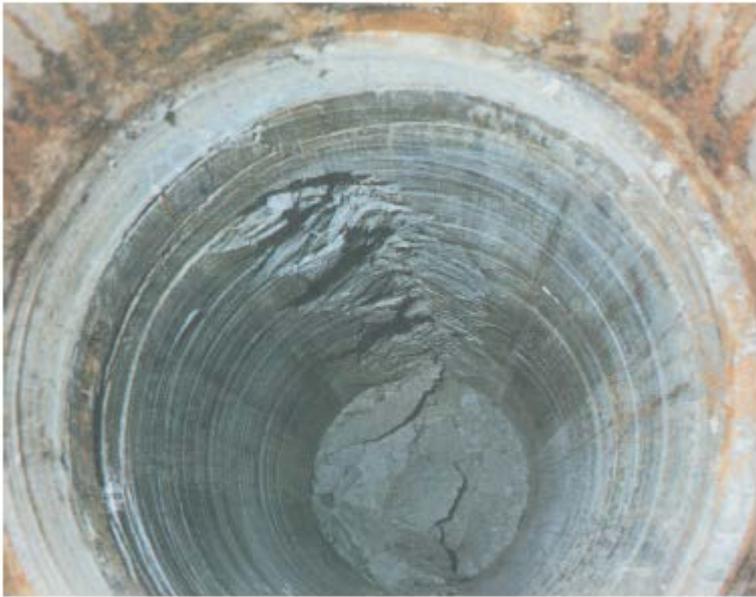


ФОРМИРОВАНИЕ ЗОН НЕОБРАТИМОЙ ДЕФОРМАЦИИ ВОКРУГ СКВАЖИН

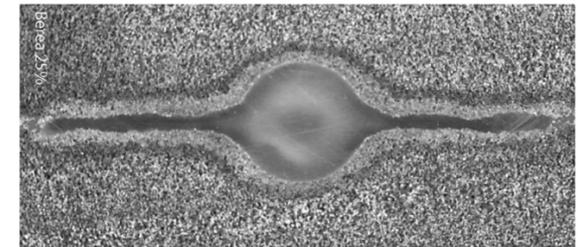
Ю.П. Стефанов^{1,2}, И.Н. Ельцов¹

¹ИНГГ СО РАН, г. Новосибирск; ²ИФПМ СО РАН, г. Томск,

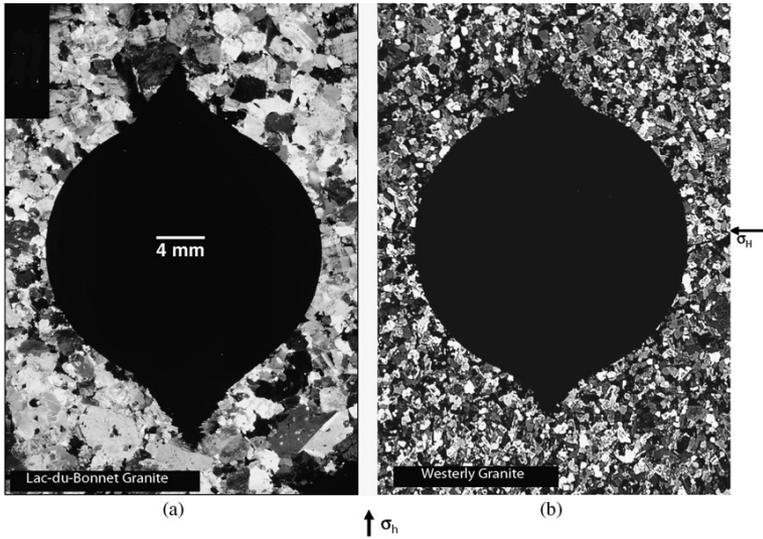




Nick Barton (2003)



Cross-sections of boreholes in four medium- to high-porosity sandstones. 2



B. Haimson (2006)

НАГРУЖЕНИЕ

Растяжение

Сдвиг

Сжатие

Разрушение контактов
Хрупкое поведение

Разрушение зерен, катаклиз
Вязкое поведение

ДИЛАТАНСИЯ

Дилатация

+

Сдвиг

Уплотнение

Раскрытие трещин

Локализация сдвига

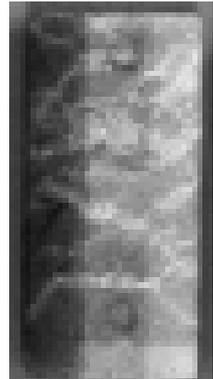
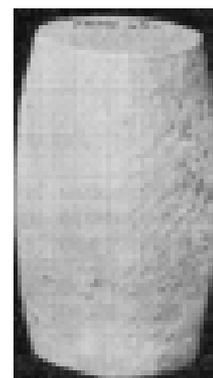
Локализация уплотнения

Явный учет и анализ роста трещин

Теория пластичности

Теория трещин

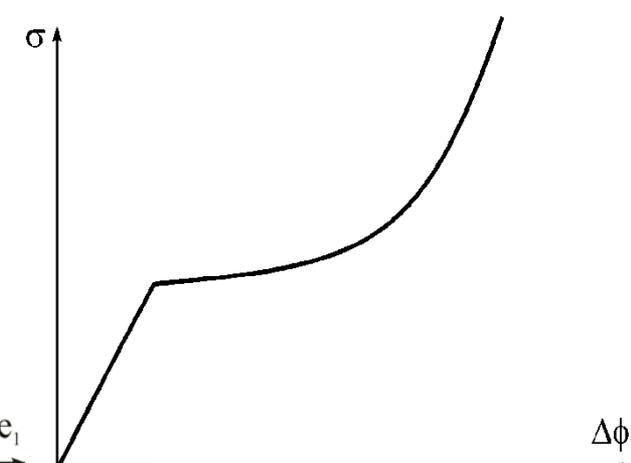
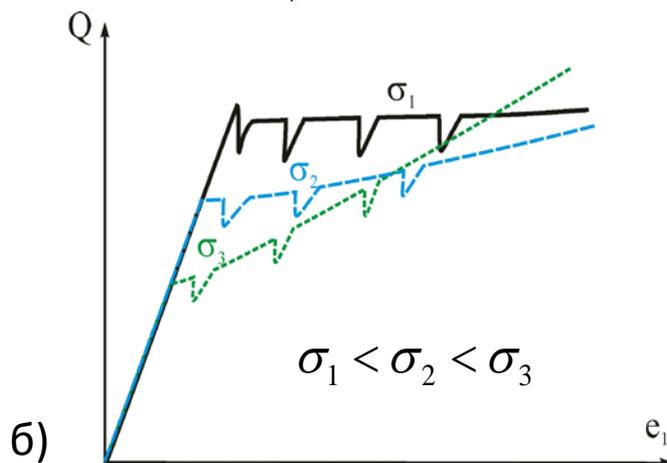
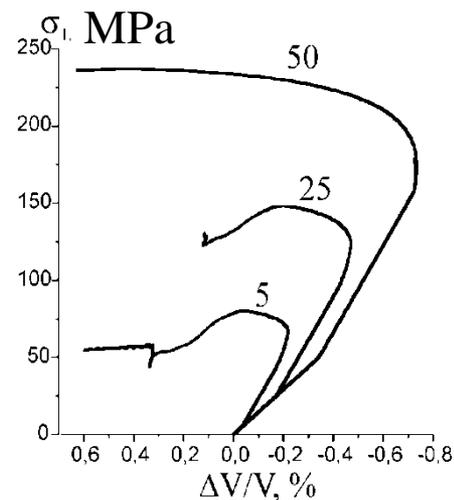
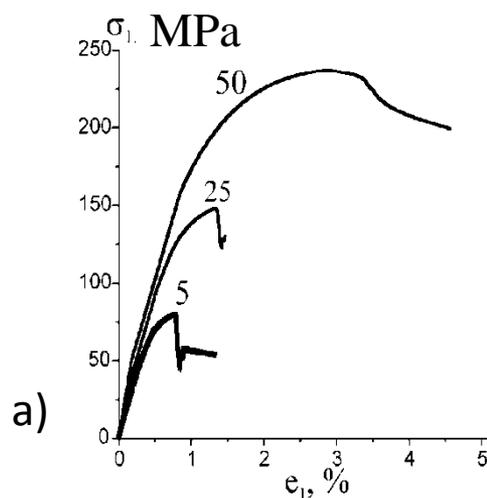
Континуальная механика разрушения



Дилатансия и компакция

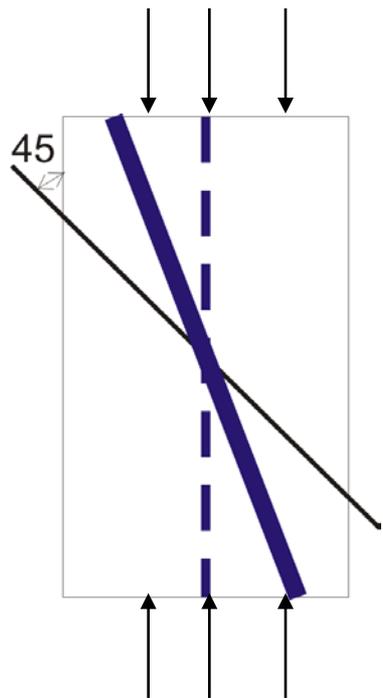
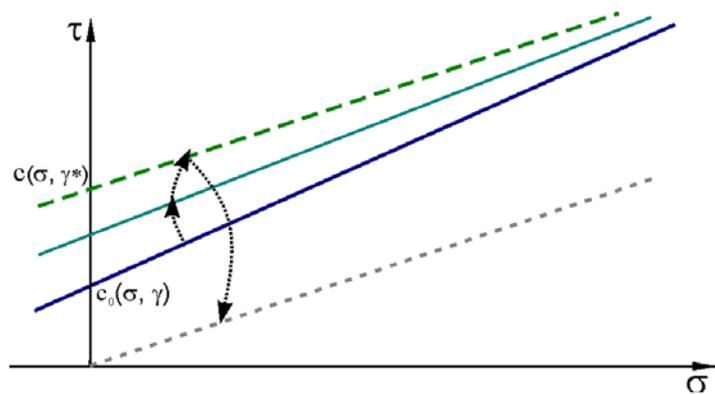
- Диаграммы нагружения
- Ориентация полос локализации
- Характер деформации (разрыхление-уплотнение)
- Поверхность предельного состояния

Типичные диаграммы нагружения для пород с (а) низкой и (б) высокой пористостью



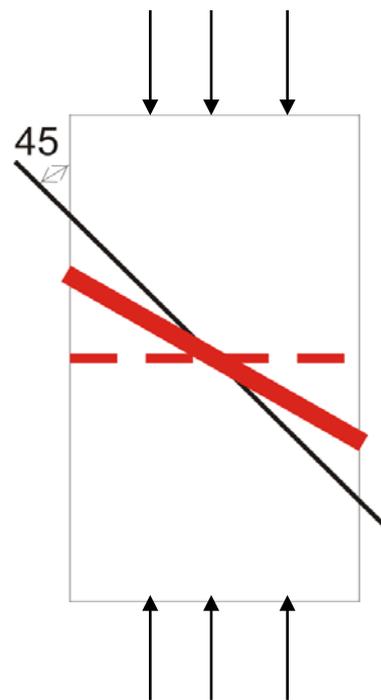
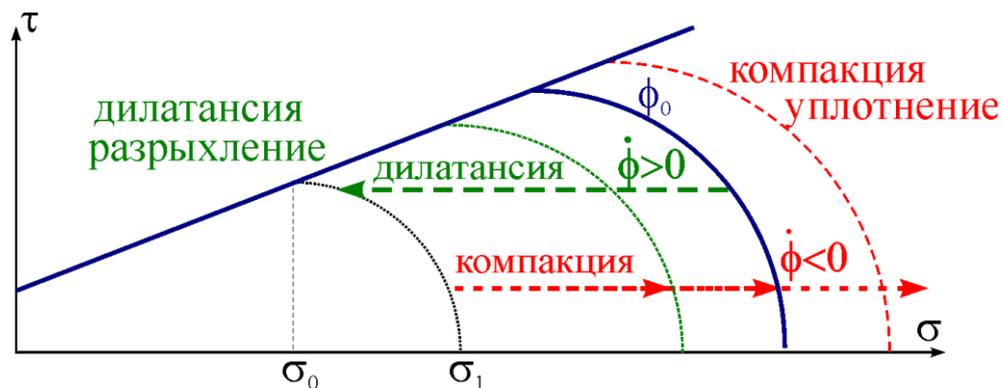
$$\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3$$

Плотные породы

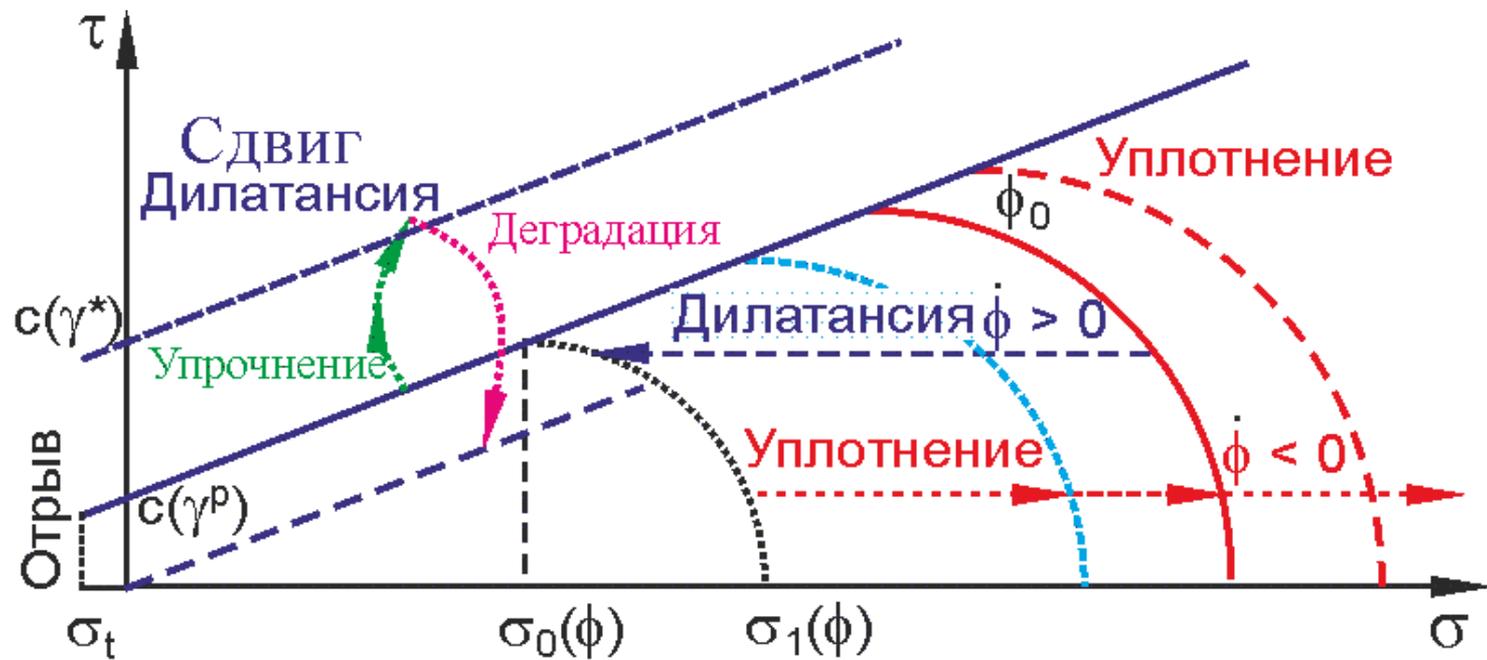


Дилатансия. Рост пористости, трещиноватости

Высокопористые породы



Компрессия. Снижение пористости



Общий вид предельной поверхности и ее изменение в ходе деформации

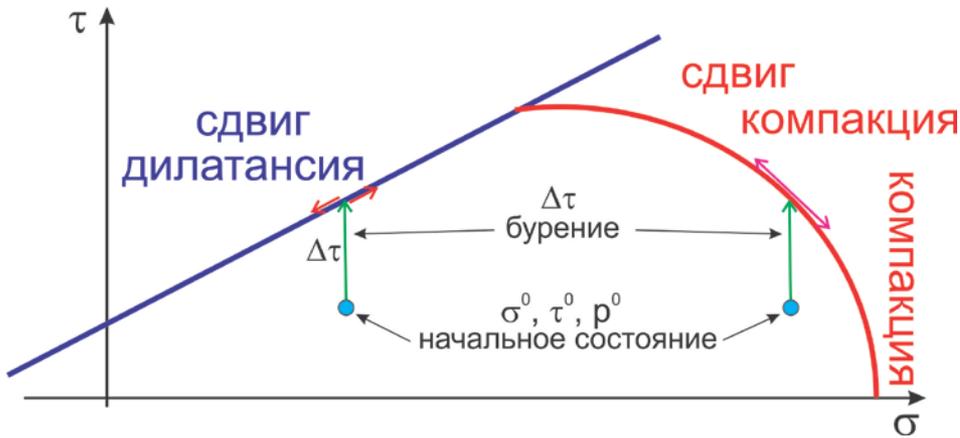
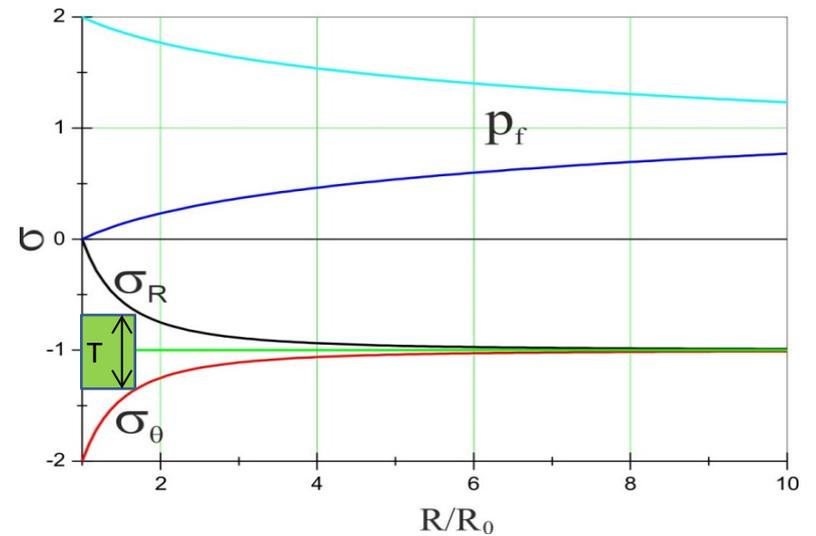


Схема изменения напряженного состояния в результате бурения.



Изменение напряжений и порового давления с расстоянием от скважины. Упругое стационарное решение

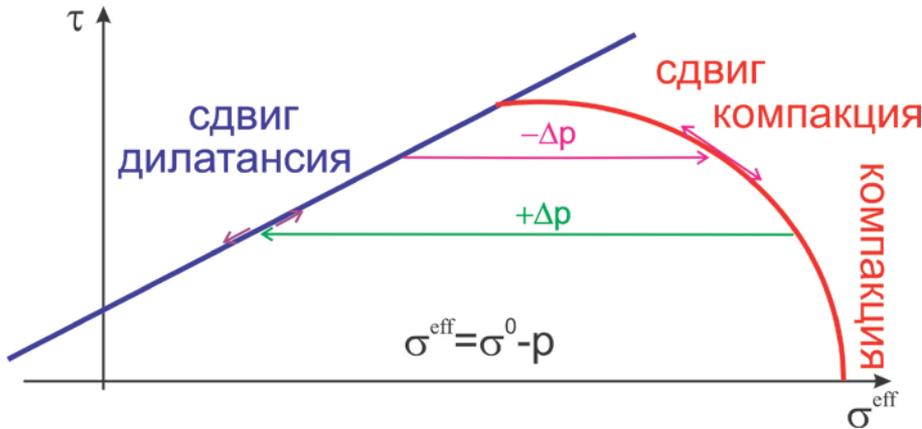
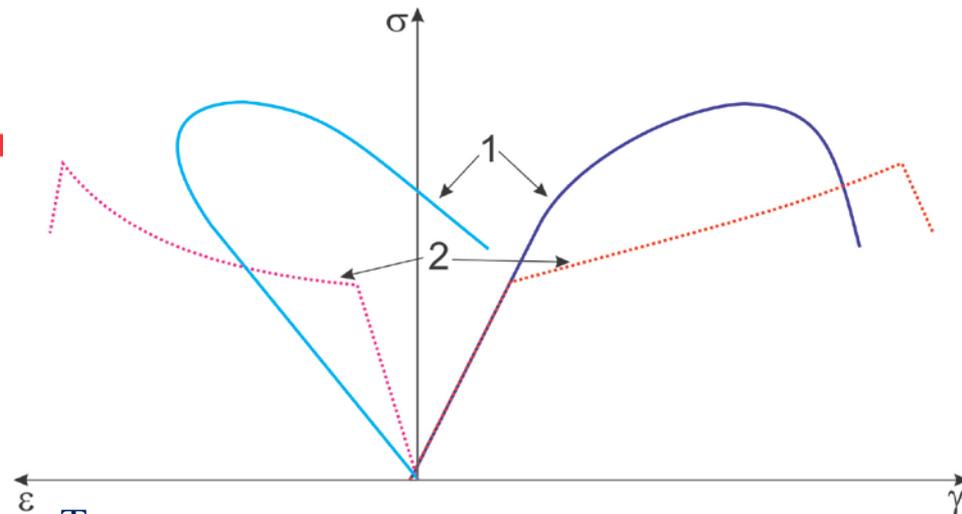


Схема изменения напряженного состояния в результате изменения порового давления



Типичные диаграммы нагружения породы при деформировании в режимах дилатансии и компакция

Основные уравнения

- Движения: $\sigma_{ij,j} = \rho \dot{u}_i$
- Неразрывности: $\dot{\rho} + \rho u_{i,i} = 0$
- Определяющие соотношения:

Аддитивное разложение скорости деформации:

• Геометрические соотношения:

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i})$$

$$\dot{\omega}_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} - u_{j,i})$$

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij}^e + \dot{\epsilon}_{ij}^p$$

Гипоупругость:

$$\sigma_{ij} = -\sigma \delta_{ij} + s_{ij} \quad \dot{\sigma} = -K \frac{\dot{V}}{V} \quad \frac{Ds_{ij}}{Dt} = 2\mu \left(\dot{\epsilon}_{ij}^e - \frac{1}{3} \dot{\epsilon}_{kk}^e \delta_{ij} \right) \quad \frac{Ds_{ij}}{Dt} = \dot{s}_{ij} - s_{ik} \dot{\omega}_{jk} - s_{jk} \dot{\omega}_{ik}$$

• **Пластичность:** комбинированная предельная поверхность, неассоциированный закон течения

Функция текучести

$$f(\sigma_{ij}, \epsilon_{ij}^p) = 0,$$

Пластический потенциал:

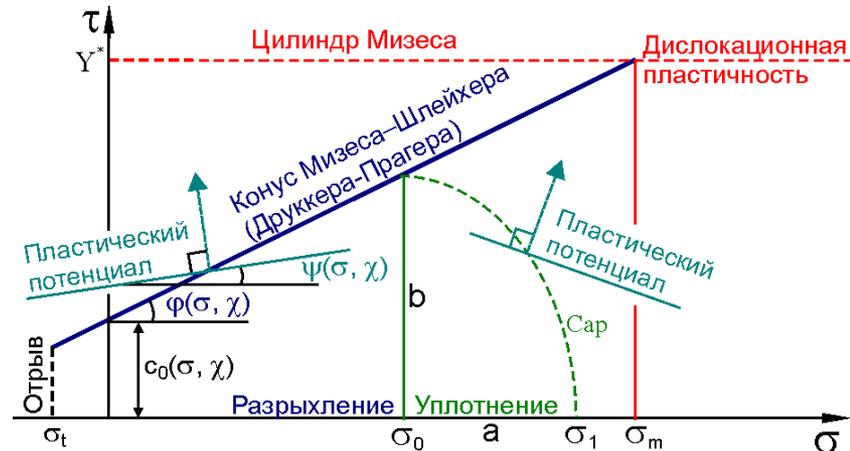
$$g(\sigma_{ij}, \epsilon_{ij}^p) = 0,$$

Пластическая деформация

$$d\epsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}}$$

+ начальные условия

+ граничные условия



Общий вид предельной поверхности

Предельная поверхность:

$$f_1(\sigma, \tau) = \tau - \alpha\sigma - c \quad \text{при} \quad \sigma_t \leq \sigma \leq \sigma_0$$

$$f_2(\sigma, \tau) = \frac{(\sigma - \sigma_0)^2}{a^2} + \frac{\tau^2}{b^2} - 1 = 0 \quad \text{при} \quad \sigma > \sigma_0$$

α – коэффициент внутреннего трения,

Λ – коэффициент дилатансии,

Упрочнение и разупрочнение:

$$c = c_0(1 + h(A(\gamma^P) - D(\gamma^P)))$$

$$A(\gamma^P) = 2 \frac{\gamma^P}{\gamma^*}, \quad D(\gamma^P) = \left(\frac{\gamma^P}{\gamma^*} \right)^2$$

Дилатансия и уплотнение

$$\sigma_0(\phi) = \sigma_0 f(\phi) = \sigma_0 \left(\frac{\phi^*}{\phi} \right)^m,$$

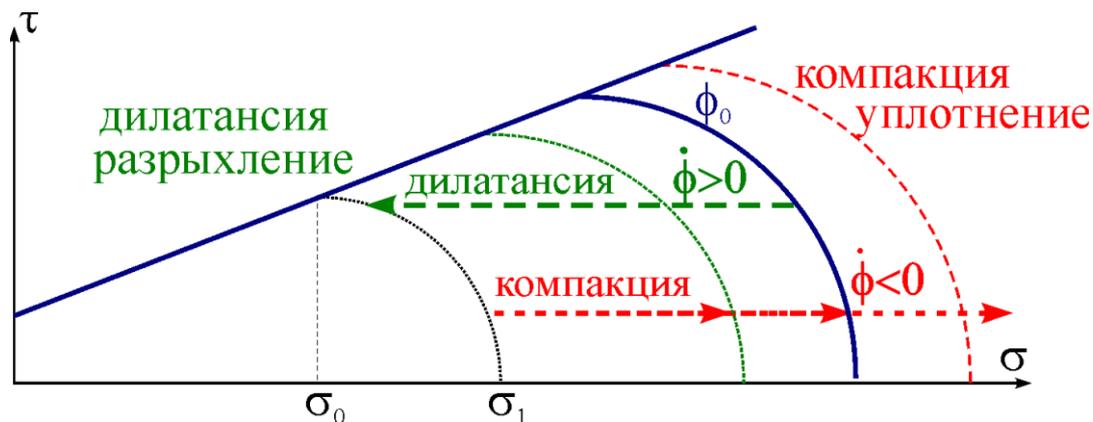
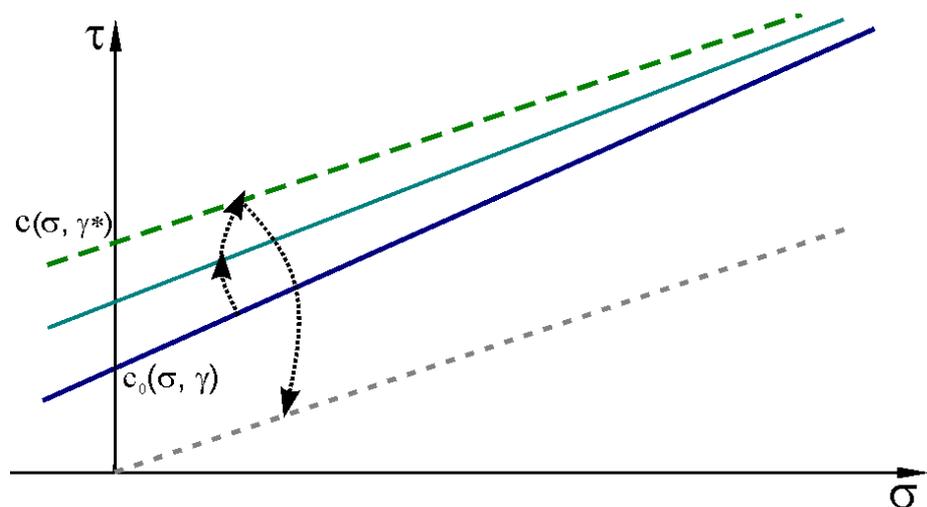
$$a = a_0 + r\Delta\sigma_0, \quad b = c + \alpha\sigma_0,$$

ϕ – пористость, γ^P – сдвиговая часть пластической деформации

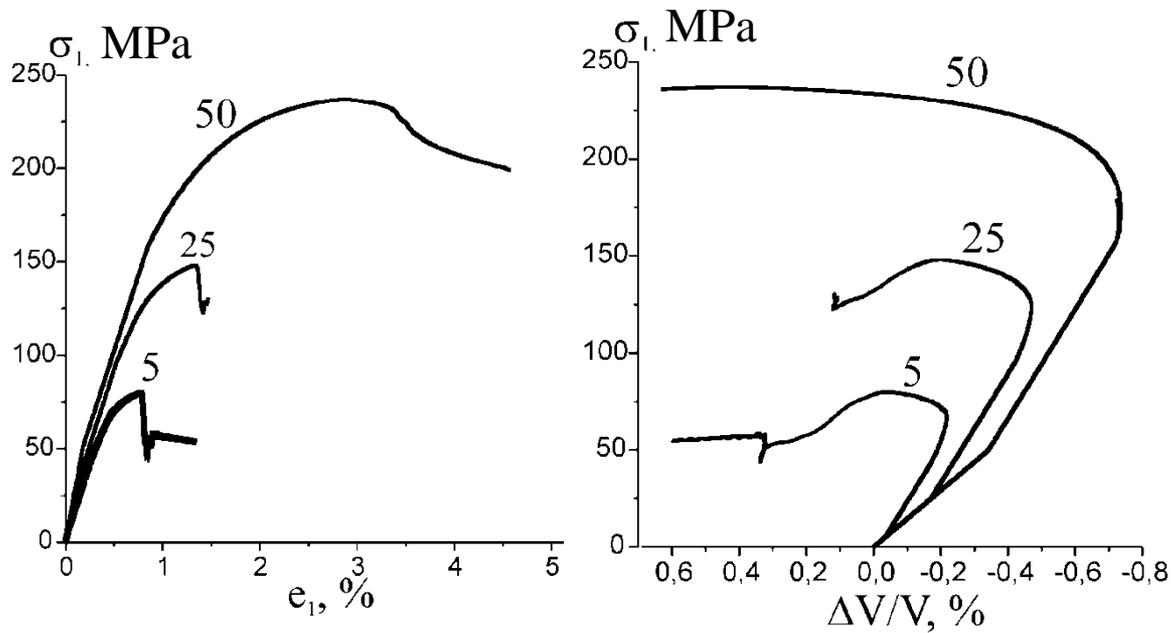
Пластический потенциал:

$$g(\sigma, \tau, \varepsilon^P) = -\Lambda\sigma + \tau$$

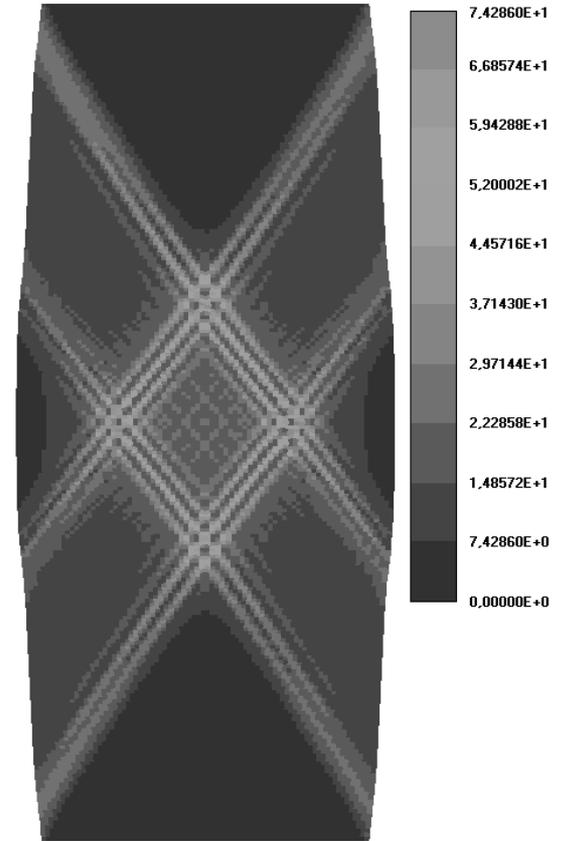
$$\sigma = -\sigma_{kk}/3 = P, \quad \tau = (s_{ij}s_{ij}/2)^{1/2}$$



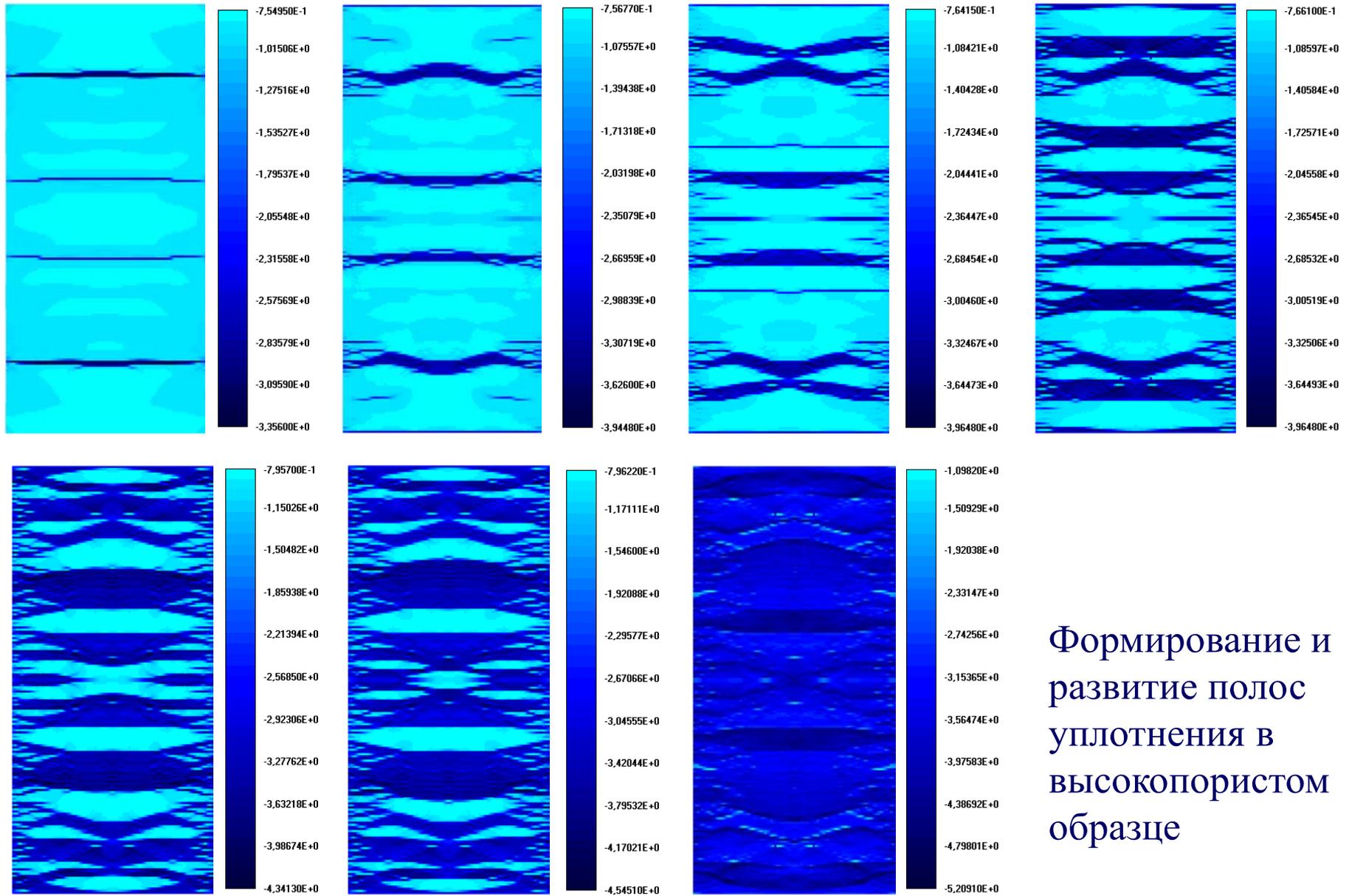
Расчет поведения образцов песчаника с низкой пористостью. Режим дилатансии



Диаграммы нагружения образцов при разном боковом обжатии. Численное моделирование.

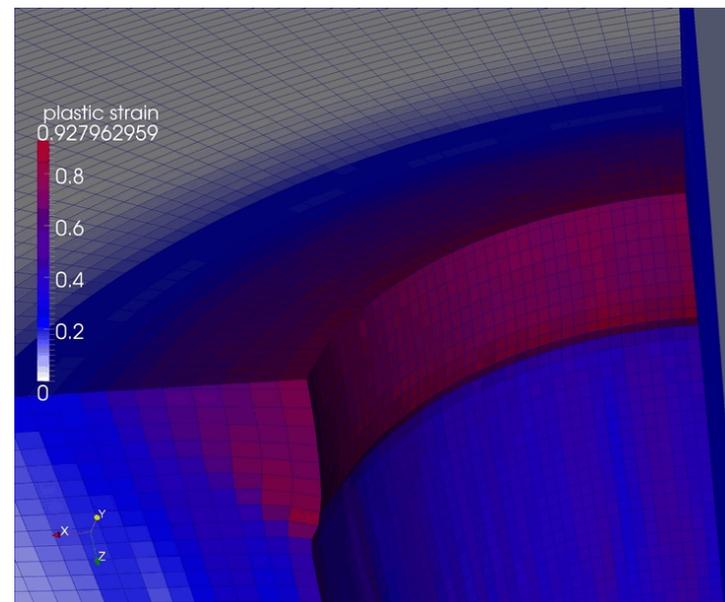
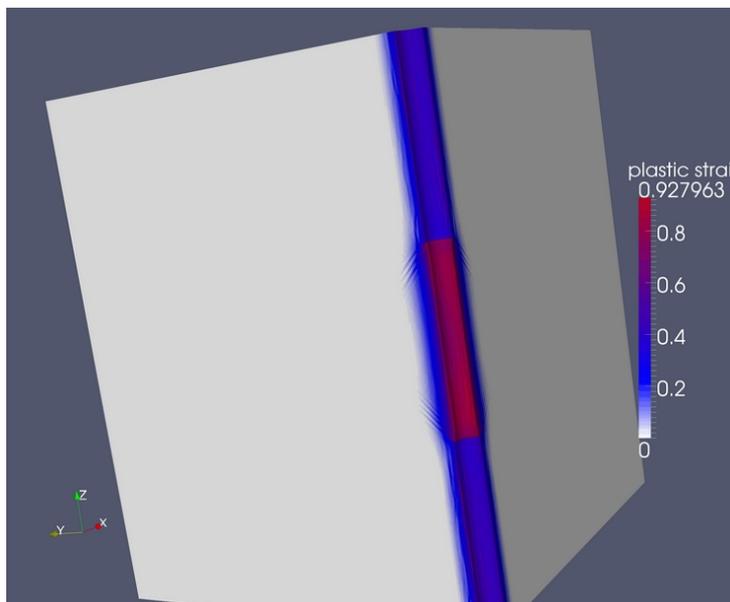


Распределение деформации в образце

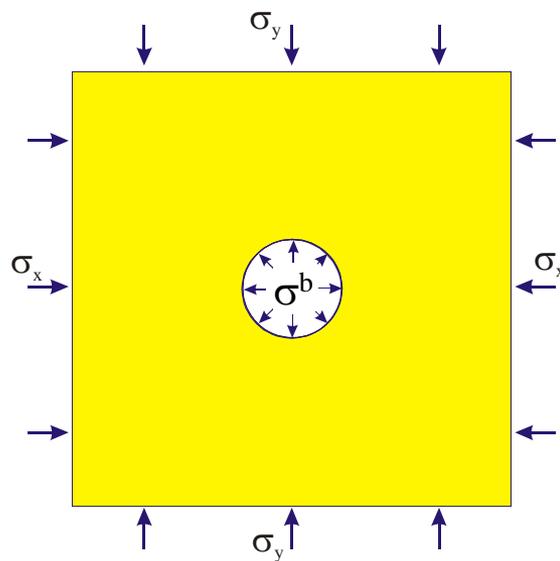


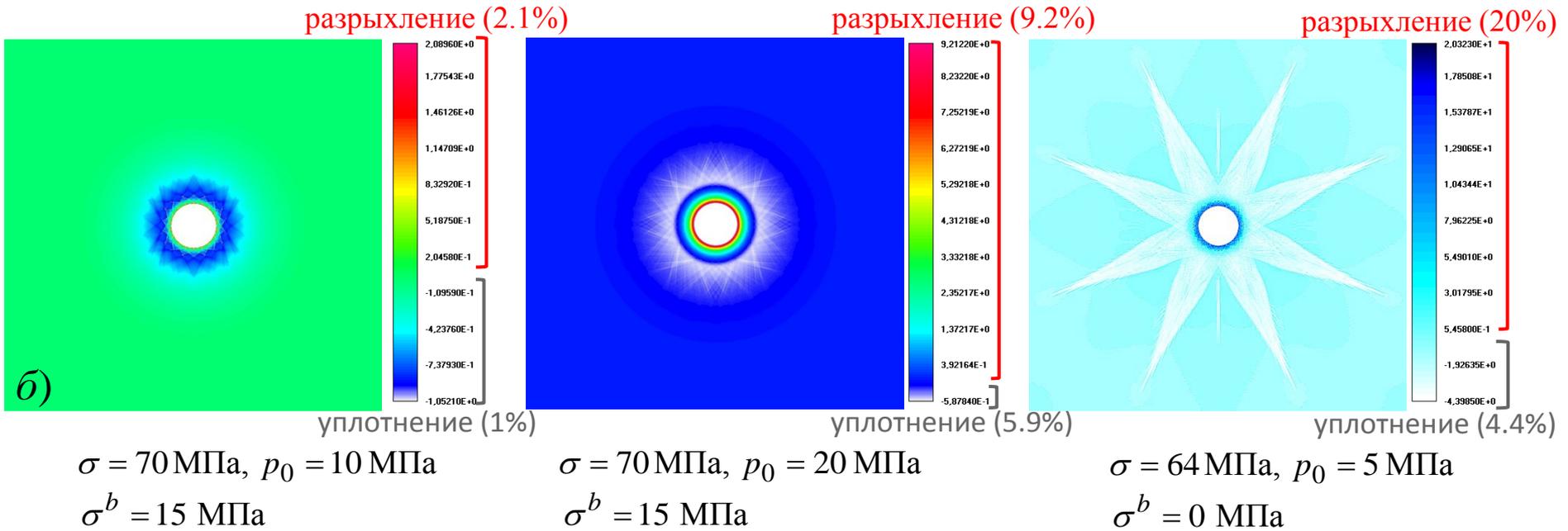
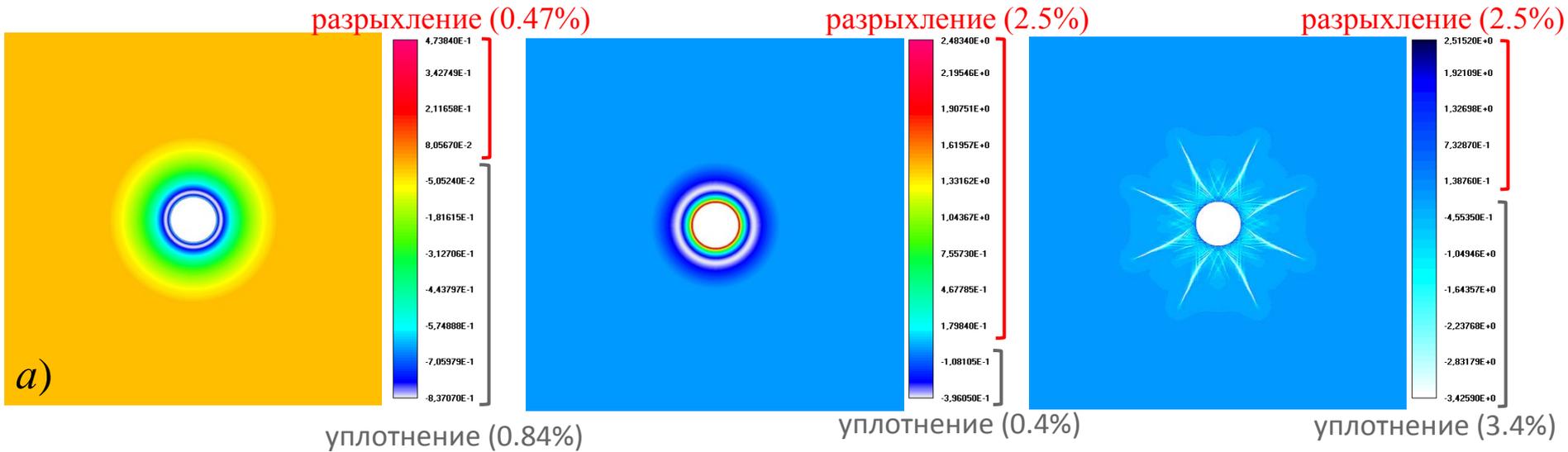
Формирование и развитие полос уплотнения в высокопористом образце

Расчет развития деформации вокруг скважин

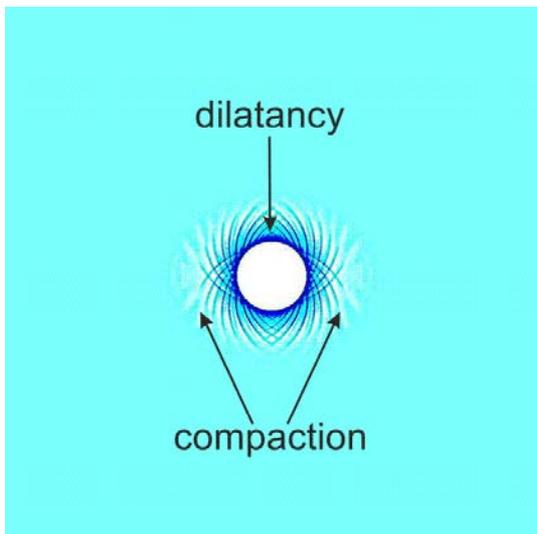


Сдвиговая деформация вокруг скважин



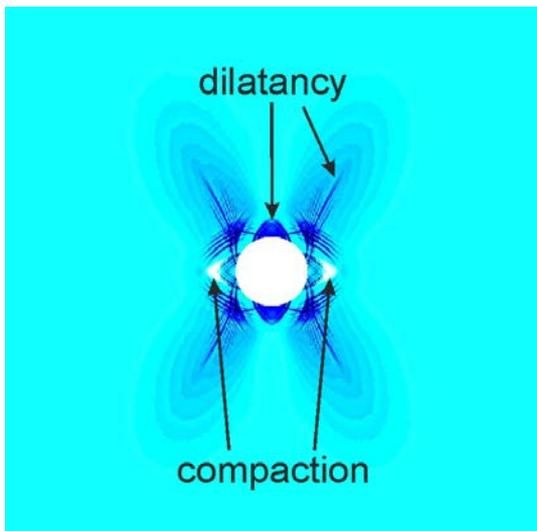
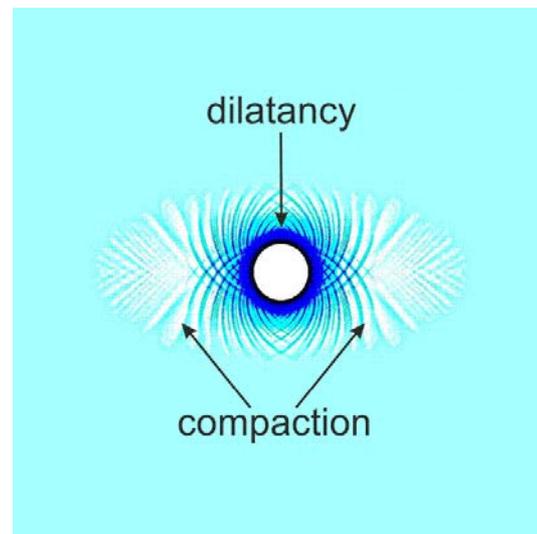


Распределение объемной деформации вокруг скважины: а) после создания скважины; б) после снижения порового давления



a)

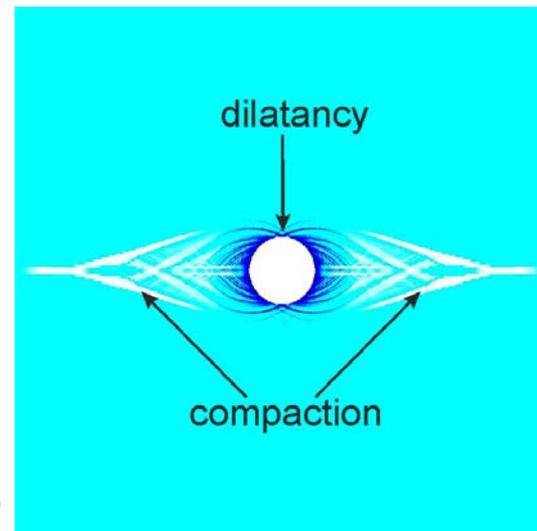
$$\sigma_x = 45 \text{ МПа}, \sigma_y = 55 \text{ МПа}, p_0 = 10 \text{ МПа}, \sigma^b = 0 \text{ МПа}$$



b)

$$\sigma_x = 30 \text{ МПа}, \sigma_y = 50 \text{ МПа}, p_0 = 24 \text{ МПа}$$

$$\sigma^b = 0 \text{ МПа}$$

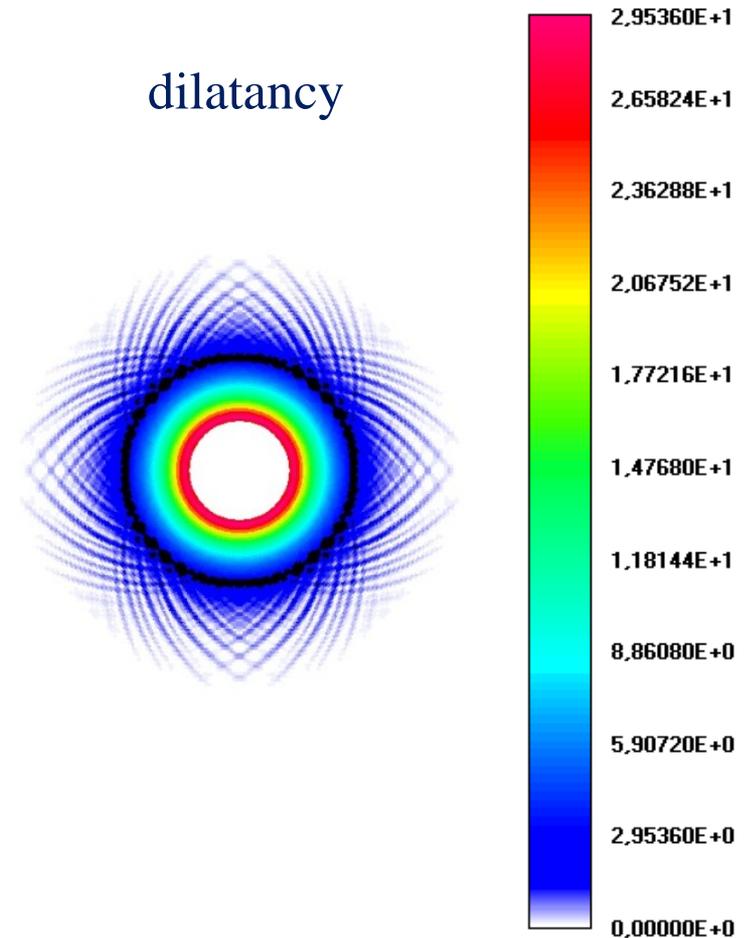
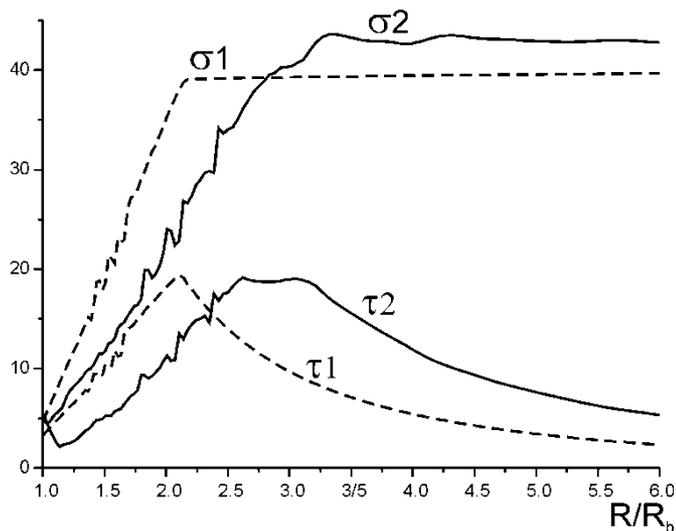
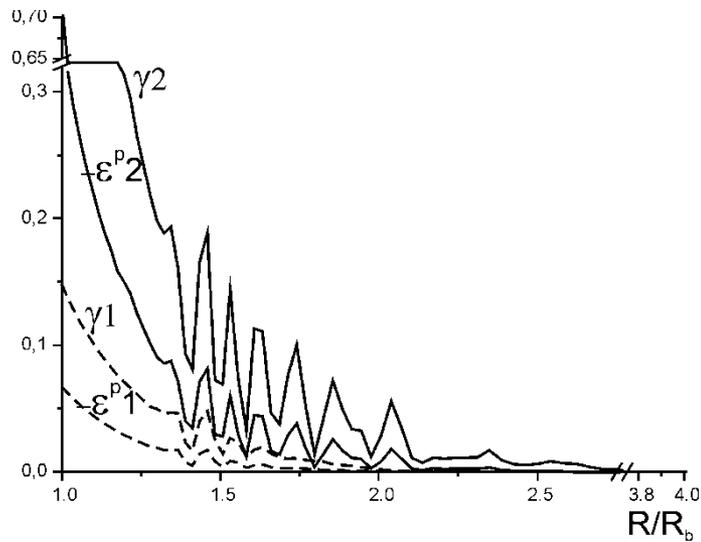


c)

$$\sigma_x = 45 \text{ МПа}, \sigma_y = 60 \text{ МПа}, p_0 = 5 \text{ МПа}$$

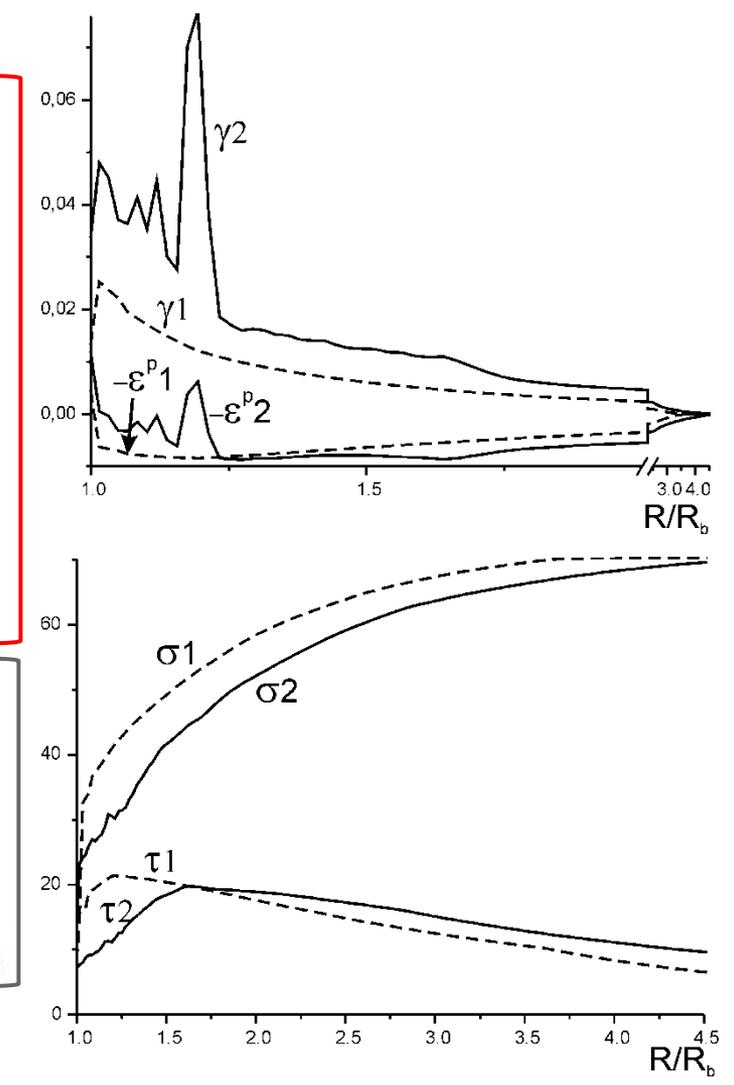
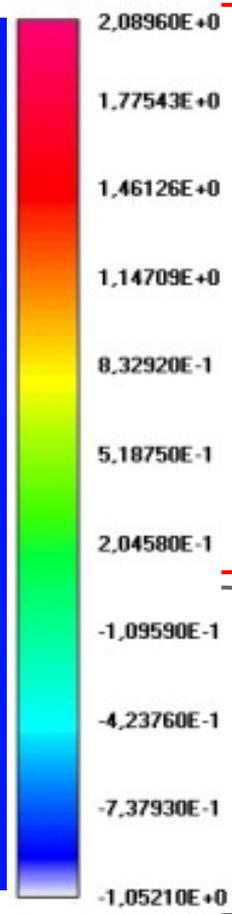
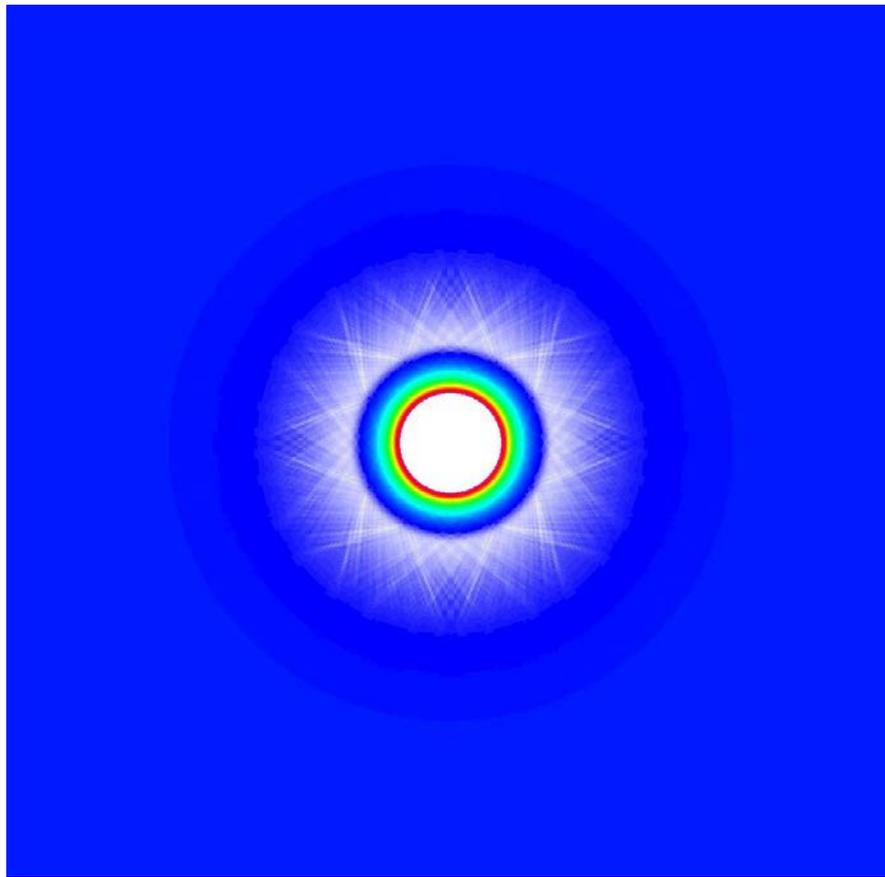
$$\sigma^b = 0 \text{ МПа}$$

Распределение объемной деформации вокруг скважины после ее создания и снижения порового давления



Графики изменения деформации и напряжений с расстоянием от скважины
 1 – после создания скважины, 2 – после снижения давления флюида

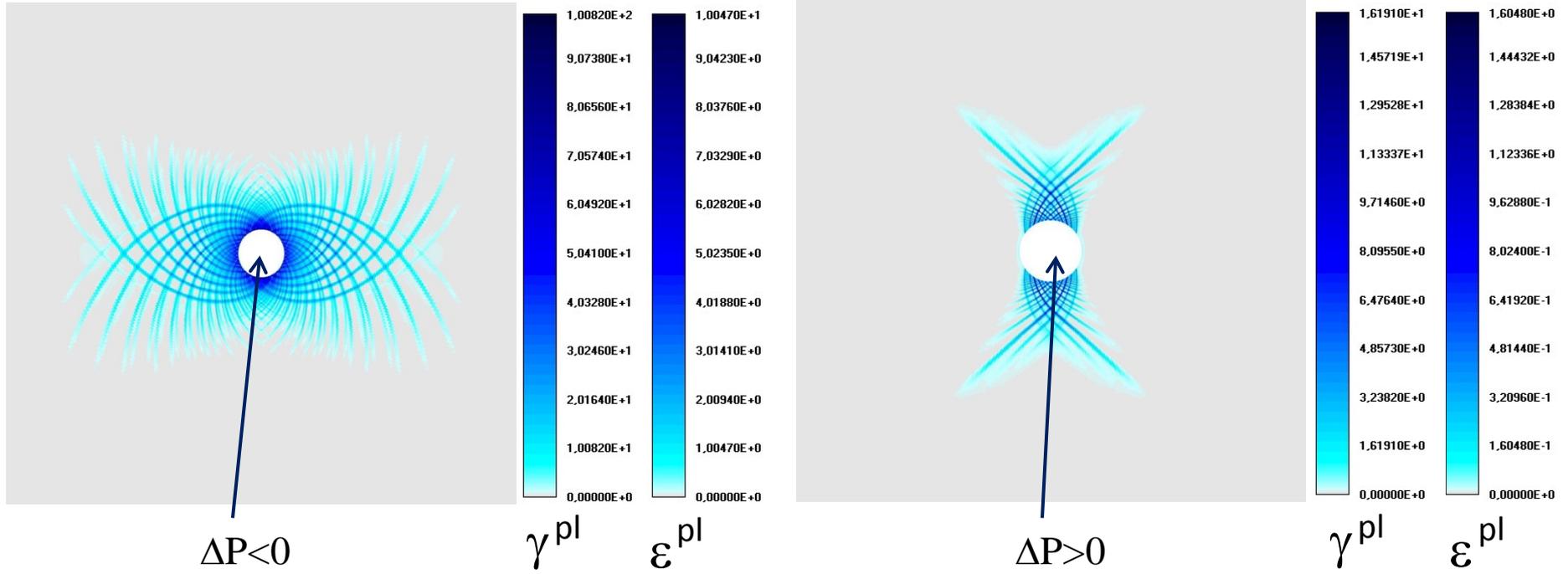
dilatancy + compaction



Графики изменения деформации и напряжений с расстоянием от скважины
1 – после создания скважины, 2 – после снижения давления флюида

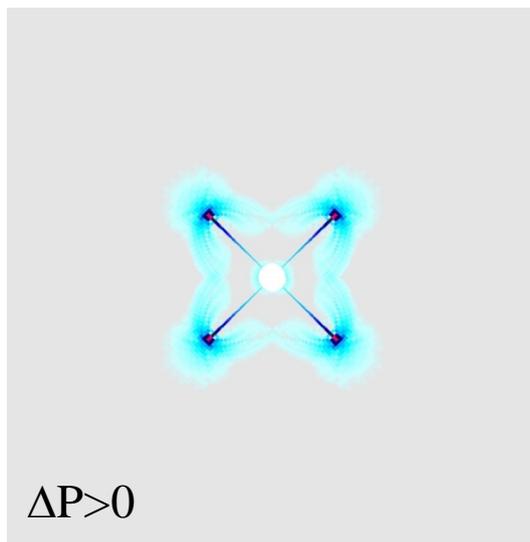
y ↑
 x →

$|\sigma_y| > |\sigma_x|$

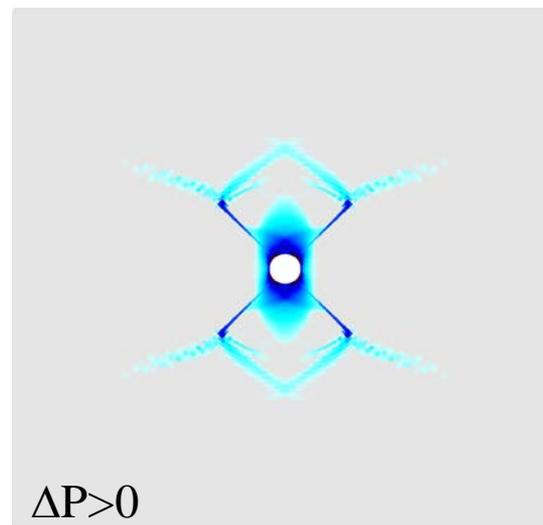


Распределение деформации вокруг скважины при изменении давления флюида

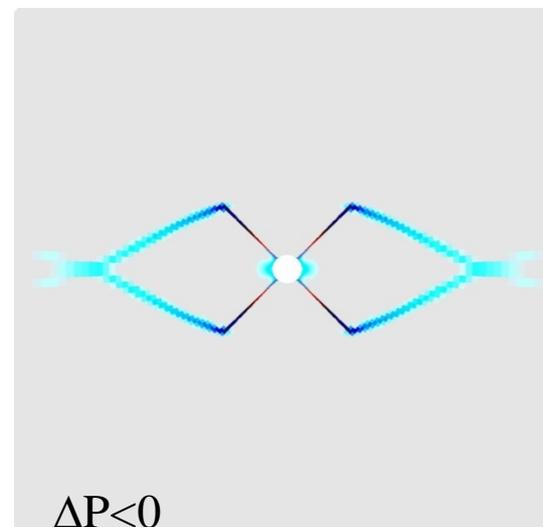
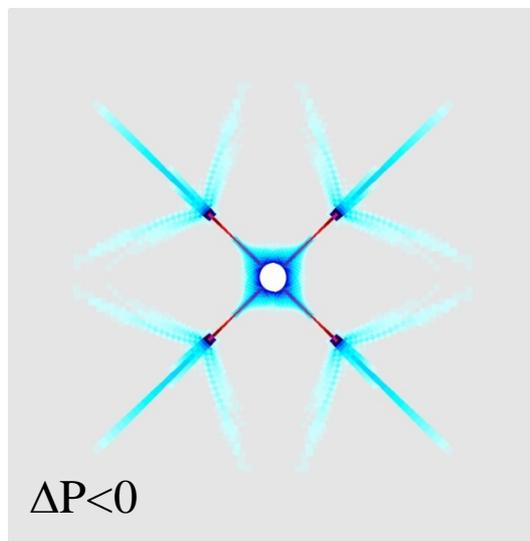
$$|\sigma_y| = |\sigma_x|$$



$$|\sigma_y| > |\sigma_x|$$



Низкая
пористость



Высокая
пористость

Развитие зон неупругой деформации при перфорации
не обсаженной скважины



Спасибо за внимание!

THANK YOU!

Некоторые проблемы, вопросы:

Трещиноватость среды.

- Совпадает ли ориентация трещиноватости современному напряженному состоянию?

Релаксация. напряжений

- Напряженное состояние близко к гидростатическому.
- Вокруг скважины напряженное состояние связано с ее созданием.
- Вокруг скважины развивается неупругая деформация

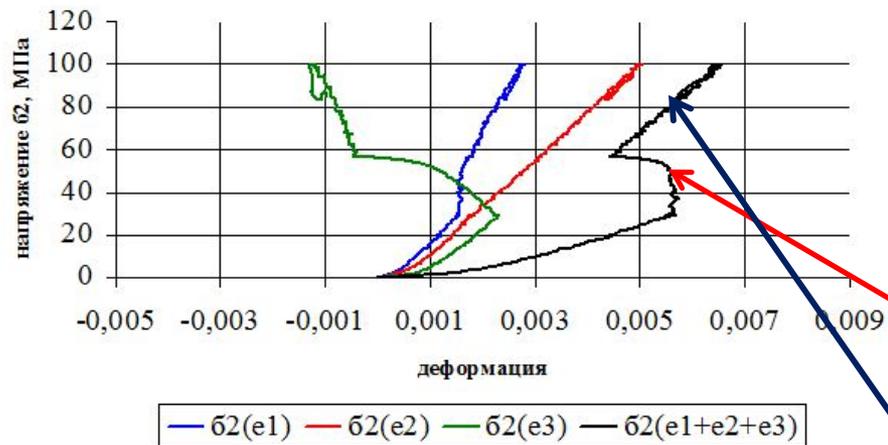
Гидроразрыв

- Направление трещин в упругопластичной среде с релаксированными напряжениями
- Направление трещины в слоистой, трещиноватой среде.

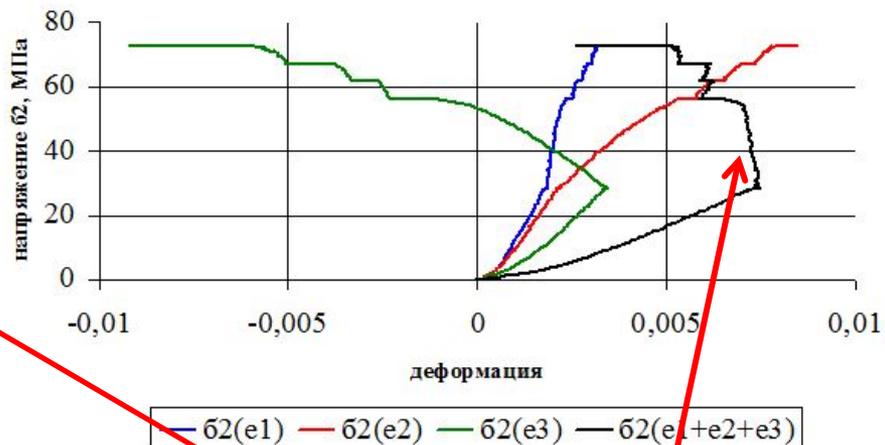
Тип трещины: отрыв, сдвиг поперечный, сдвиг продольный

- Влияние порового давления.
- Влияние строения среды, трещиноватости

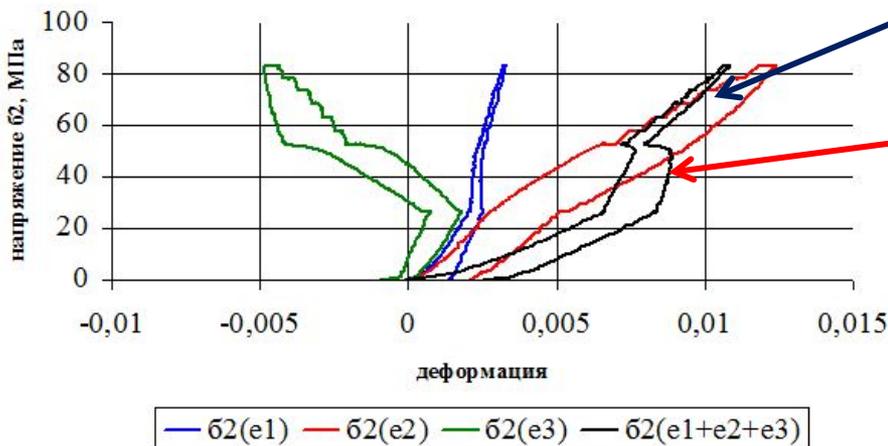
Ульяновское месторождение скв №3306:(3153м).
образец №0621



Ульяновское месторождение скв №3306:(3153м).
образец №0652



Сыхтынглорское месторождение скв №3303:(2900м).
образец №10



Compaction

Dilatancy

Stress-strain curves for bazenov rocks under complex loading.