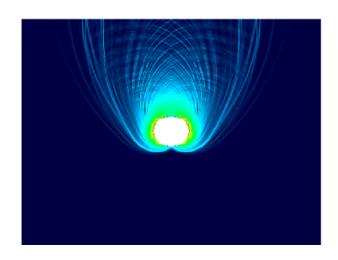
# Деформация и разрушение горных пород и моделирование геомеханических процессов

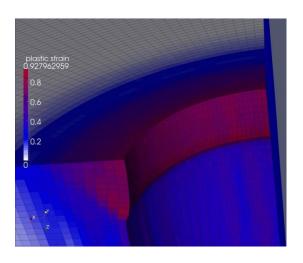
*Ю.П. Стефанов*, ИНГГ СО РАН, Новосибирск, в.н.с., д.-ф.м.н

**А.В.** *Мясников*, Сколтех, Сколково, г.н.с., д.-ф.м.н

**Р.А. Бакеев,** ИФПМ СО РАН, Томск, м.н.с., к.-ф.м.н

**А.С. Романов**, ТГУ, Томск

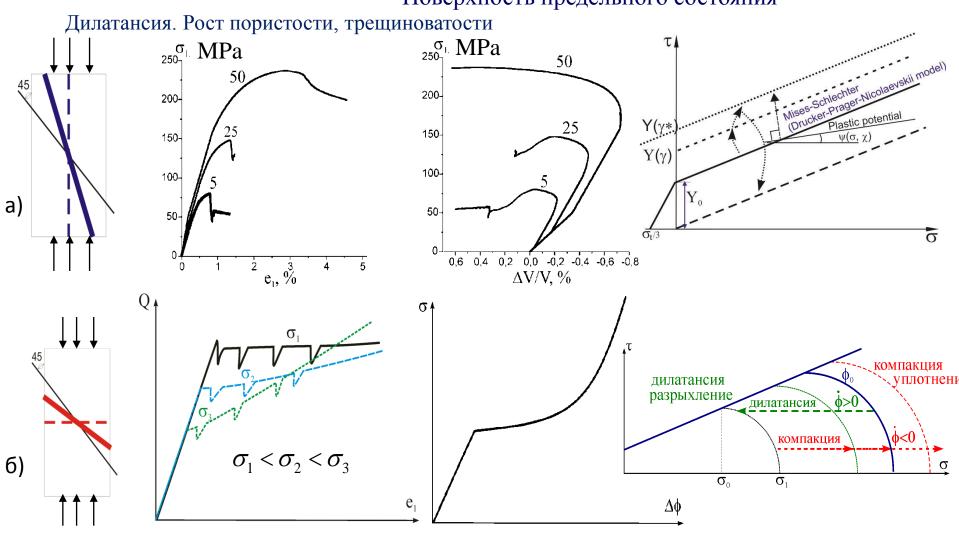






## Дилатансия и компакция

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



Ориентация зон локализации деформации, типичные диаграммы нагружения вид предельных поверхностей для пород с (а) низкой и (б) высокой пористостью

#### 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:

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

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

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

#### Гипоупругость:

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

• Пластичность: комбинированная предельная поверхность, неассоциированный закон течения

Функция текучести

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

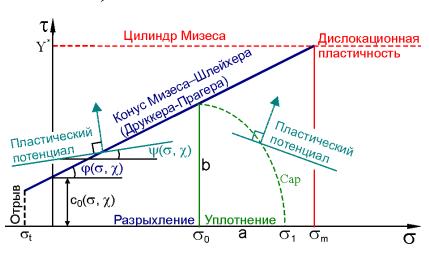
Пластический потенциал:

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

Пластическая деформация

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

+ начальные условия + граничные условия



Общий вид предельной поверхцости

#### Предельная поверхность:

#### Пластический потенциал:

$$f_1(\sigma, \tau) = \tau - \alpha \sigma - c$$
 при  $\sigma_t \le \sigma \le \sigma_0$ 

$$\sigma_t \leq \sigma \leq \sigma_0$$

$$g(\sigma, \tau, \varepsilon^{p}) = -\Lambda \sigma + \tau$$

$$f_2(\sigma, \tau) = \frac{(\sigma - \sigma_0)^2}{a^2} + \frac{\tau^2}{b^2} - 1 = 0$$
 при  $\sigma > \sigma_0$   $\sigma = -\sigma_{kk}/3 = P$ ,  $\tau = (s_{ij}s_{ij}/2)^{1/2}$ 

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

 $c, \alpha, \Lambda$  - параметры

Упрочнение и разупрочнение:

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

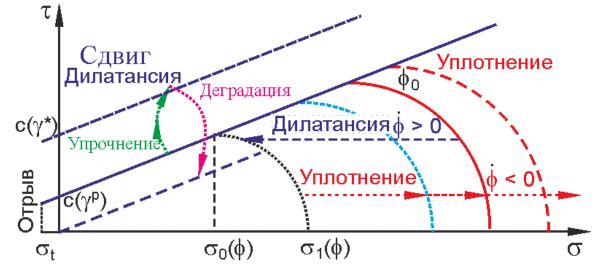
$$A(\gamma^{p}) = 2\frac{\gamma^{p}}{\gamma^{*}}, \quad D(\gamma^{p}) = \left(\frac{\gamma^{p}}{\gamma^{*}}\right)^{2}$$

Дилатансия и уплотнение

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

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

 $\phi$  – пористость,  $\gamma^{p}$  – сдвиговая часть пластической деформации

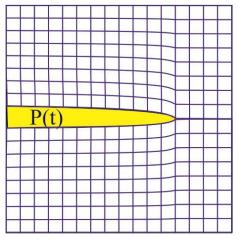


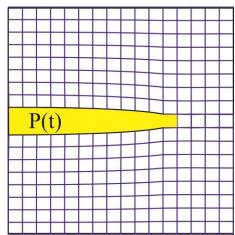
#### Условие разрушение:

$$\sigma_1 = \sigma_t, \quad \gamma^p = \gamma_0$$

Общий вид предельной поверхности и ее изменение в ходе деформации

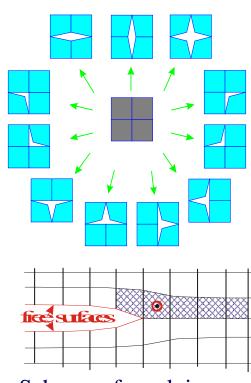
#### Описание роста трещин



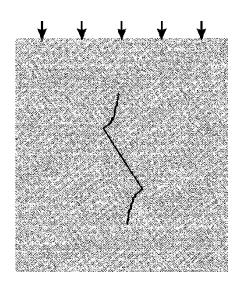


Моделирование роста трещины через разрушение в ячейках сетки и по границам ячеек

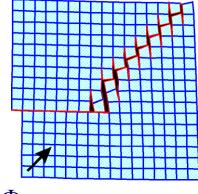
Конфигурации элементарных трещин при разделении узлов сетки с четырехугольными ячейками



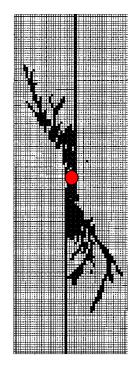
Scheme of crack in computation



Рост наклонной трещины

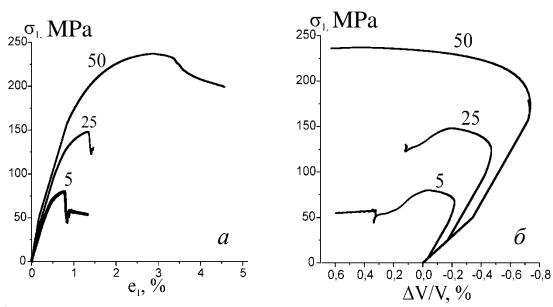


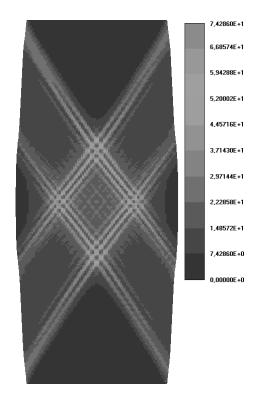
Фрагмент расчетной сетки



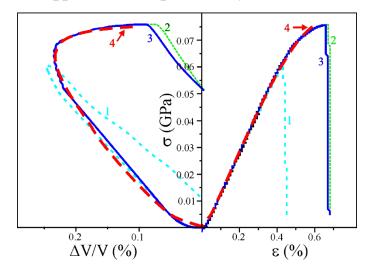
Трещины при наличии отверстия

#### Расчет поведения образцов песчаника





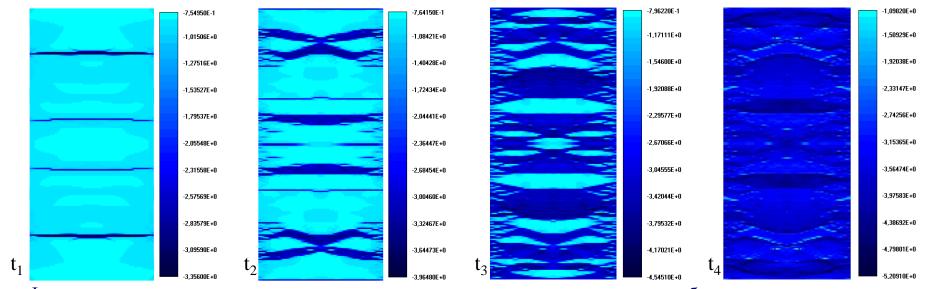
Кривые нагружения песчаника: зависимость осевой нагрузки от деформации (a), зависимость осевой нагрузки от изменения объема  $(\delta)$ . Цифрами над кривыми указано давление обжатия образцов



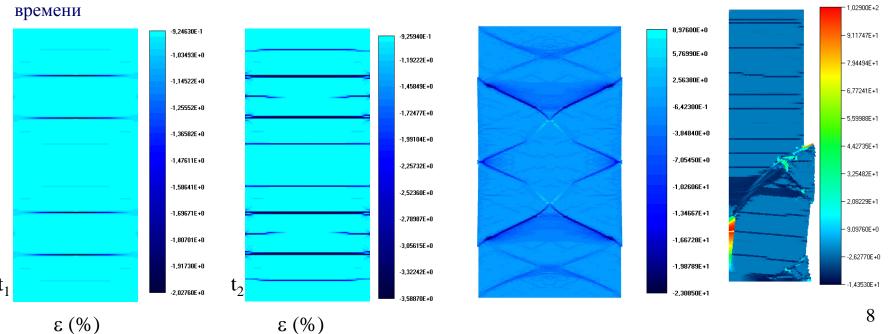
Распределение сдвиговой пластической деформации в образце

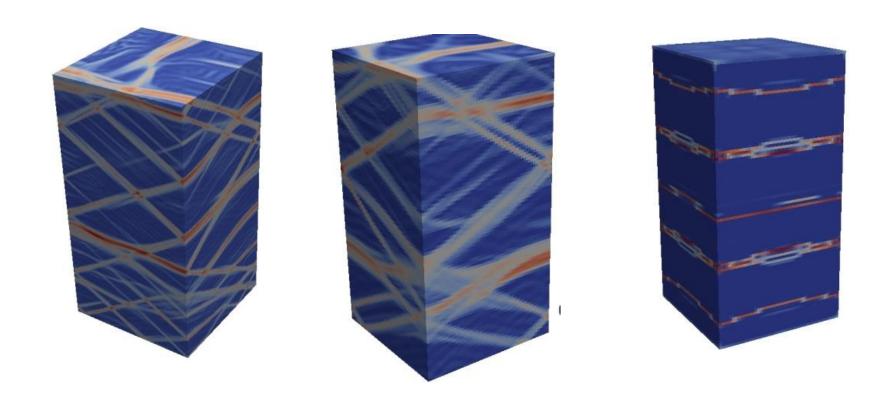
Зависимости напряжений  $Q = \sigma_1 - \sigma_2$  от деформации образца при различных условиях на торцах. Пунктирная линия соответствует данным Labuz и др. (1997)

#### Высокопористые среды при высоких давлениях



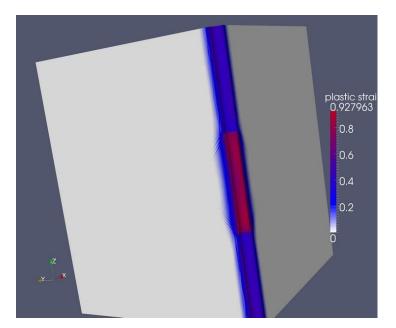
Формирование и расширение полос локализации уплотнения при осевом сжатии образцов высокопористого песчаника при боковом давлении 80 МПа. Распределение объемной деформации в последовательные моменты

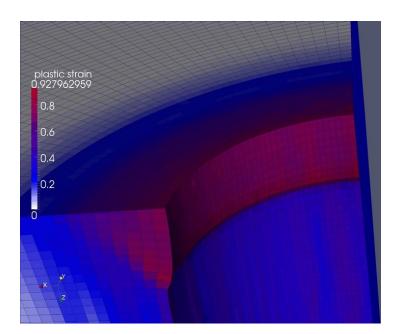




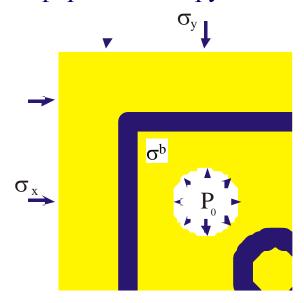
Распределение объемной деформации в образце песчаника при разном боковом давлении

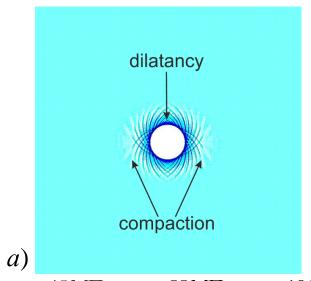
### Расчет развития деформации вокруг скважин

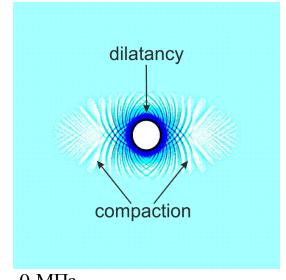




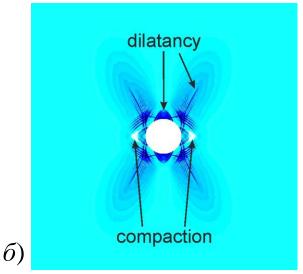
Сдвиговая деформация вокруг скважин

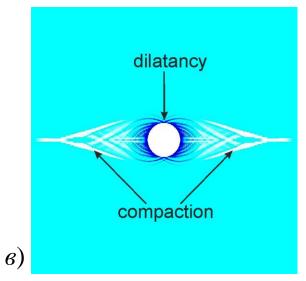






 $σ_x = 45 \,\mathrm{M\Pi a}, \, \sigma_y = 55 \,\mathrm{M\Pi a}, \, p_0 = 10 \,\mathrm{M\Pi a}, \, \sigma^b = 0 \,\mathrm{M\Pi a}$ 

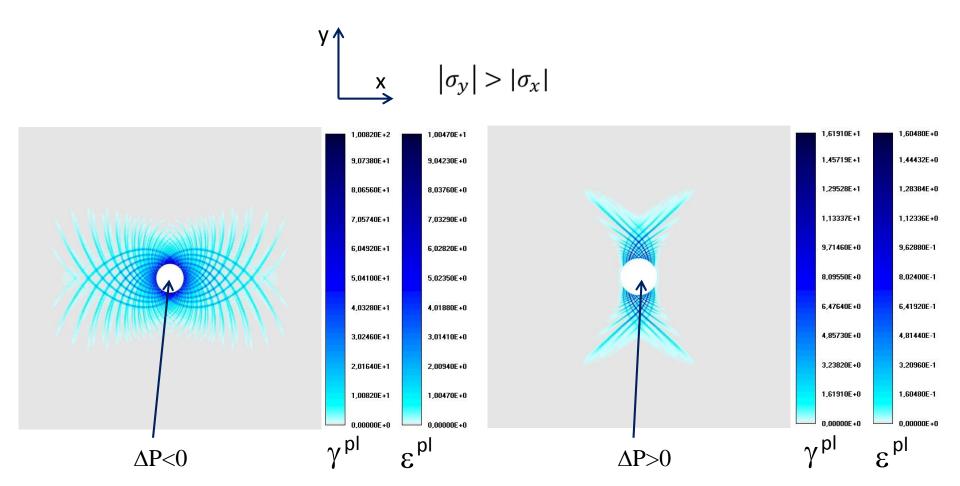




 $\sigma_x = 30 \,\mathrm{M\Pi a}, \ \sigma_y = 50 \,\mathrm{M\Pi a}, \ p_0 = 24 \,\mathrm{M\Pi a}$   $\sigma^b = 0 \,\mathrm{M\Pi a}$ 

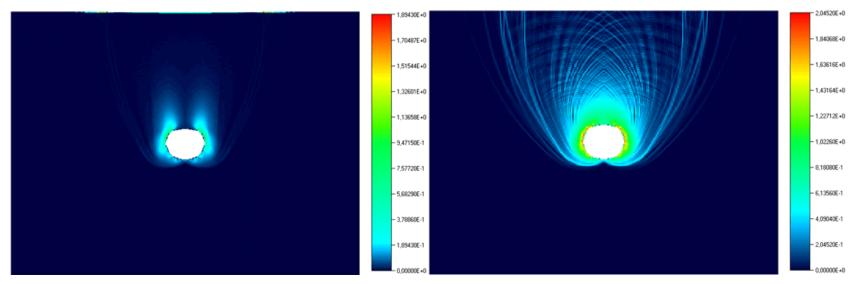
 $\sigma_x = 45$  МПа,  $\sigma_y = 60$  МПа,  $p_0 = 5$  МПа  $\sigma^b = 0$  МПа

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

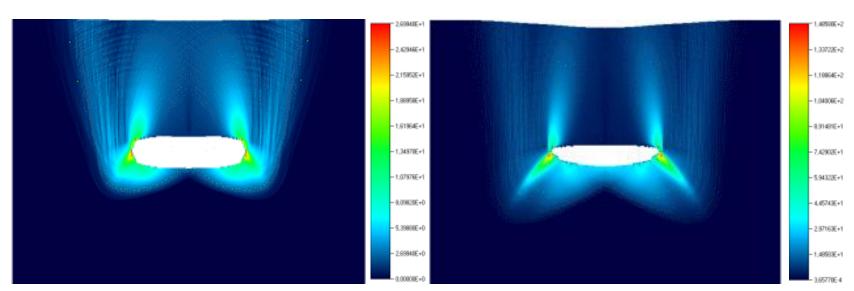


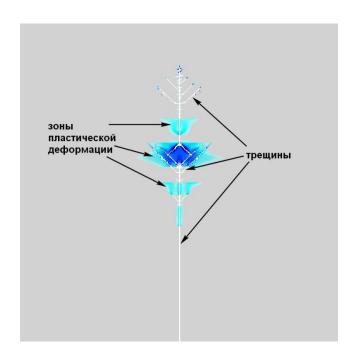
Распределение деформации вокруг скважины при изменении давления флюида

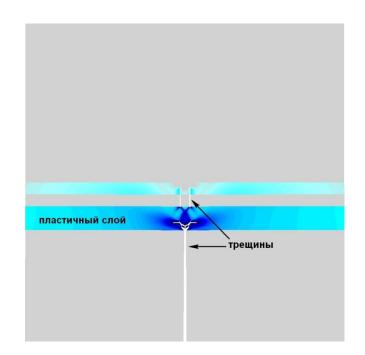
### Разрушение выработки в слабосвязной среде

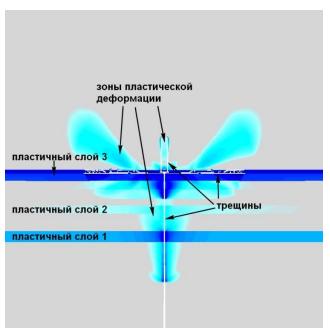


Shear localization in soft rock around horizontal borehole

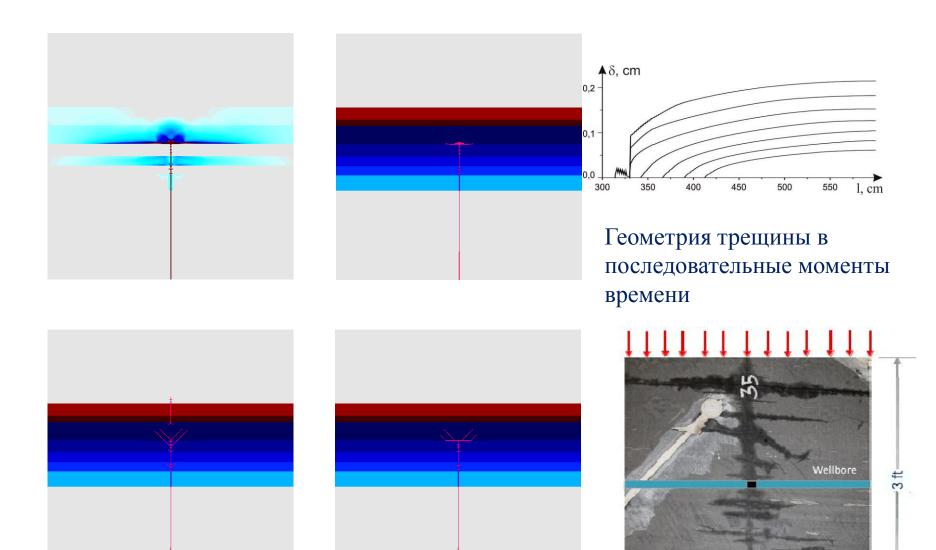






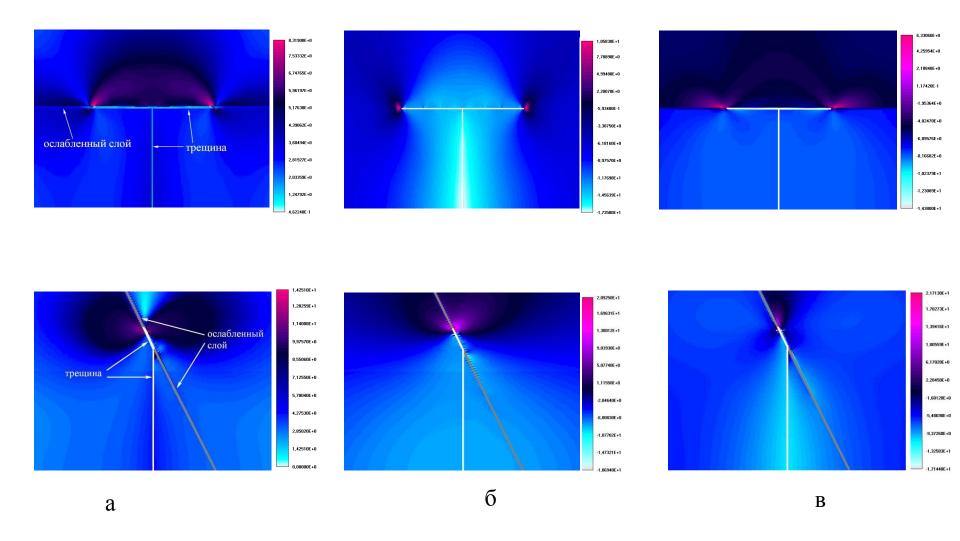


Конфигурации трещин и распределение пластической деформации в слоистой среде



Примеры расчета роста трещины гидроразрыва при наличии слоев с разными пластическими и прочностными свойствами

[Suarez-Rivera et al. 2013].



Конфигурация трещины гидроразрыва и напряженно-деформированное состояние в ее окрестности при распространении по ослабленному слою: а) интенсивность касательных напряжений (МПа); б) вертикальных (МПа); в) горизонтальных напряжений (МПа)

### Основные проблемы при моделировании геомеханических процессов в реальных условиях:

- Недостаток данных о свойствах пород
- Недостаток данных о напряженном состоянии в массиве
- Описание нелинейного поведения при разгрузке
- Смена режимов деформации: Дилатансия-Компакция;
  Компакция-Дилатансия
- Как соотносятся свойства и состояние в нетронутой среде и в извлеченной породе

## Спасибо за внимание! THANK YOU!

Работа выполнена при частичной поддержке Сколтеха (Соглашение № 711-MRA)