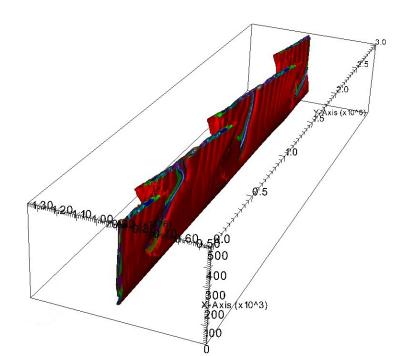
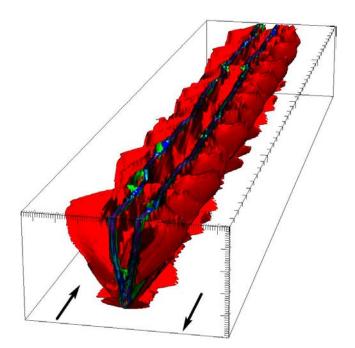
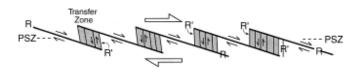
ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ЦВЕТКОВЫХ СТРУКТУР НАРУШЕНИЙ В ОСАДОЧНОМ СЛОЕ ПРИ СДВИГЕ БЛОКОВ ФУНДАМЕНТА

 \pmb{W} .П. Стефанов^{1,2}, \pmb{P} .А. Бакеев², \pmb{A} .И. Тимурзиев³, $\pmb{\Gamma}$.Н. Гогоненков³

 1 ИНГГ СО РАН, г. Новосибирск; 2 ИФПМ СО РАН, г. Томск, 3 ОАО ЦГЭ, г. Москва

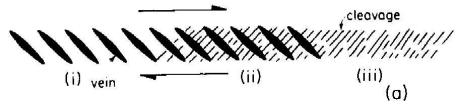






Riedel shear with R-shear zones coupled through transition R'-shear zones

(Davis G. H., Bump A. P., Garcia P. E., Ahlgren S. G. (1999))

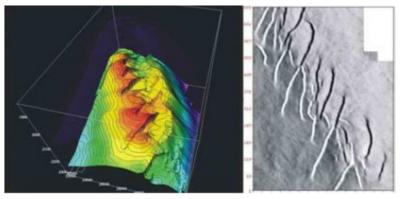


Shear zone structures in geomaterials (*Hancock P.L.* (1985))

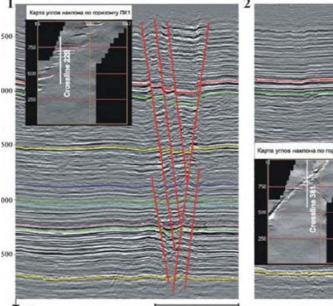


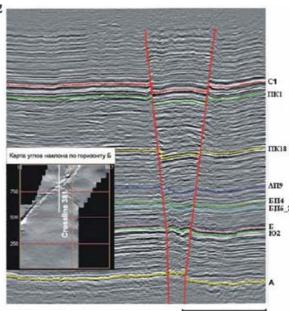
Photographs of Riedel shear systems in a Sheets Gulch area.

(Davis G. H., et al. (1999))



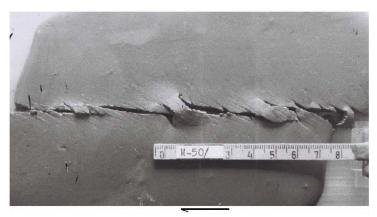
Строение шовной зоны сдвига Северного купола Еты-Пуровского вала



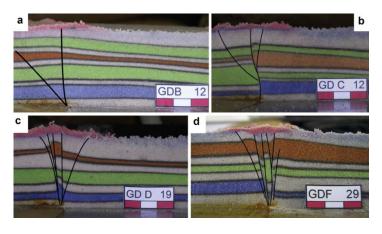


Сейсмические разрезы на Северо-Комсомольской площади. [Гогоненков Г.Н., Тимурзиев А.Н.]

Физическое моделирование

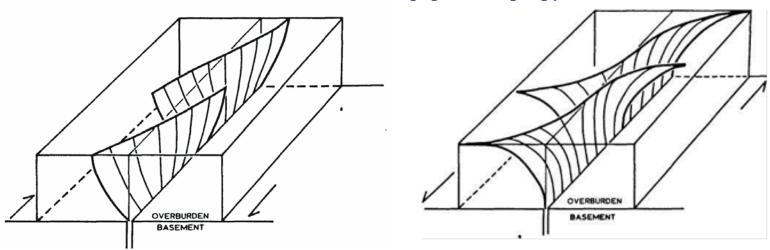


Полосы Риделя на кварцевом песке (Бокун А.Н. (2008))



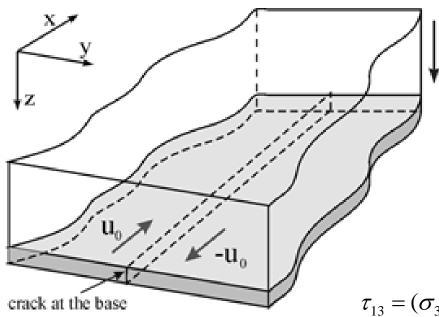
Вертикальные сечения в слоистой аналоговой модели (G. Dufréchou, F. Odonne, G. Viola (2011))

Пространственная форма зон разрушения



Прогноз формы поверхности R-сколов в глубине модели (Sylvester G., (1988))

Постановка задачи



Начальное напряженное состояние

$$\sigma_{z}(z) = -g \int_{0}^{z} \rho(z) dz$$

$$\sigma_{x}(z) = \sigma_{z}(z)\xi$$

$$\sigma_{y}(z) = \sigma_{z}(z)\xi$$

$$\xi = \frac{v}{1-v}$$

$$\tau_{13} = (\sigma_3 - \sigma_1)/2 = \sigma_z(1 - \xi)/2 = \tau_{12}$$
 (ZX)=(ZY)

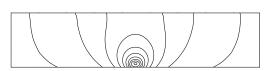
$$\tau_{23} = 0 \tag{XY}$$

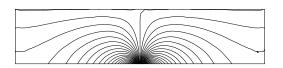
Напряженное состояние в окрестности трещины (трещина III типа)

$$\Delta \tau_{12} = K_{III}(\cos(\theta/2))/\sqrt{2\pi r}$$
 (XY)

$$\Delta \tau_{13} = K_{III}(-\sin(\theta/2))/\sqrt{2\pi r}$$
 (ZY)

$$\Delta \tau_{23} = 0 \tag{ZX}$$





Плотные и пористые среды при умеренных давлениях

Эффективная прочность среды

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

Ограничение в области растяжения:

$$\sigma_t = \sigma_t^0 (1 - D_{\varepsilon}), \quad D_{\varepsilon} = B(\varepsilon^{\mathfrak{p}} / \varepsilon^*)^2$$

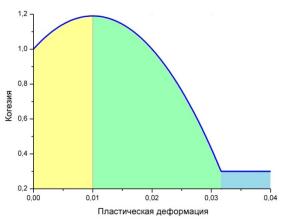
Упрочнение и разупрочнение

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

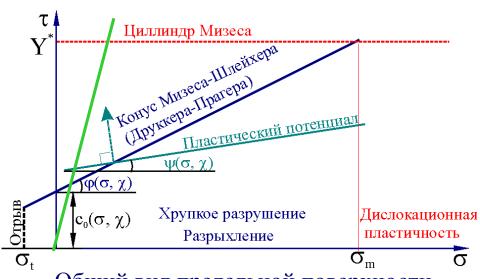
$$A(\gamma^{p}) = 2\frac{\gamma^{p}}{\gamma^{*}}, \ D(\gamma^{p}) = \left(\frac{\gamma^{p}}{\gamma^{*}}\right)^{2},$$

Пластический потенциал:

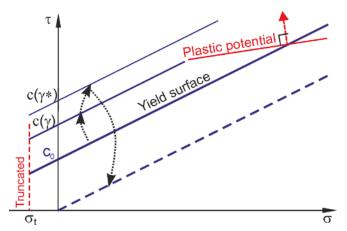
$$g(\sigma, \tau, \varepsilon^p) = -\Lambda \sigma + \tau$$



Упрочнение и разупрочнение



Общий вид предельной поверхности



Изменение предельной поверхности в ходе процесса

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

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: предельная поверхность, закон течения

Функция текучести

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

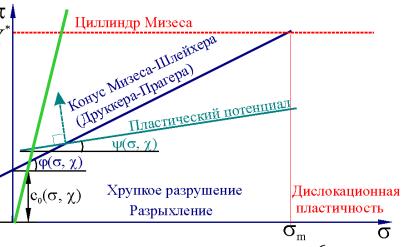
Пластический потенциал:

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

Пластическая деформация

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

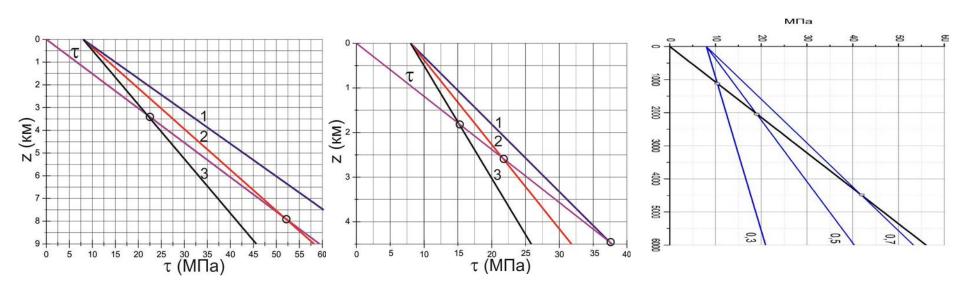
+ начальные условия + граничные условия



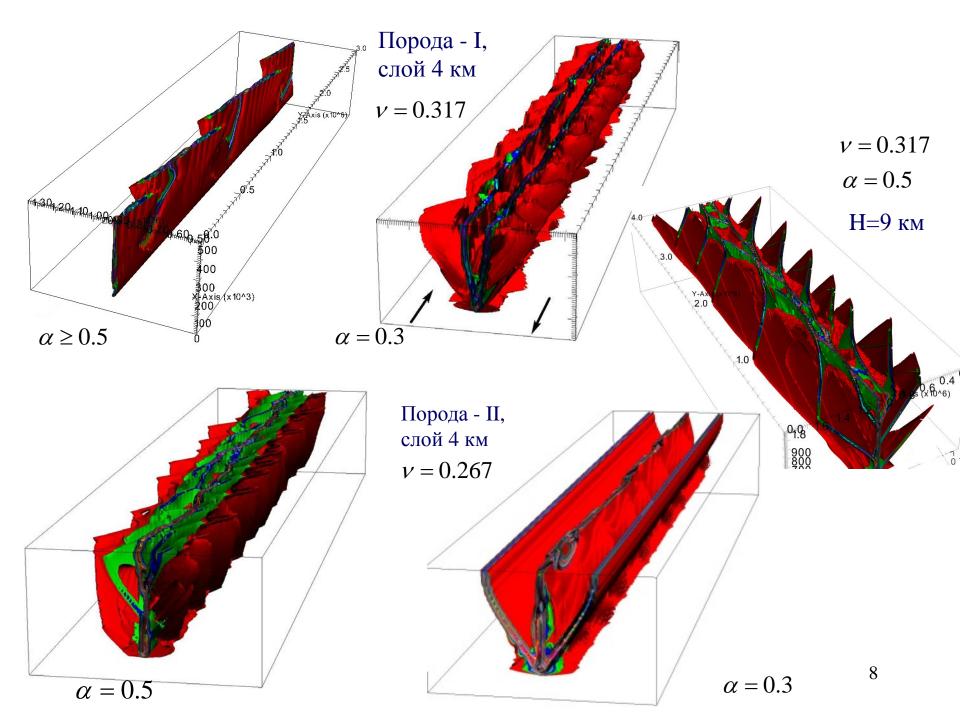
Общий вид предельной поверхности

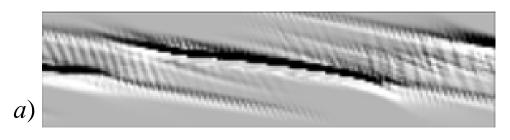
Физико-механические свойства

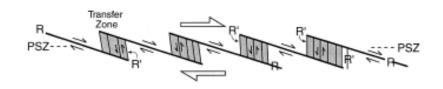
	ρ, г/cm ³	К,	μ,	\mathbf{Y}_{0} ,	α	Λ	γ*	h	σ*,	v
		ГПа	ГПа	МПа					MPa	
Порода- I	2.2	12.8	5.34	8	0.1÷0.7	0.08÷0.1	0.001÷0.04	0.06	-0.0	0.317
Порода - II	2.35	20.0	11.0	8	0.3÷0.5	0.08÷0.1	0.001	0.06	-0.0	0.267
Порода- III	2.2	11.1	8.3	8	0.1÷0.7	0.08÷0.1	0.001	0.06	-0.0	0.2

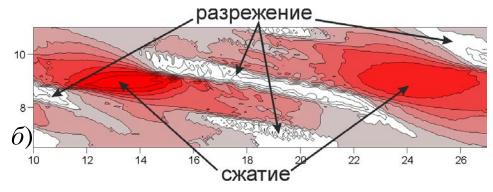


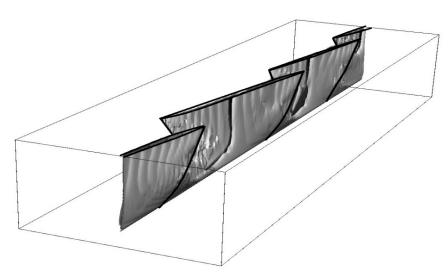
Графики изменения интенсивности касательных напряжений и прочности с глубиной за счет давления при разных коэффициентах внутреннего трения: I-0.5; 2-0.4; 3-0.3. (a) –порода-I, (б) – порода-II., (б) – порода-III







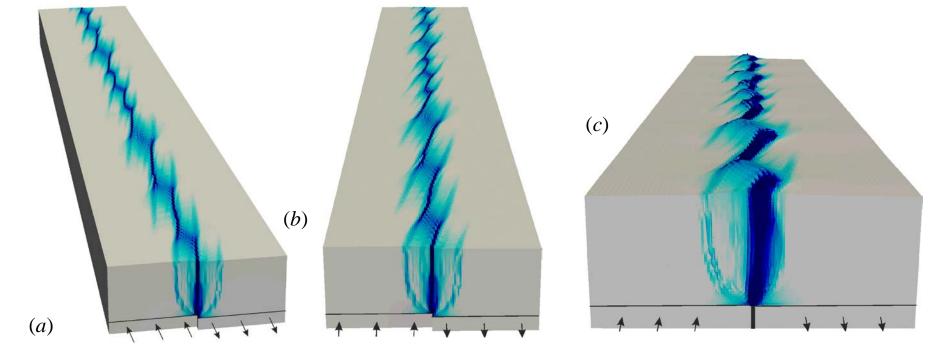




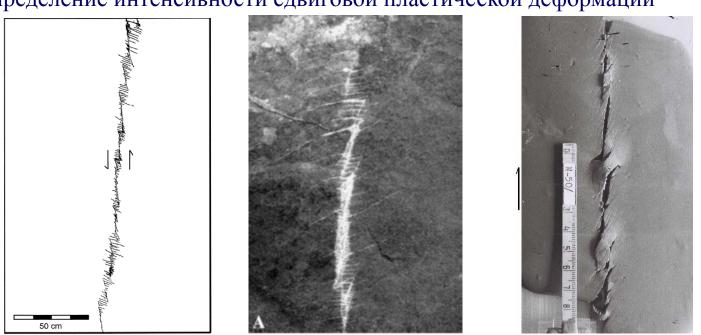
b)

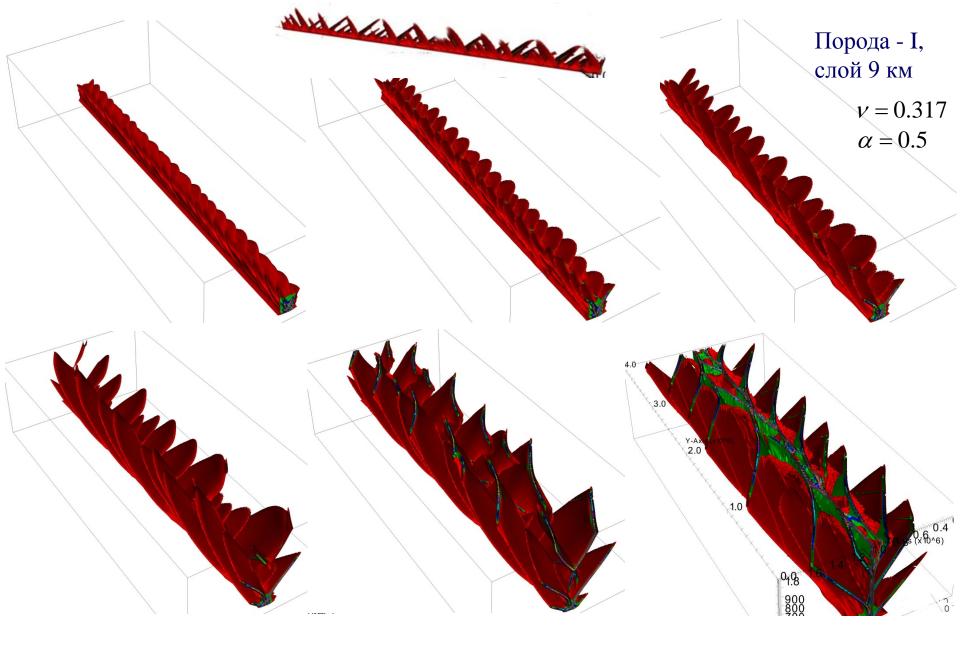
Структура нарушений после выхода зон локализации на поверхность

Распределение деформации на поверхности (a), поле смещений (δ) и давление (ϵ) вокруг участка полосы локализации

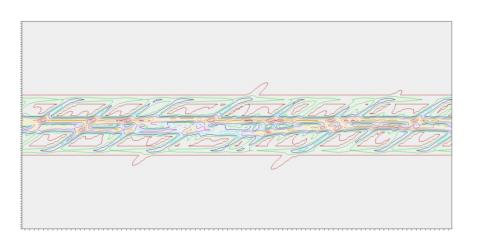


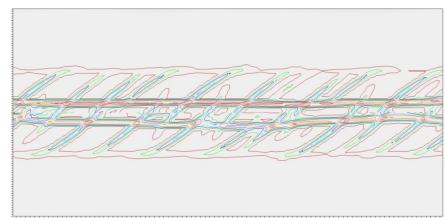
Распределение интенсивности сдвиговой пластической деформации

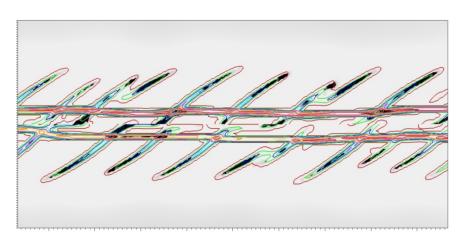


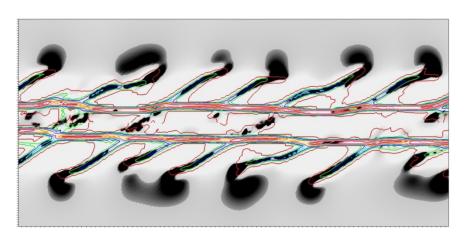


Парное зарождение и развитие зон нарушений в виде створок устрицы



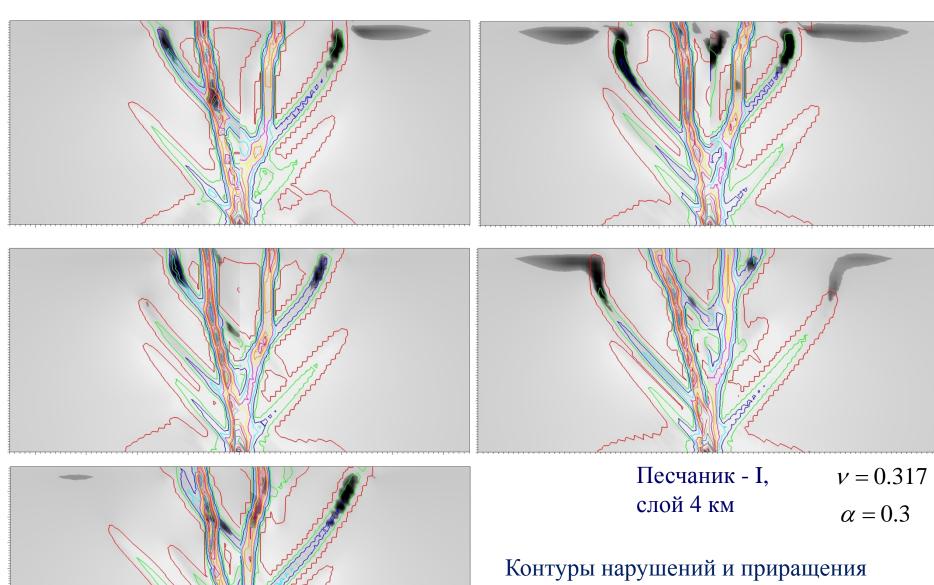




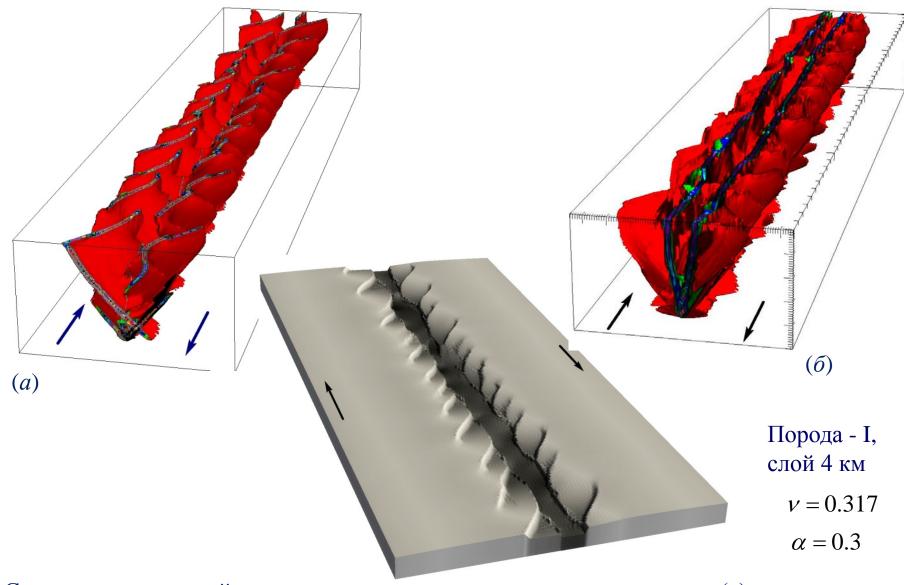


Контуры нарушений и приращения давления при сдвиге блоков основания 32 м в горизонтальных сечениях на глубинах 3.5; 2.5; 1.5; 0.5 км

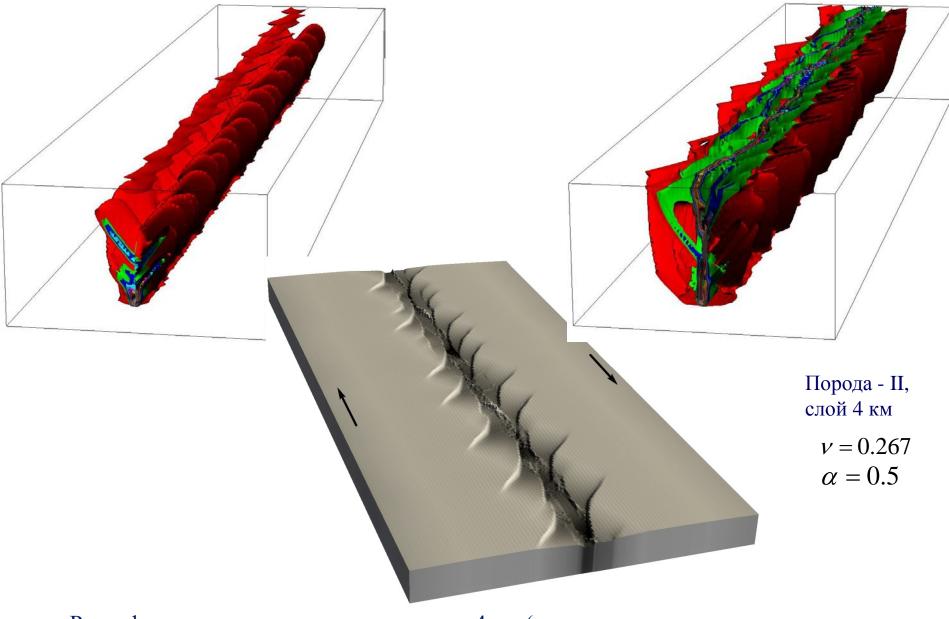
Порода - I,
$$\nu = 0.317$$
 слой 4 км $\alpha = 0.3$



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

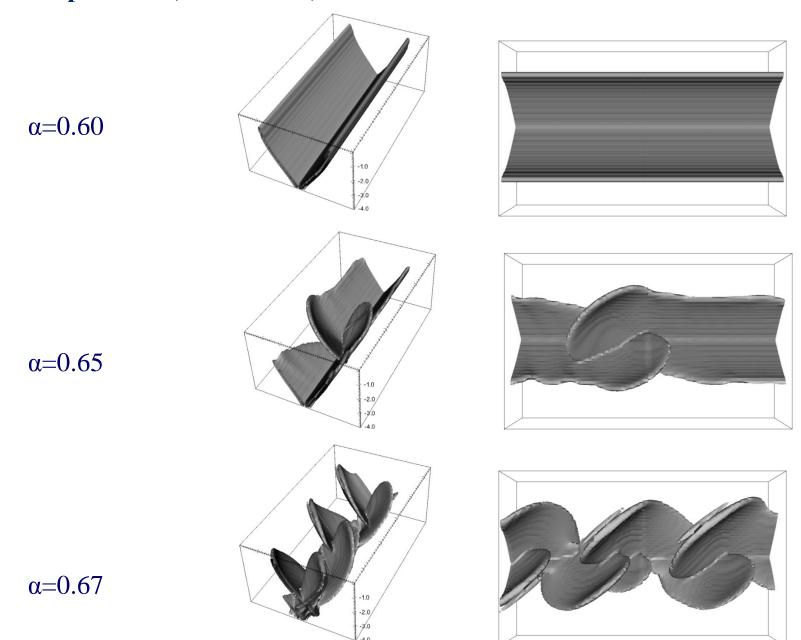


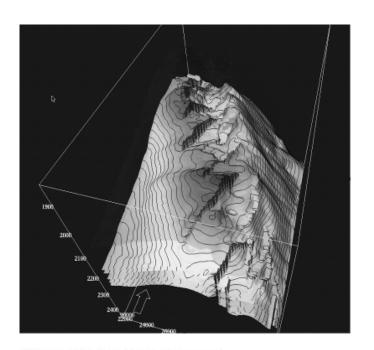
Структура нарушений после выхода зон локализации на поверхность (а) – сдвиг основания 16 м и (б) после образования двух магистральных разрывов Рельеф поверхности (вертикальные смещения в увеличенном масштабе) при толщине слоя 4 км. среда-I.

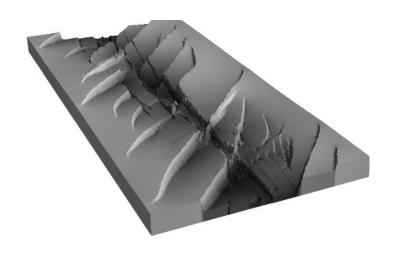


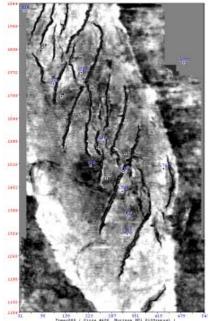
Рельеф поверхности при толщине слоя 4 км (вертикальные смещения в увеличенном масштабе)

Порода - III, слой 4 км, v=0.2



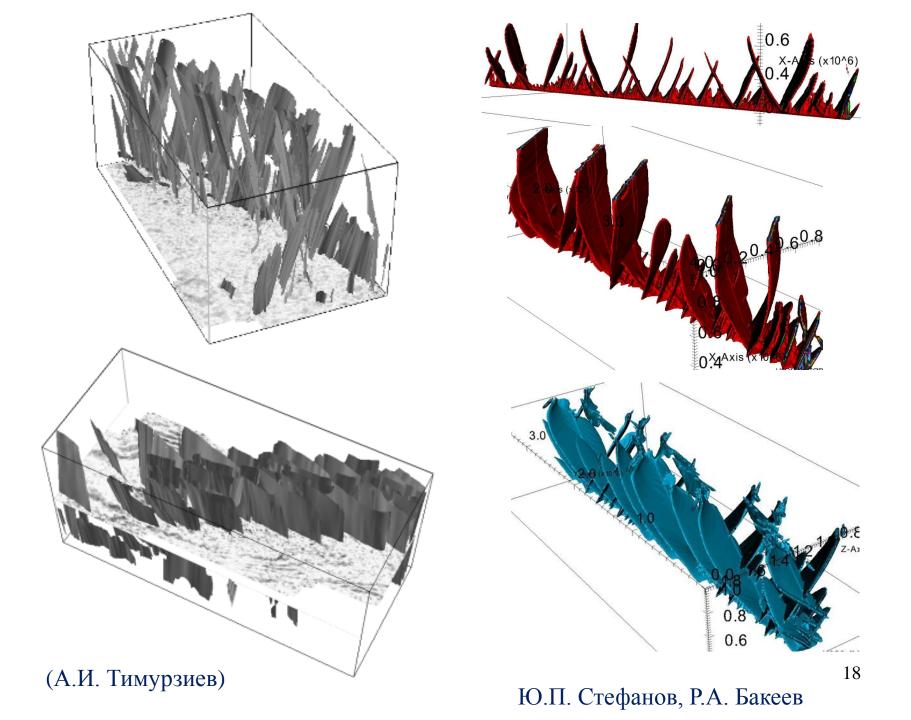






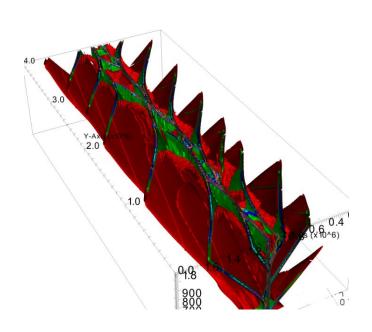
(А.И. Тимурзиев)

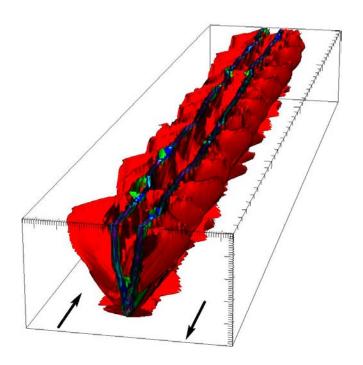
Ю.П. Стефанов, Р.А. Бакеев



Выводы

- В условиях сдвига блоков основания выделяются три типа структур:
 - эшелонированная система S-образных поверхностей с углом наклона к оси сдвига ~ 10° (классические полосы Риделя R и R') или вертикальный разлом. Прочная среда
 - эшелонированная система поверхностей в виде пар створок, с углом наклона к оси сдвига $>40^\circ$. Состояние среды вблизи основания близко к пластическому
 - V-образная система плоскостей сдвига. Пластическое состояние.
- Магистральный разлом формируется сверху, после выхода наклонных зон нарушений на поверхность





Спасибо за внимание!