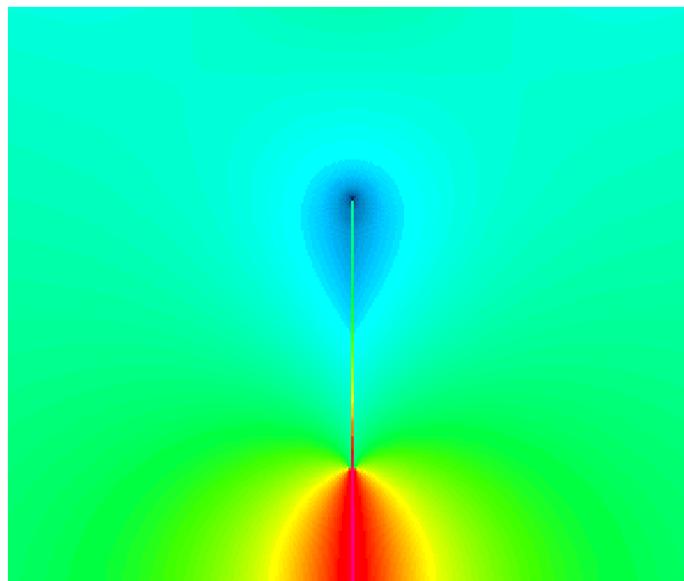


Рост трещин в земной коре в условиях растяжения и под действием внутреннего давления

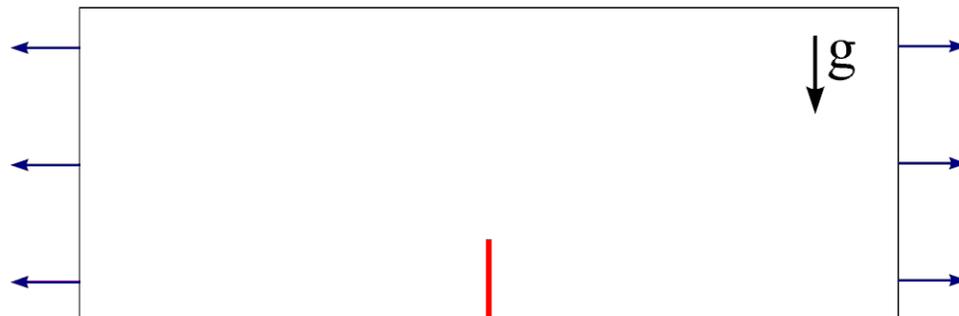
Ю.П. Стефанов¹, В.В. Ревердатто², О.П. Полянский², С.Н. Коробейников³

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

³ИГиЛ СО РАН, г. Новосибирск



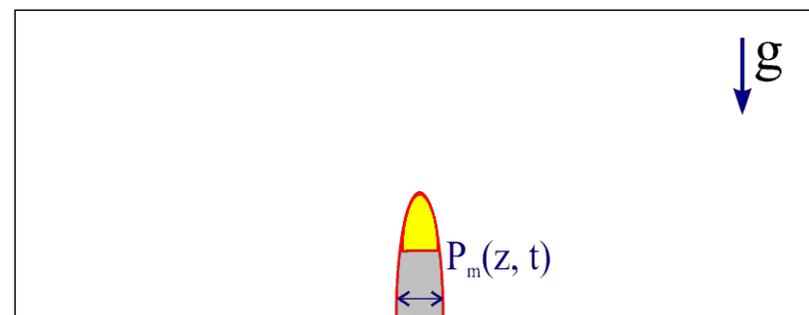
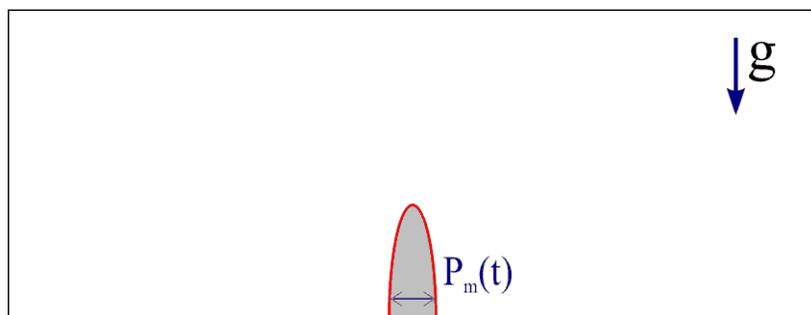
- Рост трещины при растяжении коры



- Рост трещины под действием внутреннего давления

- Трещина заполнена магмой

- Газовая шапка



Плотные и пористые среды при умеренных давлениях

Эффективная прочность среды

$$\tau = c + \alpha\sigma$$

Ограничение в области растяжения:

$$\sigma_t = \sigma_t^0 (1 - D_\varepsilon),$$

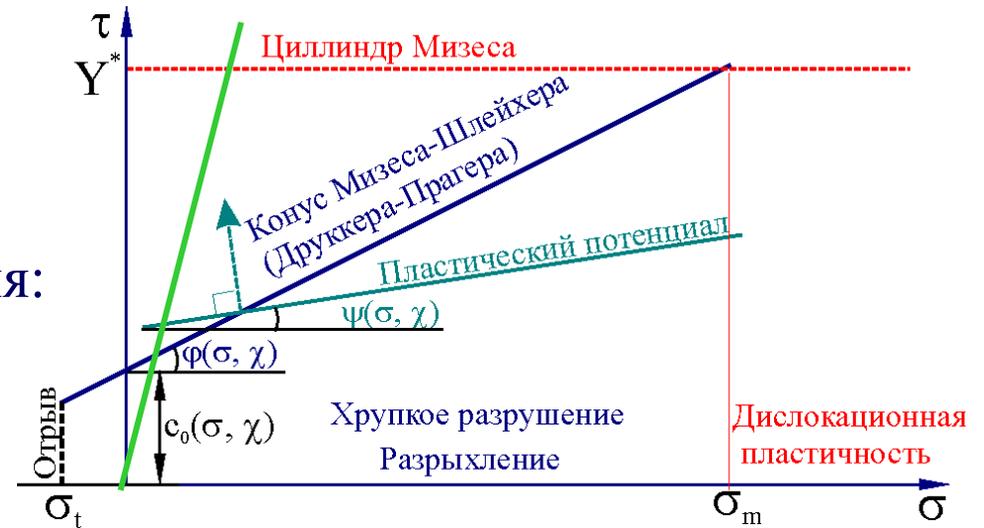
Упрочнение и разупрочнение

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

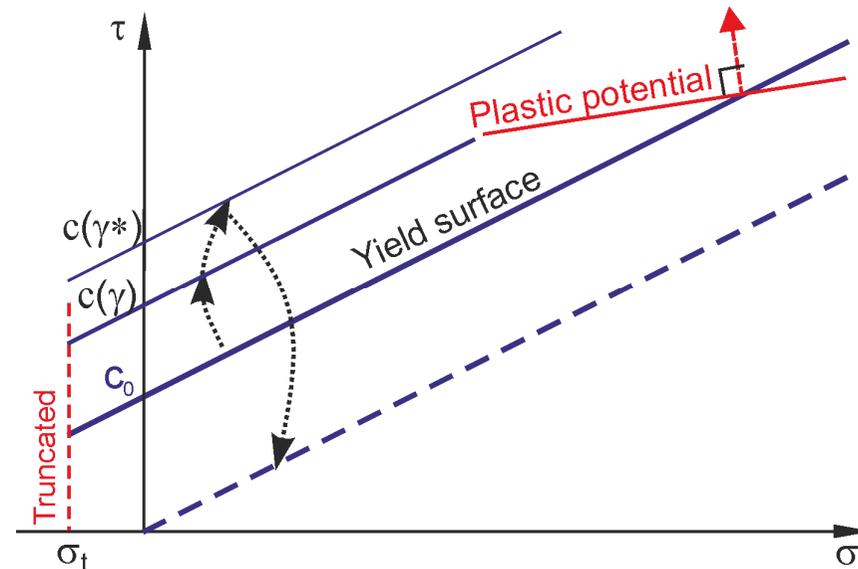
$$A(\gamma^p) = 2 \frac{\gamma^p}{\gamma^*}, \quad D(\gamma^p) = \left(\frac{\gamma^p}{\gamma^*} \right)^2,$$

$$D_\varepsilon = B \left(\frac{\varepsilon^p}{\varepsilon^*} \right)^2$$

Отрыв: $\hat{\sigma} = \sigma^*$



Общий вид предельной поверхности



Изменение предельной поверхности в ходе процесса

Основные уравнения

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

• Геометрические соотношения:

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

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

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

Аддитивное разложение скорости деформации:

Гипоупругость:

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

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

Функция текучести

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

Пластический потенциал:

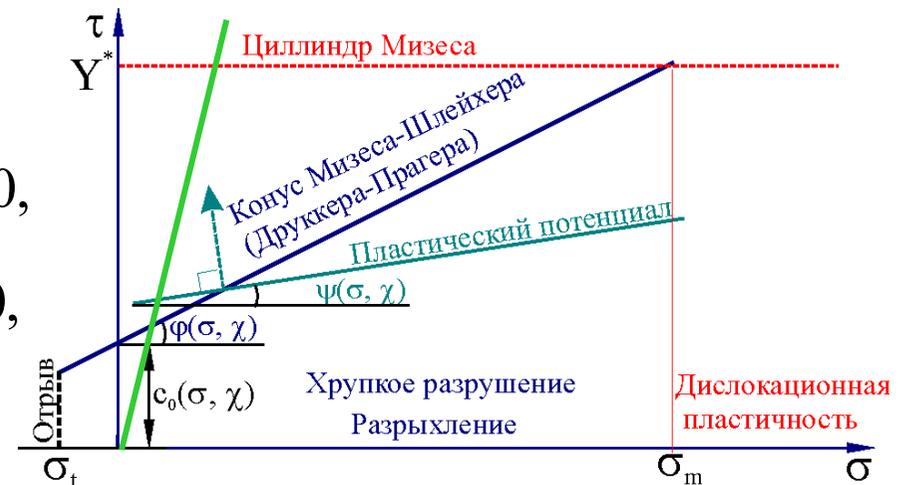
$$g(\sigma_{ij}, \epsilon_{ij}^p) = 0,$$

Пластическая деформация

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

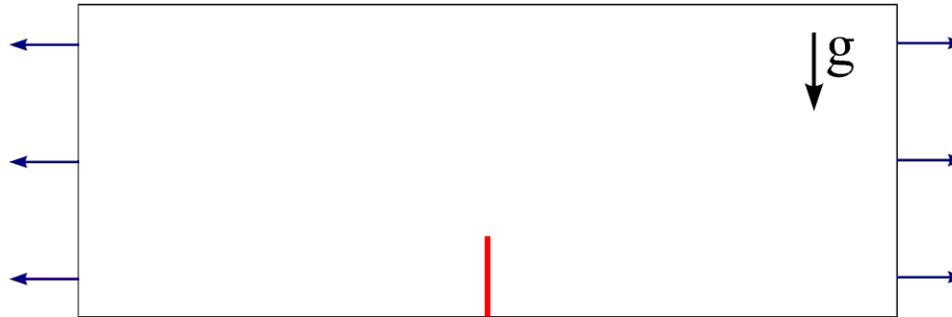
+ начальные условия

+ граничные условия



Общий вид предельной поверхности

Растяжение коры



Условие роста трещины: $\sigma_x = \sigma^* = K_{IC} \sqrt{\pi l}$

$$\sigma_z(z) = -\rho g z, \quad \sigma_x(z) = 0, \quad \sigma_y = \nu \sigma_z$$

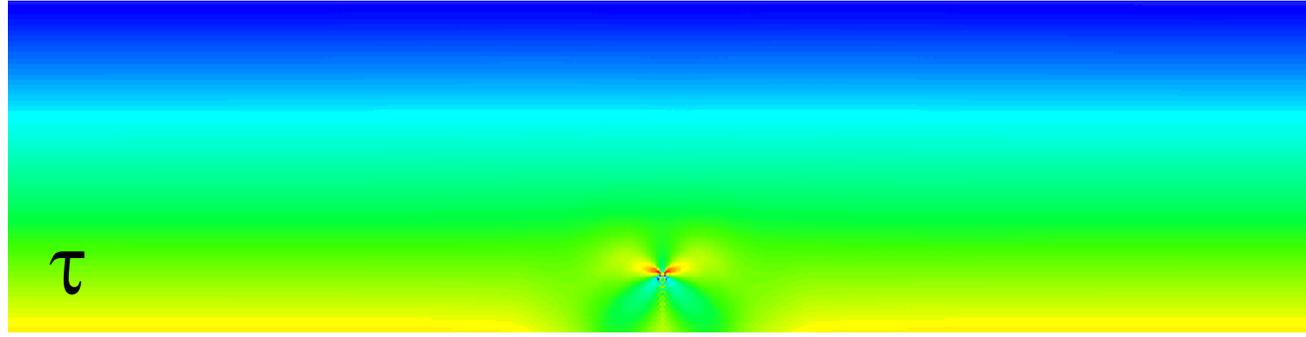
$$\tau = \frac{\sigma_z}{\sqrt{3}} \sqrt{1 + \nu^2} - \nu, \quad \sigma = -\frac{\sigma_z}{3} (1 + \nu)$$

При условии Дуккера-Прагера: $\tau = \alpha \sigma + C$

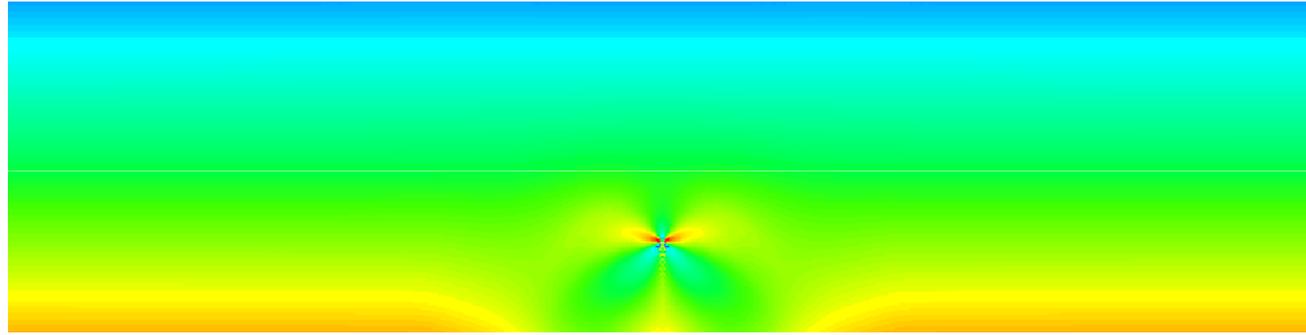
для $\rho = 2.75 \text{ г/см}^3$, $\nu = 0.25$, $\alpha = 0.5$, $C = 10 \text{ МПа}$

Раскрытие трещины возможно до глубины $z = 803 \text{ м}$

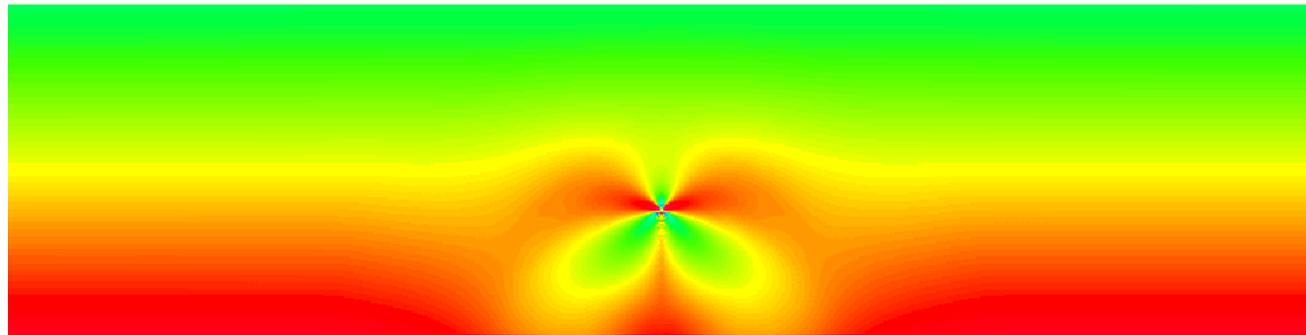
t_1



t_2

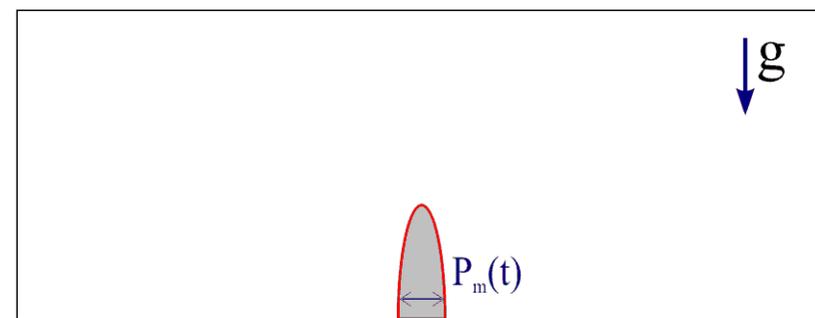
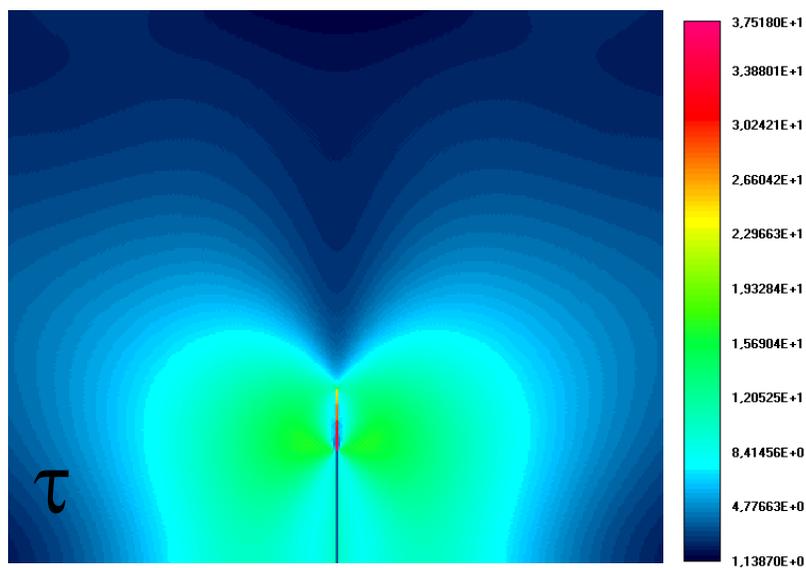
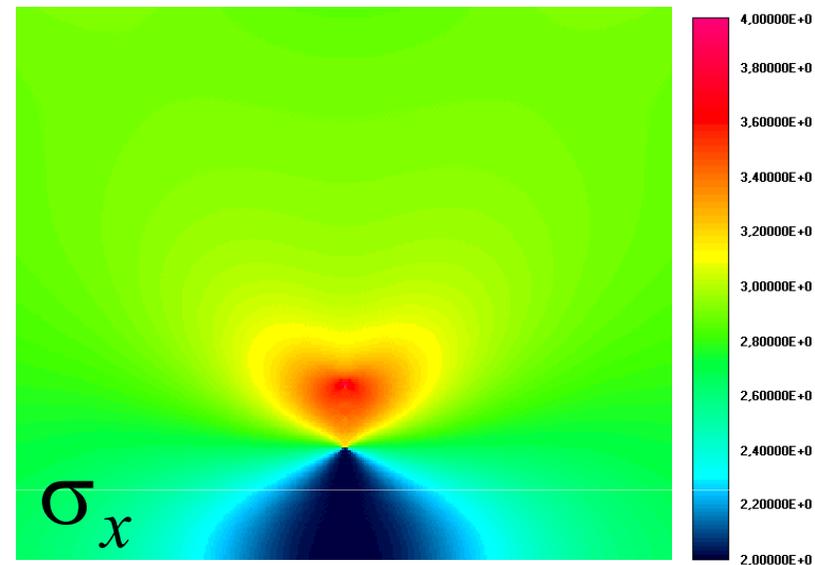
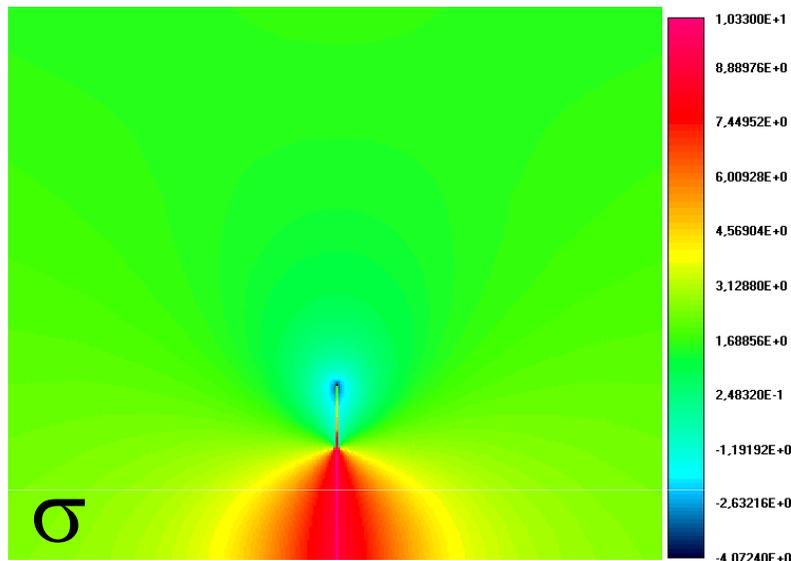


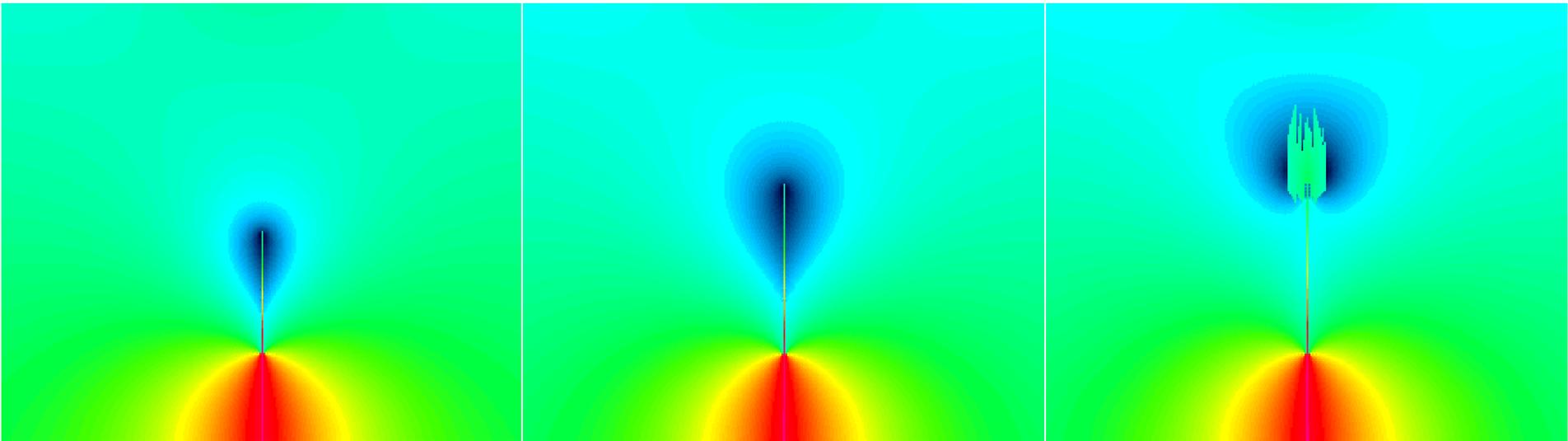
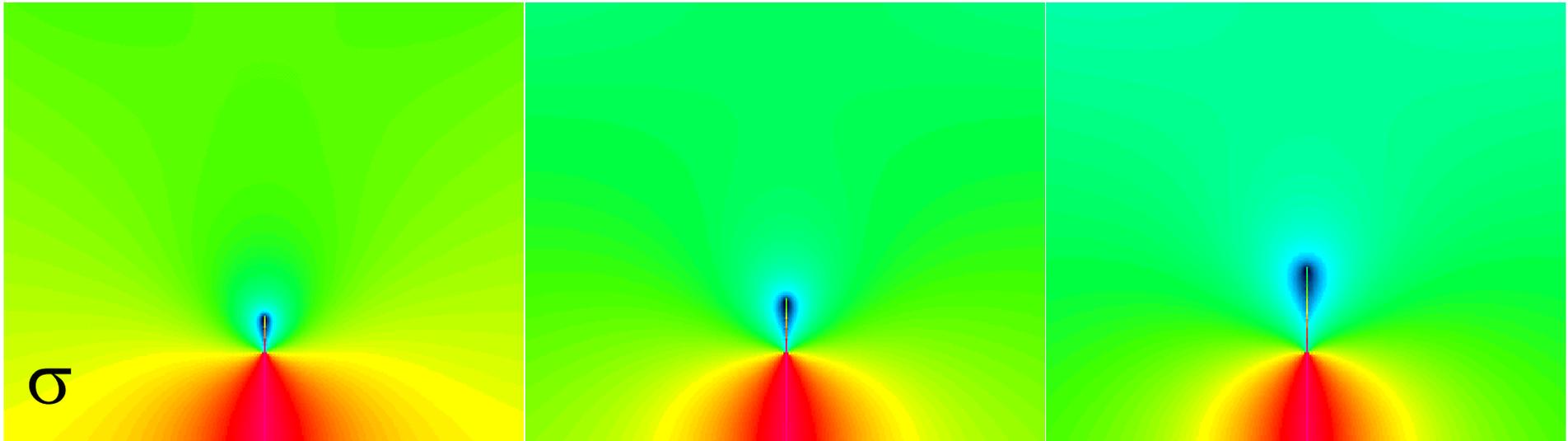
t_3



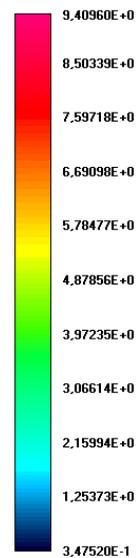
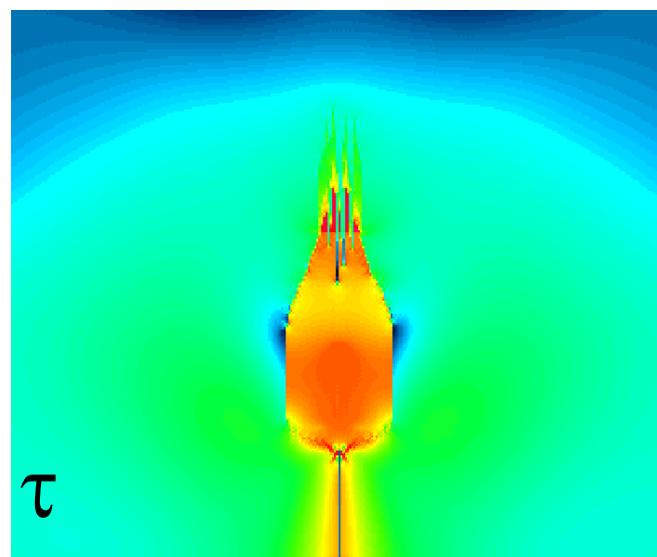
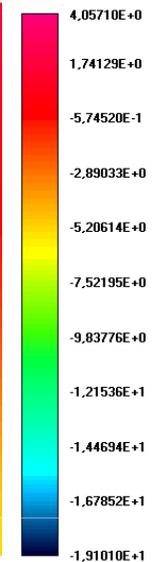
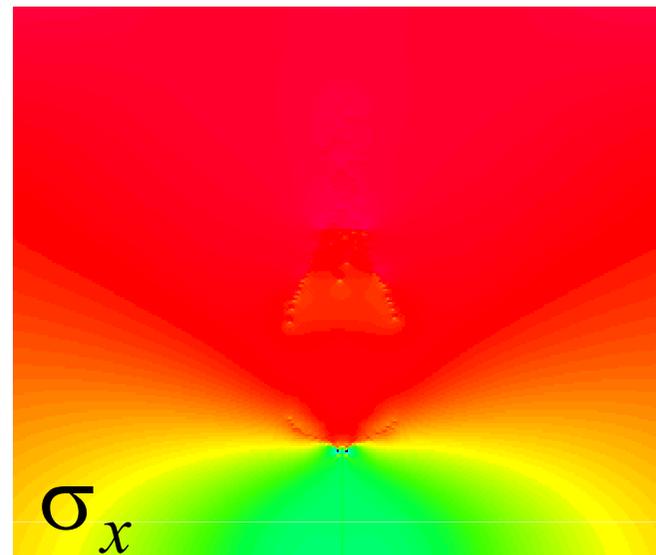
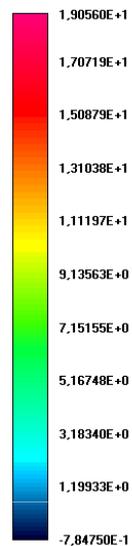
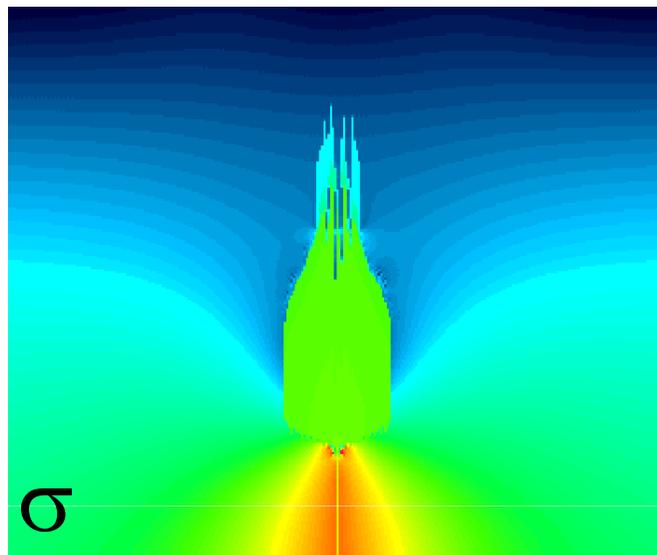
Трещина под действием внутреннего давления

Уруго-хрупкопластичная среда





Пластичная среда



Газовая шапка

$$\sigma(z) = p + \rho_m g(z - z_o) \quad \sigma_m = \sigma_t + \sigma_x$$

В состоянии покоя, в верхней части трещины

$$p = \rho g z_0 \xi$$

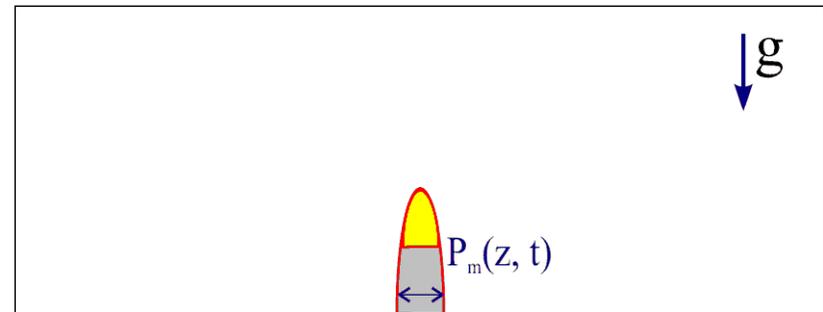
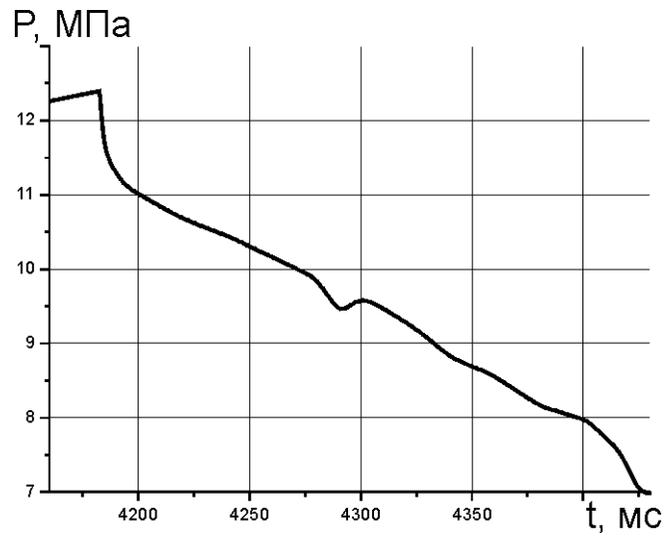
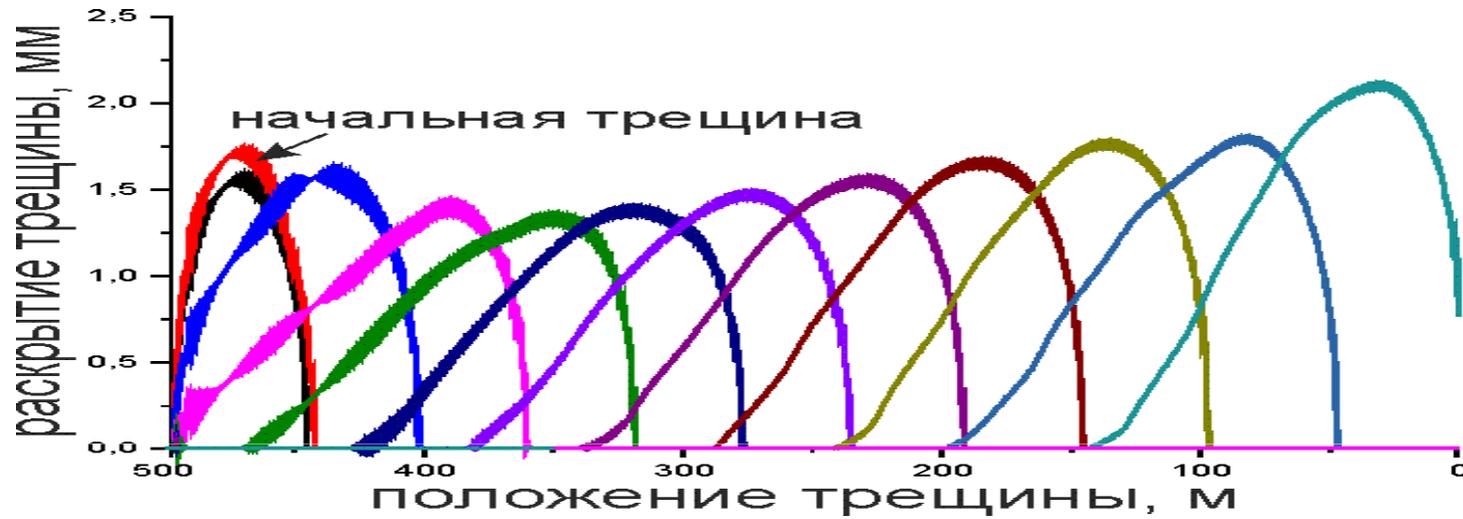
Для смыкания берегов и изоляции трещины (газовой камеры) от канала необходимо, чтобы в основании было:

$$p + \rho_m g(z - z_o) < \rho g z \xi \quad \rho_m g(z - z_o) < \rho g(z - z_o)\xi \quad \rho_m < \rho \xi$$

$$\xi = \frac{\nu}{1 - \nu} \approx 1/3 \quad \text{в случае упругой среды и}$$

$$\xi = 1 \quad \text{при полной пластичности}$$

$$P = P_0(t) A_0 / A \quad P_0(t) = P^* t / t^*$$



- Растяжение коры не может играть существенную роль в росте трещин отрыва на больших глубинах.
- В упруго-хрупкопластичной среде получен прямолинейный рост трещины под действием внутреннего давления.
- Ветвление и образование множества восходящих трещин возникает в среде с низкой прочностью.
- Пластичность облегчает отрыв газовой шапки и самопроизвольное распространение трещины заполненной газом или кипящей магмой
- Скорость распространения, заполненной газом изолированной трещины, при отсутствии утечек, возрастает по мере продвижения к поверхности. Выход на поверхность может происходить со скоростью, превышающей скорость звука в воздухе. Взрыв!

Спасибо за внимание!

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 11-05-00661-а)
и Интеграционного проекта СО РАН № 12