

Численное моделирование необратимой деформации и разрушения в геосреде

I – Свойства горных пород, математическая модель и численное описание

Ю.П. Стефанов

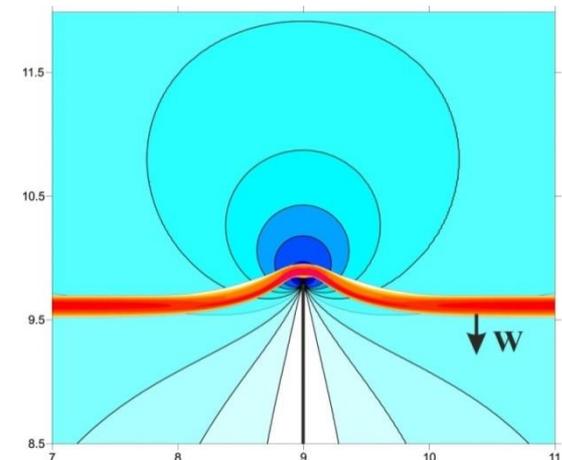
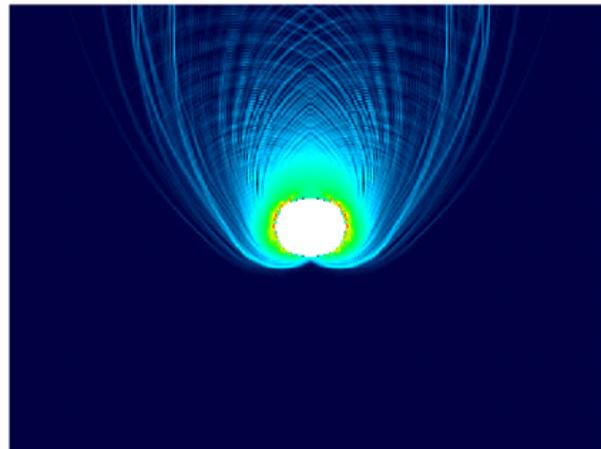
Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, г. Новосибирск;

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск;

Новосибирский государственный университет;

Университет Иннополис

yu_st@mail.ru; stefanov@ispms.ru; stefanovyp@ipgg.sbras.ru



Описание геомеханических процессов

Воспроизведение процесса в приближении принятой в модели идеализации

Цель: Модель процесса

Система уравнений:

- **Законы сохранения (баланса)**
- **Модель поведения – Определяющие среды соотношения**
- **Граничные условия**
- **Начальные условия**

- **Проверка и уточнение гипотез и условий развития процессов.** Особенно важно при недостатке данных (свойства и состояние среды, действующие условия, влияние разных факторов)
- **Объяснение явлений**
- **Выяснение роли разных факторов**
- **Прогноз развития процесса**
- **Численные значения.** Для получения желаемой точности расчетов необходим полный набор исходных данных с той же точностью. Это требует значительного объема информации, множества экспериментов.

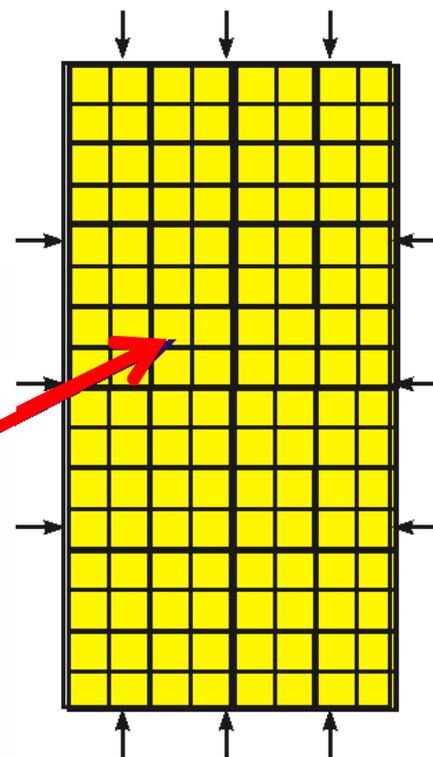
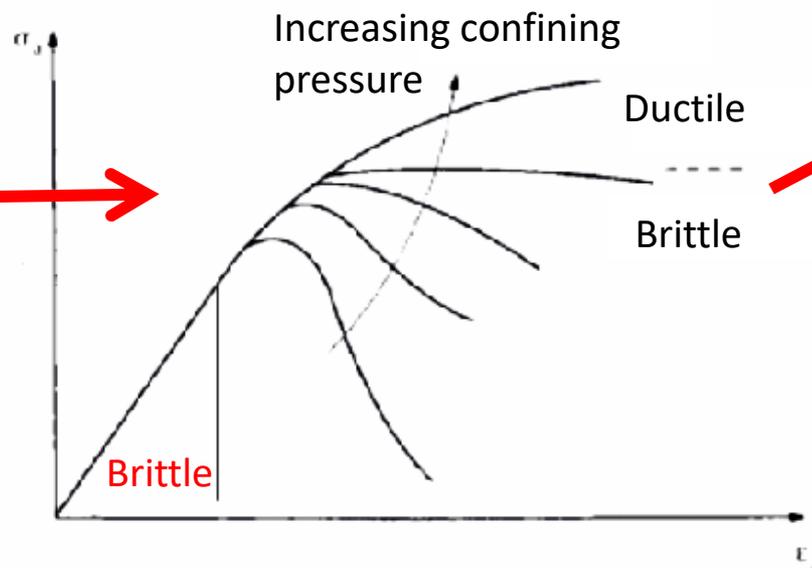
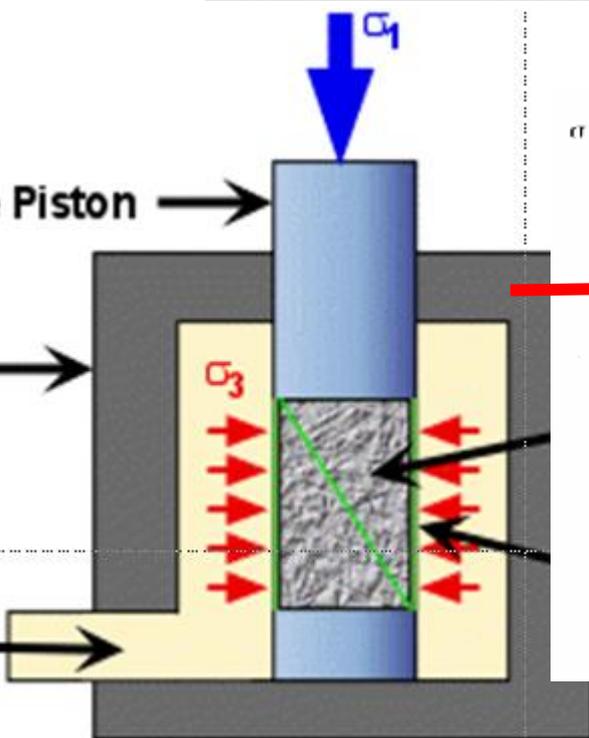
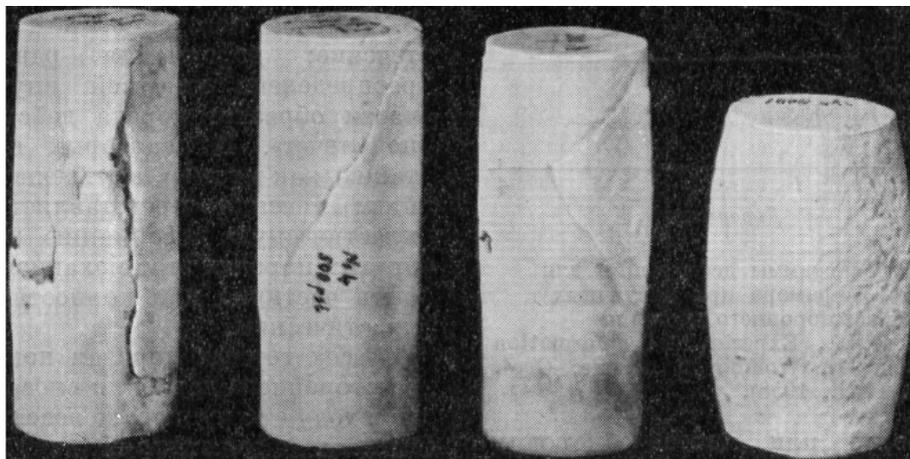
В реальности мало где достижимо: критически важные конструкции, ответственные сооружения, космическая отрасль, ядерная отрасль.

Решение задач о деформации в геосреде.

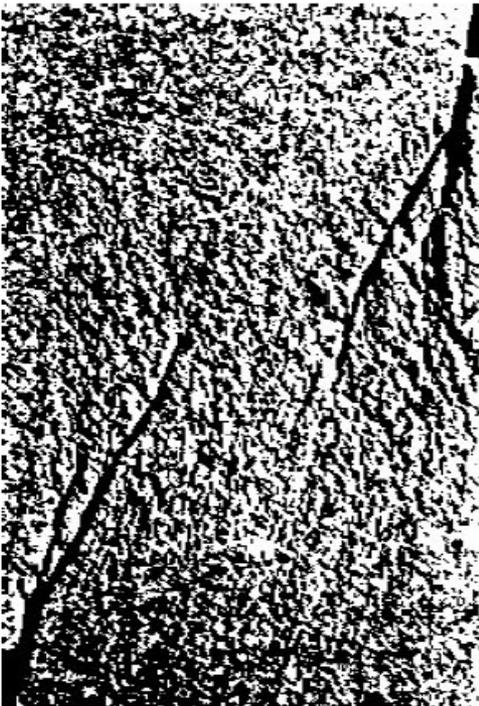
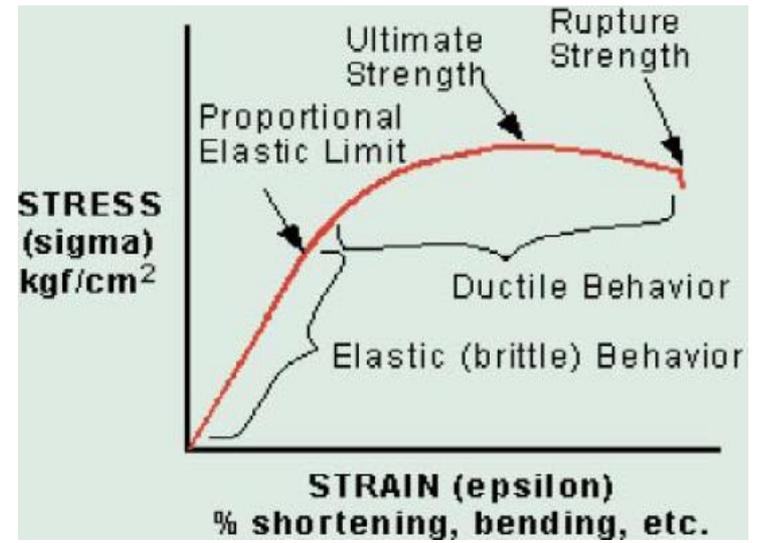
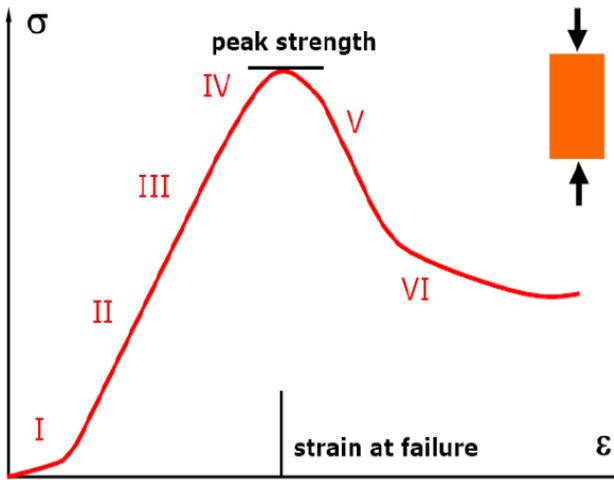
Численное моделирование

- **Постановка задачи**
 - **Цель**
 - **Условия нагружения – Граничные условия**
 - **Геометрия области**
- **Свойства и строение среды. Математические модели**
 - *Экспериментальные данные*
 - *Определяющие соотношения*
- **Примеры расчетов**

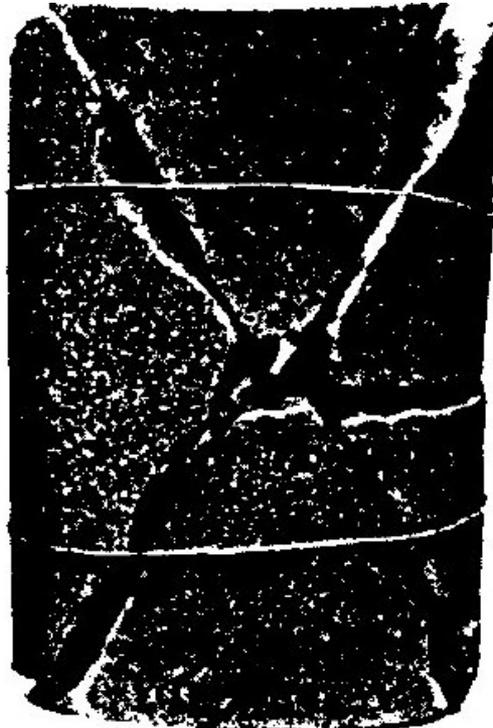
Деформирование образцов → свойства породы



Поведение образца – поведение среды (элементарного объема)?!



Around peak stress (IV-V)

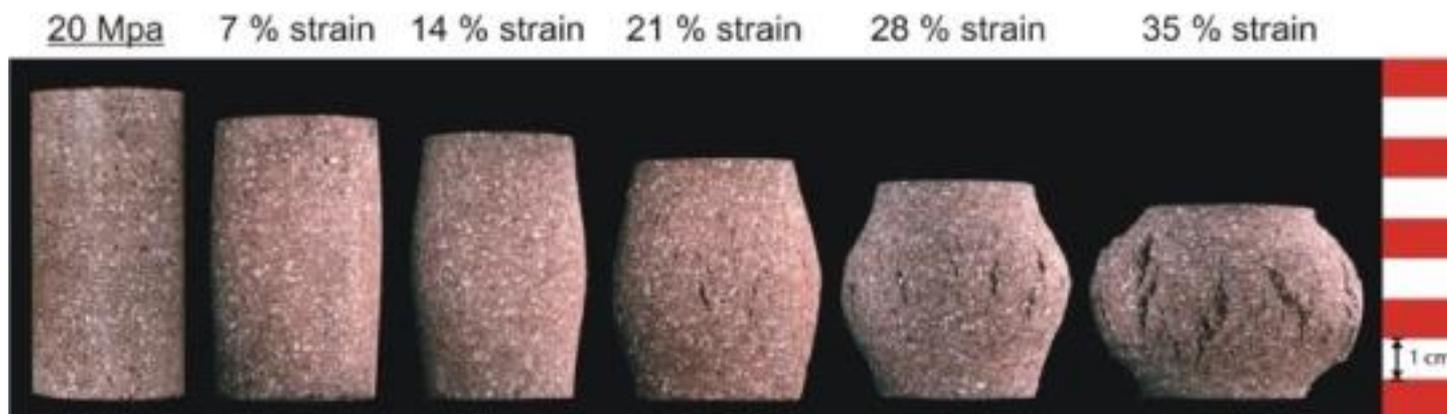


Post peak stress (VI)

(Mahmoud Ibrahim Aboushook)

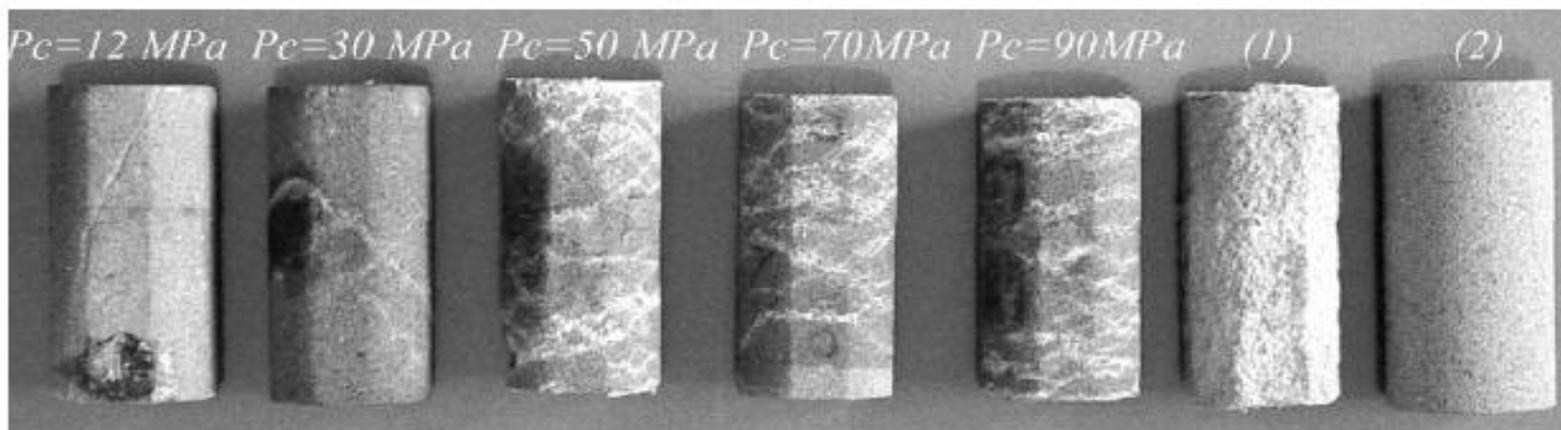
Деформирование образцов → свойства породы

Разуплотнение (дилатансия)



Фотографии образцов гранита после деформирования при различных давлениях обжатия (www.ucl.ac.uk/~ucfbpmb)

Уплотнение (компакция)



Фотографии образцов песчаника Bleurswillertg после деформирования при различных давлениях обжатия (P_c). [Fortin J., Schubnel A., Gue'guen Y., 2005]

Особенности проявления разных режимов деформирования

Дилатансия

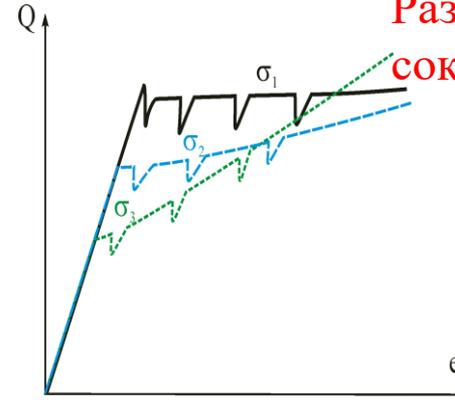
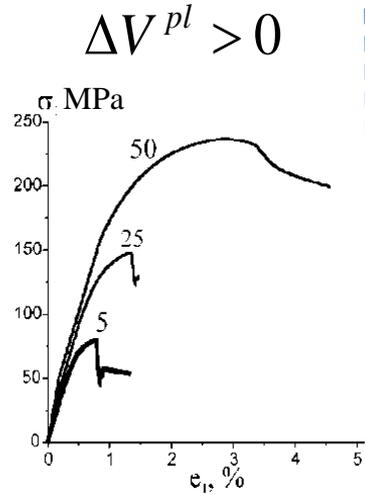
Рост прочности при
увеличении давления

Раскрытие мезотрещин,
рост пористости

$$\Delta V^{pl} > 0$$

$$\beta > 0$$

Диаграммы нагружения



Компакция

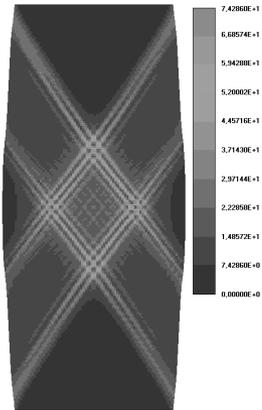
Снижение прочности при
увеличении давления выше σ_0

Разрушение зерен,
сокращение пористости

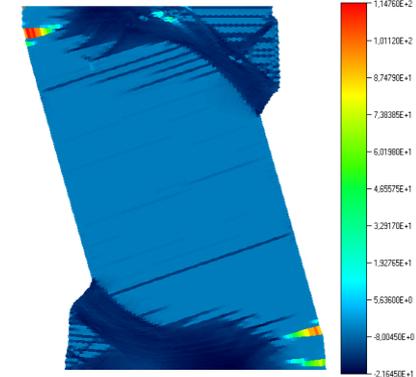
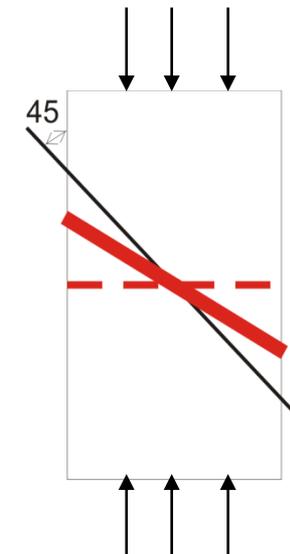
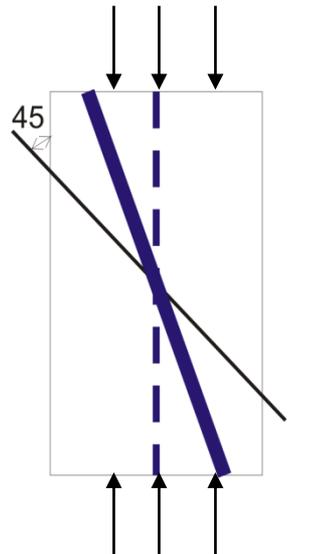
$$\Delta V^{pl} < 0$$

$$\beta < 0$$

Ориентация полос локализованной деформации



Угол наклона полос
локализации: $0 < \varphi < 45^\circ$



Угол наклона полос
локализации: $45^\circ < \varphi < 90^\circ$

Дилатансия

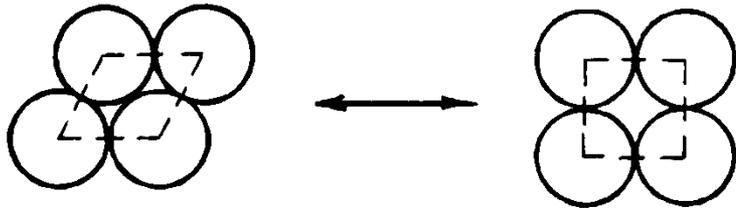


Схема Рейнольдса (O. Reynolds, 1885)

При плотной, ромбической упаковке одинаковых сферических частиц пористость $\phi=0.26$. Максимальная пористость при кубической упаковке $\phi=0.476$

$$\Delta\phi \approx \Delta\theta^P = -\beta\Delta\gamma^P$$

$\beta < 0$ закрытие пор

$\beta > 0$ образование пустот

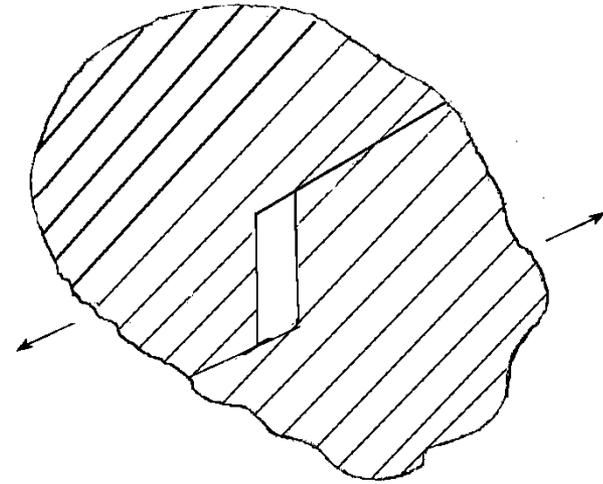
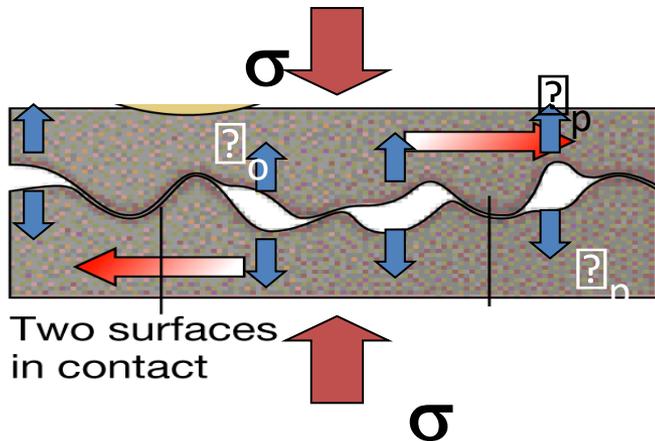
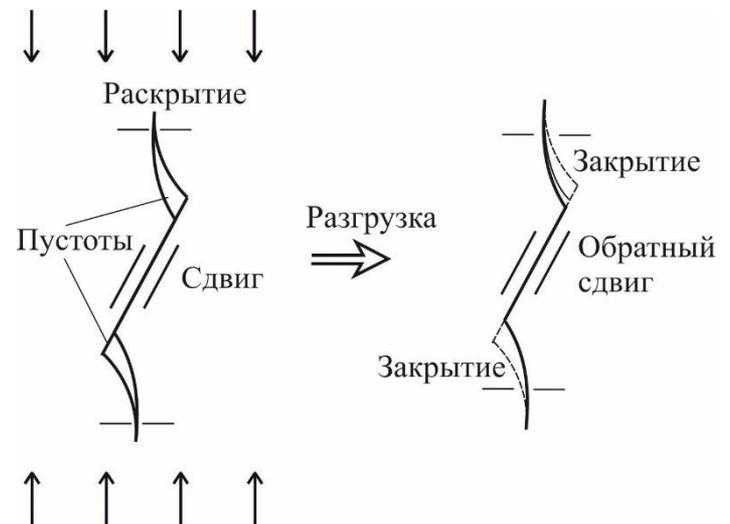
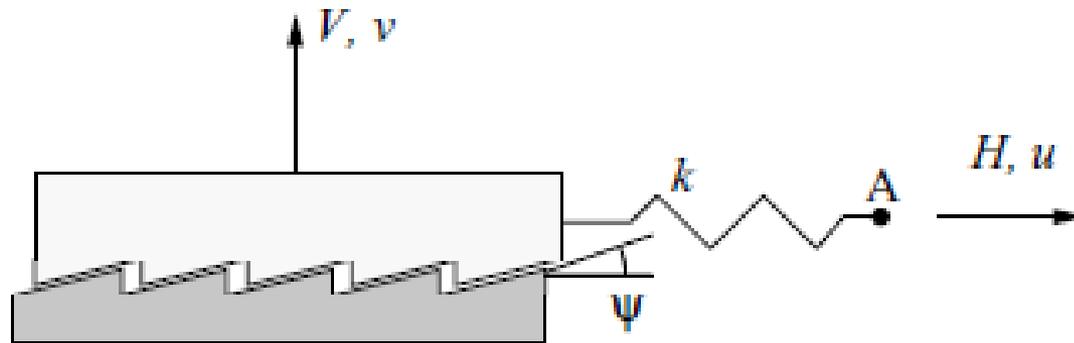


Схема Ставрогина



Частичная обратимость дилатансии

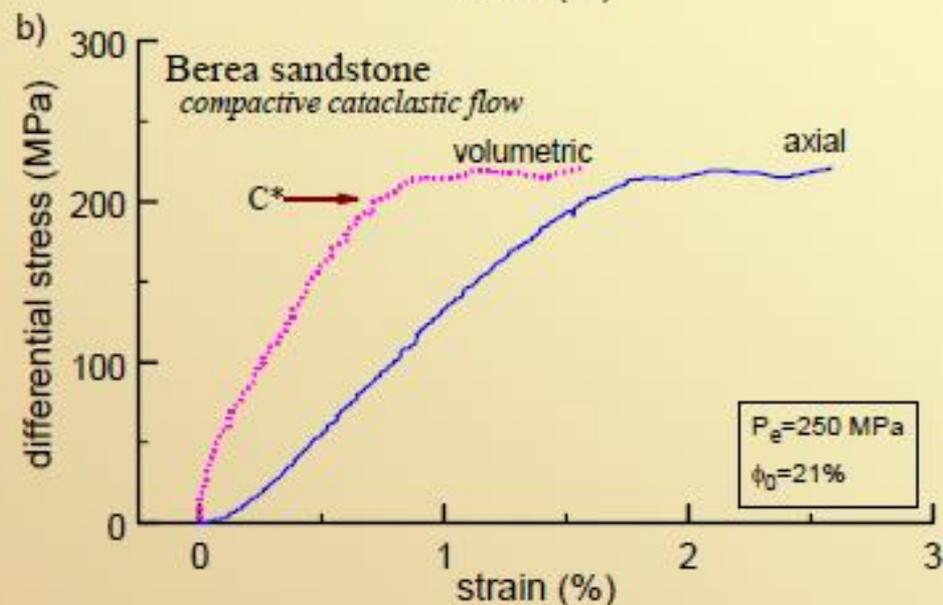
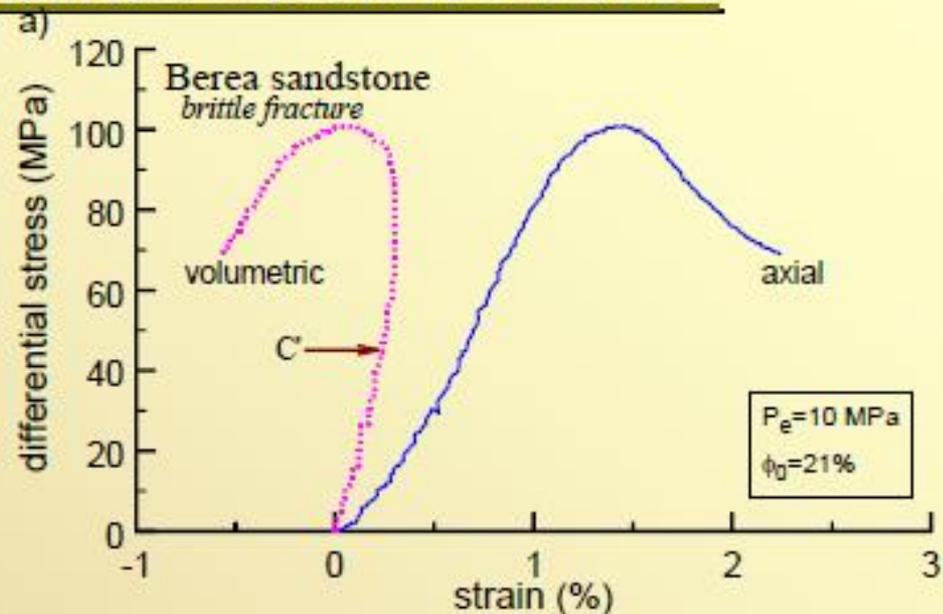
Угол дилатансии



$$\tan \psi = \frac{\dot{v}^P}{\dot{u}^P}$$

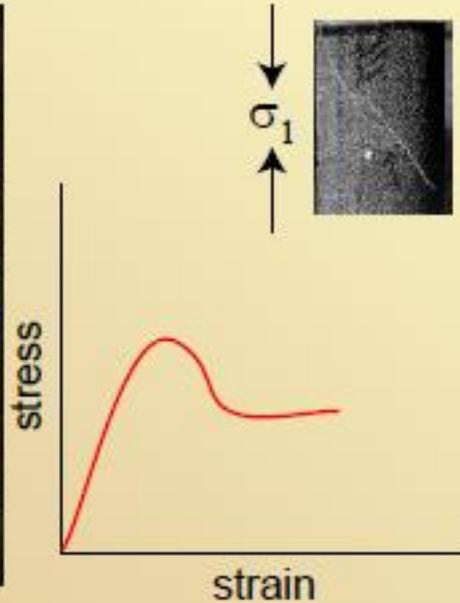
Deformation in Porous Sandstone

- In the brittle fracture regime
 - strain softening and shear fracture
 - compaction of pre-existing pores
 - dilation from stress-induced microcracking
- In the cataclastic flow regime
 - strain hardening and distributed damage
 - shear-enhanced compaction
 - stress-induced microcracking facilitates grain crushing and pore collapse



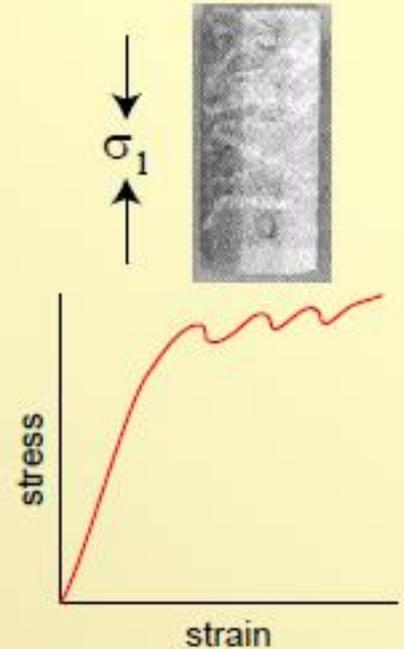
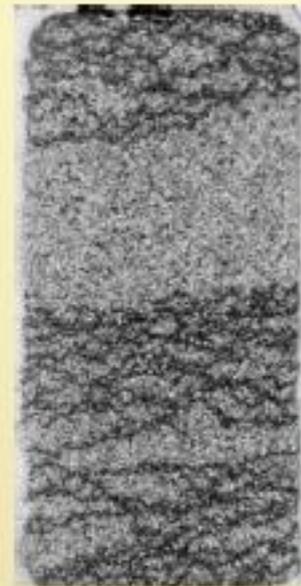
Wong and Zhu (1999)

Shear vs. Compaction Localization



Shear localization

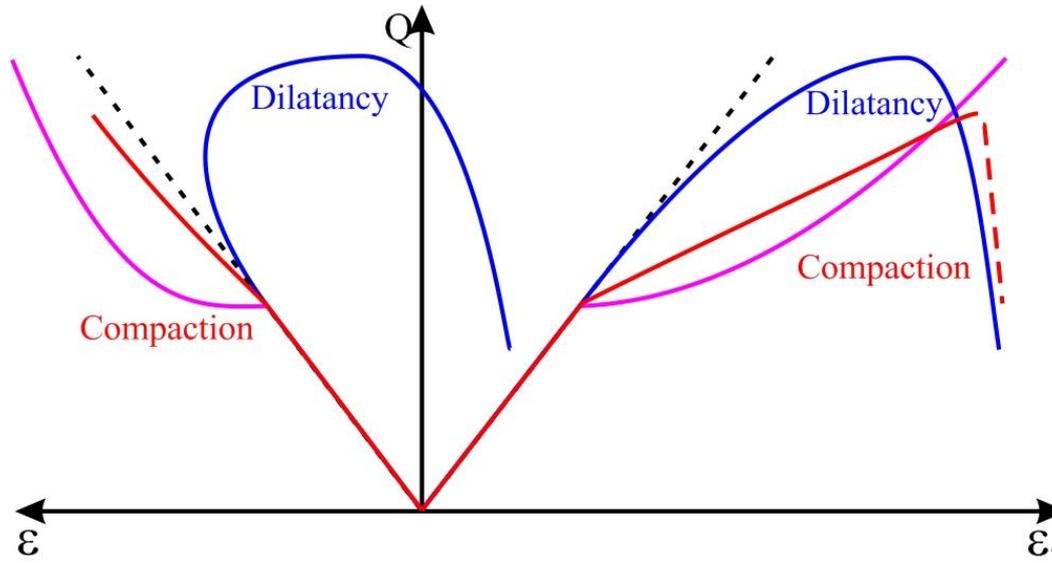
- _ Strain softening
- _ Unstable failure
- _ Dilation
- _ Enhances flow
- _ Darley Dale sandstone ($\phi \sim 15\%$), 20MPa (Zhu et al., 2003)



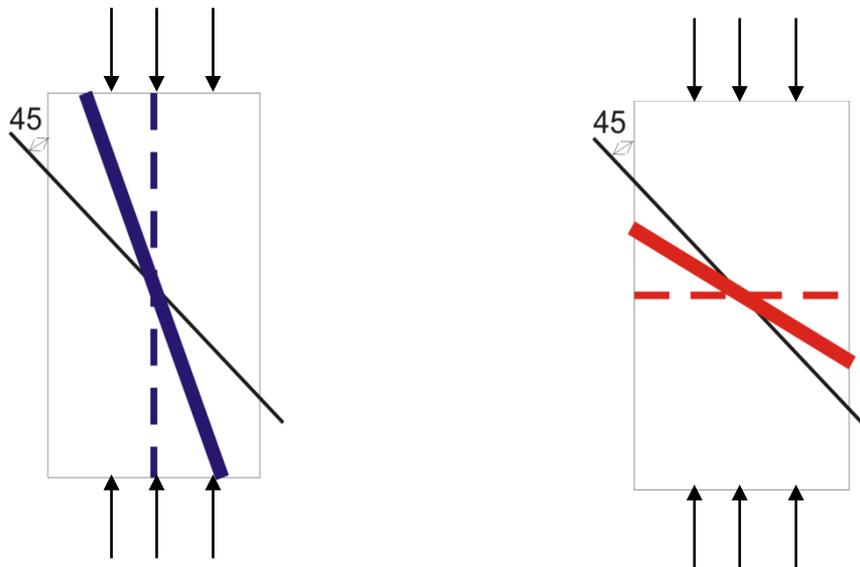
Compaction bands

- _ Strain hardening
- _ Stable propagation
- _ Compaction
- _ Reduce flow
- _ Bentheim sandstone ($\phi \sim 25\%$), 300MPa (Baud et al., 2004)

Дилатансия и компакция

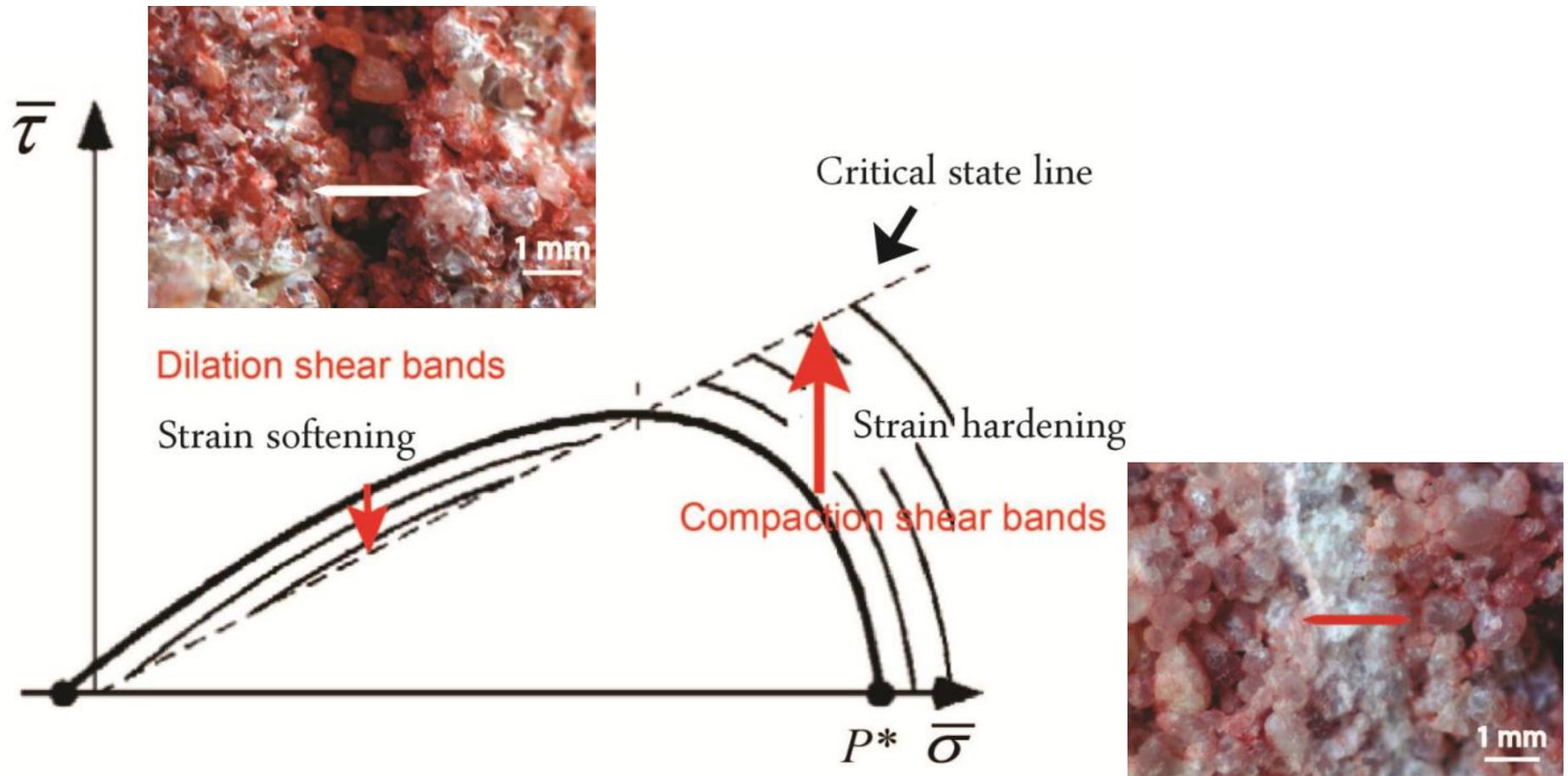


Диаграммы нагружения



Ориентация полос локализованной деформации

Пределная поверхность и характер деформирования горных пород



After Schultz and Siddharthan, 2005. Pictures from Fossen et al., 2007. (Anita Torabi (2011)

Горные породы

- Свойства зависят от напряженного состояния
- Изменение объема при деформации за пределом упругости

Механизмы разрушения:

➤ *Растяжение:*

Отрыв, раскрытие трещин (Разрушение контактов между зернами)

➤ *Умеренное давление, плотная порода:*

Сдвиг с дилатансией, отрыв.

(Разрушение контактов между зернами, дробление)

➤ *Большое давление, пористый материал:*

Сдвиг с уплотнением. (Дробление зерен)

- Влияние порового давления на эффективную прочность
- Влияние температуры, скорости деформации

Геосреда +

- Наличие блоков, разломов
- Неоднородность
- Изменение свойств



Модель среды. Определяющие соотношения, описывающие процессы деформации горных пород с учетом дилатансии и уплотнения

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \dot{\varepsilon}_{ij}^e + \dot{\varepsilon}_{ij}^{irr},$$

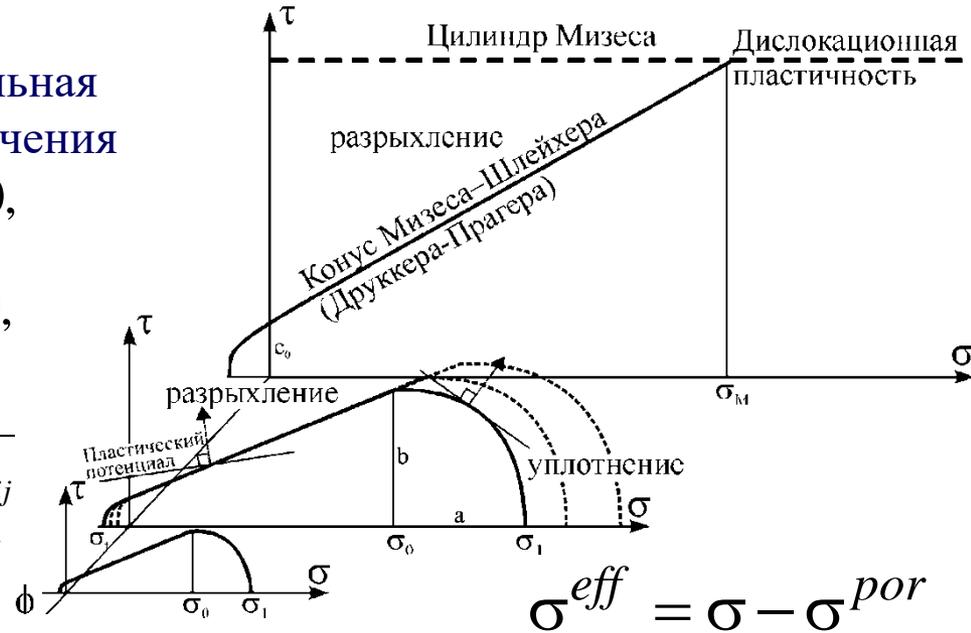
- **Пластичность:** комбинированная предельная поверхность, неассоциированный закон течения

Функция текучести $f(\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}^p) = 0,$

Пластический потенциал: $g(\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}^p) = 0,$

Пластическая деформация: $d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}}$

$$g(\sigma, \tau, \varepsilon^p) = -\beta\sigma + \tau$$



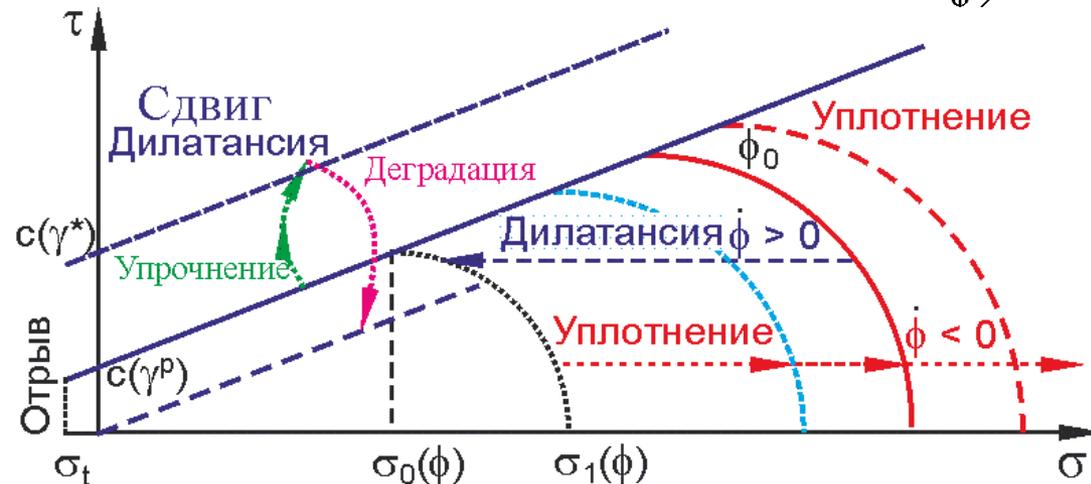
$$\sigma^{eff} = \sigma - \sigma^{por}$$

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

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

при $\sigma > \sigma_0$

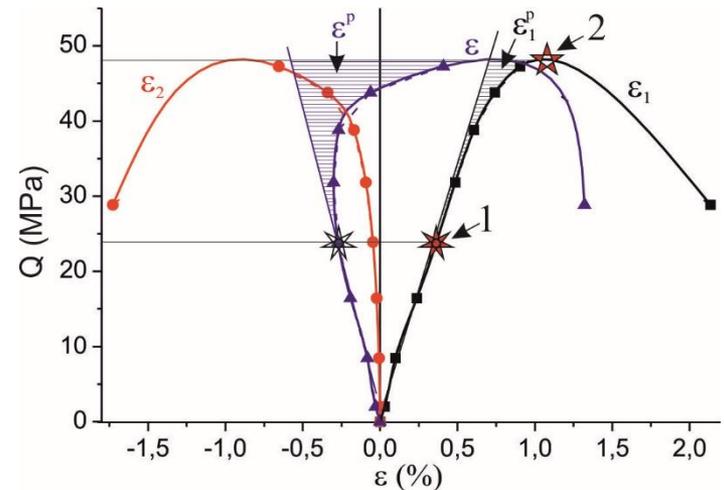
$$\sigma_0(\phi) = \sigma_0 f(\phi) = \sigma_0 \left(\frac{\phi^*}{\phi} \right)^m,$$



Вид поверхности предельного состояния и ее изменения в ходе процесса деформации

По результатам испытаний имеем:

- $Q = \sigma_1 - \sigma_c$ – приложенное напряжение, где
 $\sigma_c = const$ – боковое обжатие;
 ε_1 – осевая деформация;
 ε_2 – радиальная деформация;
 $\varepsilon = (\varepsilon_1 + 2\varepsilon_2)$ – объемная деформация.

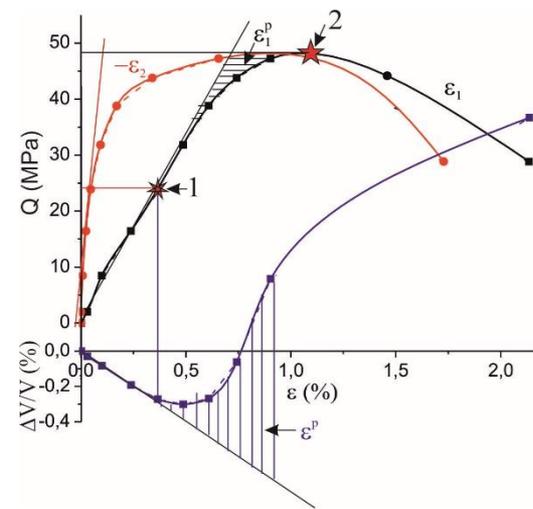
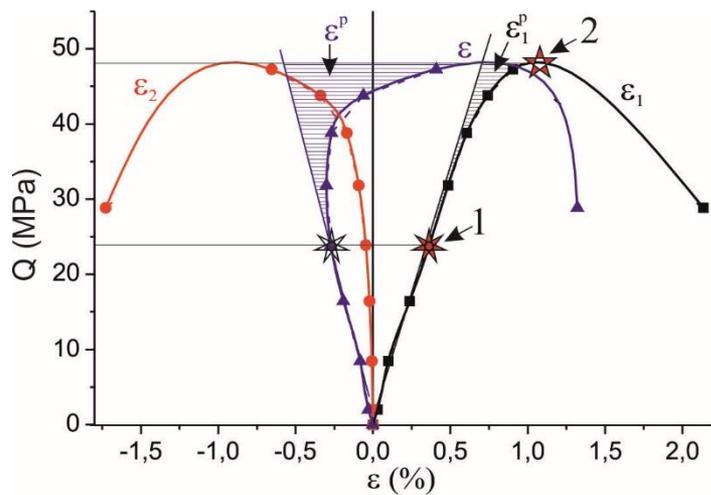


Все измерения соответствуют этапу осевого нагружения после приложения всесторонней нагрузки. Упругие модули определяются на начальном линейном участке диаграмм нагружения.

$$E = \frac{\Delta Q}{\Delta \varepsilon_1} \quad - \text{Модуль Юнга, } \nu = -\Delta \varepsilon_2 / \Delta \varepsilon_1 \quad - \text{коэффициент Пуассона}$$

Данные коэффициенты можно пересчитать в модули сжатия и сдвига из соотношений

$$K = \frac{E}{(1-2\nu)} \quad \mu = \frac{E}{2(1+\nu)}$$



Отклонение от линейного участка свидетельствует о начале пластической деформации, а соответствующие напряжения будут пределом упругости. Они соответствуют начальной предельной поверхности. На рис. данная точка отмечена звездочкой-1. Максимальные напряжения на кривых нагружения будут пределом прочности (звездочка-2). Соответствующая предельная поверхность будет конечной, после чего начинается интенсивное разрушение и разупрочнение

$$\varepsilon_1^p = \varepsilon_1 - \varepsilon_1^e$$

$$\varepsilon_2^p = \varepsilon_2 - \varepsilon_2^e$$

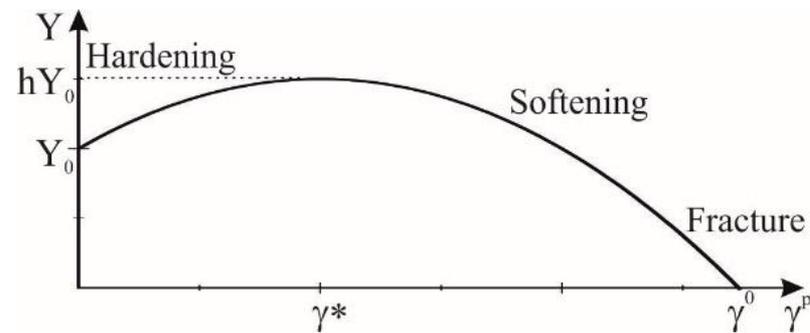
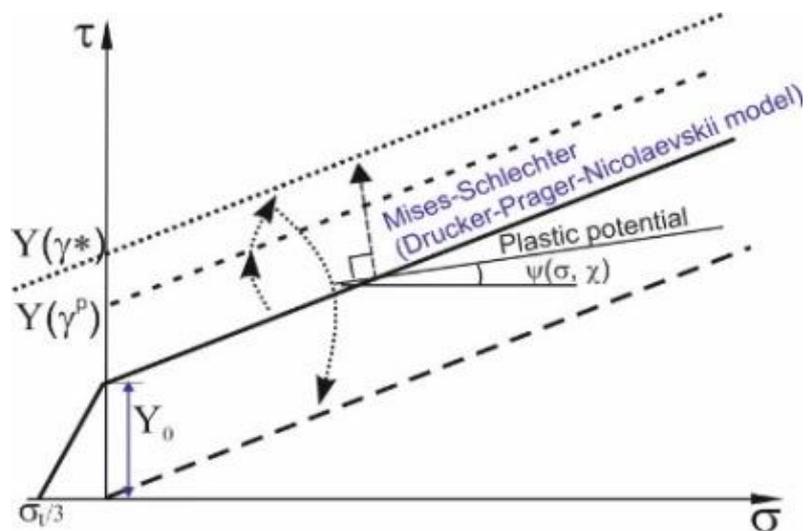
$$\varepsilon^p = \varepsilon - \varepsilon^e$$

$$\tau = |\sigma_1 - \sigma_c| / \sqrt{3}$$

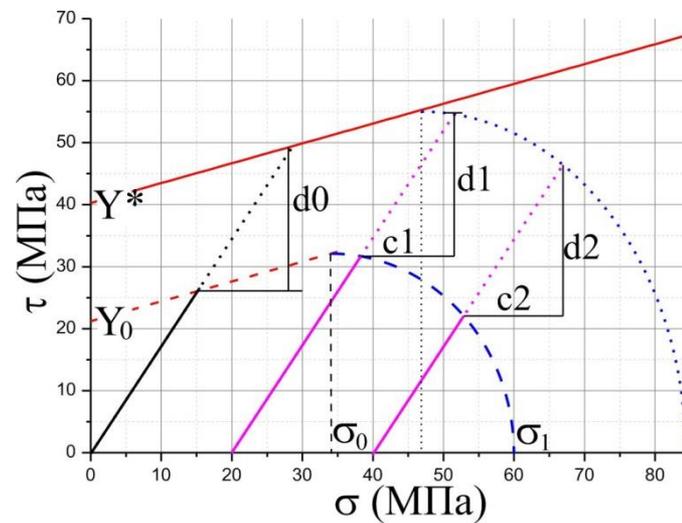
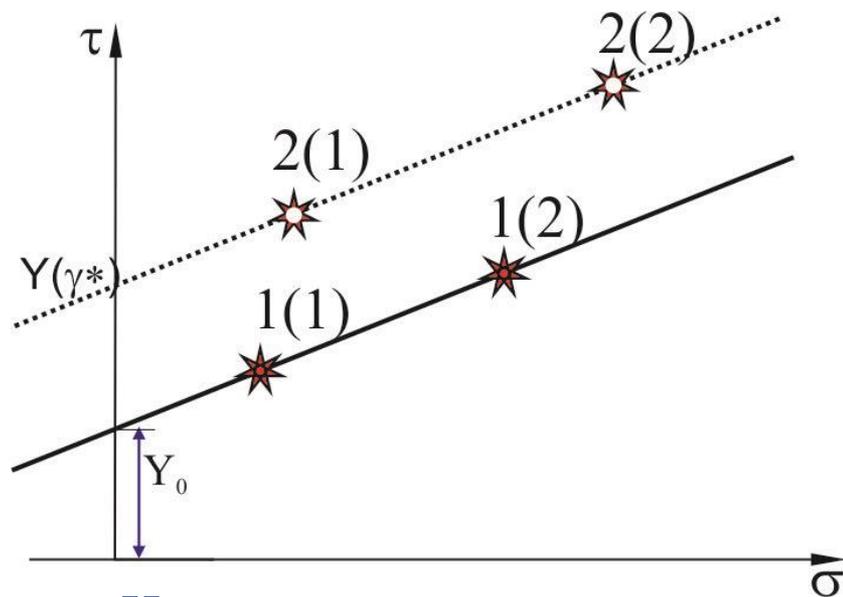
$$\sigma = P = -(\sigma_1 + 2\sigma_c) / 3$$

$$\gamma = 2|\varepsilon_1 - \varepsilon_2| / \sqrt{3}$$

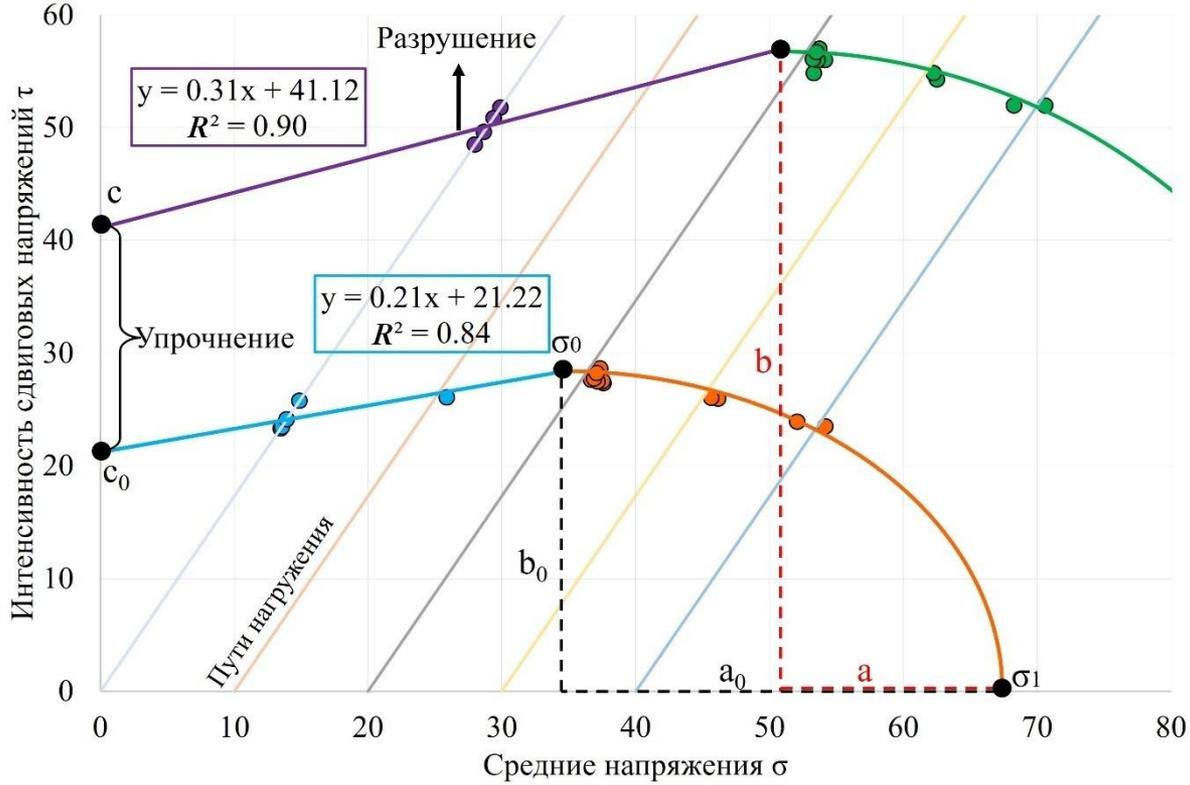
$$\varepsilon = (\varepsilon_1 + 2\varepsilon_2)$$



Изменение предельной поверхности и функция изменение коэффициента Y от сдвиговой пластической деформации



Начальная и конечная предельные поверхности, построенные по экспериментальным данным



- предельная поверхность упругости Друккера-Прагера (начало пластической деформации)
- предельная поверхность прочности Друккера-Прагера (начало разрушения)
- эллиптическая (cup) поверхность при начале разрушения
- эллиптическая (cup) поверхность начала уплотнения

Система уравнений динамики упруго-вязкопластической среды

- Движения: $\sigma_{ij,j} + \rho F_i = \rho \dot{u}_i$
- Неразрывности: $\dot{\rho} + \rho u_{i,i} = 0$
- Геометрические соотношения: $\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}), \dot{\omega}_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} - u_{j,i})$

• Определяющие соотношения:

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \dot{\varepsilon}_{ij}^e + \dot{\varepsilon}_{ij}^{irr}, \quad \dot{\varepsilon}_{ij}^{irr} = \dot{\varepsilon}_{ij}^p + \dot{\varepsilon}_{ij}^{cr}$$

➤ Гипоупругость:

$$\dot{\sigma}_{ij} = \zeta(\dot{\theta} - \dot{\theta}^{irr})\delta_{ij} + 2\mu(\dot{\varepsilon}_{ij} - \dot{\varepsilon}_{ij}^{irr})$$

➤ Вязкость: $\dot{\varepsilon}_{ij}^{cr} = \frac{s_{ij}}{2\eta}$

➤ Пластичность:

Функция текучести: $f(\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}^p) = 0,$

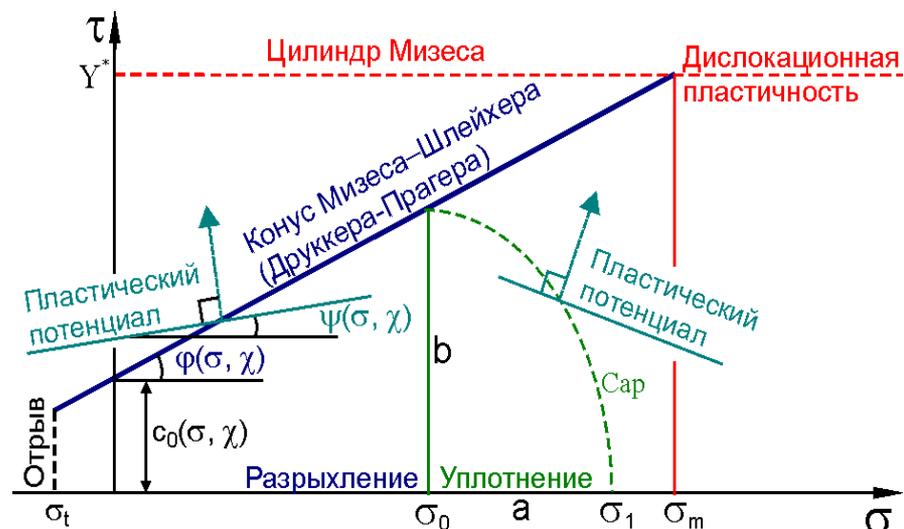
Пластический потенциал: $g(\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}^p) = 0,$

Пластическая деформация: $d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}}$

➤ Условие разрушение: $\sigma_1 = \sigma_t, \gamma^p = \gamma_0$

+ начальные условия

+ граничные условия



Общий вид предельной поверхности

Упругопластическая деформация

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^p$$

$$f(\sigma, \varepsilon^p, \chi) = 0,$$

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

$$d\varepsilon_{ij}^e = \frac{d\sigma_{ij}}{2\mu} - \frac{d\sigma}{K} \delta_{ij}$$

f — функция (поверхность) текучести (нагрузки),
предельная поверхность;

g — пластический потенциал;

χ — параметр упрочнения;

$d\lambda$ — множитель, определяемый в ходе процесса;

если $f=g$ — ассоциированный закон течения

если $f \neq g$ — неассоциированный закон течения

• Идеальная пластичность

$$d\lambda = 0, \quad \text{если } f = 0, \quad df < 0 \quad \text{и при } f < 0$$

$$d\lambda \neq 0, \quad \text{если } f = 0, \quad df = 0$$

$$df = \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} d\sigma_{ij}$$

• Упрочняющееся тело

$$d\lambda = 0, \quad \text{если } f = 0, \quad d'f < 0 \quad \text{и при } f < 0$$

$$d\lambda = h d'f \neq 0, \quad \text{если } f = 0, \quad d'f = 0$$

Расчет приращений псевдопластической деформации и истинных напряжений

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

$$f(\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}^p) = 0, \quad f(\sigma, \tau) = \tau - \alpha\sigma - Y$$

$$g(\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}^p) = 0, \quad g(\sigma, \tau, \varepsilon^p) = \tau - \beta\sigma$$

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} \Rightarrow d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda \left(\frac{s_{ij}}{2\tau} + \frac{\beta}{3} \delta_{ij} \right).$$

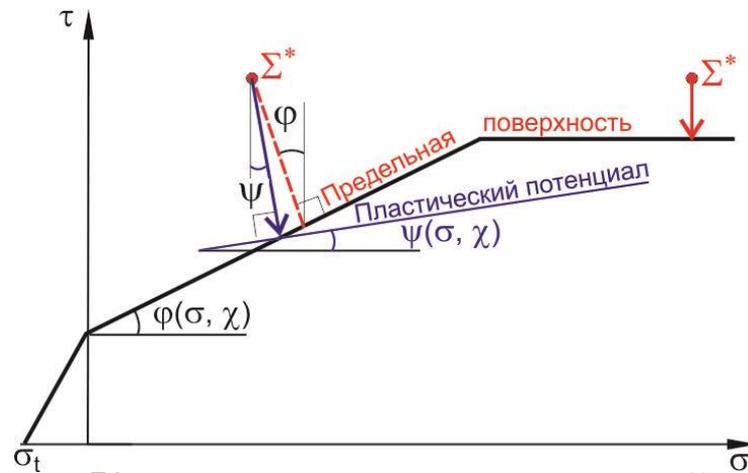
- расчет полных деформаций
- предварительный расчет напряжений на основании гипоупругого закона:
- проверка условия пластичности:

$$\begin{aligned} \text{если } f^* = f(\sigma_{ij}^*) \leq 0, & \quad d\lambda = 0, & \quad s_{ij}^{n+1} = (s_{ij}^{n+1})^*, \\ & \quad d\varepsilon_{ij}^p = 0 & \quad \sigma^{n+1} = (\sigma^{n+1})^*. \end{aligned}$$

$$\text{если } f^* = f(\sigma_{ij}^*) > 0, \quad d\lambda > 0,$$

- расчет приращений неупругой составляющей деформации и действующих напряжений;

$$d\varepsilon_{ij}^p > 0 \quad d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}}$$



К схеме расчета пластической деформации и напряжений

$$(s_{ij}^{n+1})^* = s_{ij}^n + (\Delta s_{ij}^{n+1})^*,$$

$$(\sigma^{n+1})^* = \sigma^n + (\Delta \sigma^{n+1})^*.$$

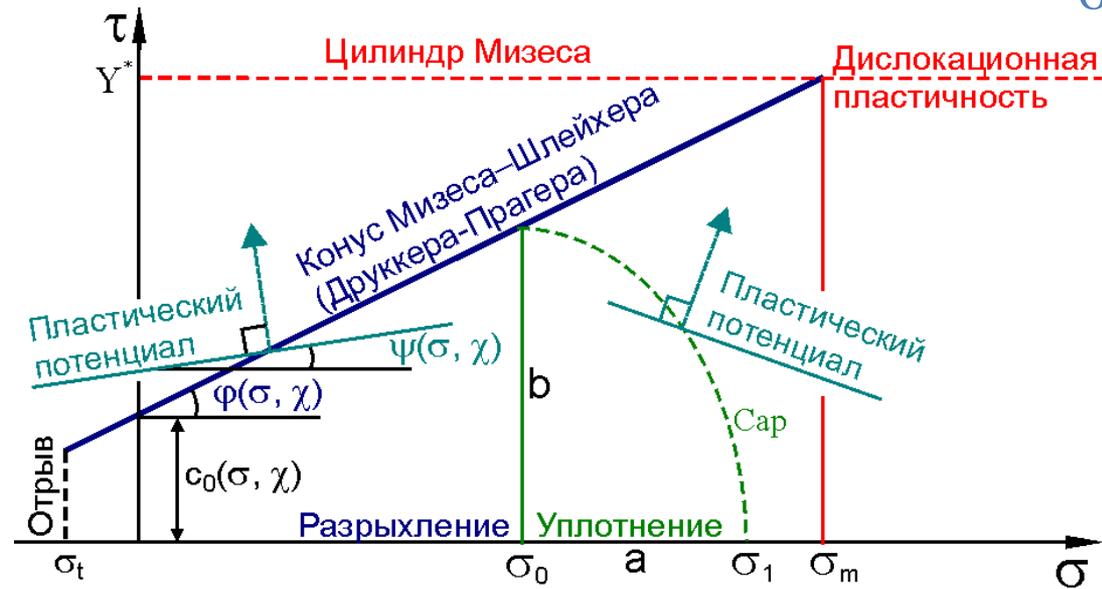
Приращение пластической деформации:

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

Пластический потенциал

$$g(\sigma, \tau, \varepsilon^p) = \tau - \beta\sigma$$

β – коэффициент дилатансии



$$d\gamma^p = d\lambda \frac{\partial g}{\partial \tau} = d\lambda, \quad d\varepsilon^{pl} = -d\lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma} = -d\lambda\beta, \quad \Delta\varepsilon^p = -\beta\Delta\gamma^p$$

$$g(\sigma, \tau, \varepsilon^p) = -\beta_1\sigma + \kappa\tau,$$

$$\beta = \beta_0 B(\sigma),$$

$$\beta_1/\kappa = \beta, \quad \beta_1 = \sin \psi, \quad \kappa = \cos \psi$$

$$B(\sigma) = \left(\frac{\sigma_0 - \sigma}{\sigma_0} \right)^{n1} \quad \text{при } \sigma < \sigma_0,$$

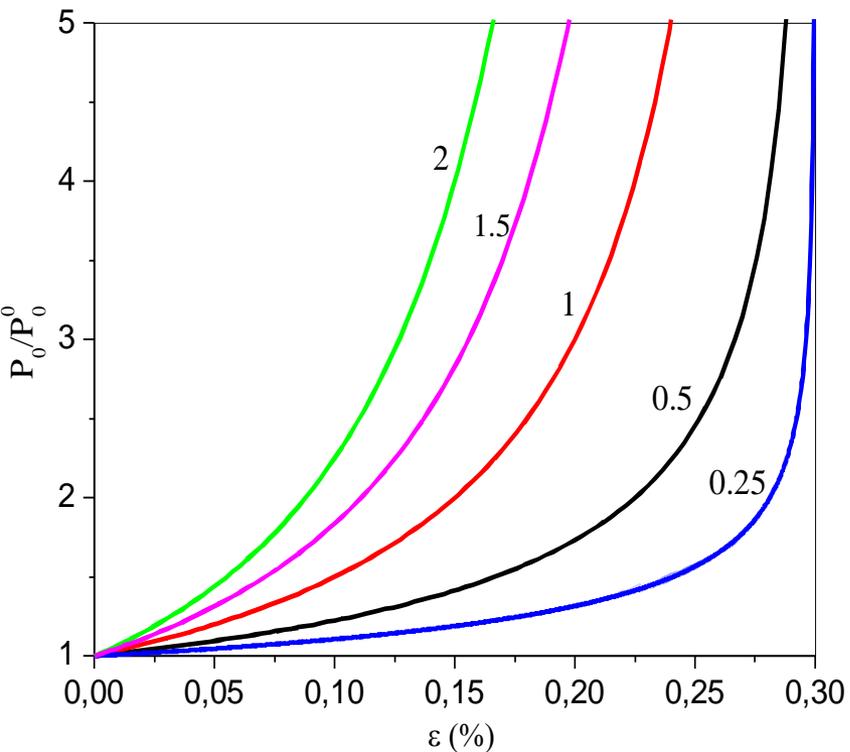
$$d\gamma^p = d\lambda \frac{\partial g}{\partial \tau} = \lambda\kappa,$$

$$B(\sigma) = \left(\frac{\sigma - \sigma_0}{\sigma_1 - \sigma_0} \right)^{n2} \quad \text{при } \sigma_0 < \sigma < \sigma_1$$

$$d\varepsilon^{pl} = d\lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma} = -d\lambda\beta_1,$$

$$\tau = (s_{ij}s_{ij}/2)^{1/2}, \quad \sigma = -\sigma_{kk}/3 = P, \quad \gamma^p = 2I_2^p{}^{1/2}, \quad \varepsilon = -\varepsilon_{kk}$$

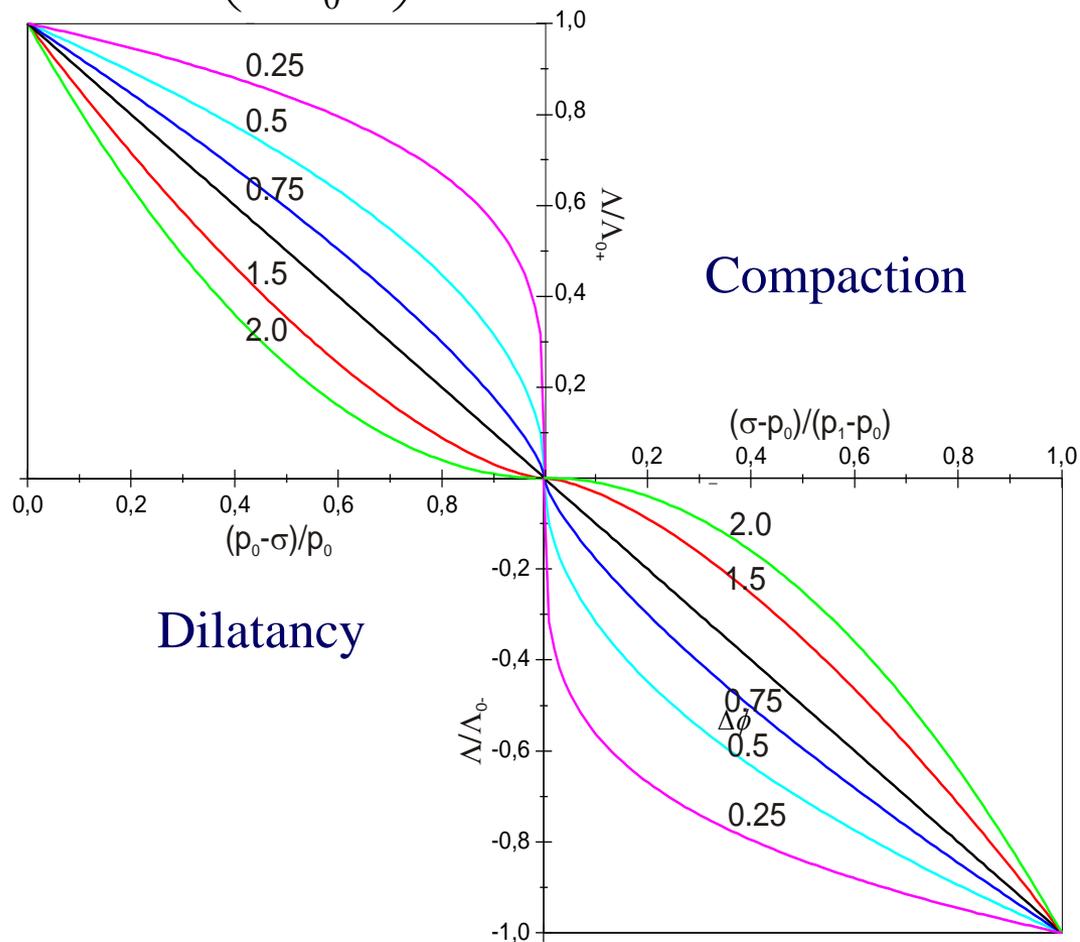
$$\sigma_0(\varepsilon) = \sigma_0^0 \left(\frac{\varepsilon^*}{\varepsilon^* - \varepsilon^p} \right)^m = \sigma_0^0 \left(\frac{\phi_0}{\phi} \right)^m$$



Cap extension function

Dilatancy function

$$B(\sigma) = \left(\frac{\sigma_0 - \sigma}{\sigma_0} \right)^n, \quad \sigma < \sigma_0$$

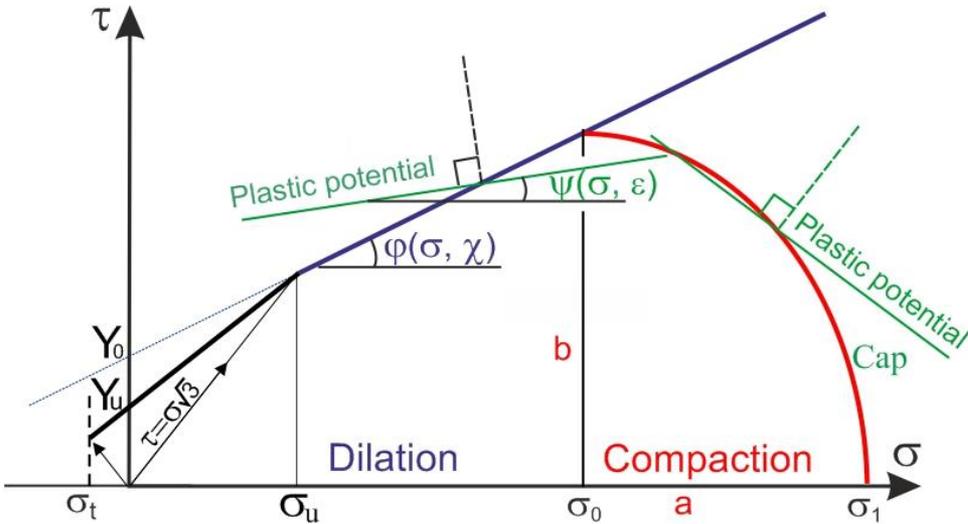


Dilatancy

Compaction

$$B(\sigma) = \left(\frac{\sigma - \sigma_0}{\sigma_1 - \sigma_0} \right)^n, \quad \sigma_0 < \sigma < \sigma_1$$

Комбинированная предельная поверхность



$$f_1(\sigma, \tau) = \tau - \alpha_u \sigma - Y_u \quad \text{при} \quad \sigma_t \leq \sigma \leq \sigma_u$$

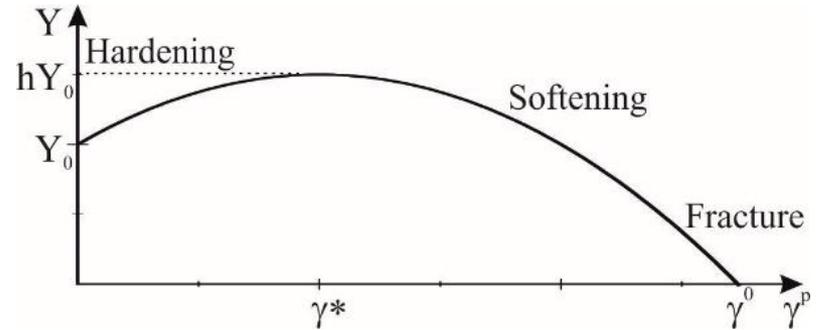
$$f_2(\sigma, \tau) = \tau - \alpha \sigma - Y \quad \text{при} \quad \sigma_u < \sigma \leq \sigma_0$$

$$f_3 = \frac{(\sigma - \sigma_0)^2}{a^2} + \frac{\tau^2}{b^2} - 1 = 0, \quad \text{при} \quad \sigma_0 < \sigma < \sigma_1$$

$$\sigma_u = Y / (\sqrt{3} - \alpha)$$

$$\tau_u = Y \left(1 + \frac{\alpha}{\sqrt{3} - \alpha} \right)$$

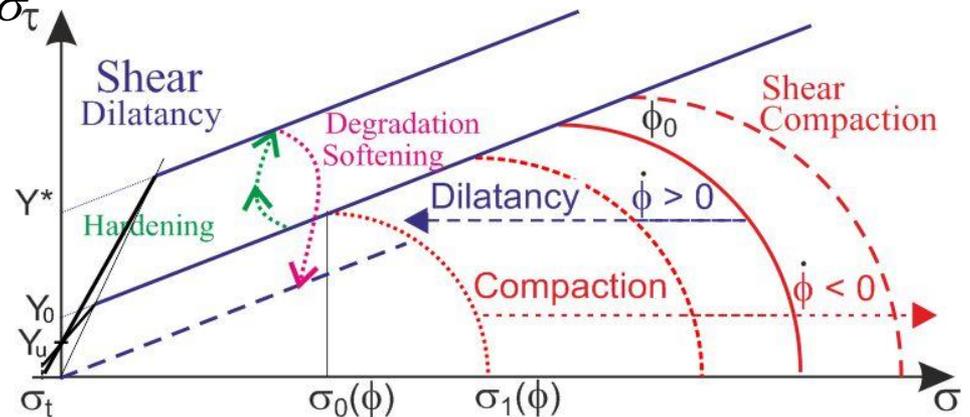
$$Y_u = Y \frac{\sqrt{3} - \alpha_u}{\sqrt{3} - \alpha}, \quad \alpha_u = (2 \div 3)\alpha$$



$$Y = Y_0 (1 + h(A(\gamma^p) - D(\gamma^p)))$$

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

Упрочнение и разупрочнение



Изменение предельной поверхности в ходе необратимой деформации

• **Определяющие соотношения:** $\dot{\varepsilon}_{ij} = \dot{\varepsilon}_{ij}^e + \dot{\varepsilon}_{ij}^{irr}$, $\dot{\varepsilon}_{ij}^{irr} = \dot{\varepsilon}_{ij}^p + \dot{\varepsilon}_{ij}^{cr}$

➤ **Гипоупругость:** $\dot{\sigma}_{ij} = \zeta(\dot{\theta} - \dot{\theta}^{irr})\delta_{ij} + 2\mu(\dot{\varepsilon}_{ij} - \dot{\varepsilon}_{ij}^{irr})$

➤ **Вязкость:** $\dot{\varepsilon}_{ij}^{cr} = \frac{s_{ij}}{2\eta}$

➤ **Пластичность:** предельная поверхность, закон течения

Функция текучести

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

(уравнение предельной поверхности)

Пластический потенциал

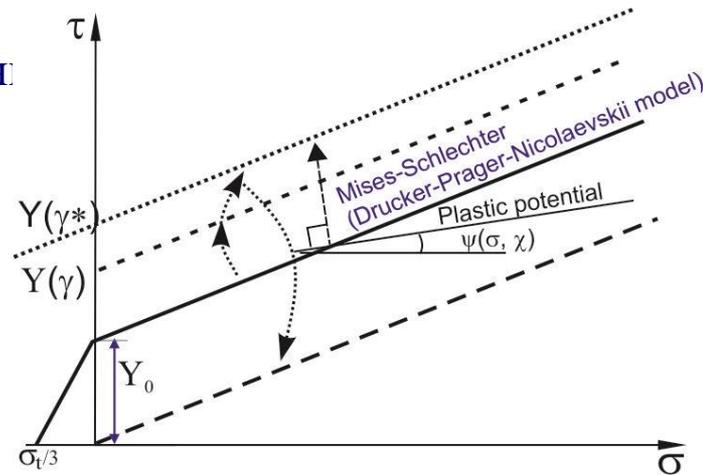
$$g(\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}^p) = 0,$$

(уравнение пластического потенциала):

Пластическая деформация

(закон пластического течения)

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



Общий вид предельной поверхности

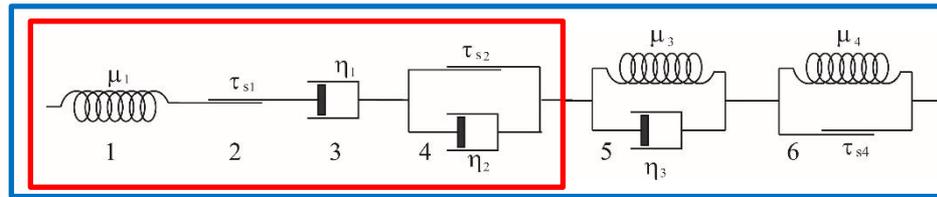
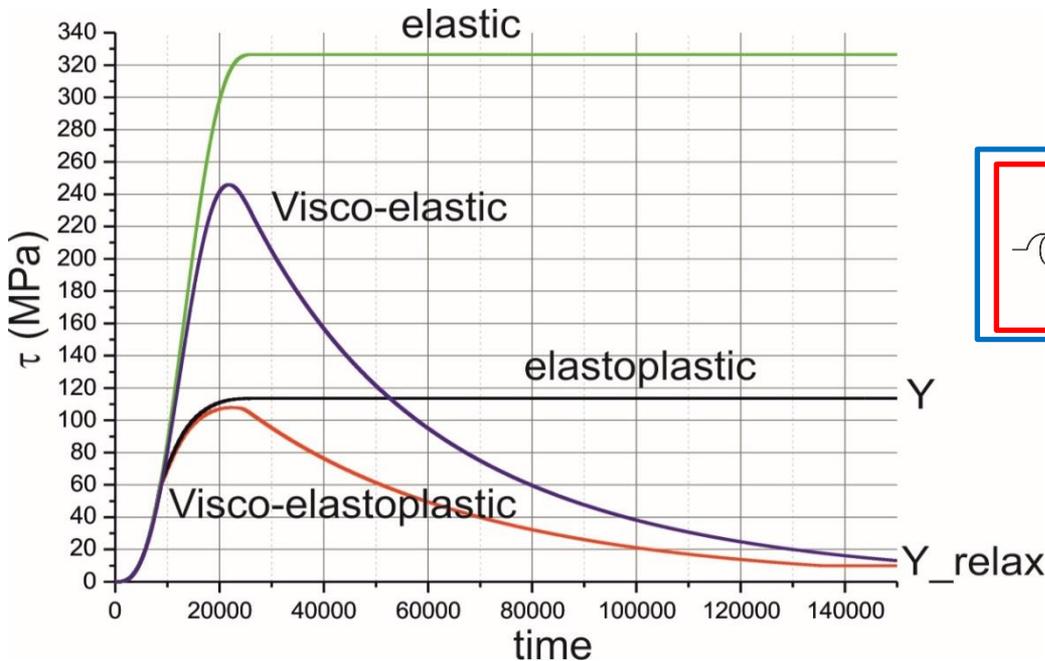
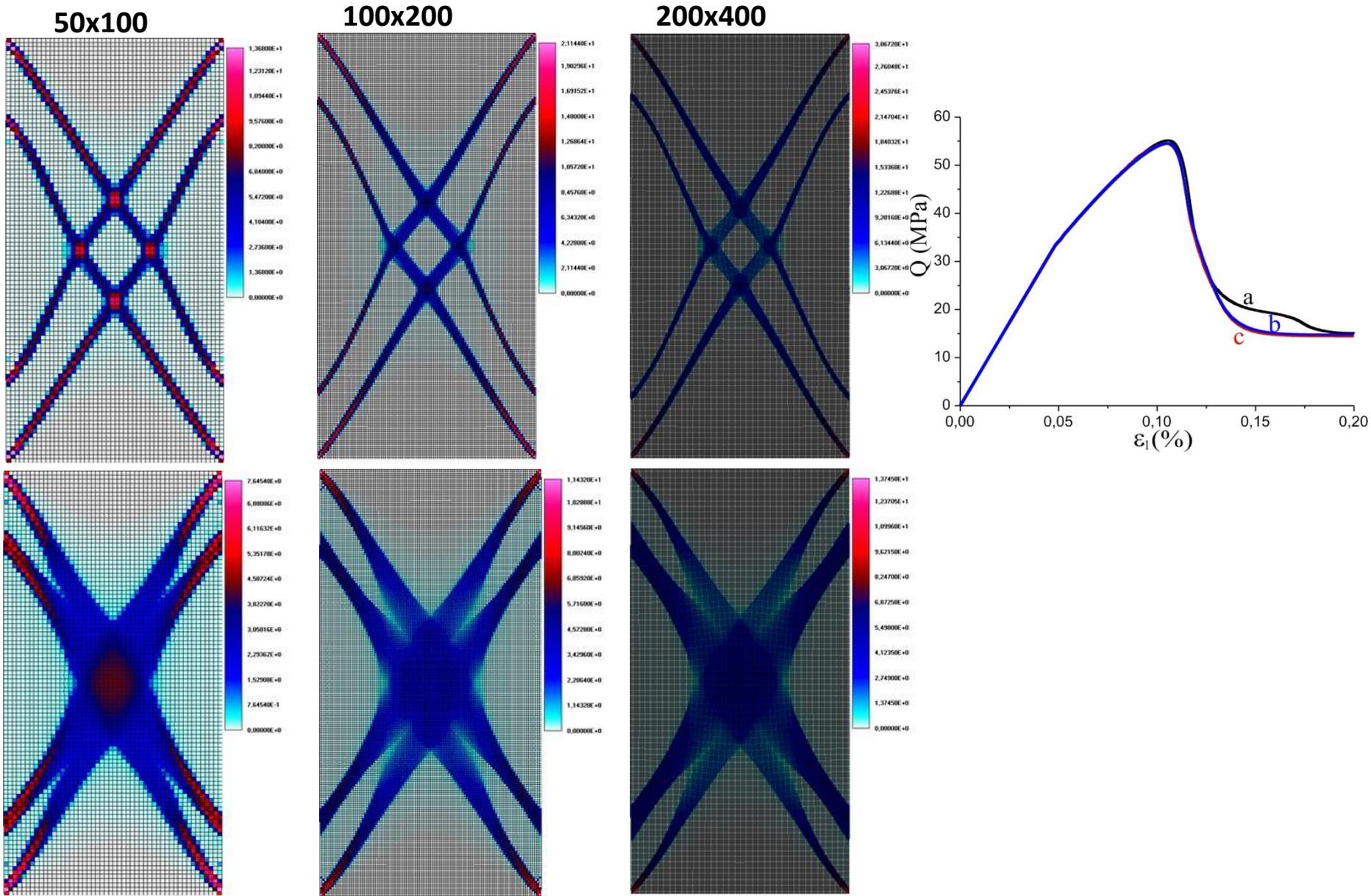


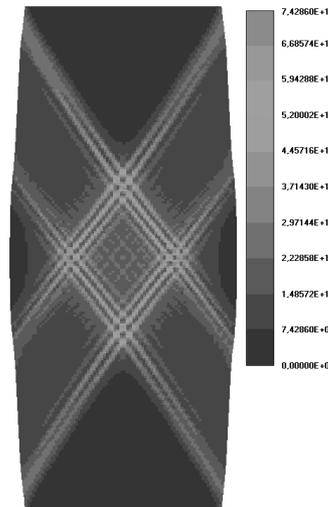
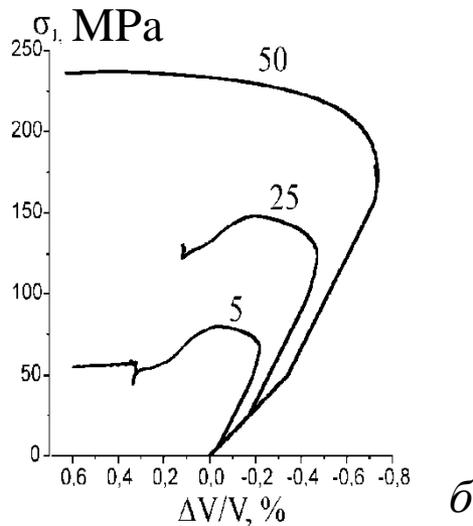
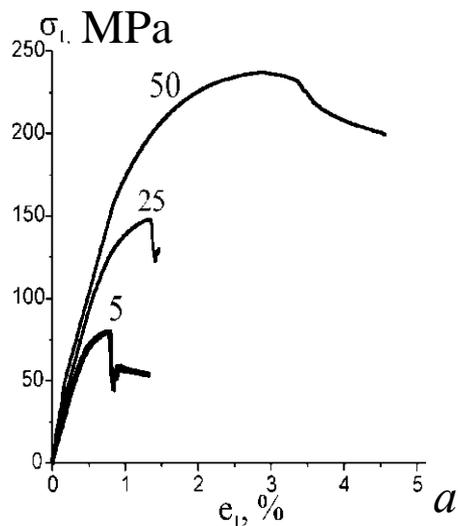
Диаграмма деформирования с течением времени упругой, вязкоупругой, упругопластической и вязкоупругопластической сред

Сходимость (упруго-вязкопластическая модель)



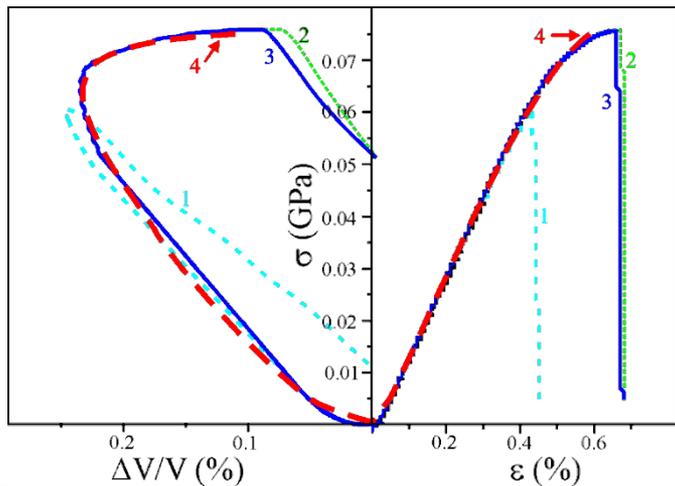
Локализация деформации при расчетах на разных сетках

Верификация модели. Расчет поведения образцов горных пород

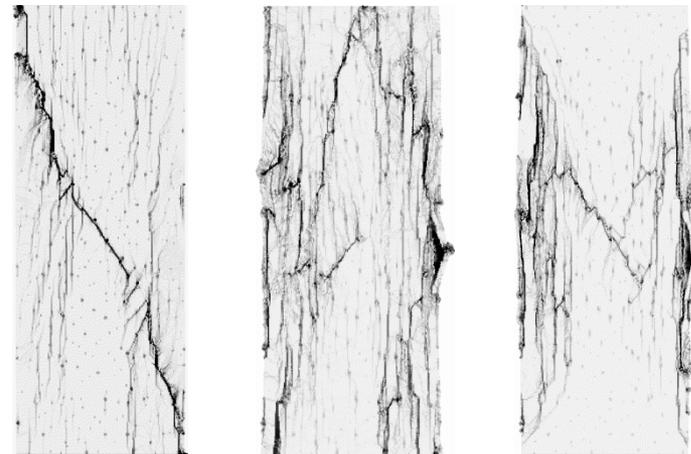


Диаграммы нагружения песчаника: зависимость осевой нагрузки от деформации (а), зависимость осевой нагрузки от изменения объема (б). Цифрами над кривыми указано давление обжатия образцов

Распределение сдвиговой пластической деформации в образце



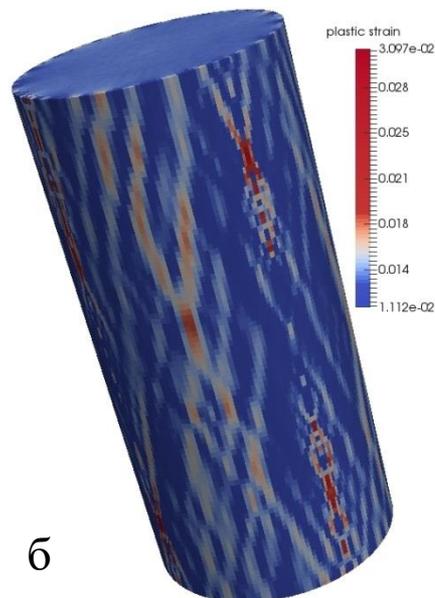
Зависимости приложенных напряжений от деформации образца при различных условиях на торцах. Пунктирная линия данные Labuz и др. (1997)



Локализация деформации в пористых образцах



а

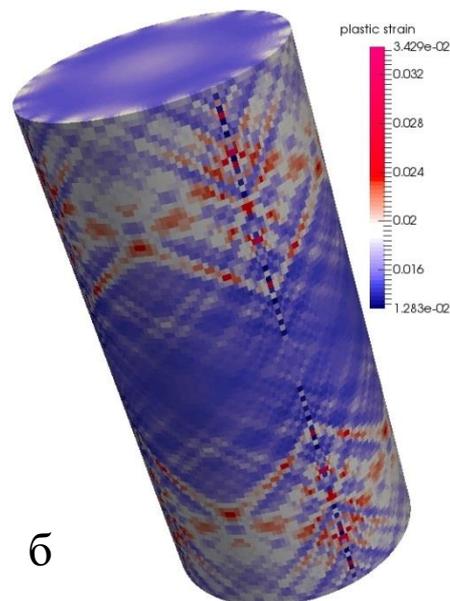


б

Картина деформирования образца баженовской породы при одномосном нагружении: а) эксперимент; б) численное моделирование



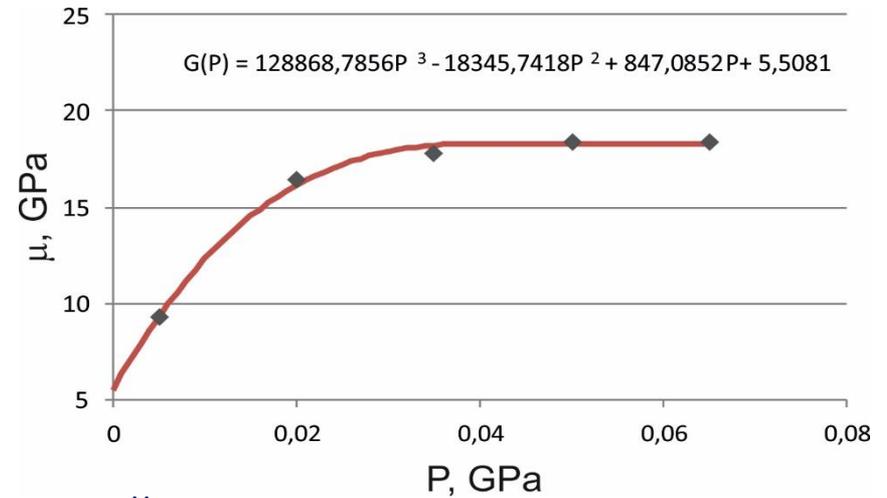
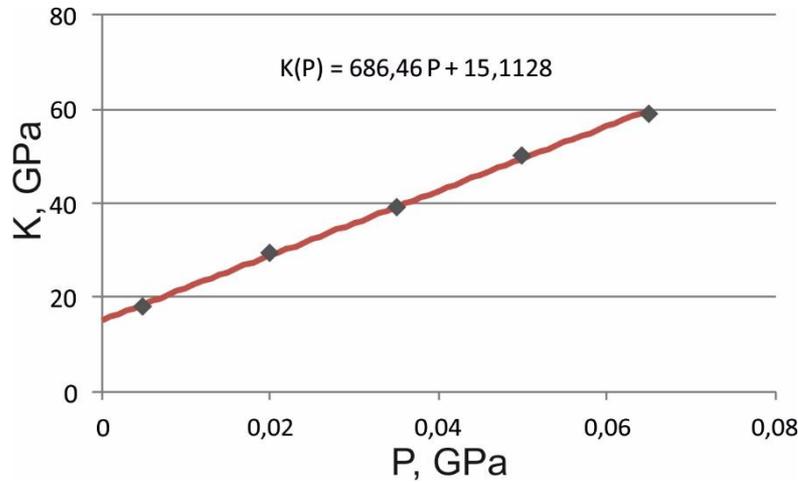
а



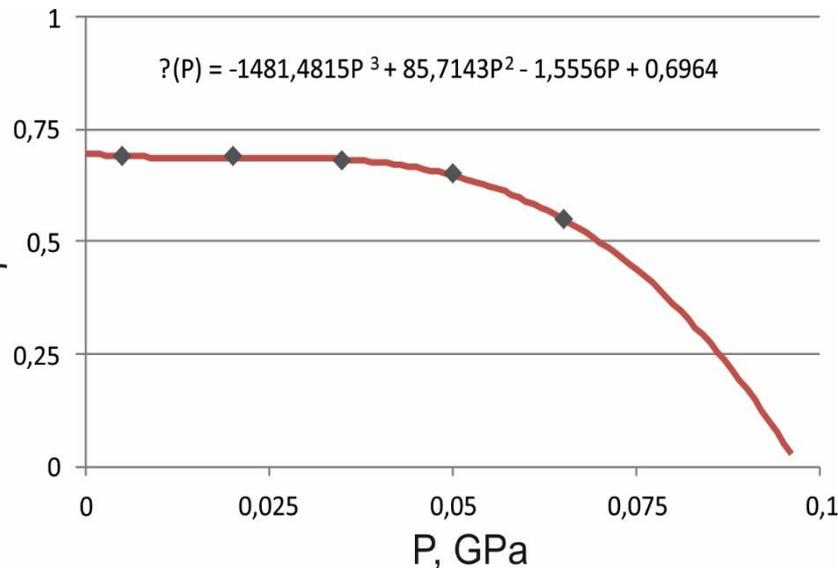
б

Картина деформирования образца баженовской породы при боковом обжатии 10 МПа: а) эксперимент; б) численное моделирование

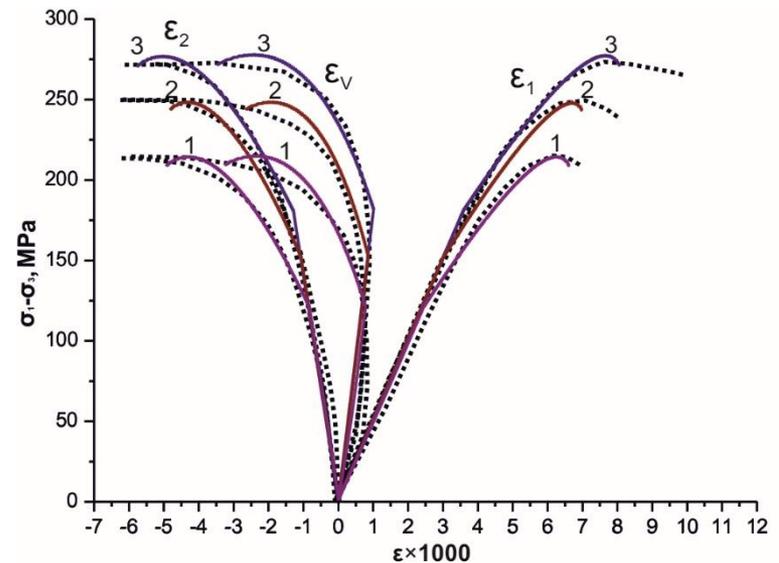
Зависимость параметров от напряженного состояния



Зависимость упругих модулей от давления

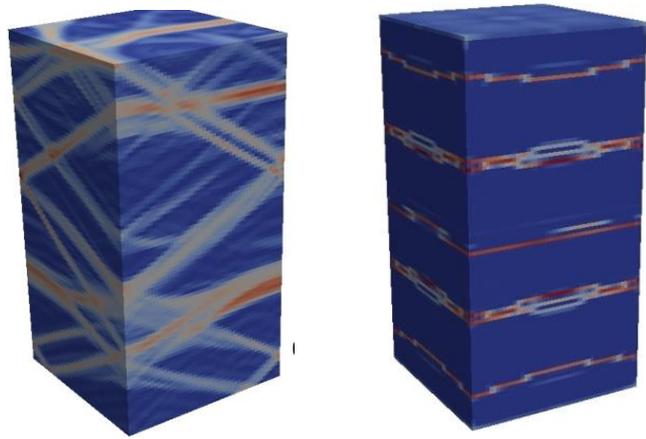


Зависимость коэффициента дилатансии от давления

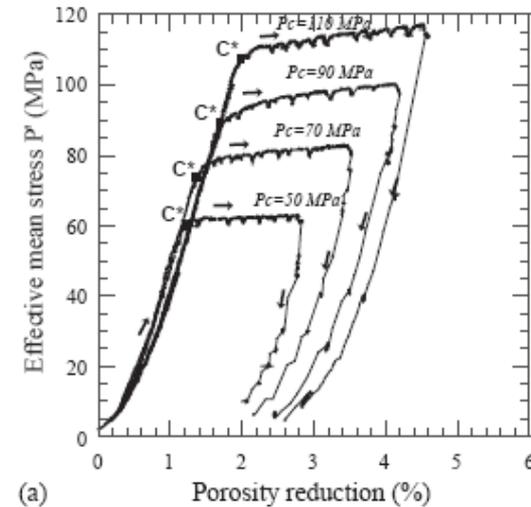
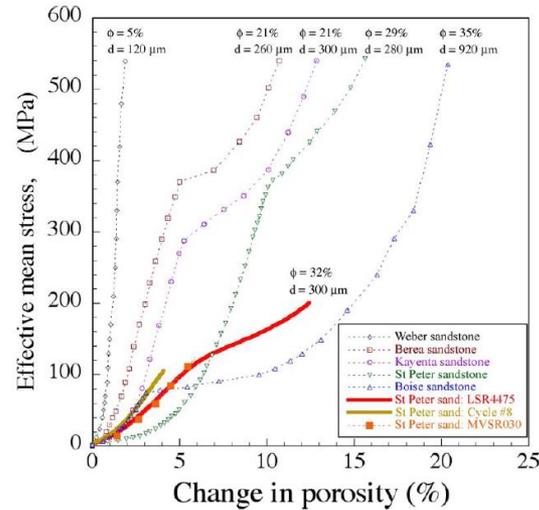


Экспериментальные и расчетные диаграммы нагружения

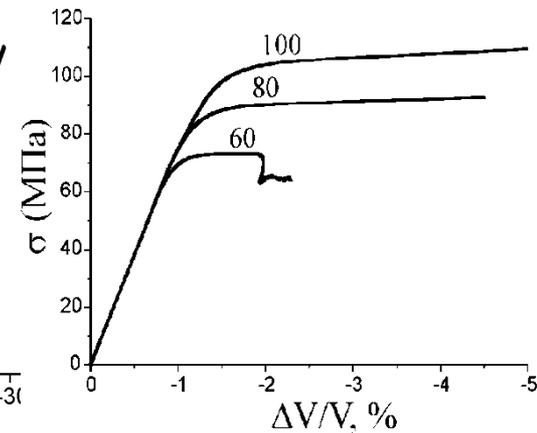
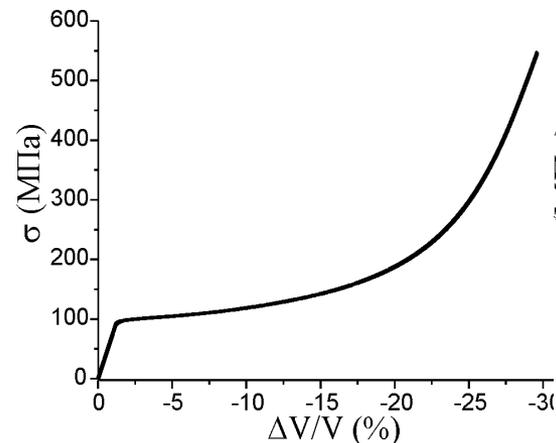
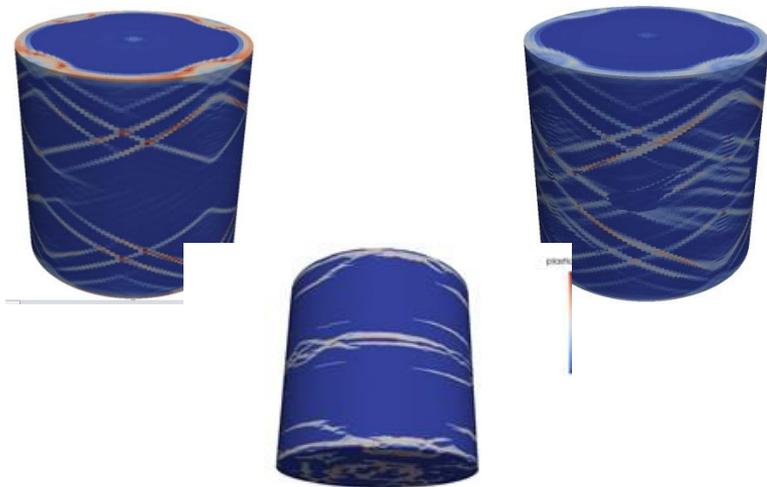
Компакция. Формирование зон локализованного уплотнения



Расчет формирования зон уплотнения в образцах высокопористого песчаника при разном давлении обжатия



Диаграммы нагружения высокопористого песчаника: (Karner S.L и др., 2003), (Fortin J и др., 2005)



Результаты численного расчета деформации высокопористого песчаника при однородном

Расчет процессов деформации в конкретных условиях

- **Механические свойства пород, модель и параметры** 
 - *Забор керна. Скважинные данные*
 - *Керновые испытания*
 - **Анализ данных**
 - **Выбор и модификация модели поведения, определение параметров.**
 - **Верификация, валидация, калибровка. Численное моделирование, воспроизведение эксперимента**
 - **Дополнительные факторы** 
 - **Гравитация**
 - **Флюид. Поровое давление**
 - **Температура**
 - **Условия нагружения** 
 - *Предоставленные данные. (Часто достоверные данные отсутствуют)*
 - **Предполагаемые условия, множество вариантов в широком диапазоне**
 - **Конкретная задача. Процессы деформации в конкретных условиях** 
 - **Численное моделирование множества вариантов**
 - **Возможные сценарии развития деформации в заданных условиях**
 - **Выводы** 
 - **Анализ и интерпретация результатов**
- ?*
- ?*
- 

Численное моделирование необратимой деформации и разрушения в геосреде

II – Примеры расчетов

Ю.П. Стефанов

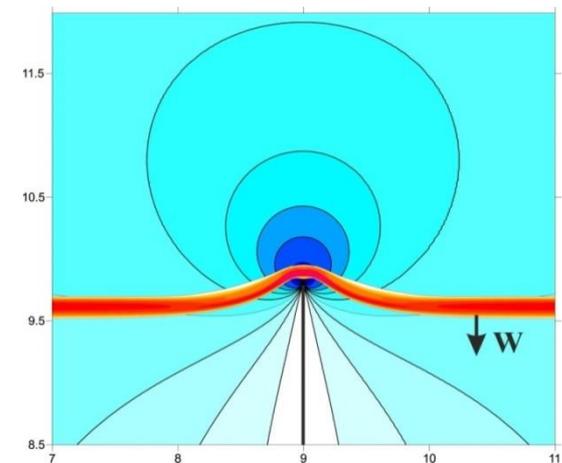
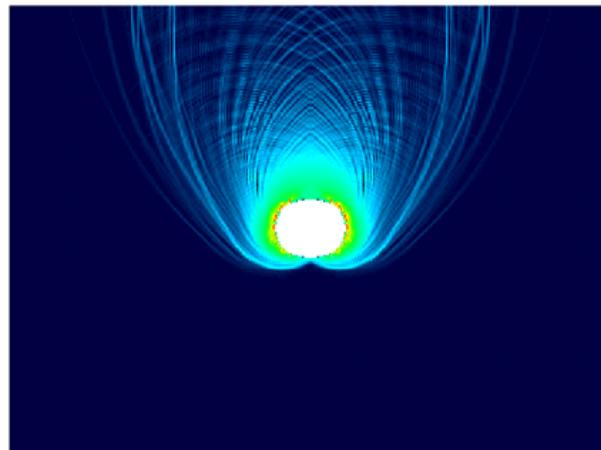
Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, г. Новосибирск;

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск;

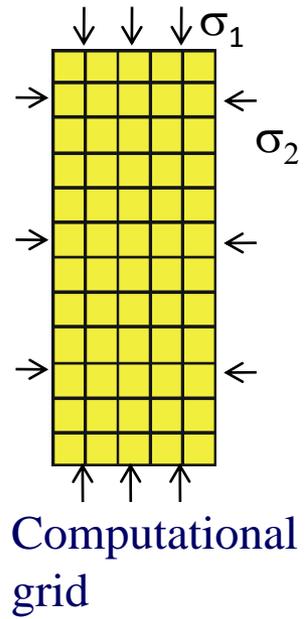
Новосибирский государственный университет;

Университет Иннополис

yu_st@mail.ru; stefanov@ispms.ru; stefanovyp@ipgg.sbras.ru

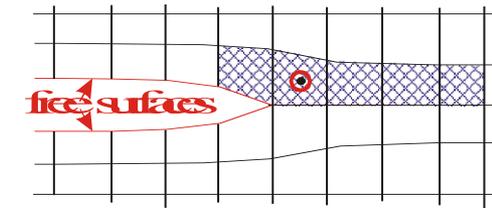
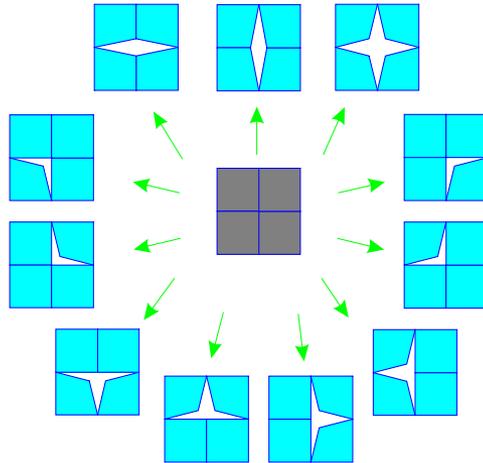


Simulation of crack growth

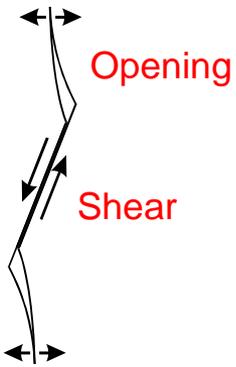


Computational grid

Split node technique for cracks description in computation

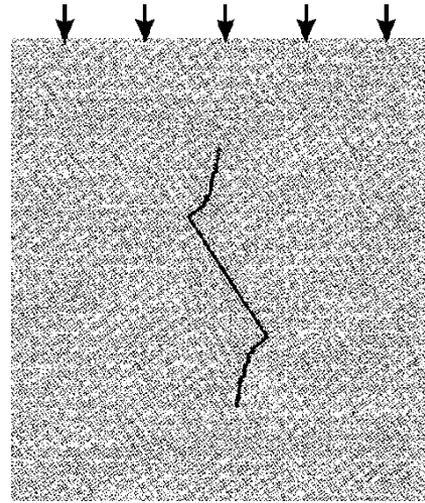


Scheme of crack in computation

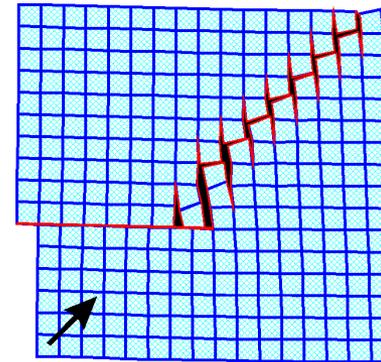


Opening mechanism of crack growth

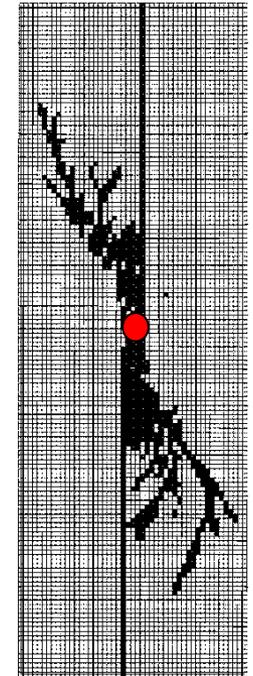
Explicit consideration of cracks



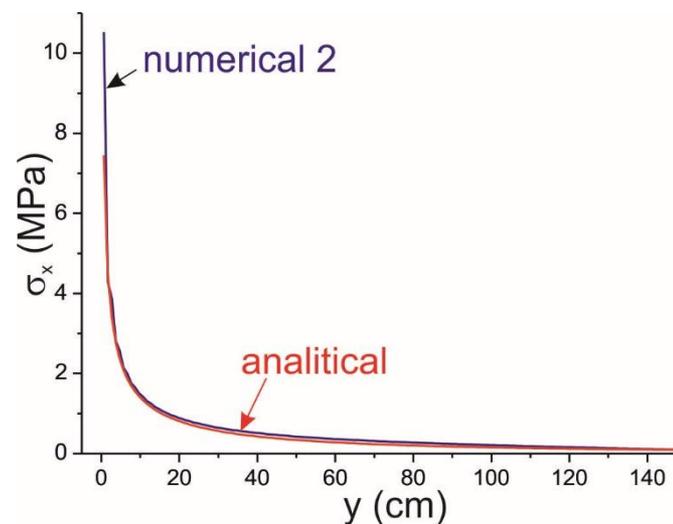
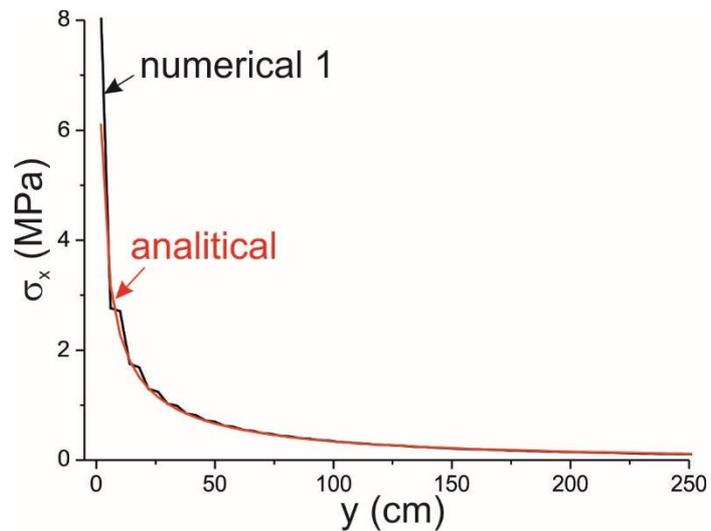
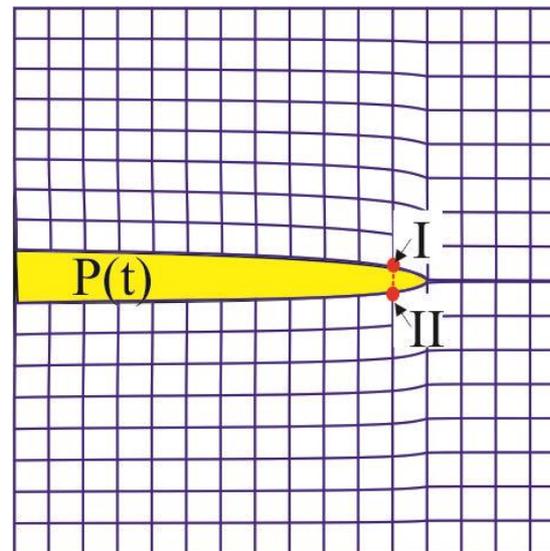
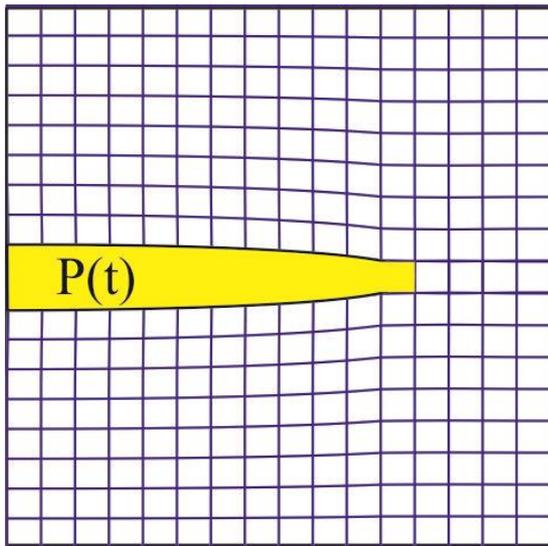
Inclined crack growth



Calculation grid fragment in numerical simulation

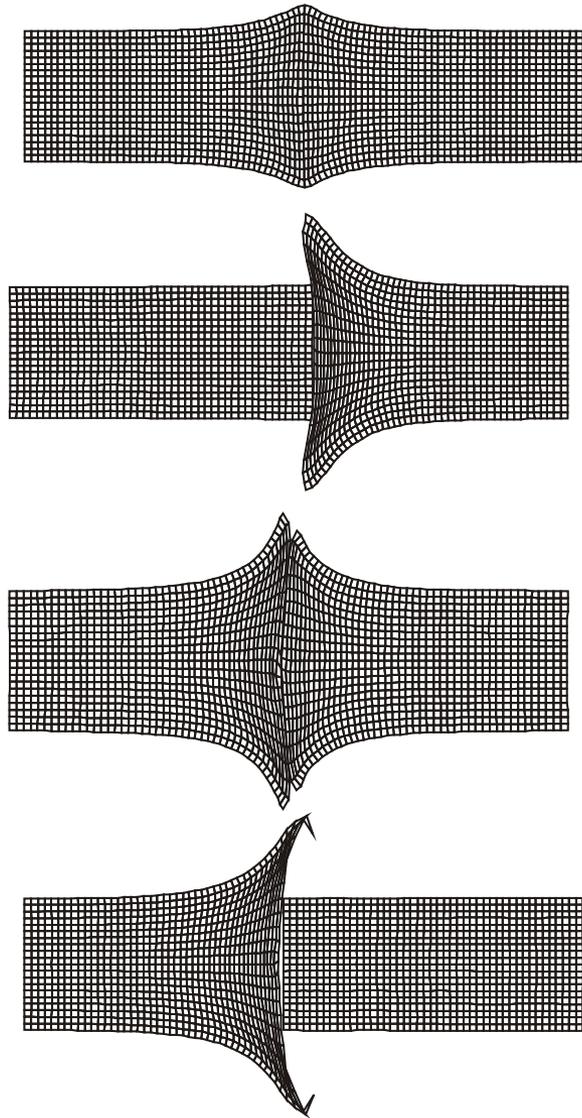


Cracking near hole

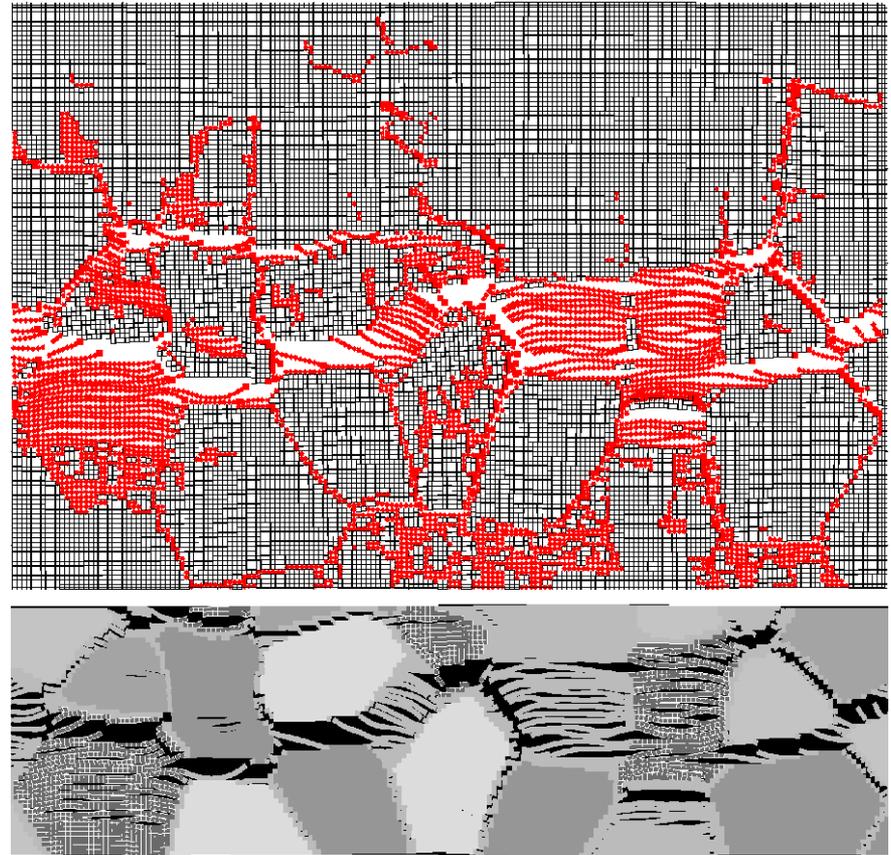


Сопоставление численного и точного решений для трещины отрыва при разных способах моделирования трещины

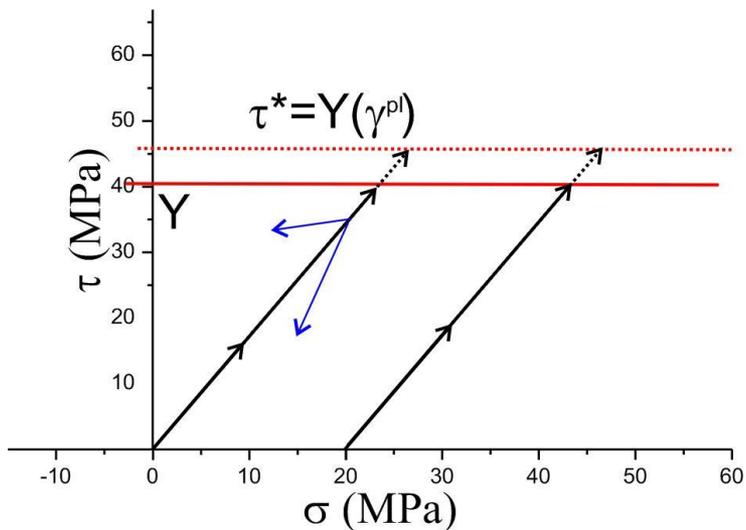
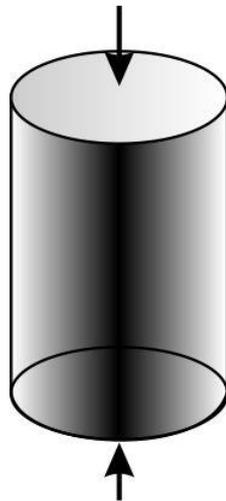
Ударное нагружение



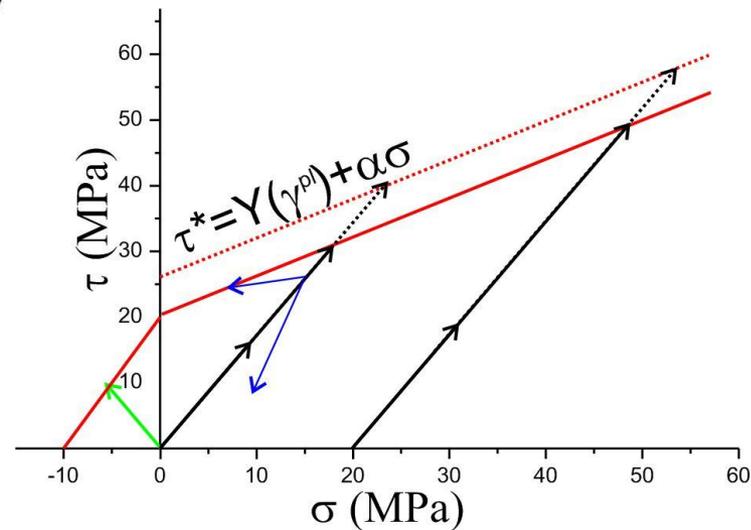
Соударение упругопластических стержней



Откольное разрушение

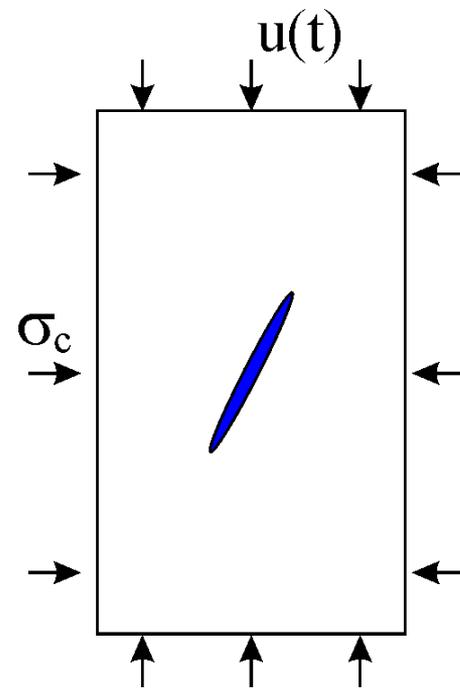
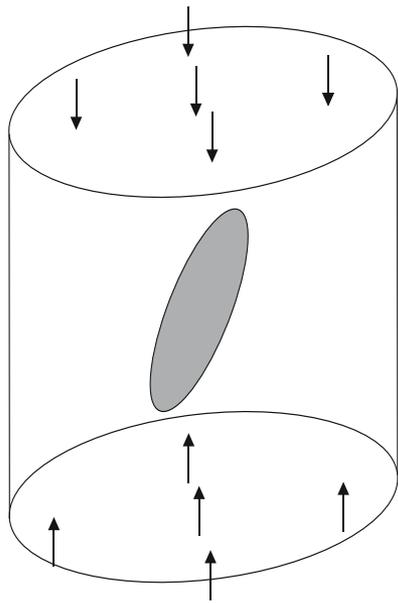


а)

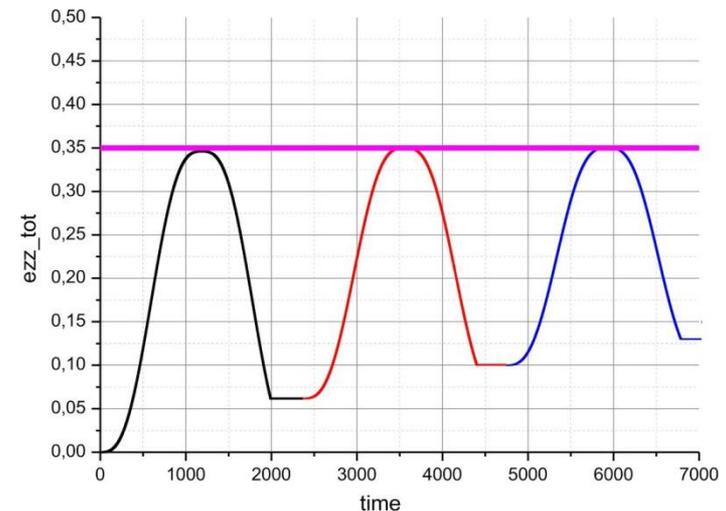
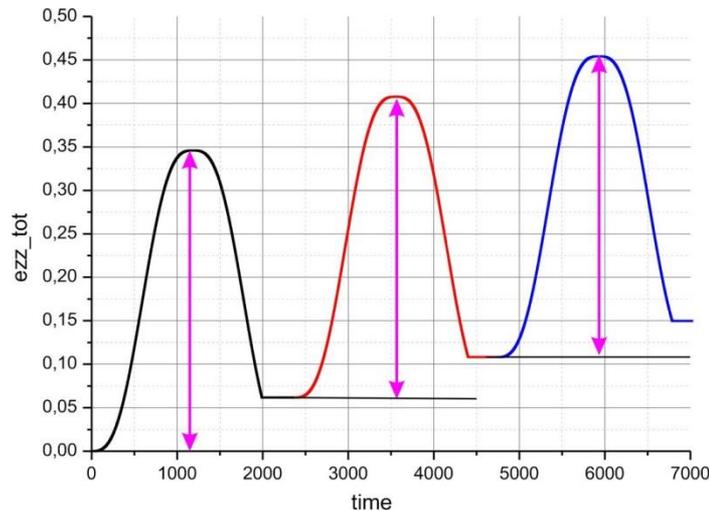


б)

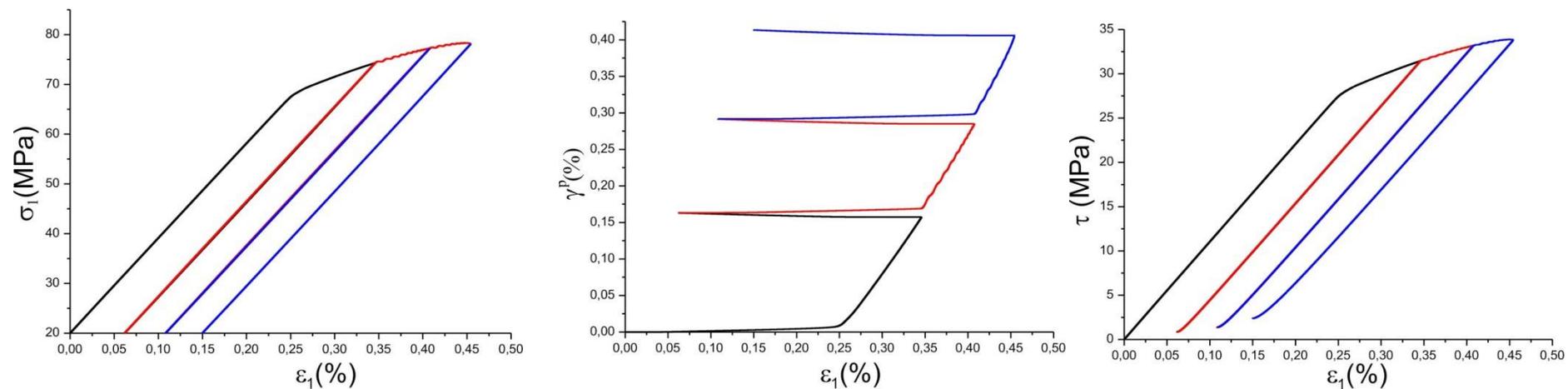
Пути нагружения при псевдотехосном нагружении цилиндрического образца для предельных поверхностей а) Мизеса и б) Друккера-Прагера



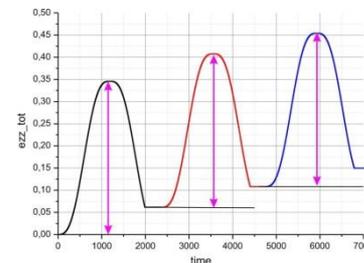
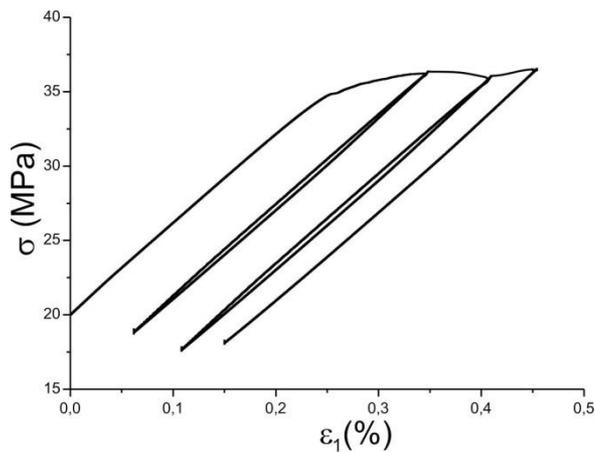
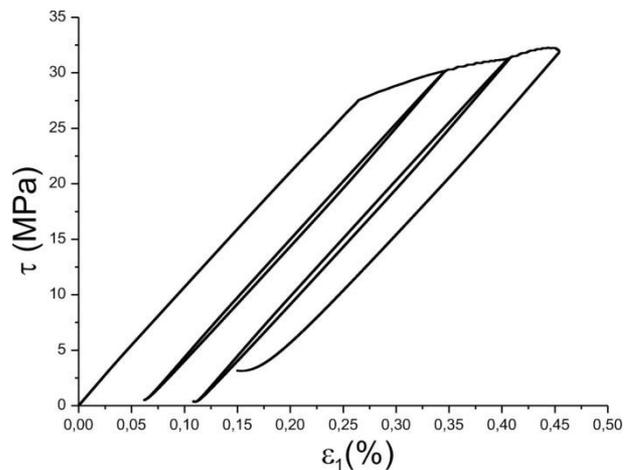
Геометрия расчетной области и схема нагружения для 3D и 2D постановок



Циклы нагрузок с постоянной амплитудой и с постоянной деформацией на каждом цикле

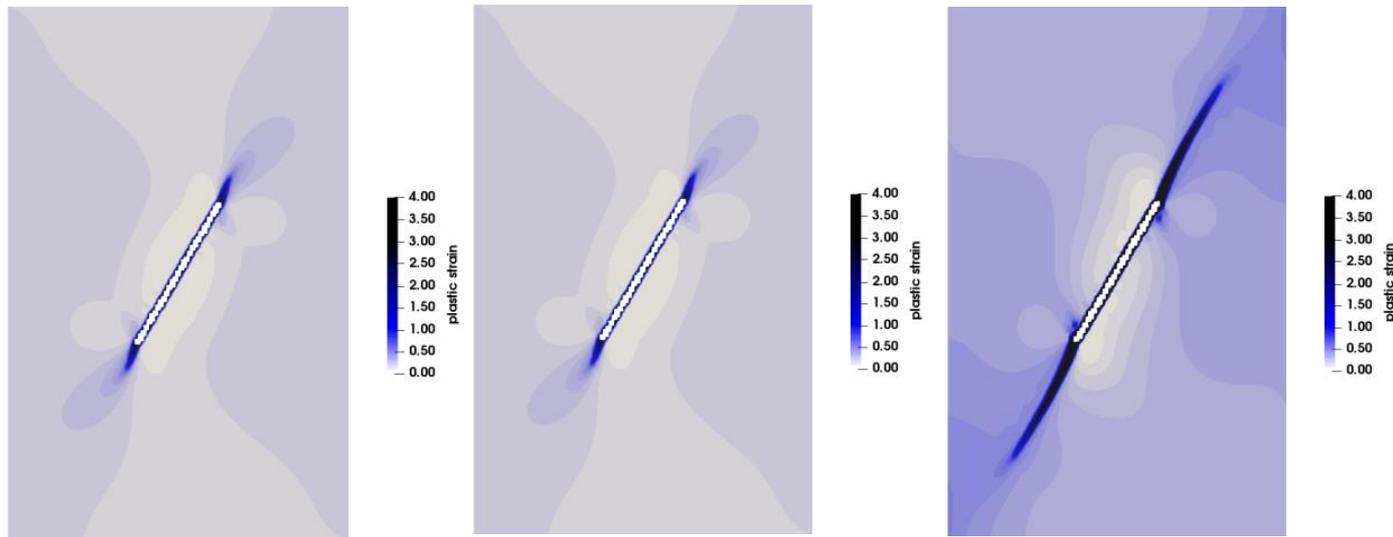


Диаграммы нагружения от осевой деформации при циклическом нагружении образца горной породы с постоянной амплитудой смещений между циклами: а) осевые напряжения от деформации; б) усредненная необратимая сдвиговая деформация; с) усредненные значения интенсивности касательных напряжений

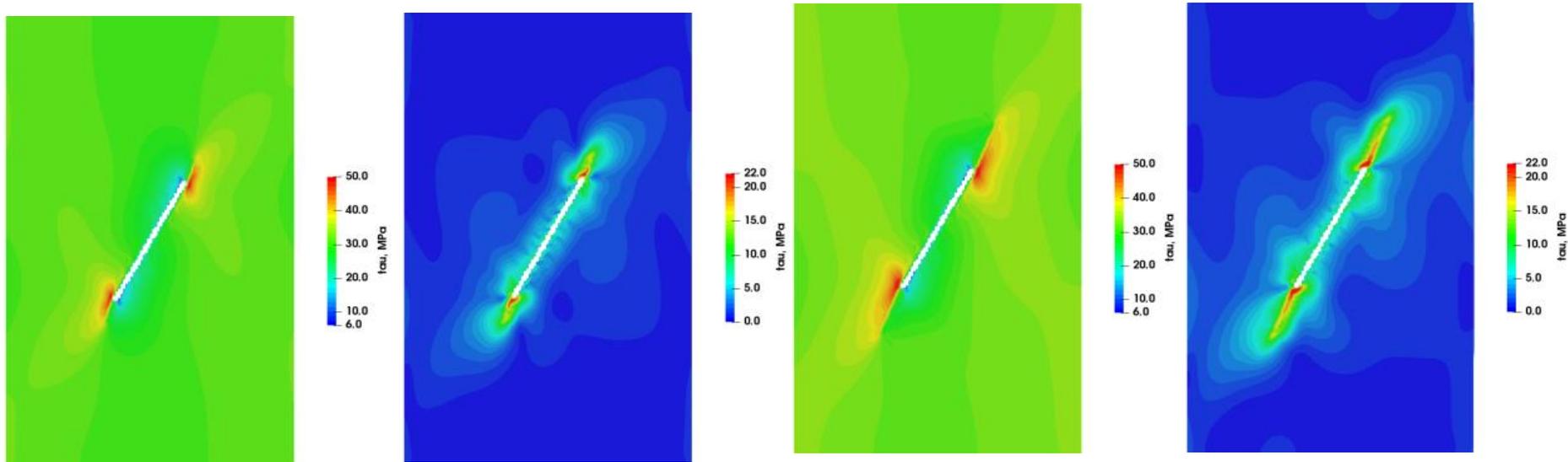


Циклы нагрузки с постоянной амплитудой

Диаграммы нагружения от осевой деформации при циклическом нагружении образца горной породы с постоянной амплитудой смещений между циклами: а) интенсивность касательных напряжений и в) давление в точке вблизи вершины дефекта



Распределения интенсивности сдвиговой пластической деформации на разных циклах нагружения



Распределения интенсивности касательных напряжений в образце: а) на первом цикле нагружения, б) после разгрузки, с) после второго цикла нагружения, д) после разгрузки

Образец с трещиной при многостадийном нагружении

Многостадийное нагружение

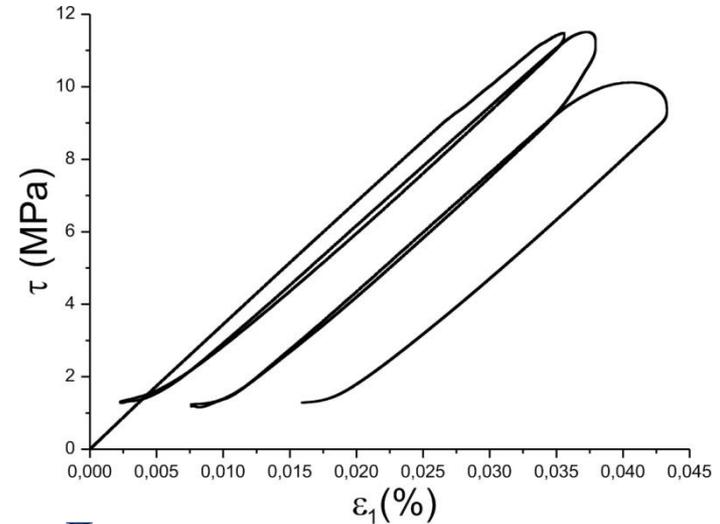
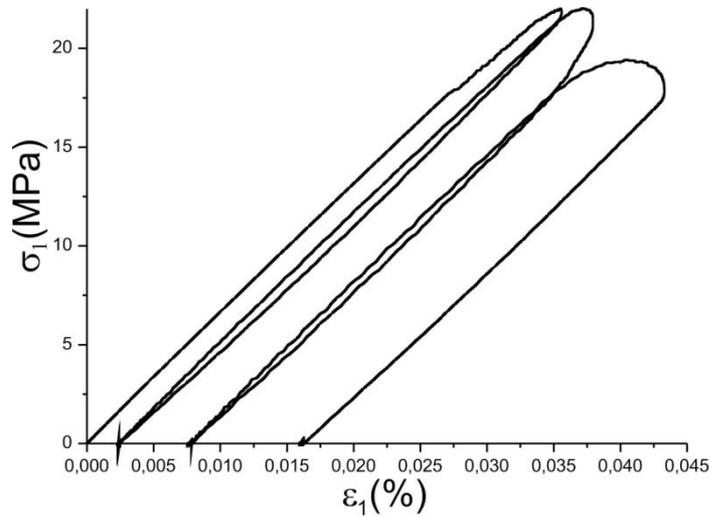
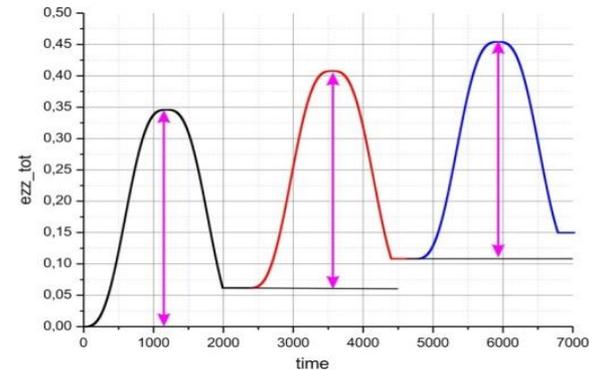
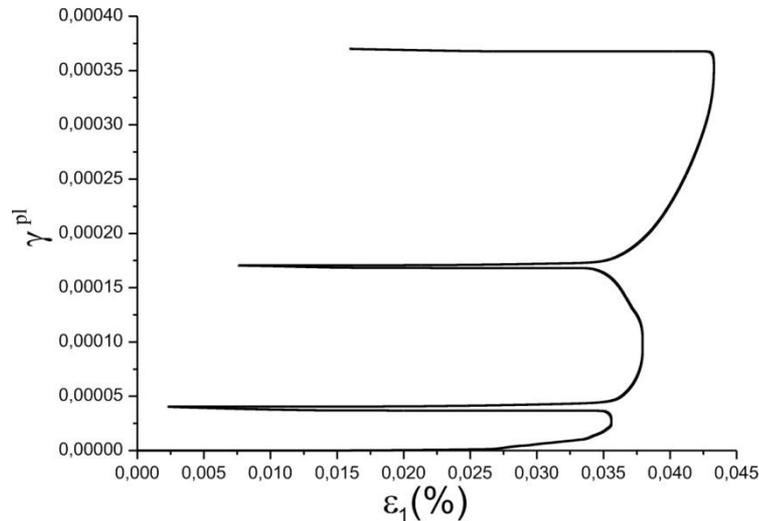


Диаграмма усредненных значений интенсивности касательных напряжений в образце



Диаграммы при многостадийном нагружении

Циклы нагрузки с постоянной амплитудой

Образец с трещиной при многостадийном нагружении

Многостадийное нагружение до одной степени деформации и разгрузкой

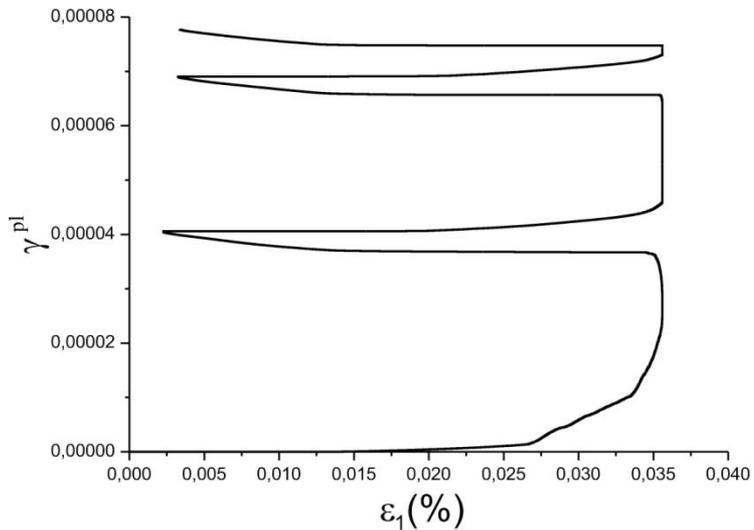
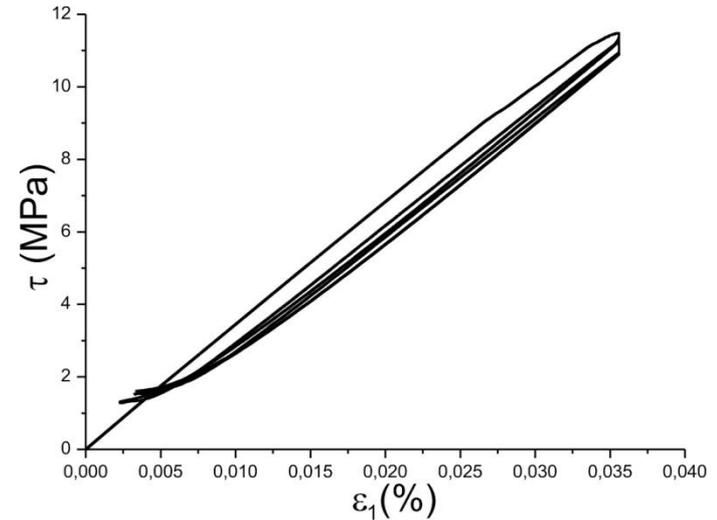
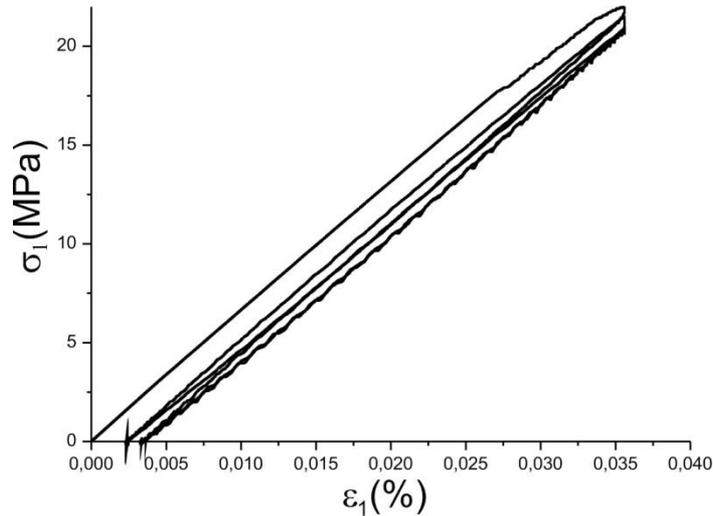
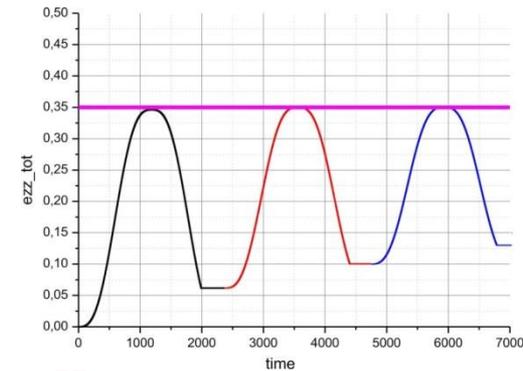


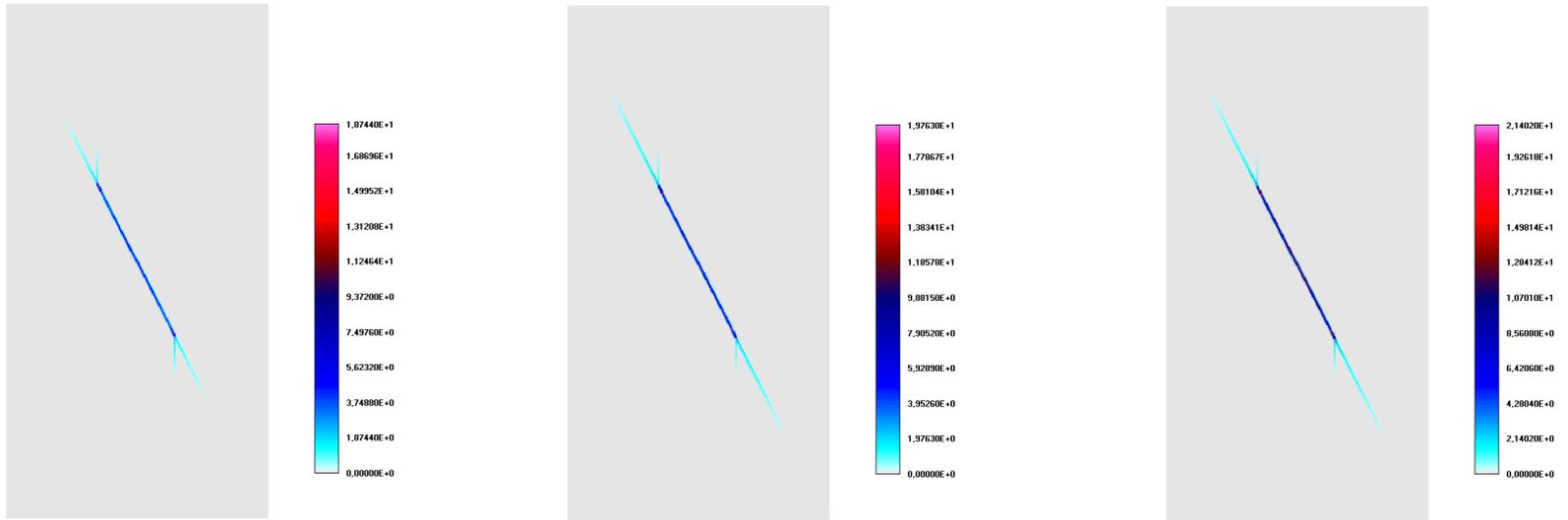
Диаграмма усредненных значений интенсивности касательных напряжений в образце



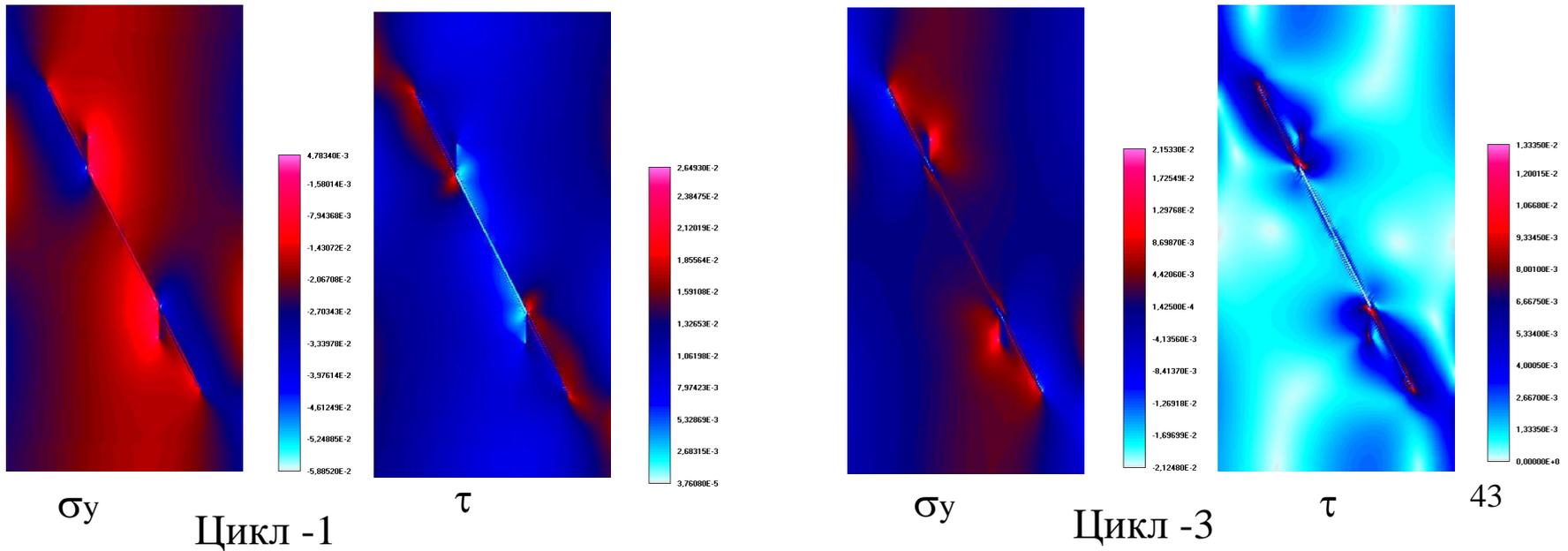
Диаграммы при многостадийном нагружении

Циклы нагрузок до фиксированной деформации

Образец с трещиной при многостадийном нагружении



Развитие необратимой деформации на разных циклах



-
- Изменение напряженно-деформированного состояния может привести к нелинейной разгрузке, вторичной деформации и разрушению на этапе разгрузки
 - Развитие необратимой деформации происходит не только при активном нагружении, но и при разгрузке.
 - В окрестности дефекта формируются остаточные напряжения, которые расположены вблизи областей интенсивного роста деформации. Эти особенности поведения тела с дефектами могут проявляться в виде гистерезиса диаграмм нагружения.
 - Важным следствием развития деформации на этапах нагружения и разгрузки может быть изменения механических свойств горных пород, которые имеют неоднородную структуру и содержат множество разномасштабных дефектов

Напряженно-деформированное состояние

Напряжения достигли
предельного уровня



Пластическая деформация
Хрупкое разрушения

Напряжения ниже
предельного уровня



Упругое состояние.
Конструкция будет вечной?

- Ползучесть, релаксация напряжений
- Пластическая деформация/разрушение с течением времени

Накопление повреждений:

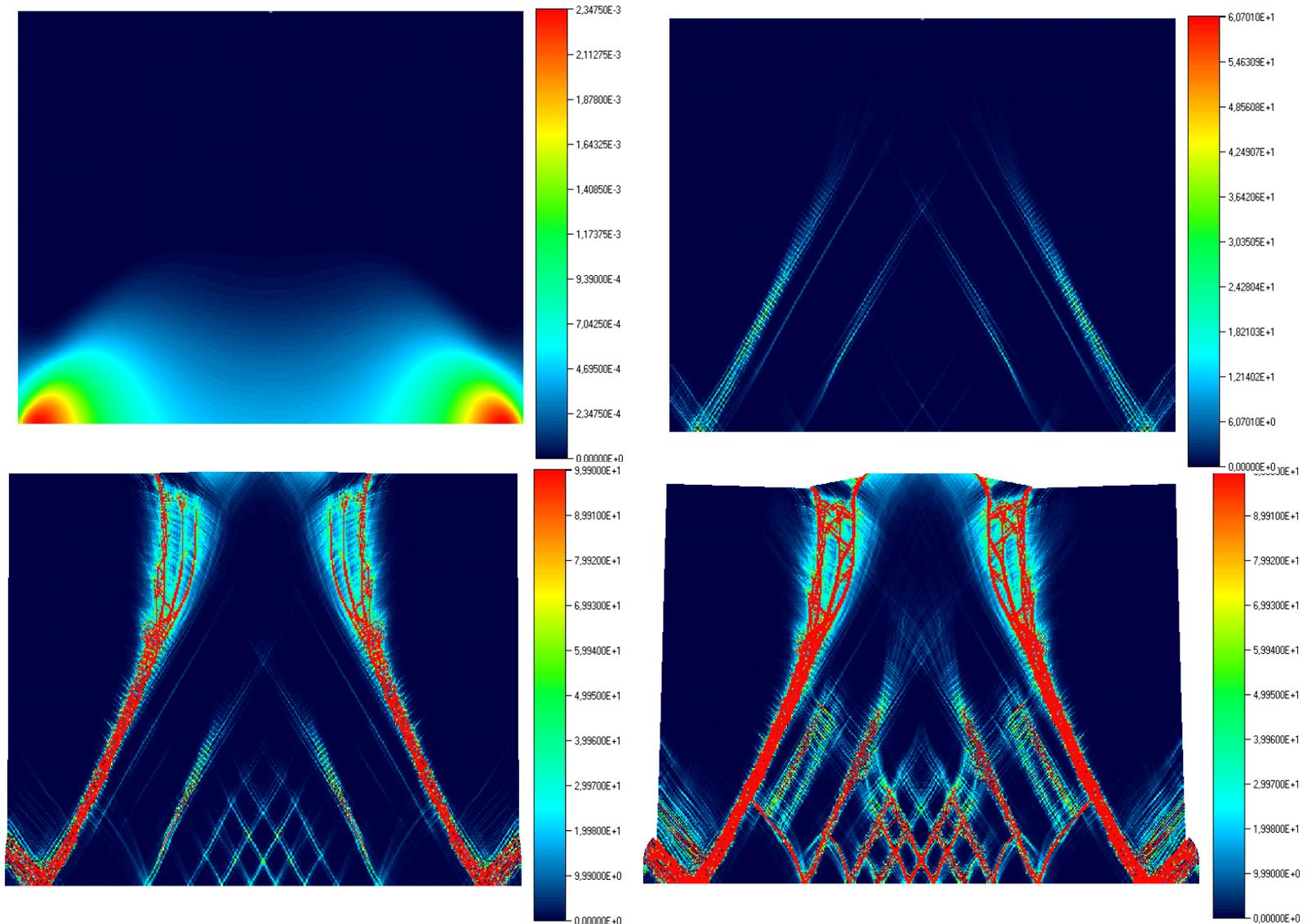
$$D_{\tau}(\tau, t) = \frac{1}{b} \int_{t_0}^{t_{fr}} (\tau - \tau_o)^n dt$$

$$\tau = Y + \alpha \sigma^{eff}$$

$$Y = Y_0 (1 - D_{\tau}(\tau, t))$$

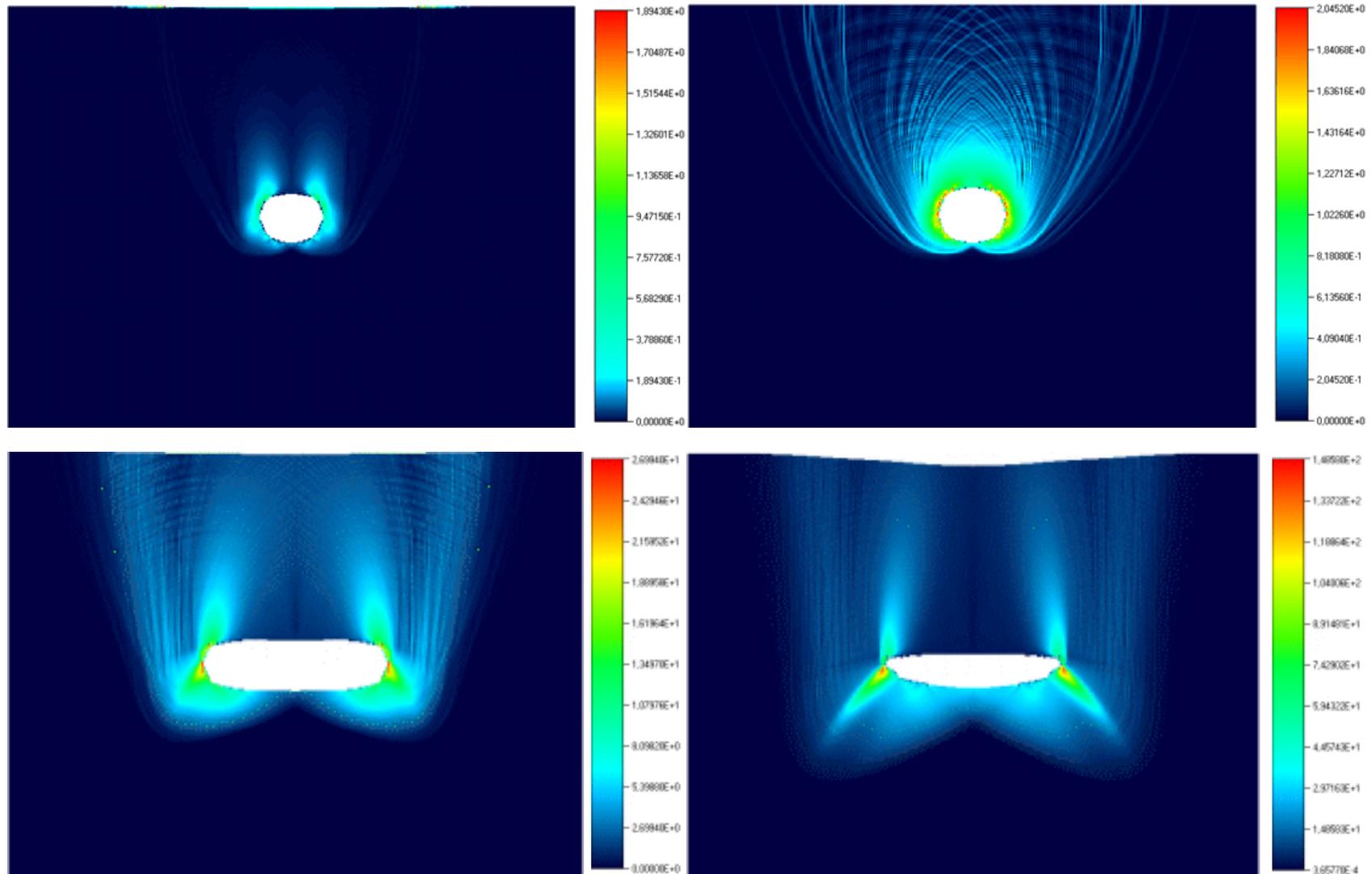
- Пороговое напряжение при котором начинается процесс накопления повреждений
- Время «жизни» материала при разном уровне напряжений

Разрушение массива под действием собственного веса



Этапы образования зон необратимой деформации и ее локализации.
Накопление повреждений

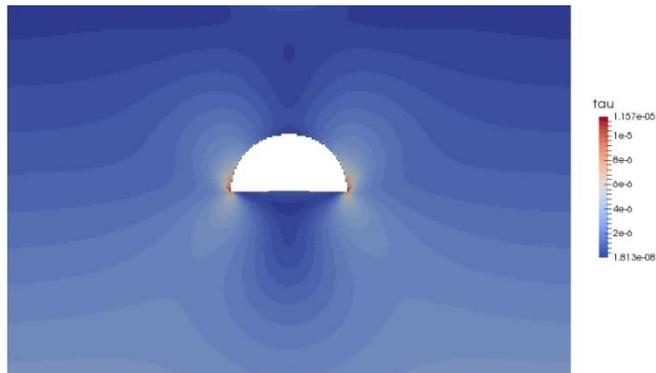
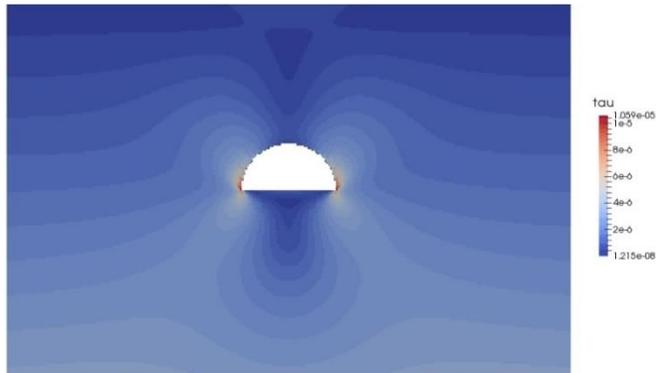
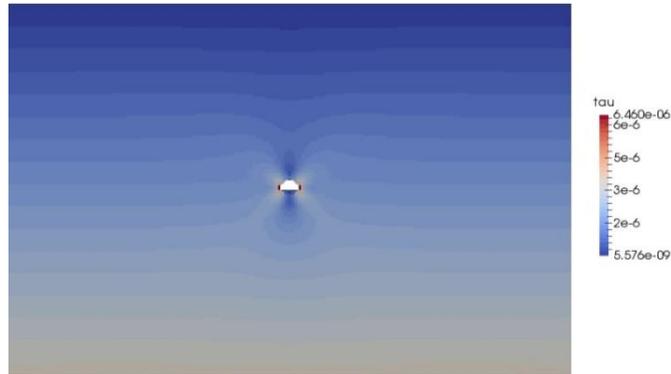
Разрушение выработки в слабосвязной среде



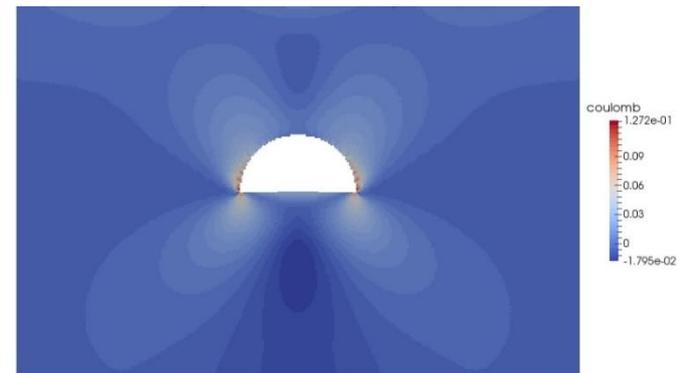
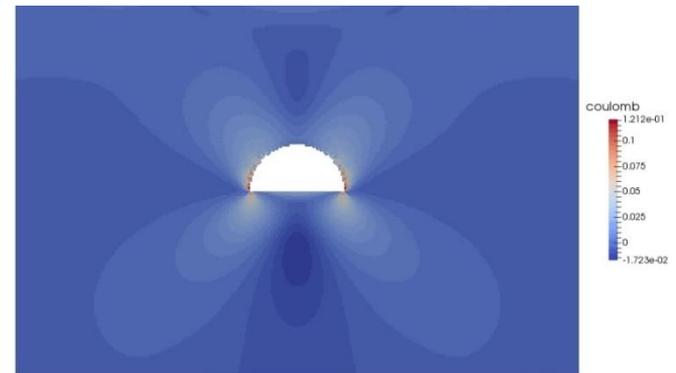
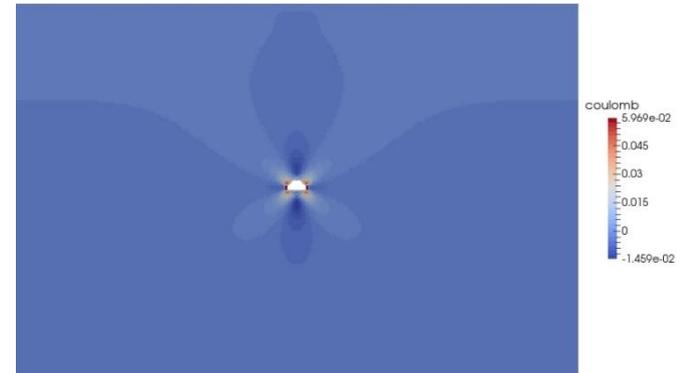
Распределение необратимой деформации в последовательные моменты времени

НДС в окрестности медленно растущей полости

а



б

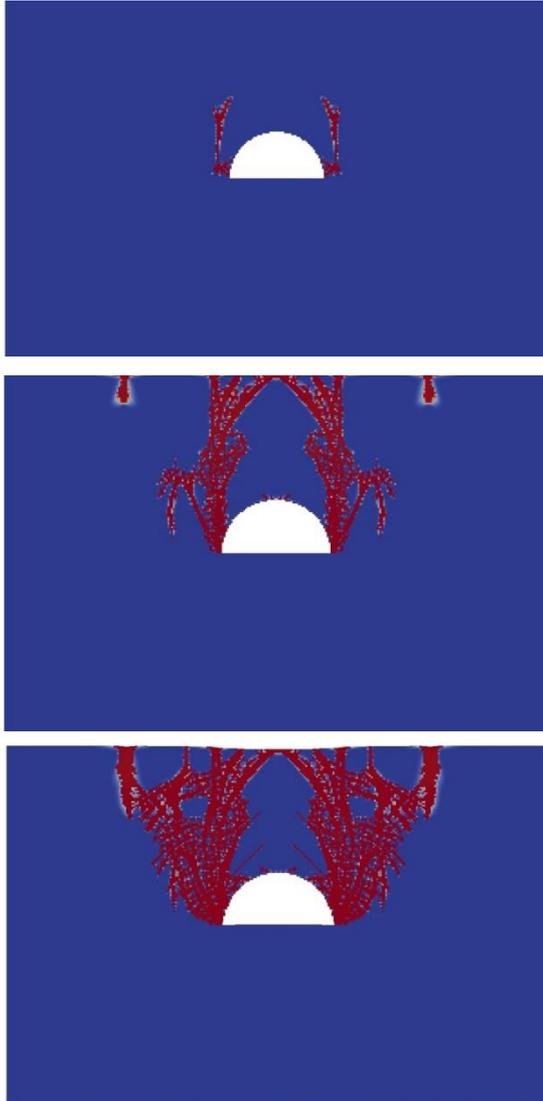


Распределения: а) интенсивности касательных и б) «кулоновских» напряжений по мере роста полости при отсутствии накопления повреждений

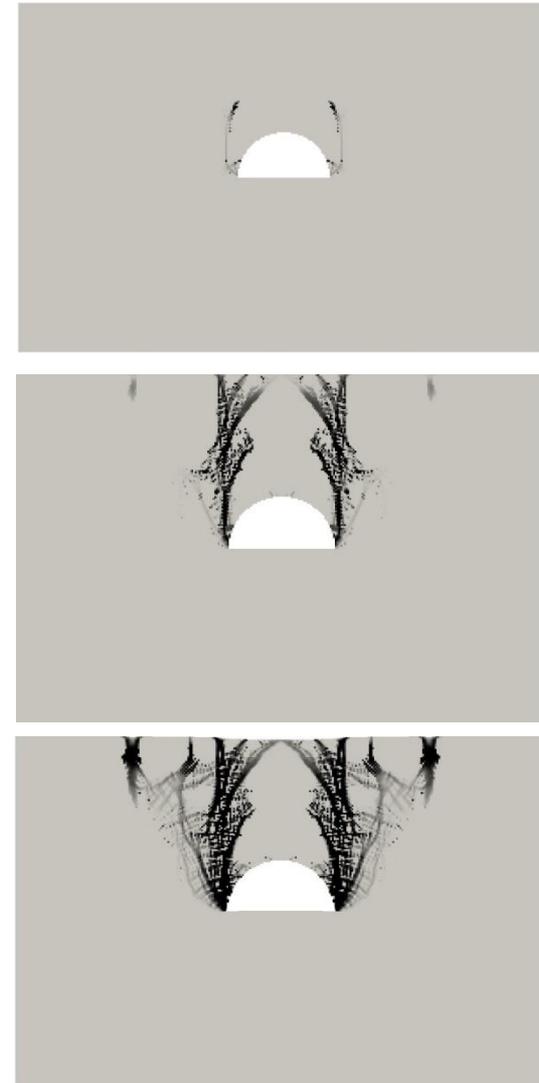
НДС в окрестности медленно растущей полости

Учет накопления повреждений с течением времени

а



б

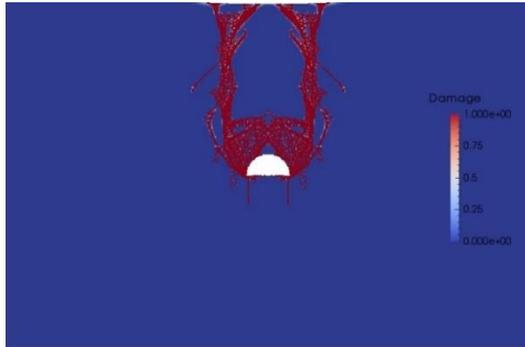
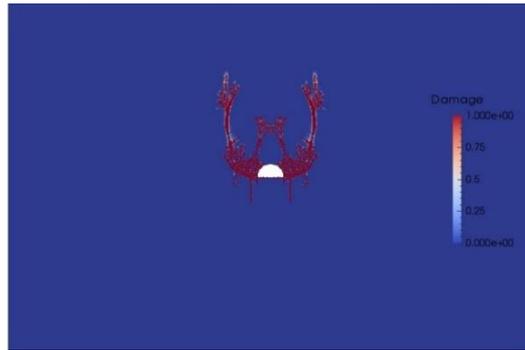


Распределения поврежденности и интенсивности сдвиговой пластической деформации по мере роста полости и накопления повреждений (начальная глубина полости 20⁴⁹ м)

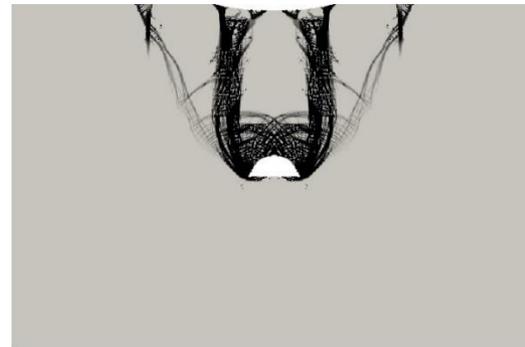
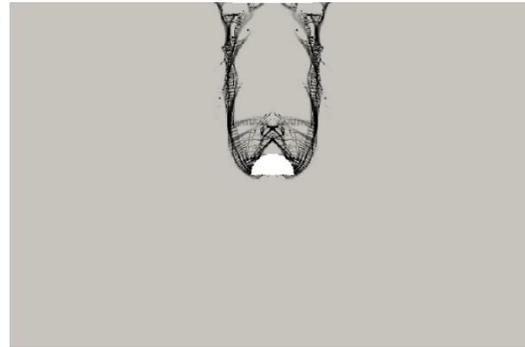
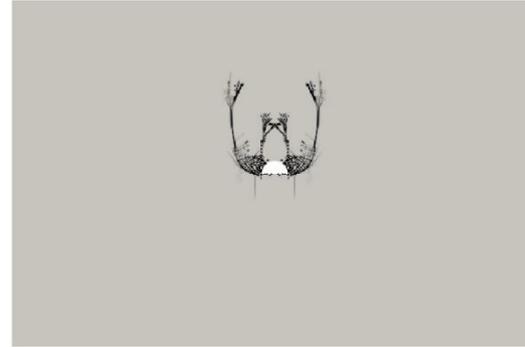
НДС в окрестности медленно растущей полости

Учет накопления повреждений с течением времени

а



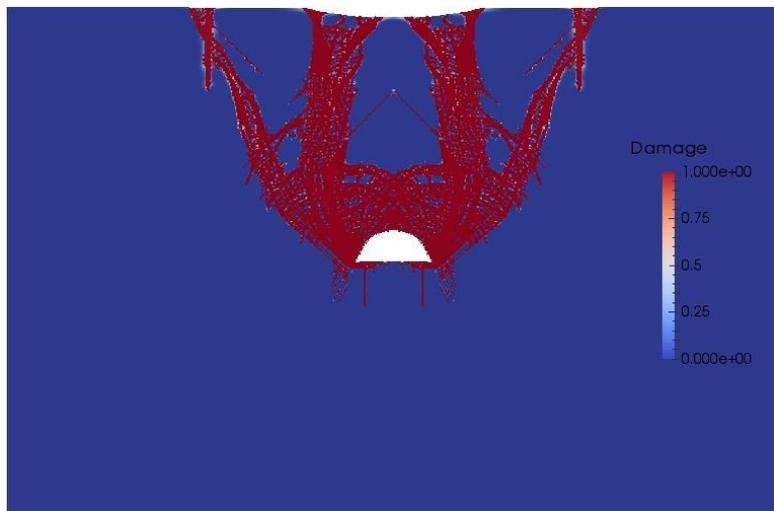
б



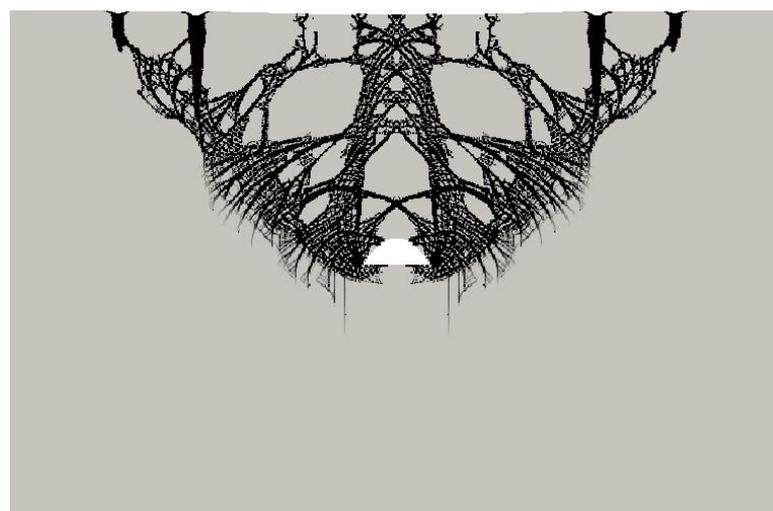
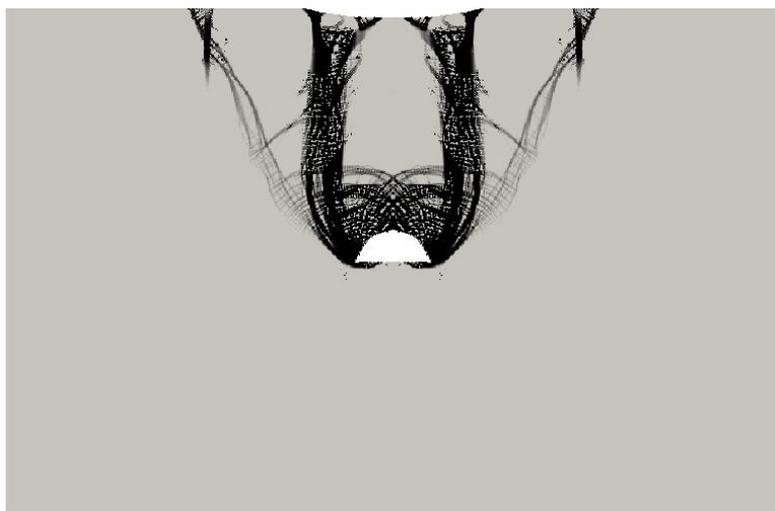
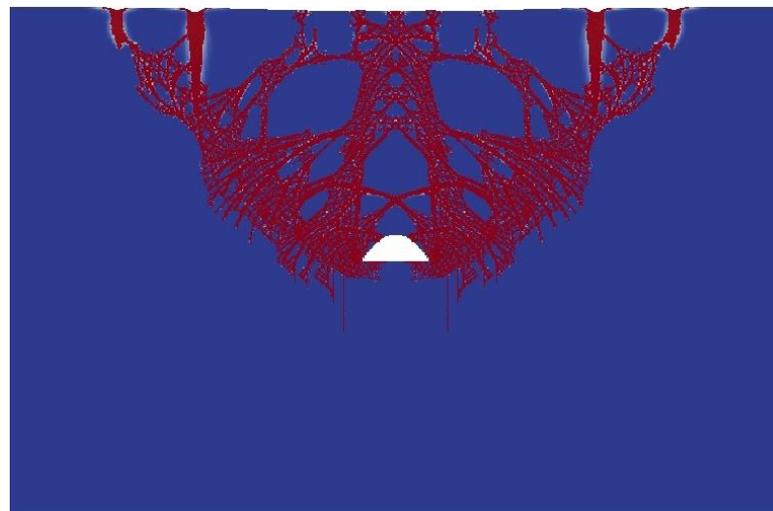
Распределения поврежденности и интенсивности сдвиговой пластической деформации по мере роста полости и накопления повреждений (начальная глубина полости 50⁵⁰ м)

Моделирование разрушения карстовой полости с течением времени

Трещиноватая среда (низкий порог напряжений для накопления повреждений)

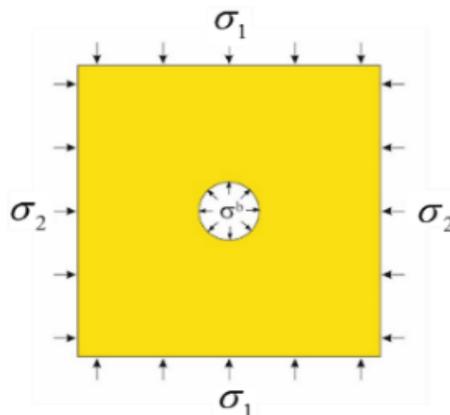
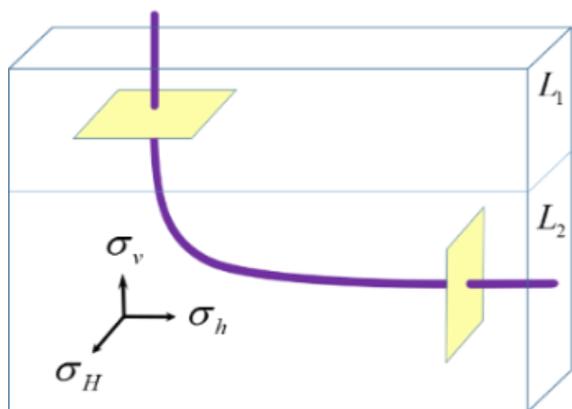


Прочная среда (высокий порог напряжений для накопления повреждений)



Распределение повреждений и интенсивности необратимых сдвиговых деформаций
(Ю.П. Стефанов, Р.А. Бакеев)

Необратимая деформация вокруг скважины при бурении и эксплуатации



□ Вертикальная скважина:

$$\sigma_1 = \sigma_H, \quad \sigma_2 = \sigma_h$$

□ Вертикальная скважина:

$$\sigma_1 = \sigma_v, \quad \sigma_2 = \sigma_H$$

$$\sigma(x, y) = \sigma^0 = -(\sigma_1 + \sigma_2)(1 + \nu) / 3, \quad s_x^0(x, y) = \sigma_x - \sigma^0, \quad s_y^0(x, y) = \sigma_y - \sigma^0$$

□ Неправильное задание нагрузки:

$$s_x|_b = s_x^0$$

$$s_y|_b = s_y^0$$

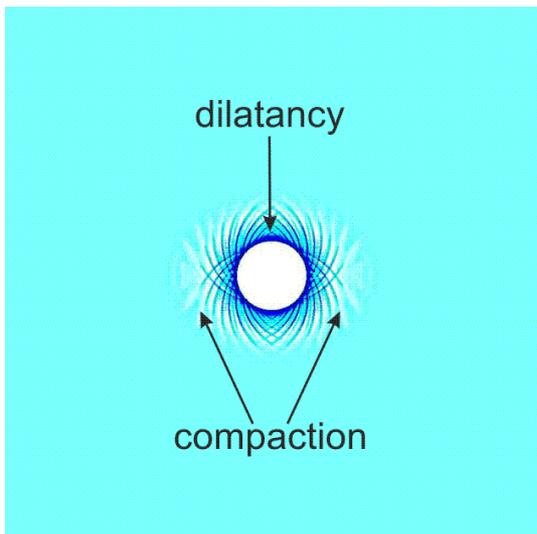
$$\sigma|_b = \sigma^b$$

□ Правильное задание нагрузки:

$$s_x|_b = s_x^0(1 - t/t_1)$$

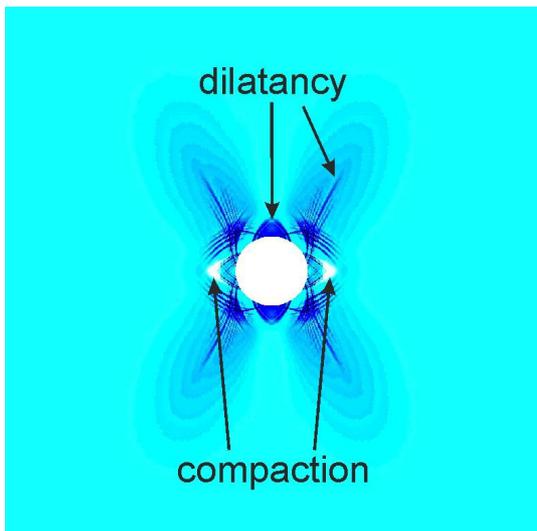
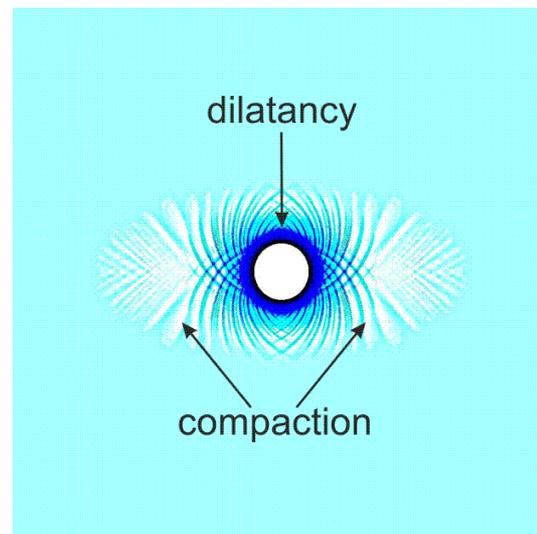
$$s_y|_b = s_y^0(1 - t/t_1)$$

$$\sigma|_b = \sigma^0(1 - t/t_1) + \sigma^b t/t_1$$



a)

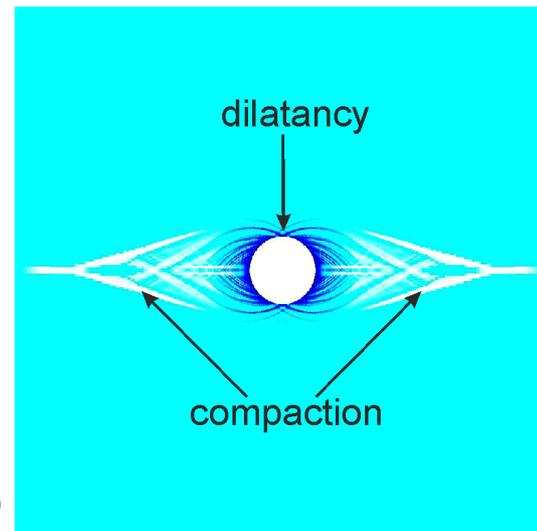
$$\sigma_x = 45 \text{ МПа}, \sigma_y = 55 \text{ МПа}, p_0 = 10 \text{ МПа}, \sigma^b = 0 \text{ МПа}$$



b)

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

$$\sigma^b = 0 \text{ МПа}$$



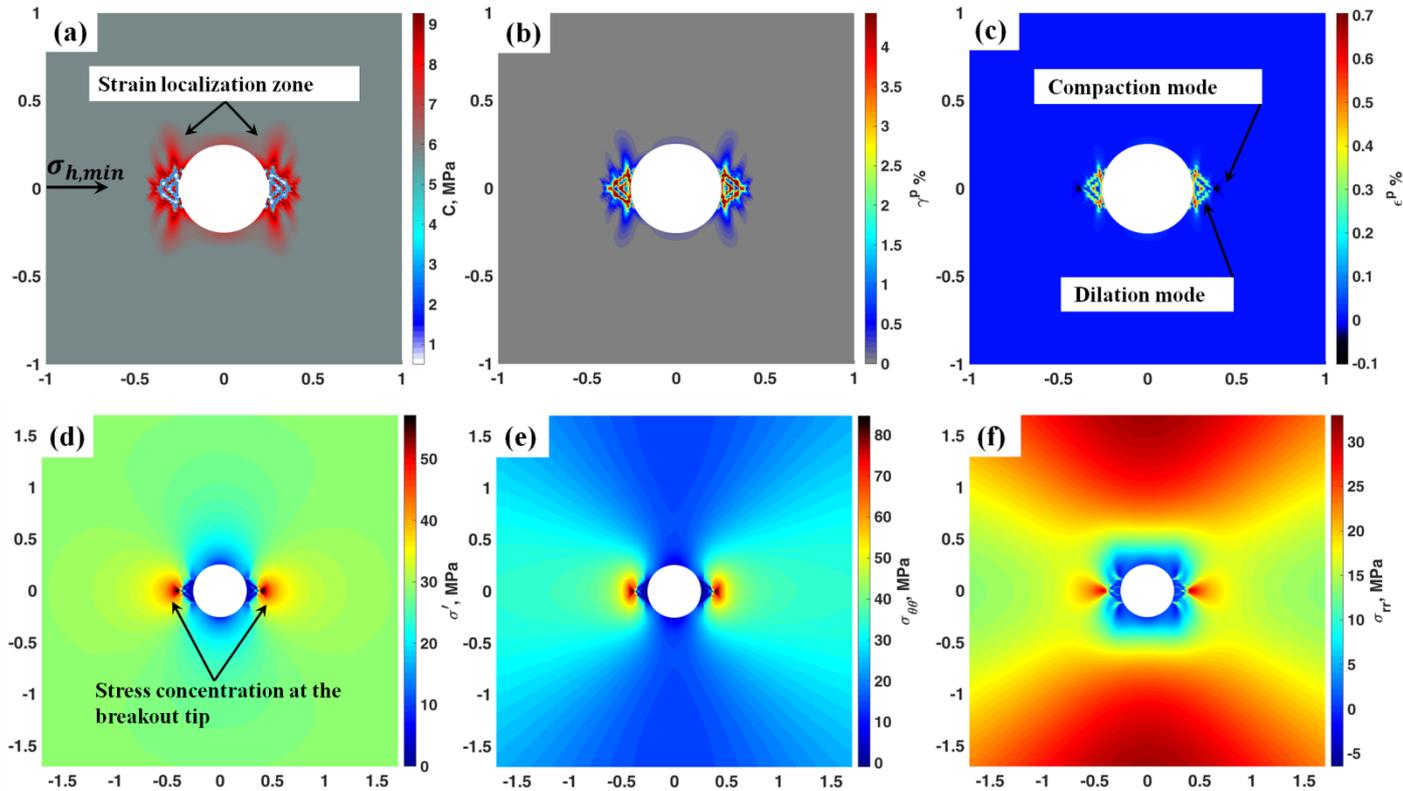
c)

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

$$\sigma^b = 0 \text{ МПа}$$

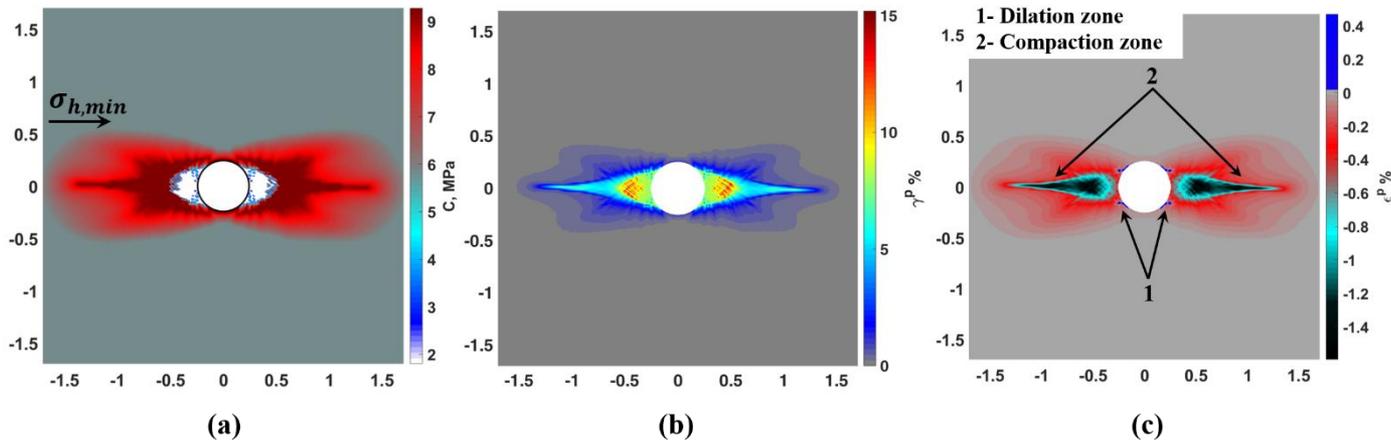
Распределение объемной деформации вокруг скважины после ее создания и снижения порового давления

Необратимая деформация вокруг скважин

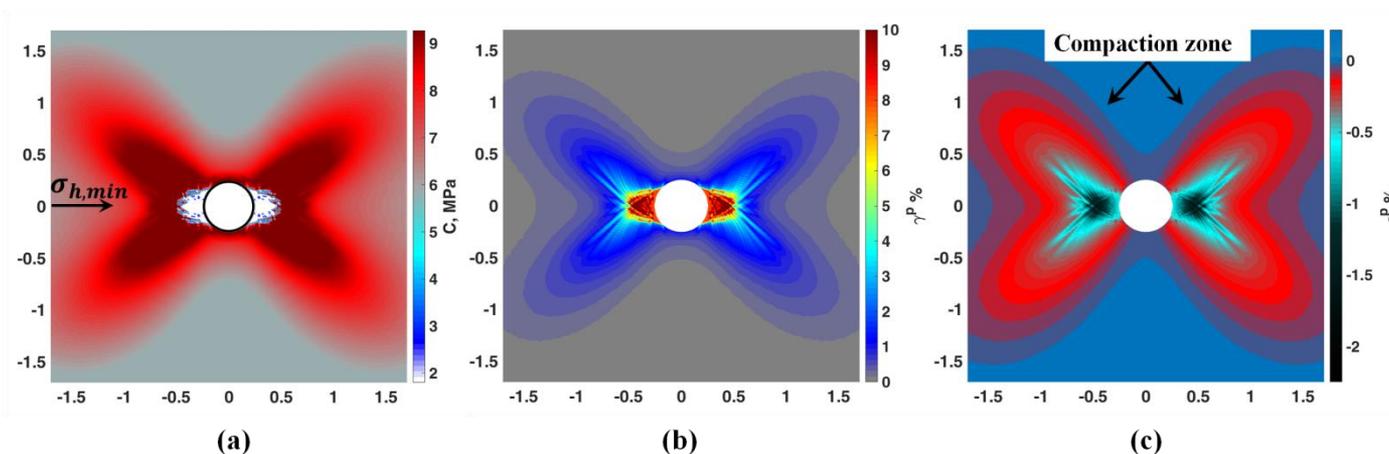


State of stress and plastic zone around borehole with high anisotropy in stress state, (a) cohesion variation, (b) accumulated inelastic equivalent shear strain, (c) inelastic volume strain, (d) effective mean pressure, (e) effective tangential stress and (f) effective radial stress distribution, $\sigma_V / \sigma_H / \sigma_h = 68 / 61 / 41$ MPa

Необратимая деформация вокруг скважин

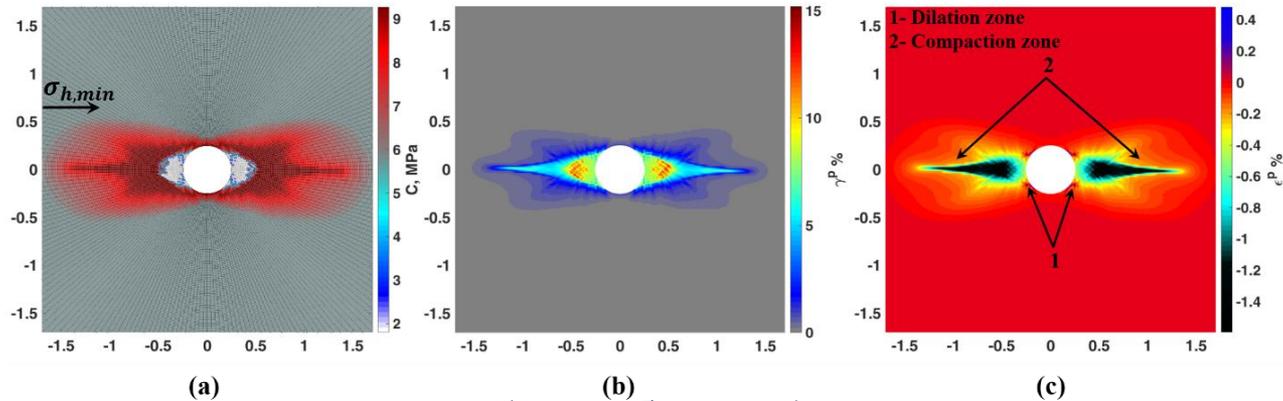


Formation of long and narrow (needle-shaped) compaction band ahead of breakout, (a) cohesion variation, (b) accumulated inelastic equivalent shear strain, (c) inelastic volume strain

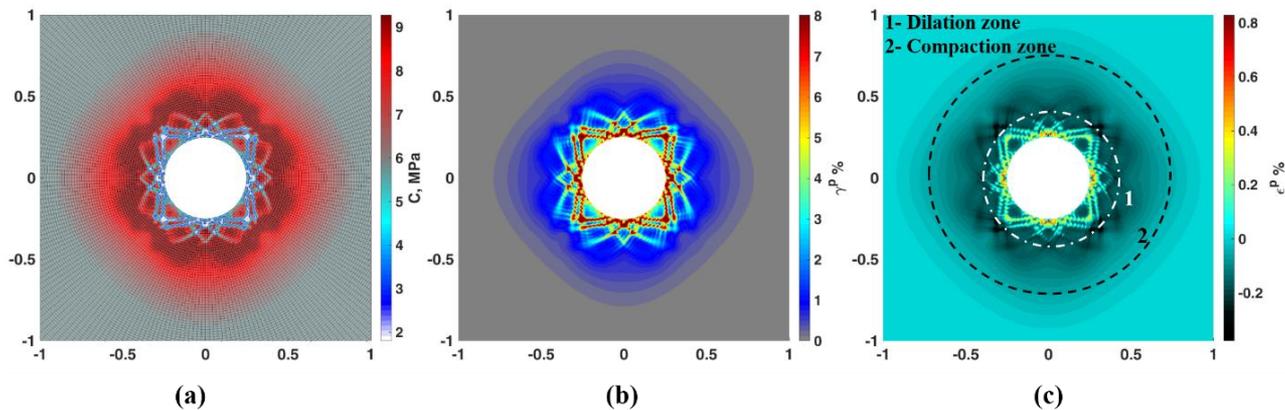


Formation of butterfly-shaped compaction localization zone around the borehole, (a) cohesion variation, (b) accumulated inelastic equivalent shear strain, (c) inelastic volume strain,

(Garavand, Stefanov et.al, 2020)



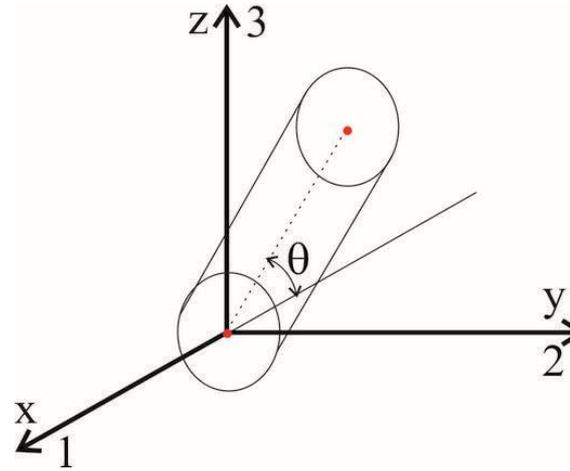
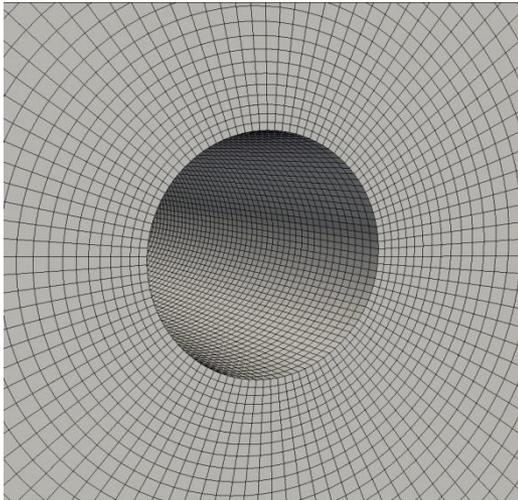
Формирование длинной и узкой (иглообразной) полосы уплотнения вдоль направления разрушения, (а) изменение сдвиговой прочности, (б) интенсивность сдвиговой псевдопластической деформации, (в) интенсивность объемной псевдопластической деформации, $\sigma_V / \sigma_H / \sigma_h = 85/110/95$ МПа



Необратимая деформация при изотропном напряженном вокруг ствола скважины, (а) изменение сдвиговой прочности, (б) интенсивность сдвиговой псевдопластической деформации, (в) интенсивность объемной псевдопластической деформации,

$$\sigma_V / \sigma_H / \sigma_h = 120/90/90 \text{ МПа}$$

(Garavand, Stefanov et.al, 2020)

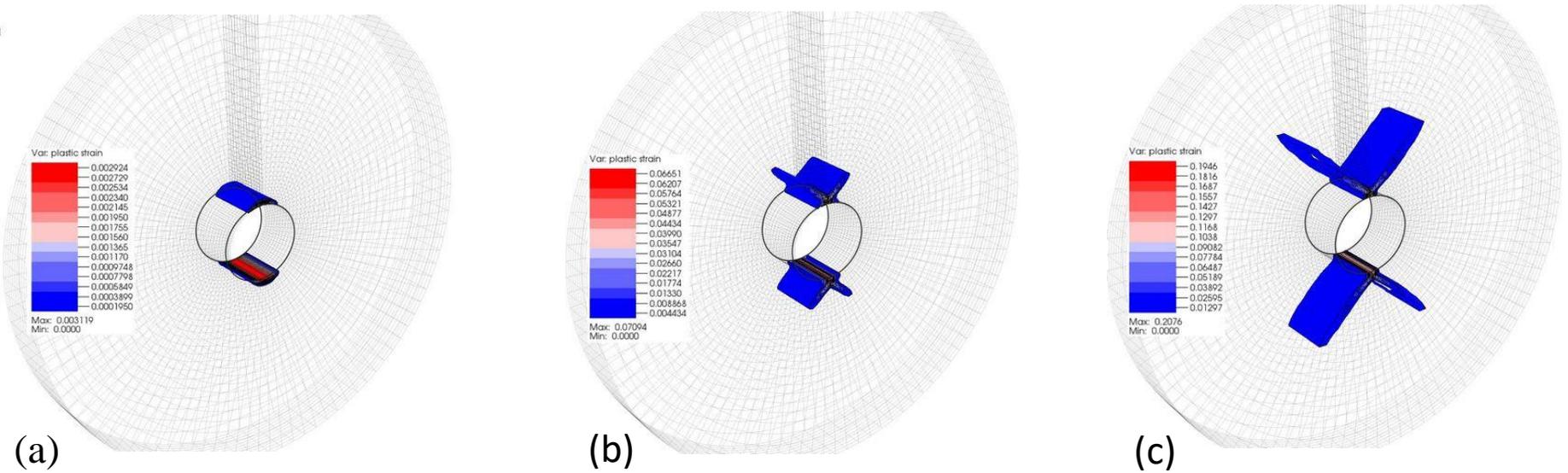


$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$$

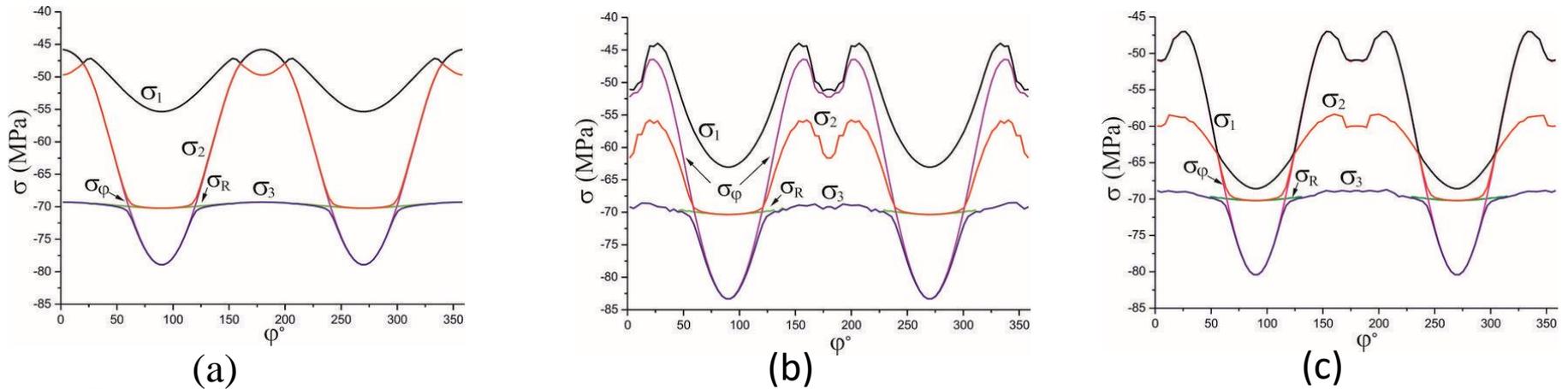
Сжатие $\rightarrow \sigma_i < 0$

Трёхмерная сетка и ориентация скважины в пространстве главных напряжений

Влияние ориентации скважины относительно главных направлений



Распределения интенсивности пластической деформации вокруг скважины при разной ее ориентации: (a) $\theta=0^\circ$; (b) $\theta=45^\circ$; (c) $\theta=90^\circ$



Распределение главных и нормальных напряжений вокруг скважины при разной ее ориентации: (a) $\theta=0^\circ$; (b) $\theta=45^\circ$; (c) $\theta=90^\circ$.

Моделирование процесса выбуривания керна

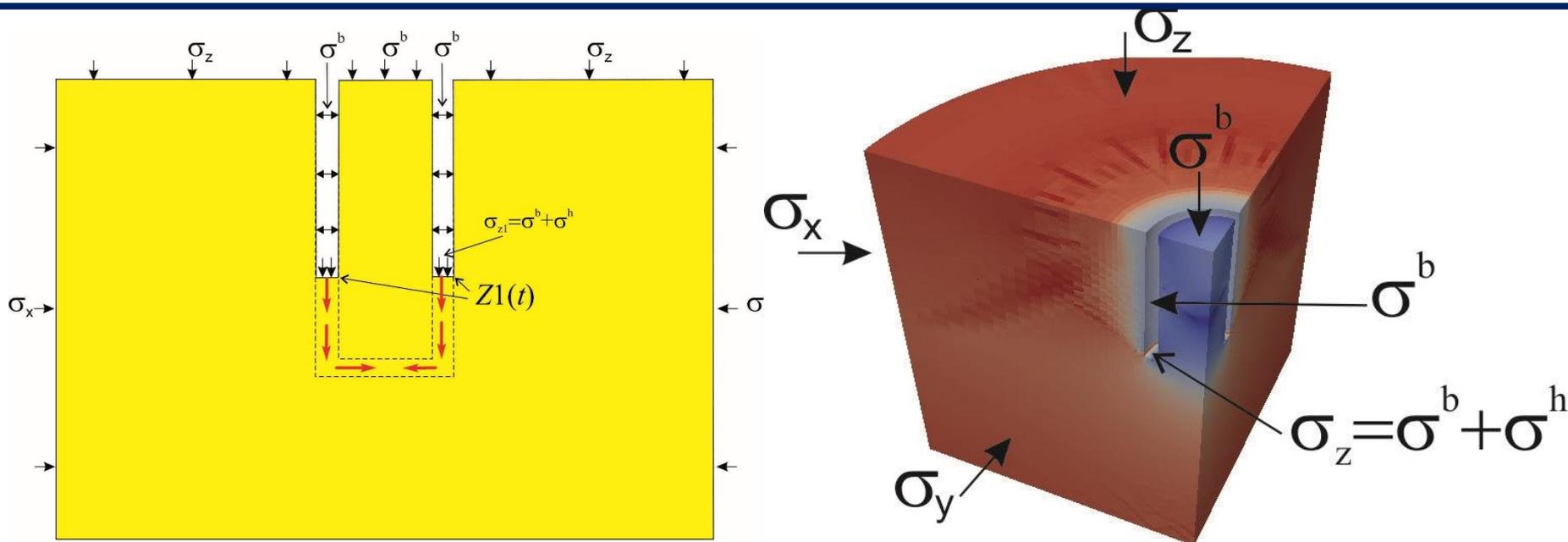


Схема изменения геометрии расчетной области и граничных условий

Изменение напряжений при имитации продвижения бурового инструмента на один слой ячеек за время t_1

$$s_x|_G = s_x^0(1 - t/t_1) \quad \sigma|_G = \sigma^0(1 - t/t_1) + \sigma^b t/t_1$$

$$s_y|_G = s_y^0(1 - t/t_1) \quad \sigma|_{Z1} = \sigma^b + \sigma^h$$

$$s_z|_G = s_z^0(1 - t/t_1)$$

σ^b - давление бурового раствора

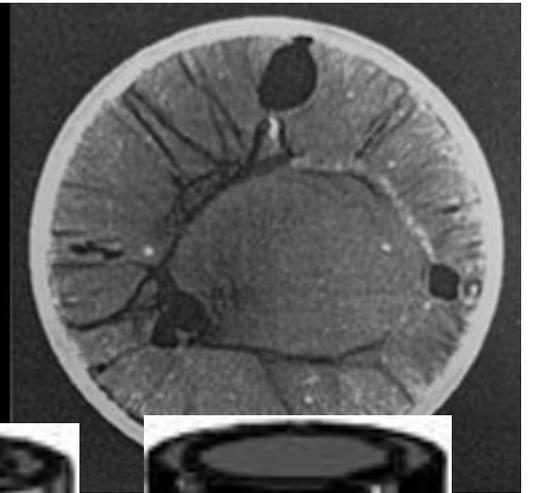
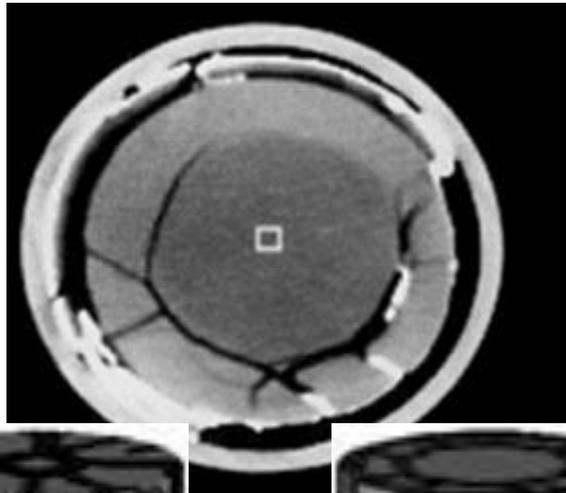
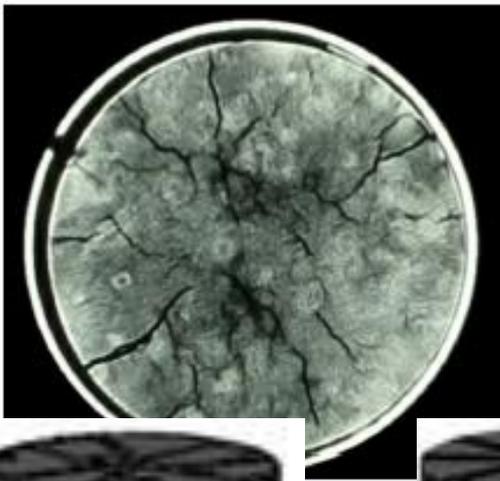
σ^0 - давление в породе

s_i^0 - компоненты девиатора

$$\sigma_{ij} = -\sigma\delta_{ij} + s_{ij}, \quad \sigma = -\sigma_{kk}/3$$

$G=B+C+Z1$, B – граница скважины, C – граница керна,
Z1 – основание разреза между керном и скважиной

(Ю.П. Стефанов, Р.А. Бакеев, А.В. Мясников)

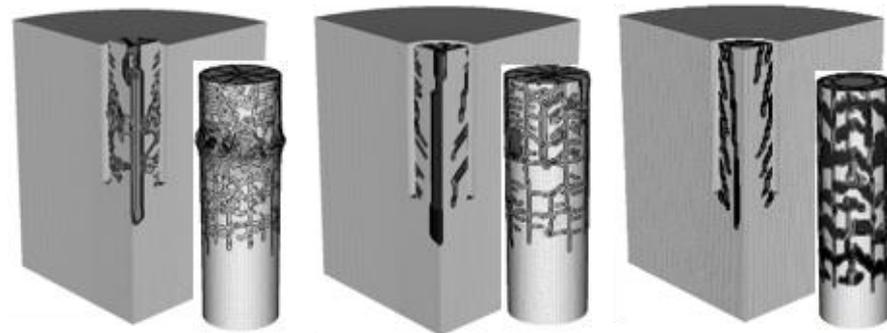


1) Отрывное и отрывно-сдвиговое разрушение керна происходит при большой разнице между главными напряжениями. Увеличение ДБР в допустимых пределах играет положительную роль и может перевести сильное разрушение в частичное. Роль НБИ может быть как отрицательной так и положительной.

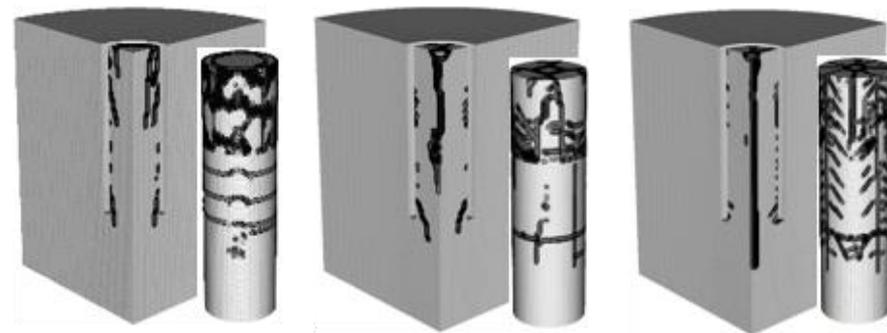
2) При близких главных напряжениях, возможно слабое разрушение или сохранение целостности керна даже при низкой прочностью на отрыв.

3) При низкой сдвиговой прочности угрозу представляют ослабленные (пластичные) пропластки, на границе которых происходит расслоение керна. Частичную стабилизацию может обеспечить повышение ДБР

Сильное разрушение



Частичное разрушение

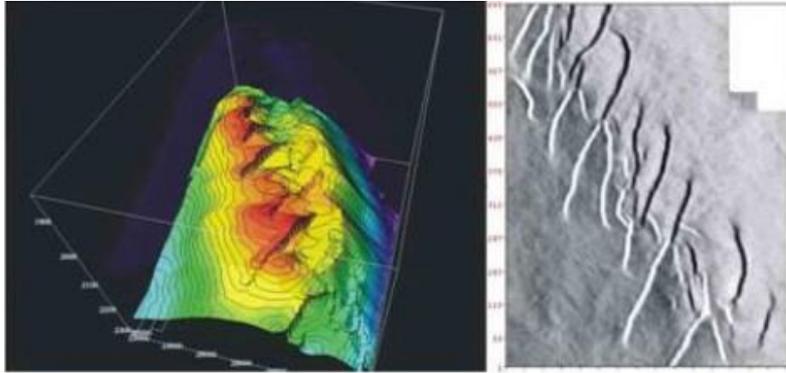


Слабое разрушение, целый керн

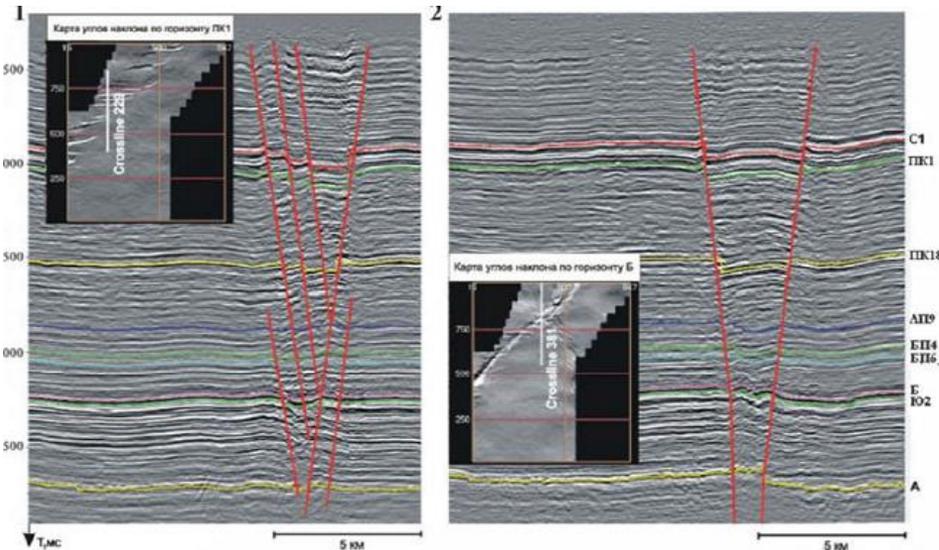


Уточнение строения залежи в трещиноватых коллекторах

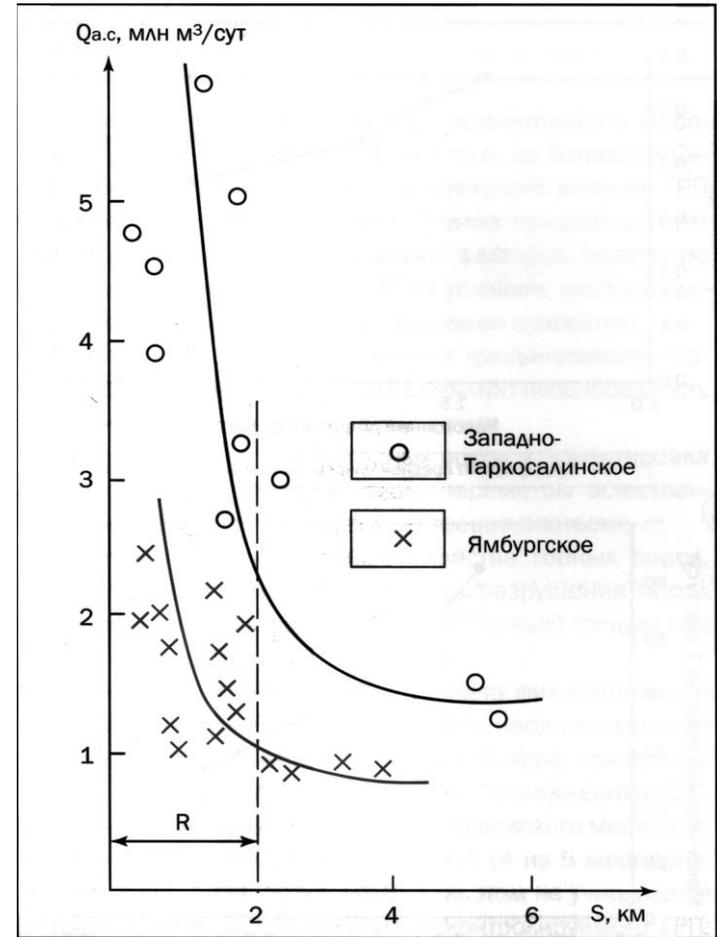
Актуально для разработки как углеводородов, так и для твердых ПИ



The structure of the suture zone of the Northern dome shift Ety-Pur shaft



Seismic sections of the North-Komsomolskaya Square. [Gogonenkov G.N. Timurziyev A.I.]



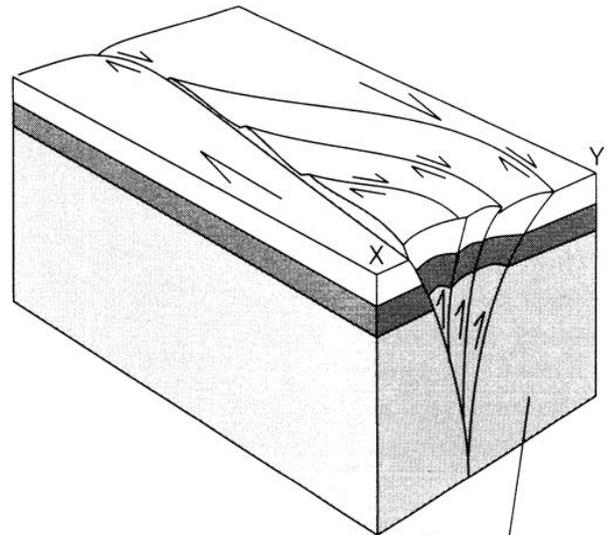
The dependence of the debit wells in the Cenomanian deposits of the West Tarkosalinskoye and Yamburg fields on the distance to faults (according to SN Bepalov and OV Bakueva, 1995) [Kashik AS, GN Gogonenkov, Timurziyev AI, 2009]

Зоны сдвига

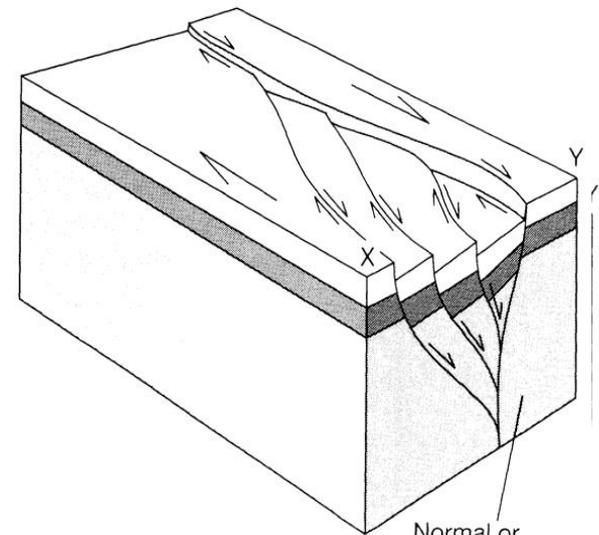


Photographs of Riedel shear systems in a Sheets Gulch area. (G.H. Davis et al. (2000))

Цветковые структуры

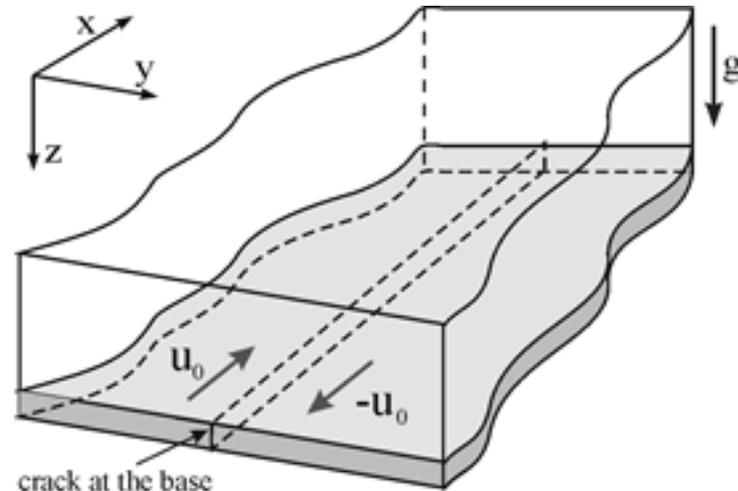
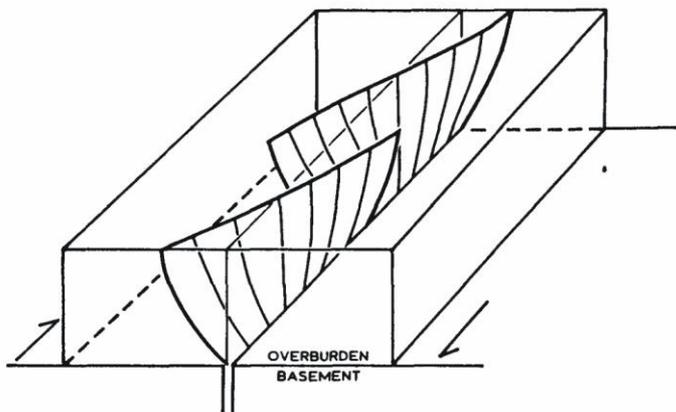


Reverse or positive flower structure



Normal or negative flower structure

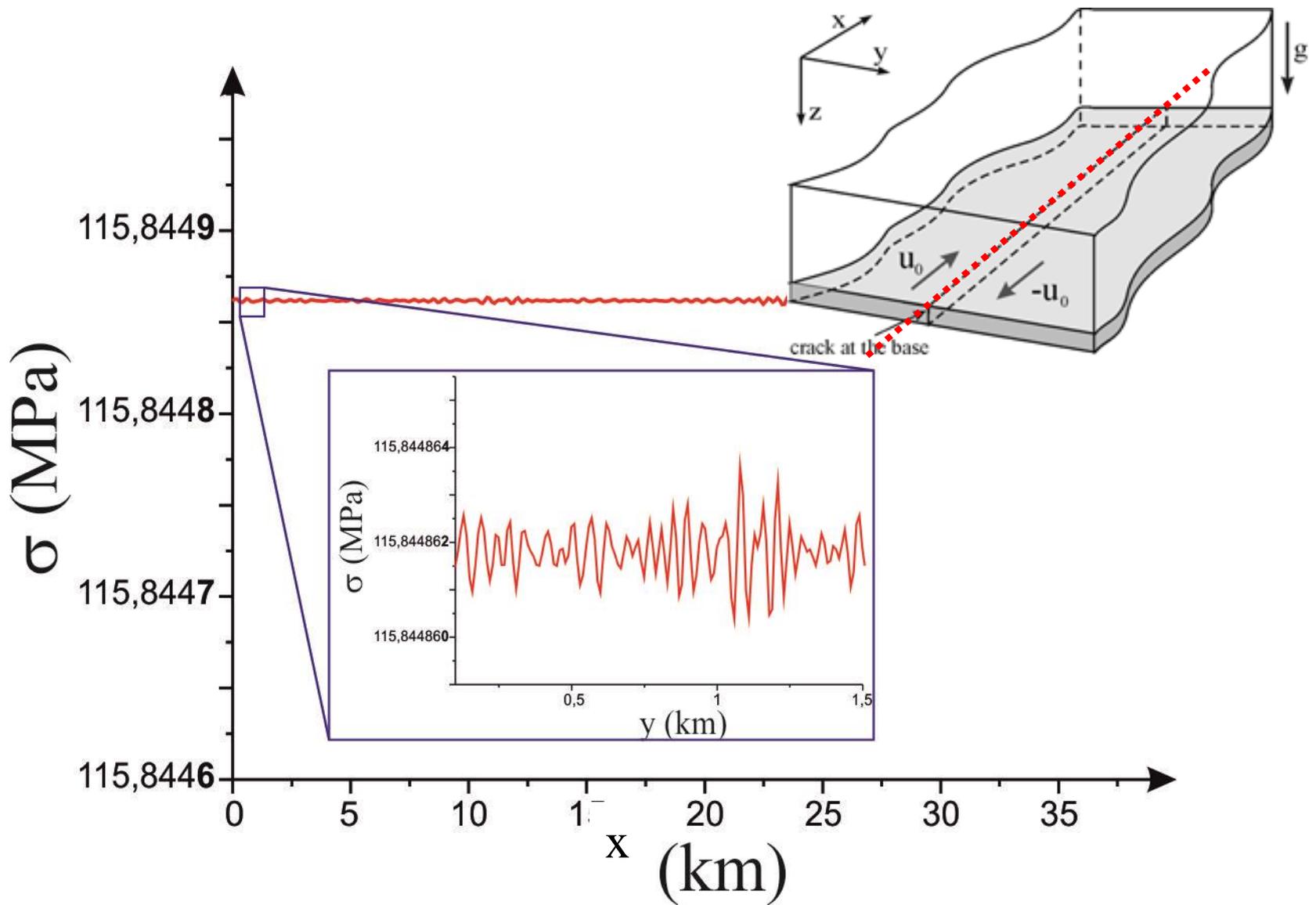
Схемы образования положительных и отрицательных структур (ru.scribd.com/document/228019099/14Strike-Slip-Faulting)



Предполагаемые формы поверхностей

R-сколов (Naylor and others, 1986)

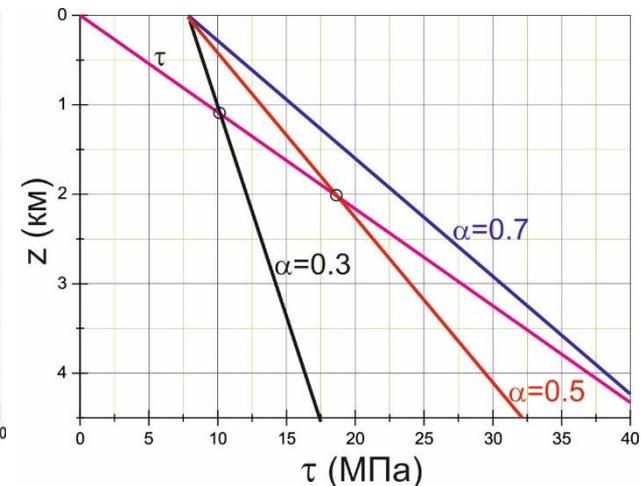
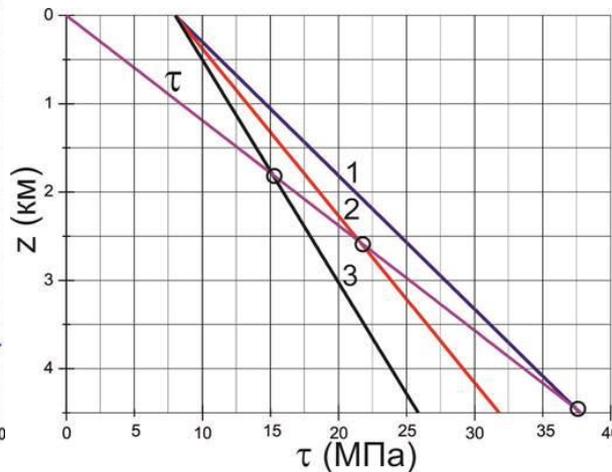
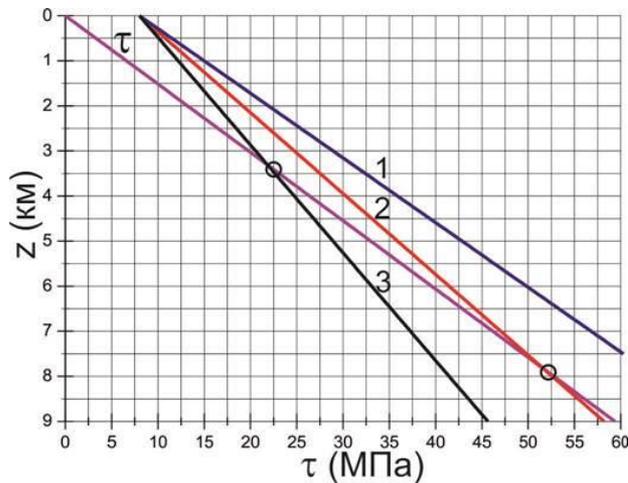
Схема к постановке задачи численного моделирования



Микроосциляції напружень вдоль лінії розріза в основанні на етапі предшествующому формованню зон локалізації деформації

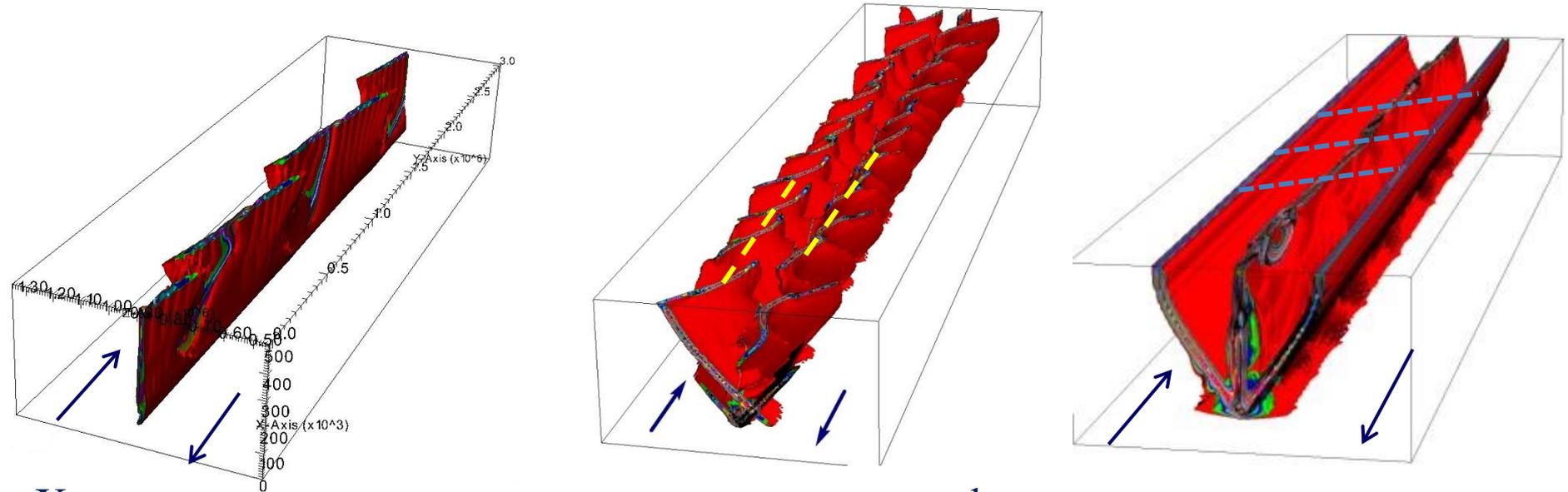
Физико-механические свойства

	$\rho, \text{ г/см}^3$	$K, \text{ ГПа}$	$\mu, \text{ ГПа}$	$Y_0, \text{ МПа}$	α	ν
Порода- I	2.2	12.8	5.34	8	0.1÷0.7	0.317
Порода- II	2.35	20.0	11.0	8	0.3÷0.5	0.267
Порода- III	2.2	11.1	8.3	8	0.1÷0.7	0.2

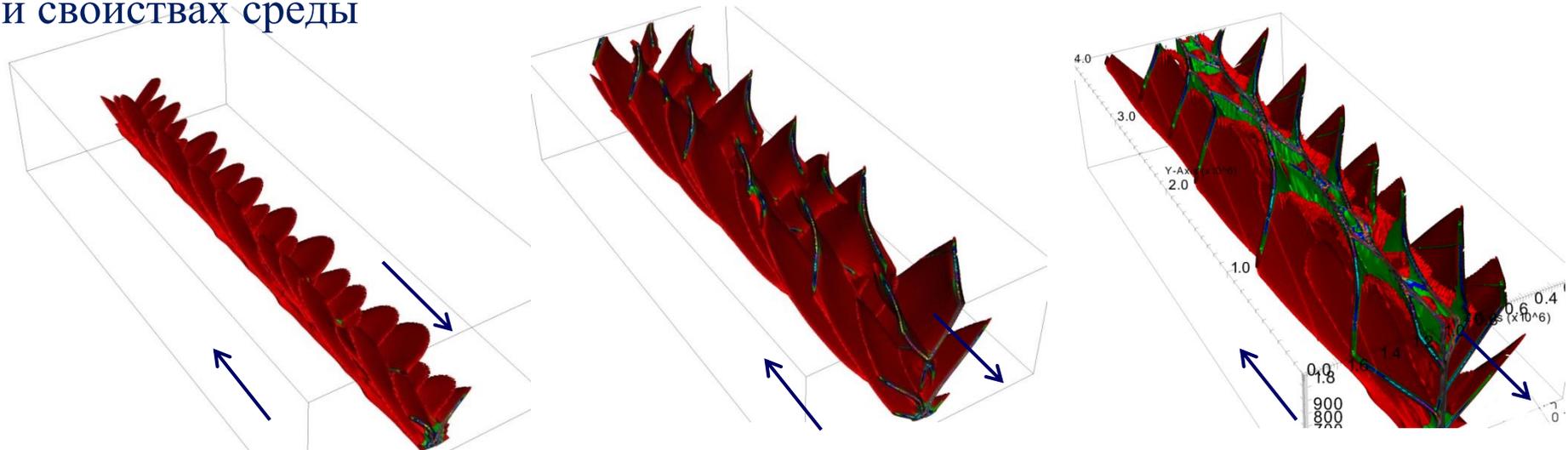


Графики изменения интенсивности касательных напряжений τ и прочности τ^* с глубиной (за счет изменения давления) при разных коэффициентах внутреннего трения: 1 – $\alpha=0.5$; 2 – $\alpha=0.4$; 3 – $\alpha=0.3$. (а) – порода-I, (б) – порода-II, (б) – порода-III
Пересечение τ и τ^* соответствует переходу в неупругое (упругопластическое) состояние

Расчет формирования нарушений при сдвиге основания



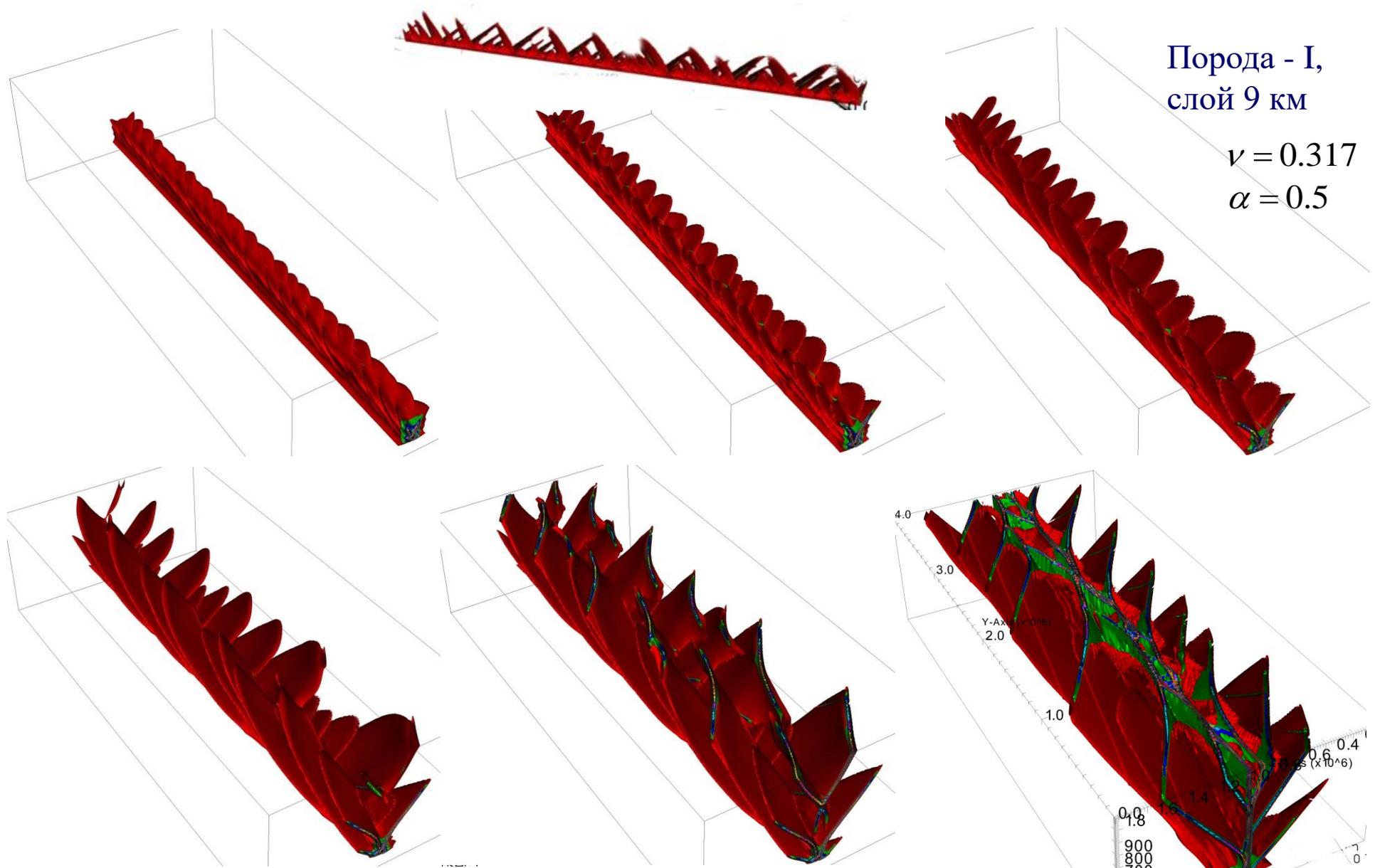
Характерные типы строения зон локализации деформации при разных условиях и свойствах среды



Этапы развития зон нарушений в условиях сдвига
(Ю.П. Стефанов, Р.А. Бакеев)

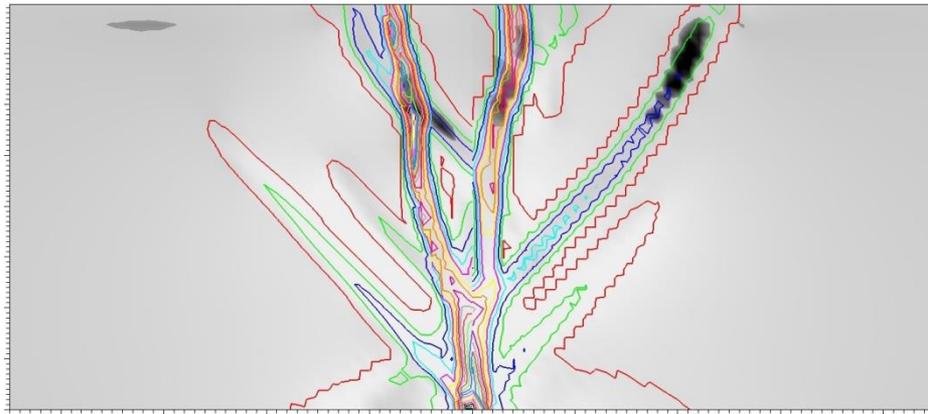
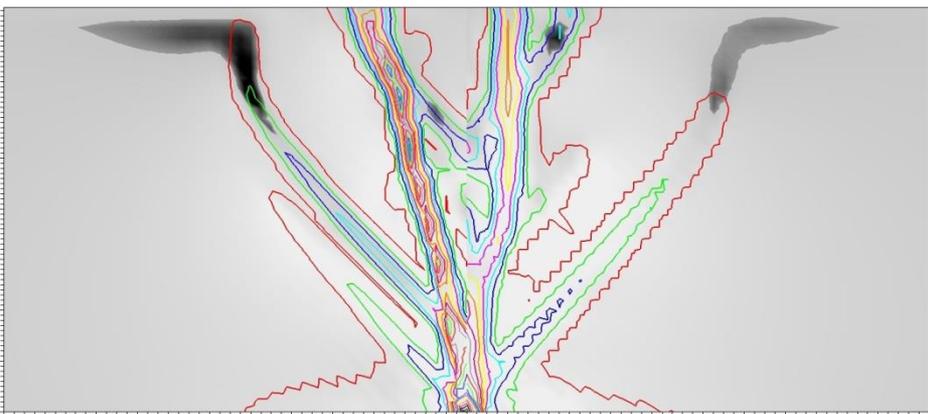
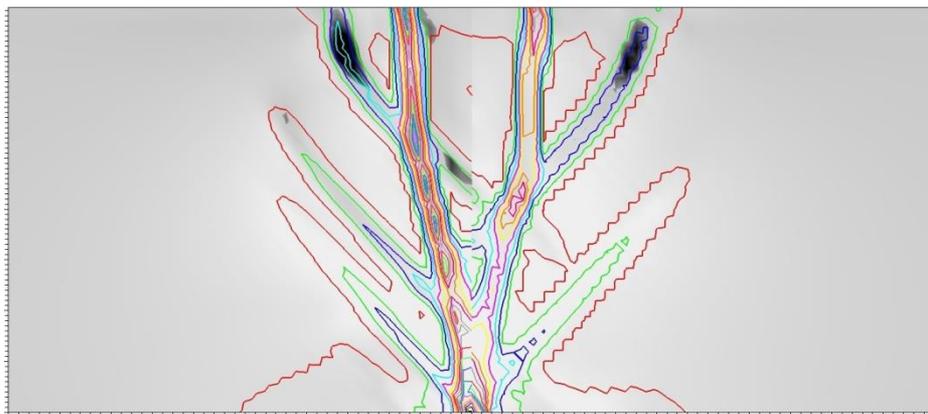
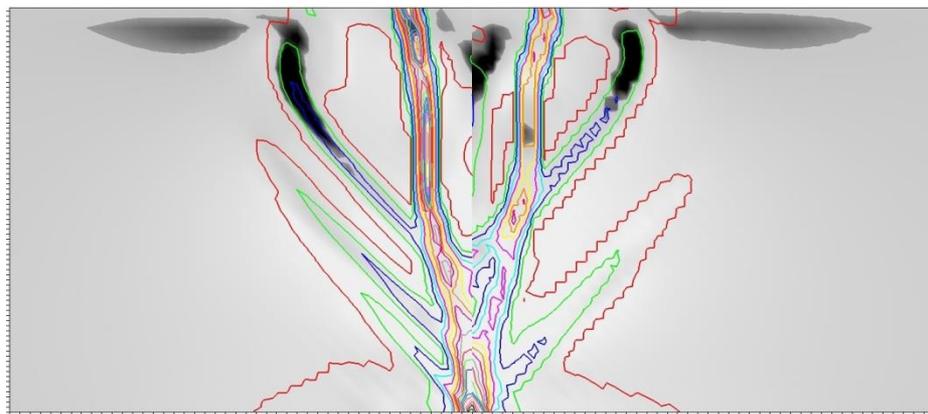
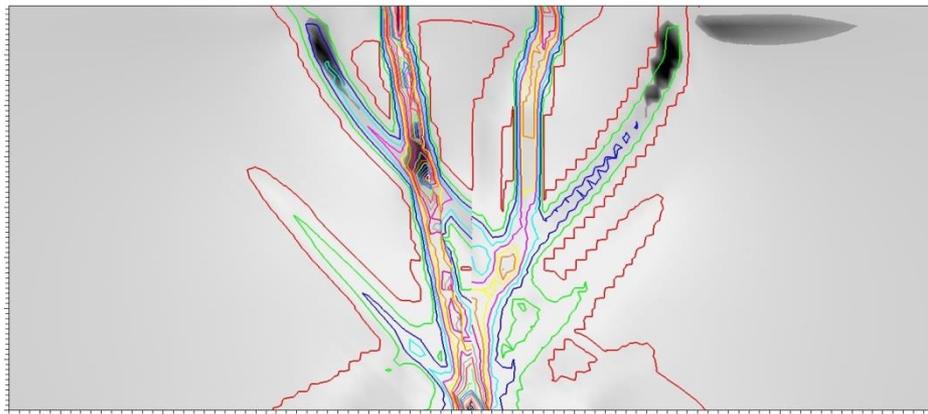
Порода - I,
слой 9 км

$\nu = 0.317$
 $\alpha = 0.5$



Парное зарождение и развитие зон нарушений в виде створок устрицы

(Ю.П. Стефанов, Р.А. Бакеев)

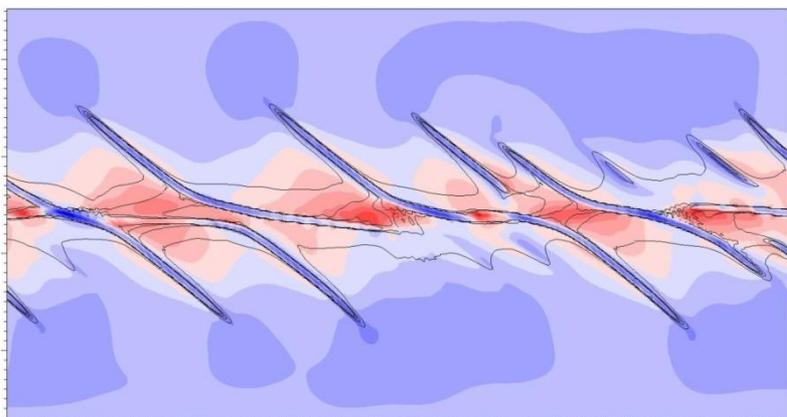


Песчаник - I, $\nu = 0.317$
слой 4 км $\alpha = 0.3$

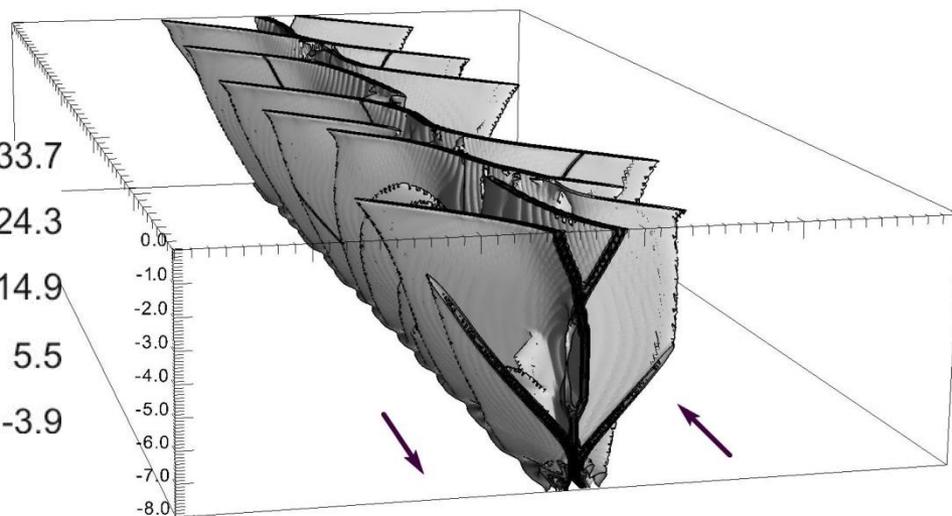
Контурные нарушения и приращения давления при сдвиге блоков основания 32 м в серии вертикальных сечений (расстояние между сечениями 500 м)

(Ю.П. Стефанов, Р.А. Бакеев)

Отрицательные структуры

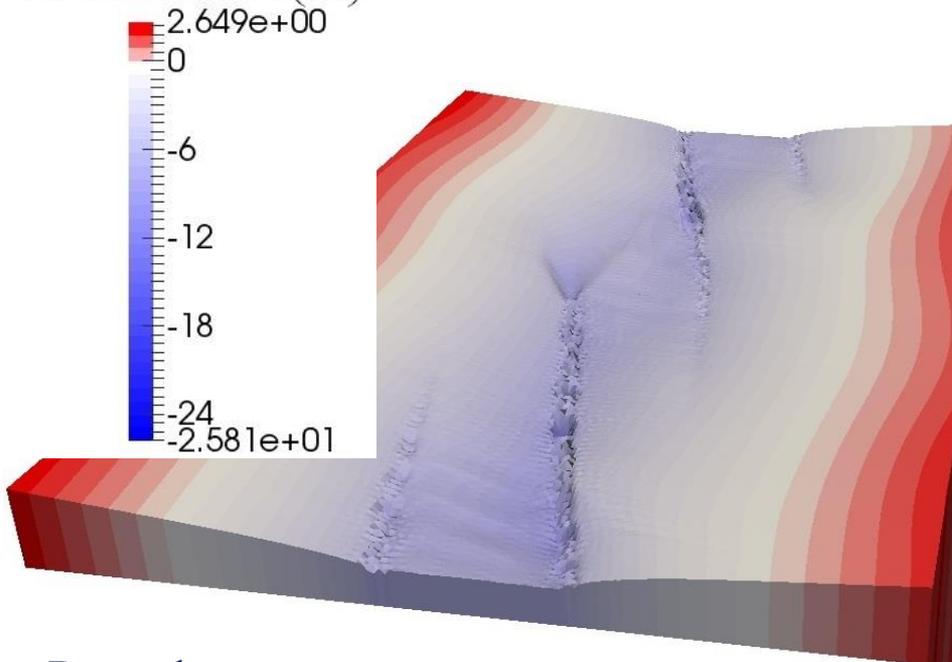


Приращения давления на глубине 500 м.

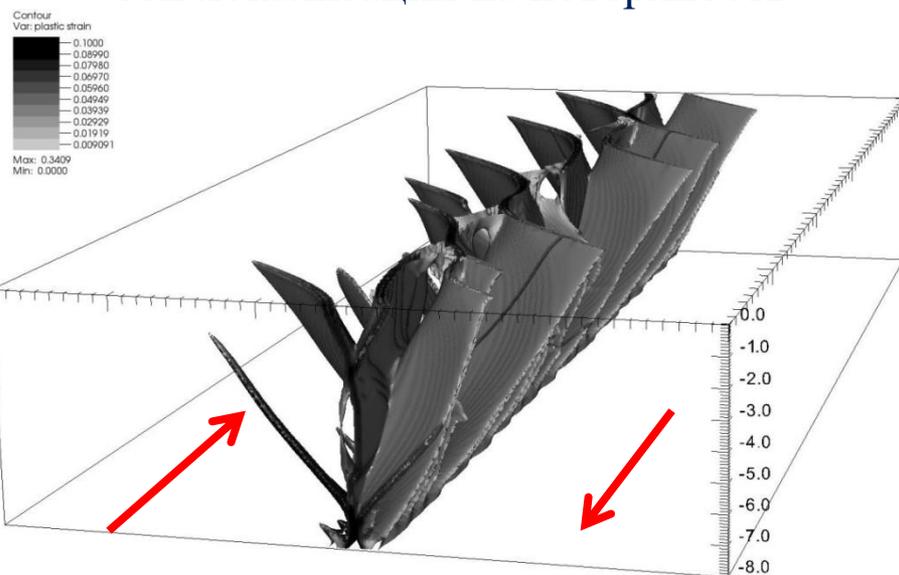


Структура нарушений после выхода зон локализации на поверхность

displacement Z (m)

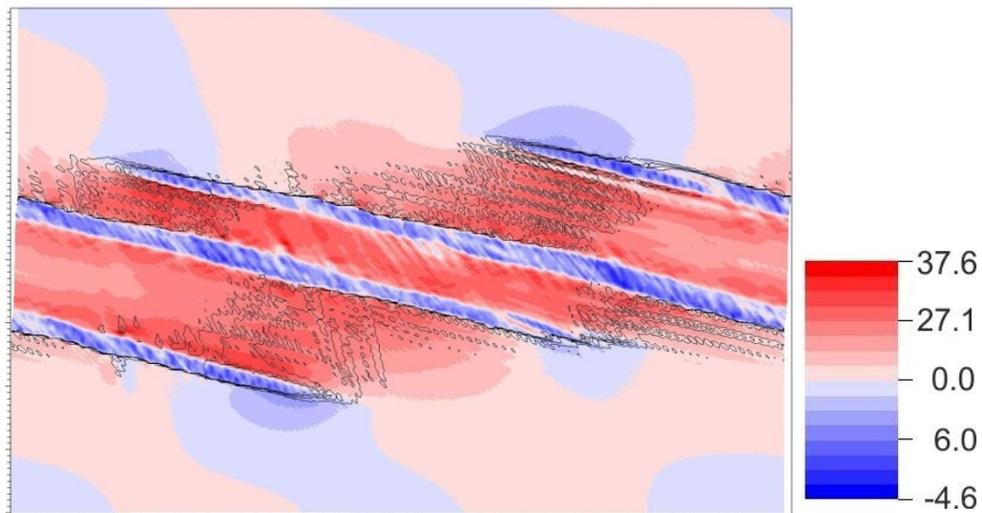


Рельеф поверхности

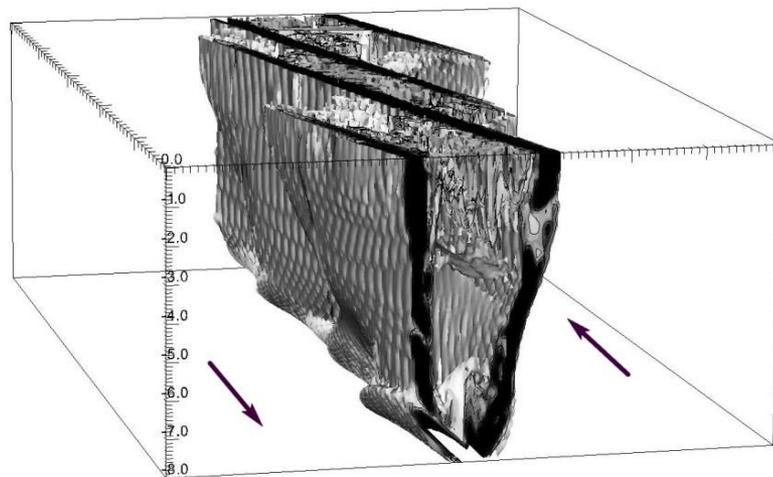


(Ю.П. Стефанов, Р.А. Бакеев, М.Г. Леонов)⁶⁹

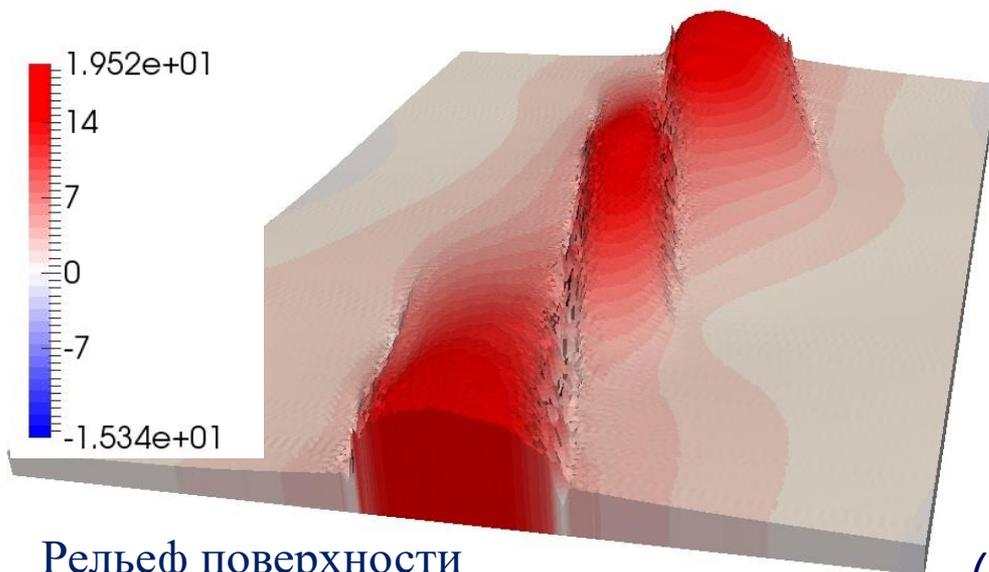
Положительные структуры



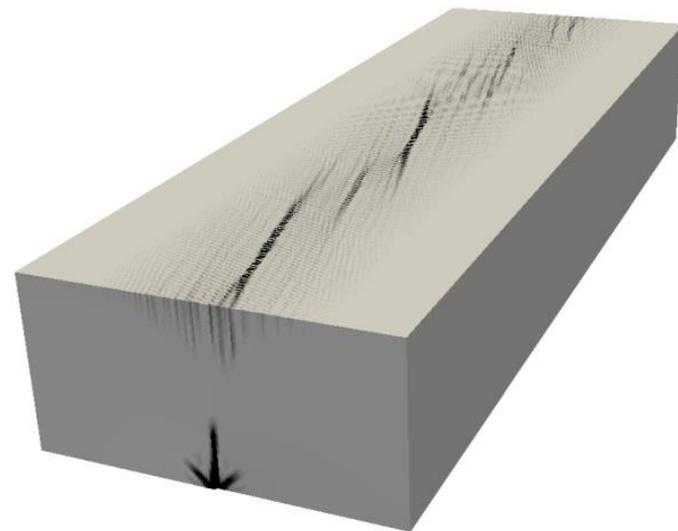
Приращения давления на глубине 500 м.



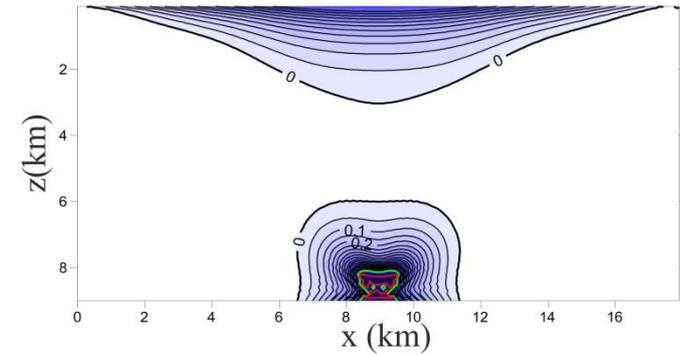
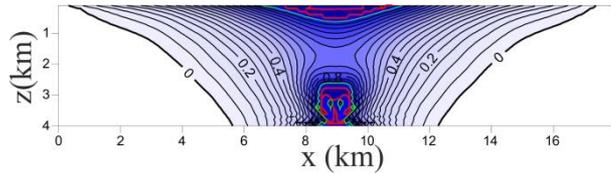
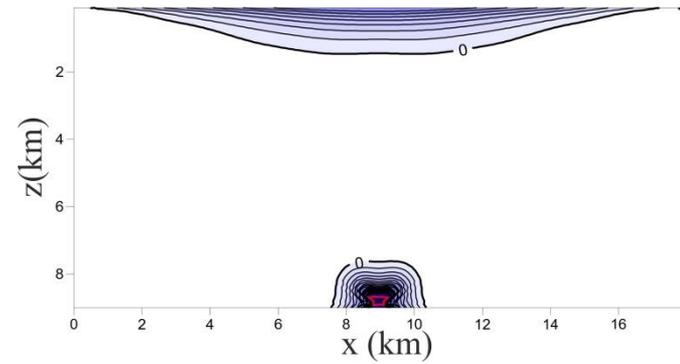
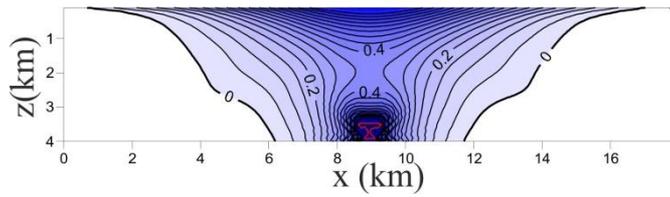
Структура нарушений после выхода зон локализации на поверхность



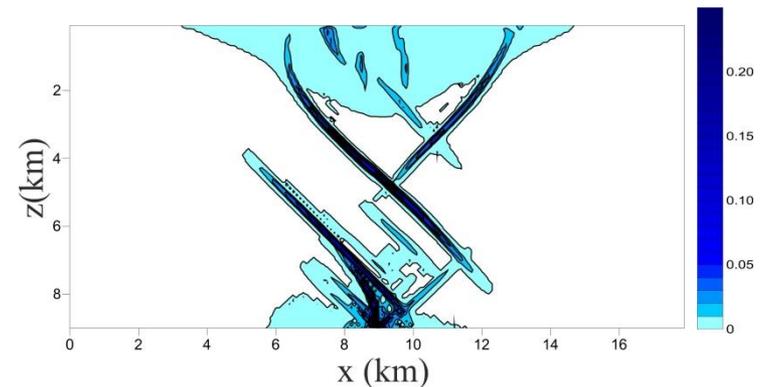
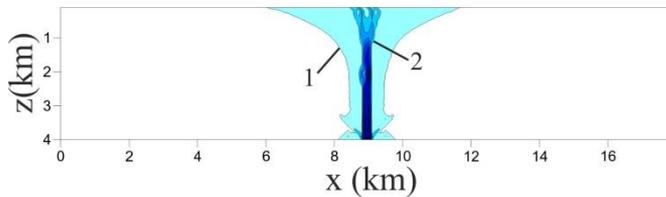
Рельеф поверхности



(Ю.П. Стефанов, Р.А. Бакеев, М.Г. Леонов)

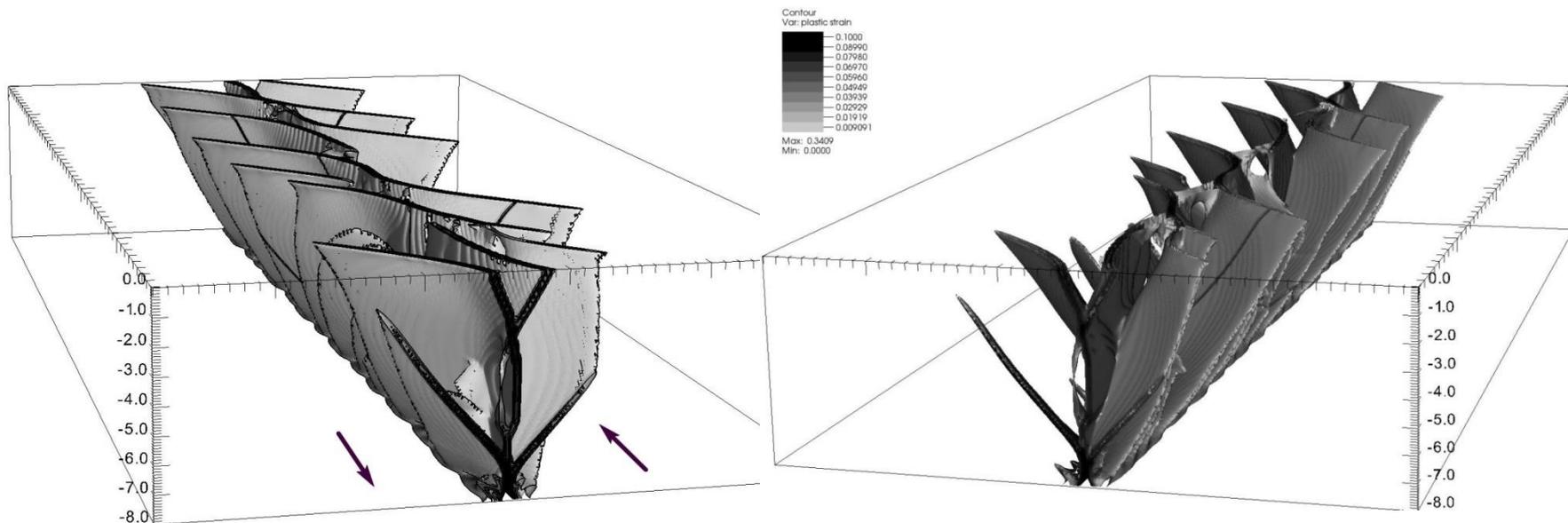
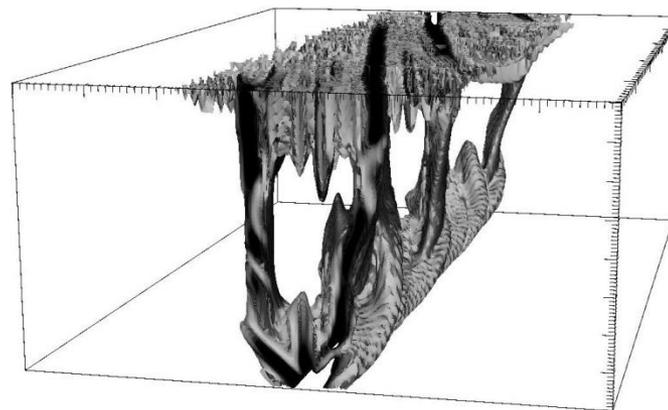
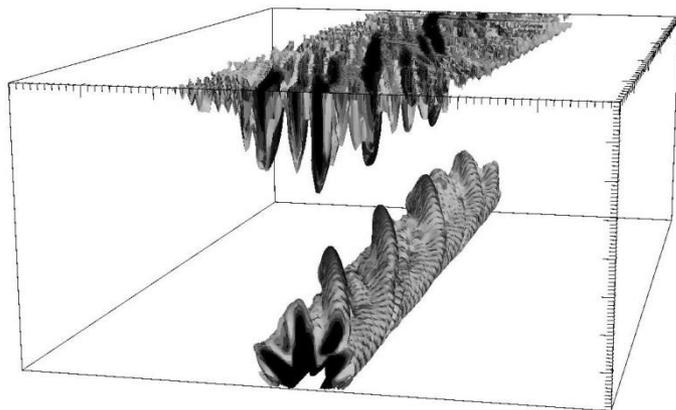


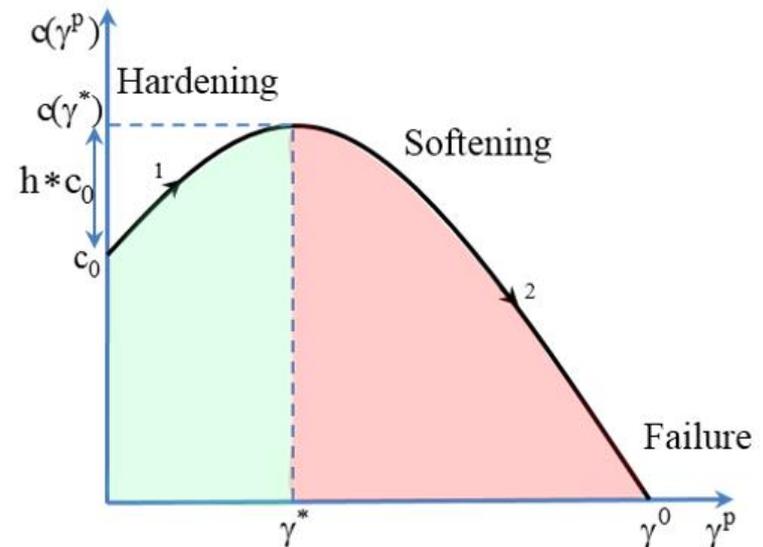
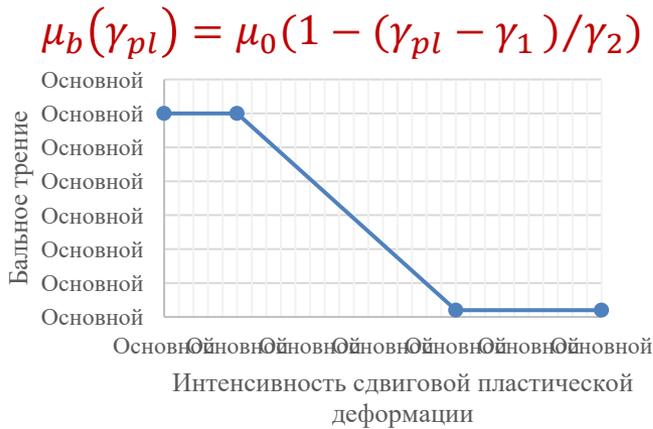
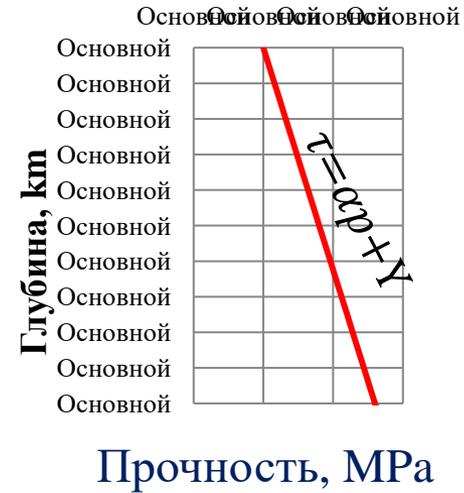
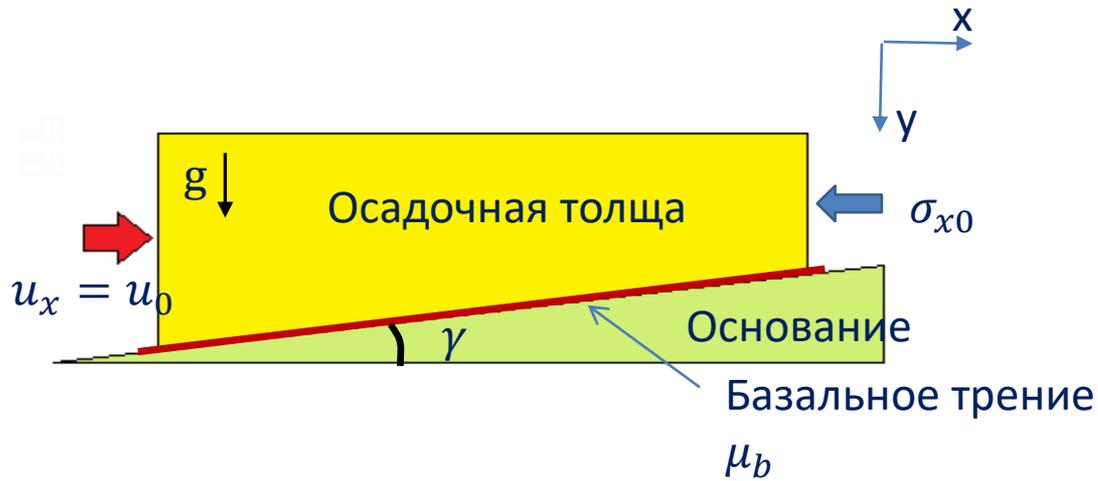
Effective stress contours for the rock massifs of thickness 4 and 9 km at the onset of inelastic deformation and early in its development



Plastic strain intensity contours in the rock massifs of thickness 4 km (a) and 9 km (b)

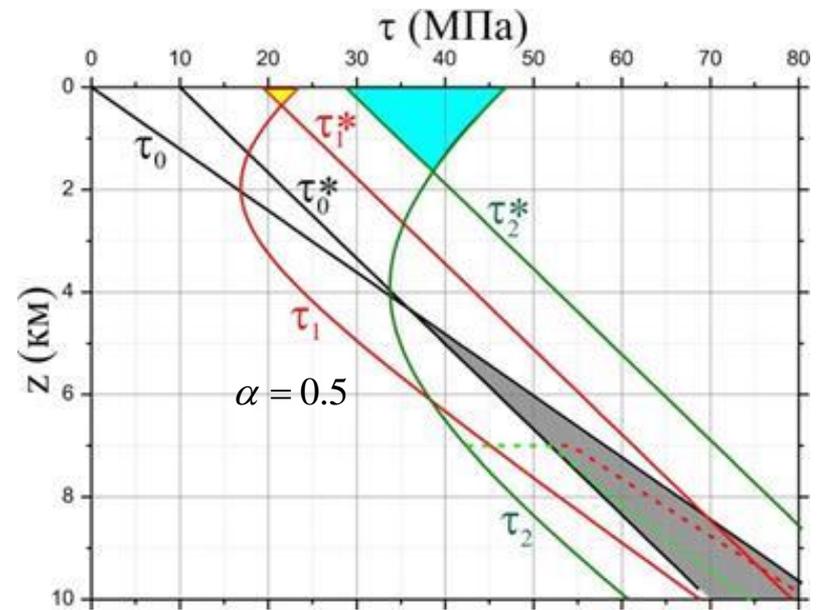
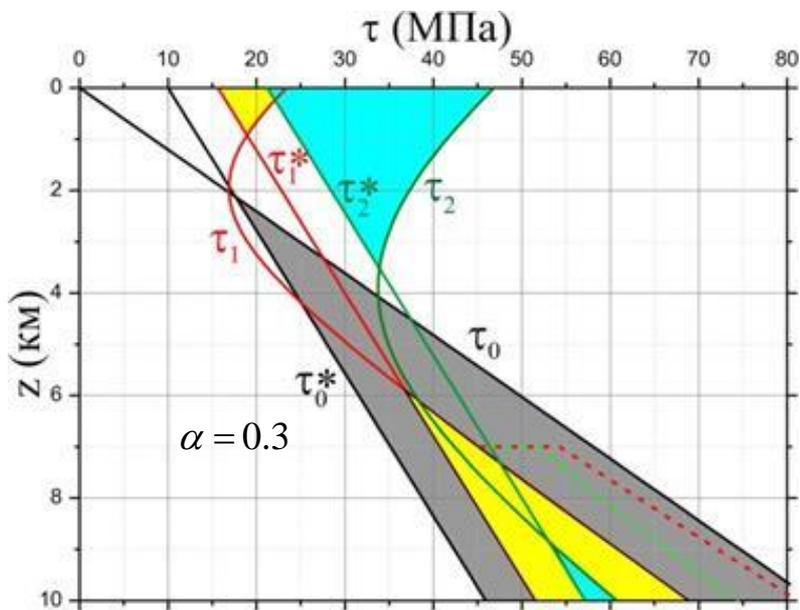
Этапы развития зон локализованной деформации





Изменение трения на подошве слоя в ходе смещения и роста сдвиговой деформации
(Татаурова А.А., Стефанов Ю.П.)

Упрочнение и разупрочнение при псевдопластической деформации



Распределения прочности и интенсивности касательных напряжений с глубиной после первого этапа нагружения индекс (0), при дополнительном горизонтальном сжатии $\Delta\sigma=45$ МПа – (1) и $\Delta\sigma=90$ МПа – (2) . Пунктиром показаны графики с учетом возможного влияния трения. Цветом выделены области неупругого состояния.

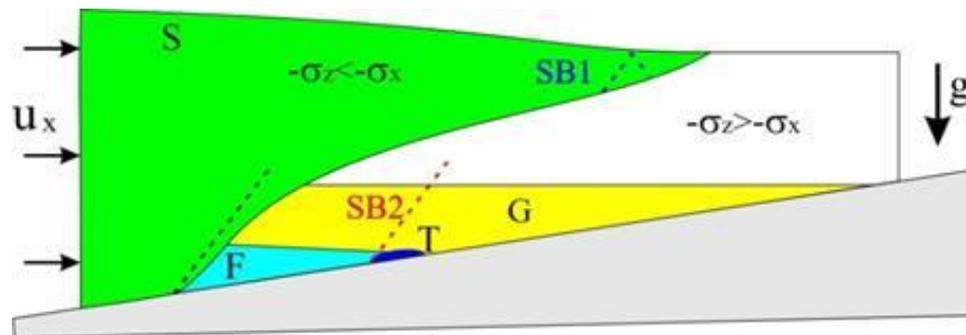
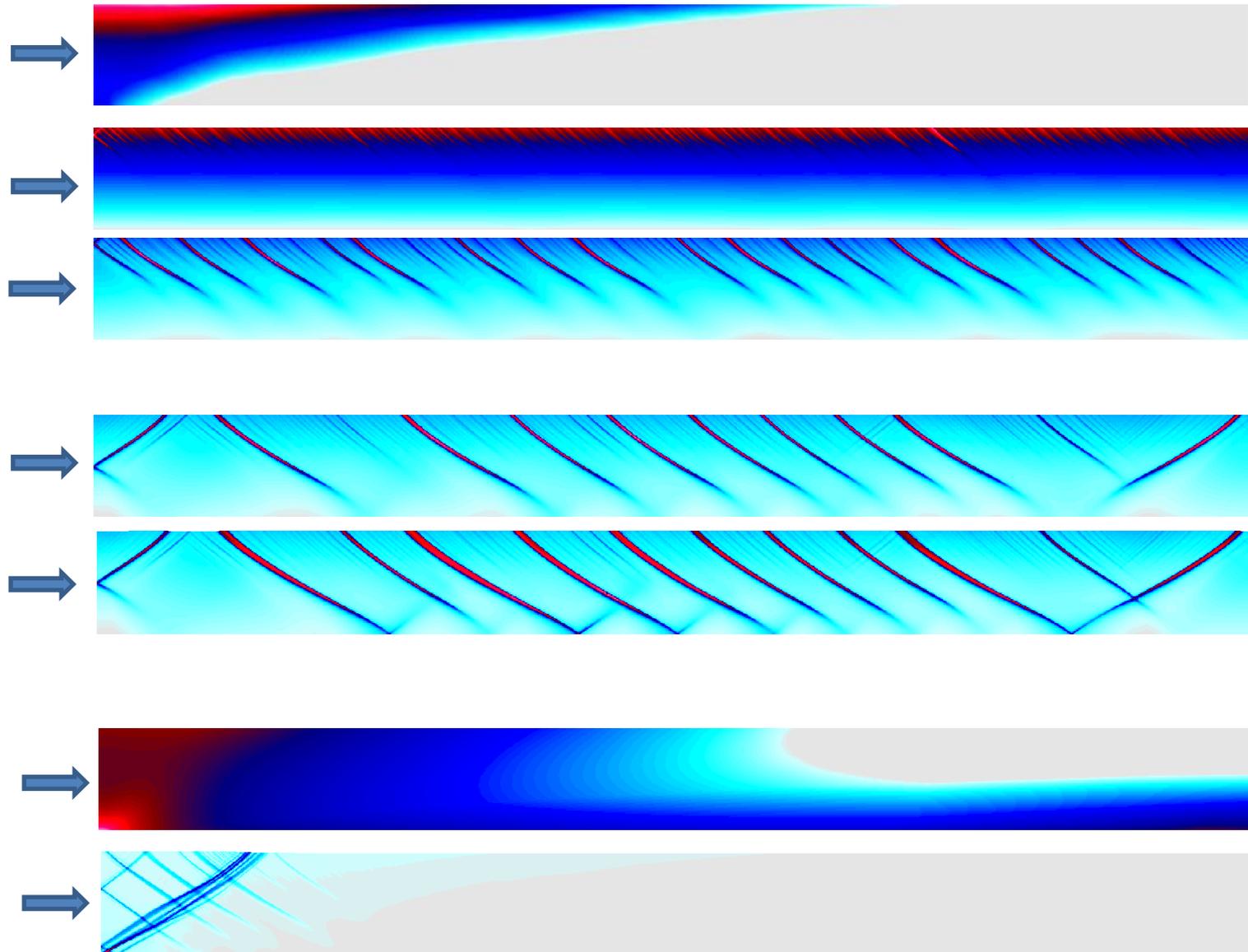
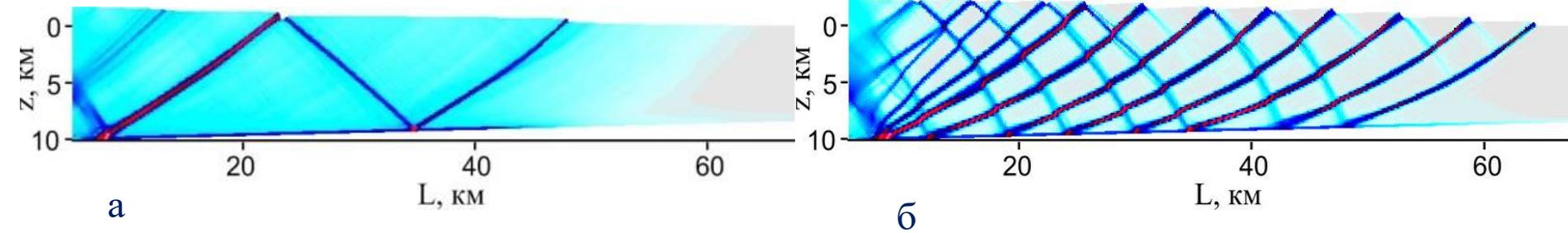


Схема развития процесса необратимой деформации при латеральном сжатии деформируемого слоя.

Зарождение и развитие полос локализованного сдвига при горизонтальном сжатии слоя геосреды





Характерный вид образования полос локализованного сдвига: а) в сухой среде, б) в насыщенной среде.

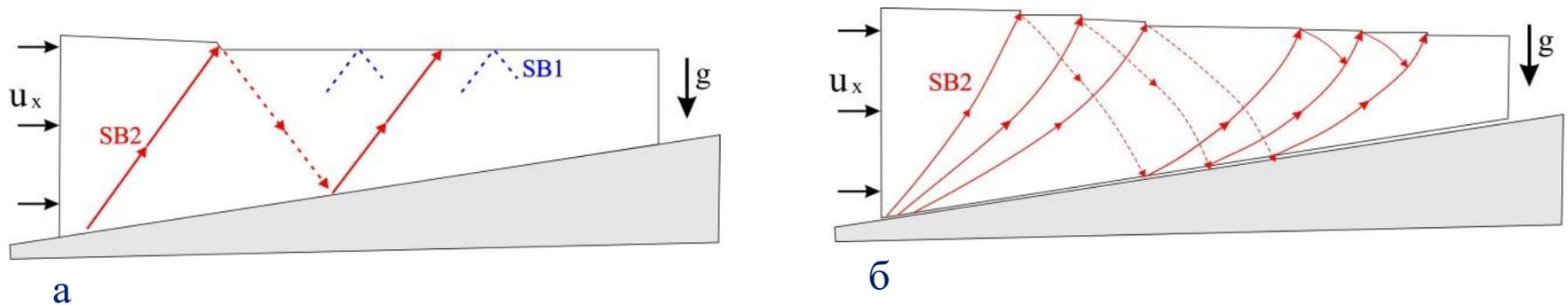
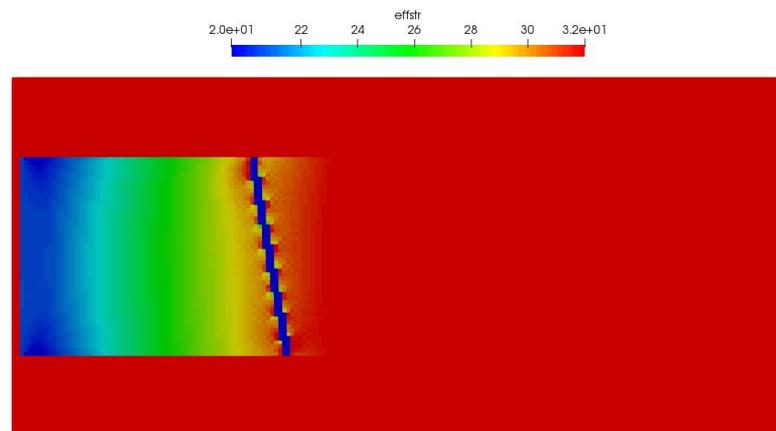
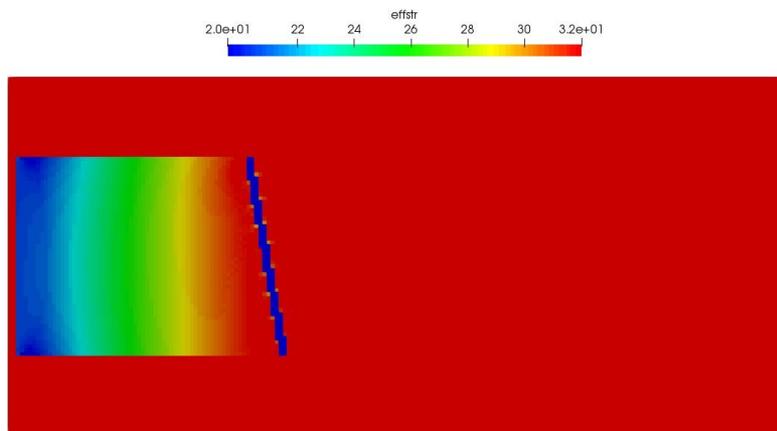
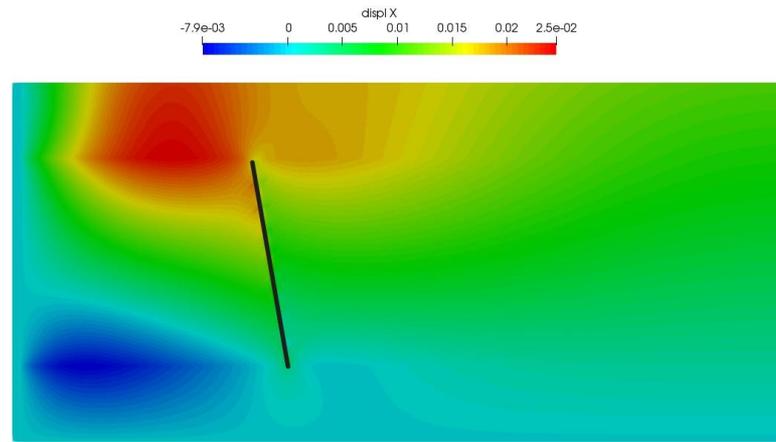
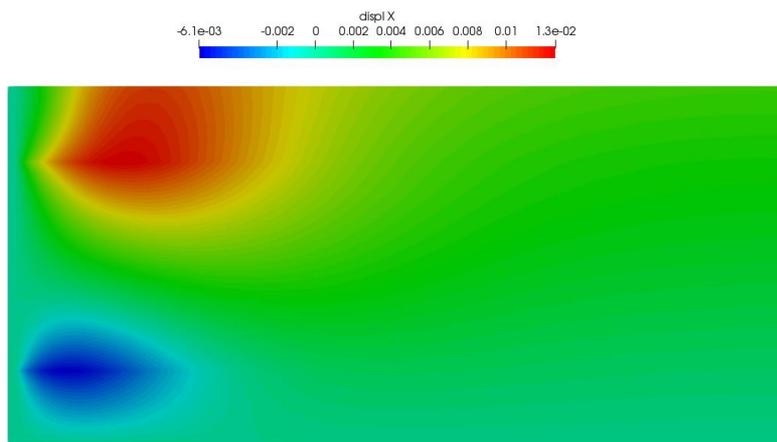


Схема формирования полос локализованного сдвига: а) в среде с высоким коэффициентом внутреннего трения; б) в пластичной среде с низким внутренним трением и в насыщенной среде

Инициация разлома при росте порового давления

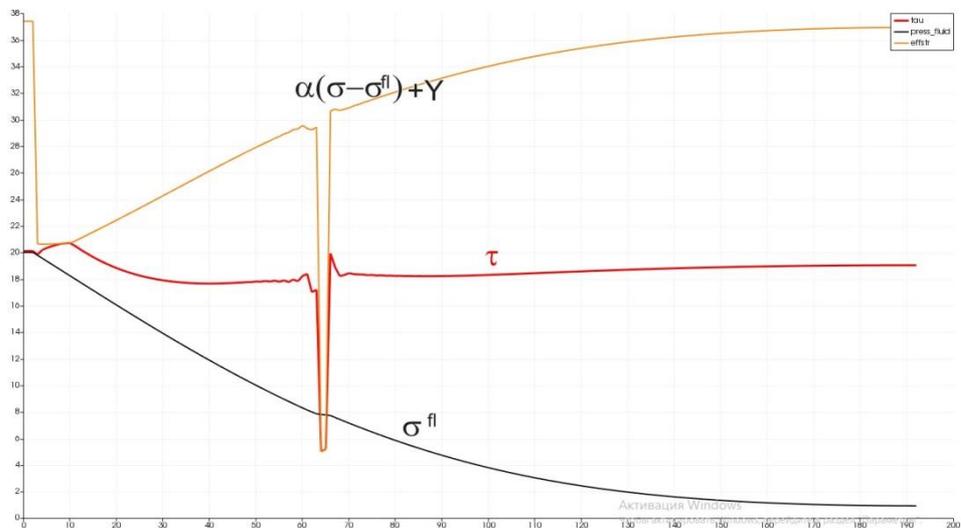


Изменение эффективной прочности с ростом порового давления

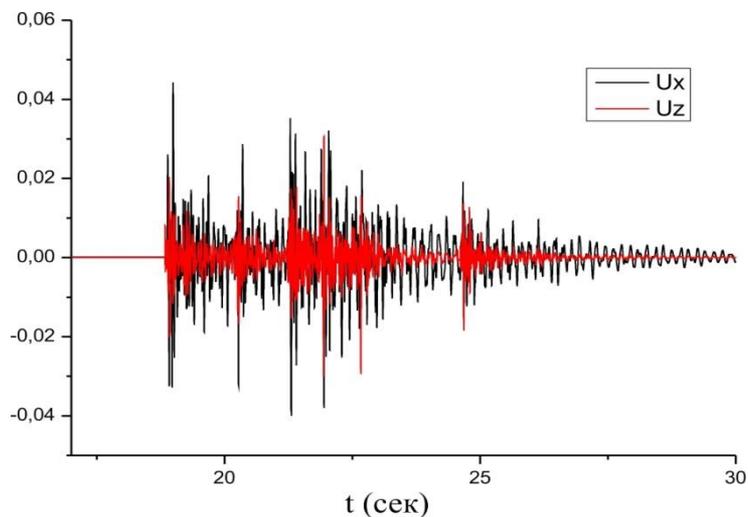


Горизонтальные смещения с ростом порового давления в процессе фильтрации

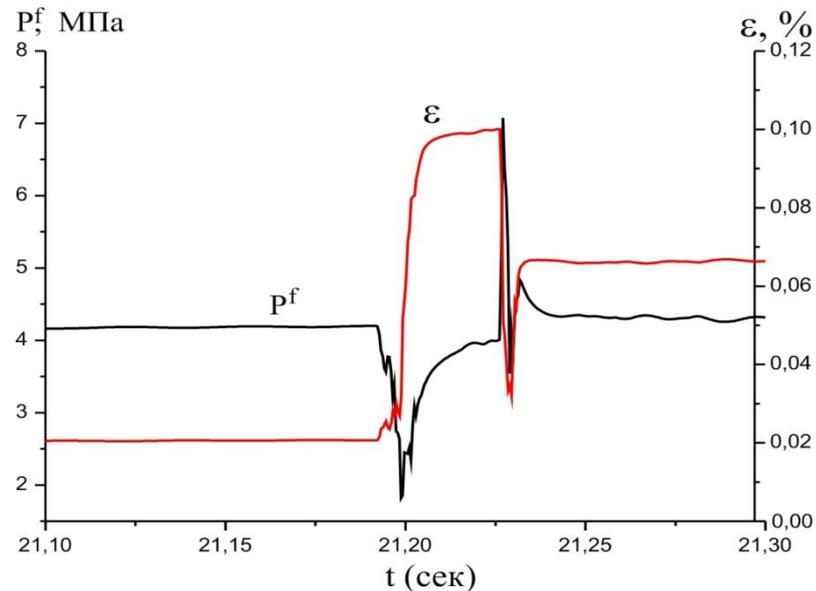
Инициация разлома при росте порового давления



Изменение эффективной прочности с ростом порового давления



АЭ при инициации разлома



Скачек порового давления и объемной деформации при инициации разлома

Заключение

Неоднородное строение горных пород с контрастными свойствами включений, наличие пористости и трещиноватости приводит к ряду особенностей их поведения под нагрузкой:

- Нелинейность упругих свойств при не большом сжатии, а также в зонах концентрации напряжений (зонах разрежения)
- Зависимость прочностных свойств от напряженного состояния
- Объемная деформация при деформации за пределом упругости (дилатансия и компакция), меняется пористость и трещиноватость
- Разная ориентация полос локализованного сдвига и трещин в зависимости от напряженного состояния и режима развития деформации (дилатансии или компакции)
- Влияние флюида на прочностные свойства

Для описания процессов деформации горных пород за пределом упругости необходимо учитывать изменения параметров модели в ходе процесса. Когезия, внутреннее трение, дилатансия зависят от напряженно-деформированного состояния, сдвиговой и объемной частей необратимой деформации

Заключение

Горные породы:

- Процессы деформации и разрушения образцов горных пород могут быть описаны в рамках упругопластической постановки (и роста трещин) с учетом нелинейности на разных этапах нагружения и разгрузки. Параметры модели зависят от текущего напряженно-деформированного состояния)

Описание процессов в земной коре может потребовать учета:

- Реологии (вязкая деформация, ползучесть и релаксация напряжений)
- Кинетики поврежденности (понижение прочностных свойств с течением времени, ускорение процессов, обострение, локализация)
- Физико-химических преобразований
- Учет порового давления в связной постановке (поро-упругопластичность)
- Изменение внутреннего трения в процессе деформирования (трение является чувствительным параметром к реологическим и кинетическим свойствам и т.о. зависит от скорости процесса)

ОСНОВНЫЕ ВОПРОСЫ И ПРОБЛЕМЫ

- Разные пути нагружения и разгрузки внутри среды за счет неоднородности структуры разных масштабов: включений, пор и трещин.
 - Неоднородное НДС и внутренние напряжения.
 - Связные задачи поро-упругопластичности
 - Физико-химические эффекты и фазовые преобразования
- Исходные данные о строении, свойствах и нагрузке

Спасибо за внимание!

THANK YOU!