

Численная оценка устойчивости охранных целиков при отработке смежных выемочных столбов наклонного пласта

¹Еремин М.О., ¹Перышкин А.Ю., ²Esterhuizen G.,

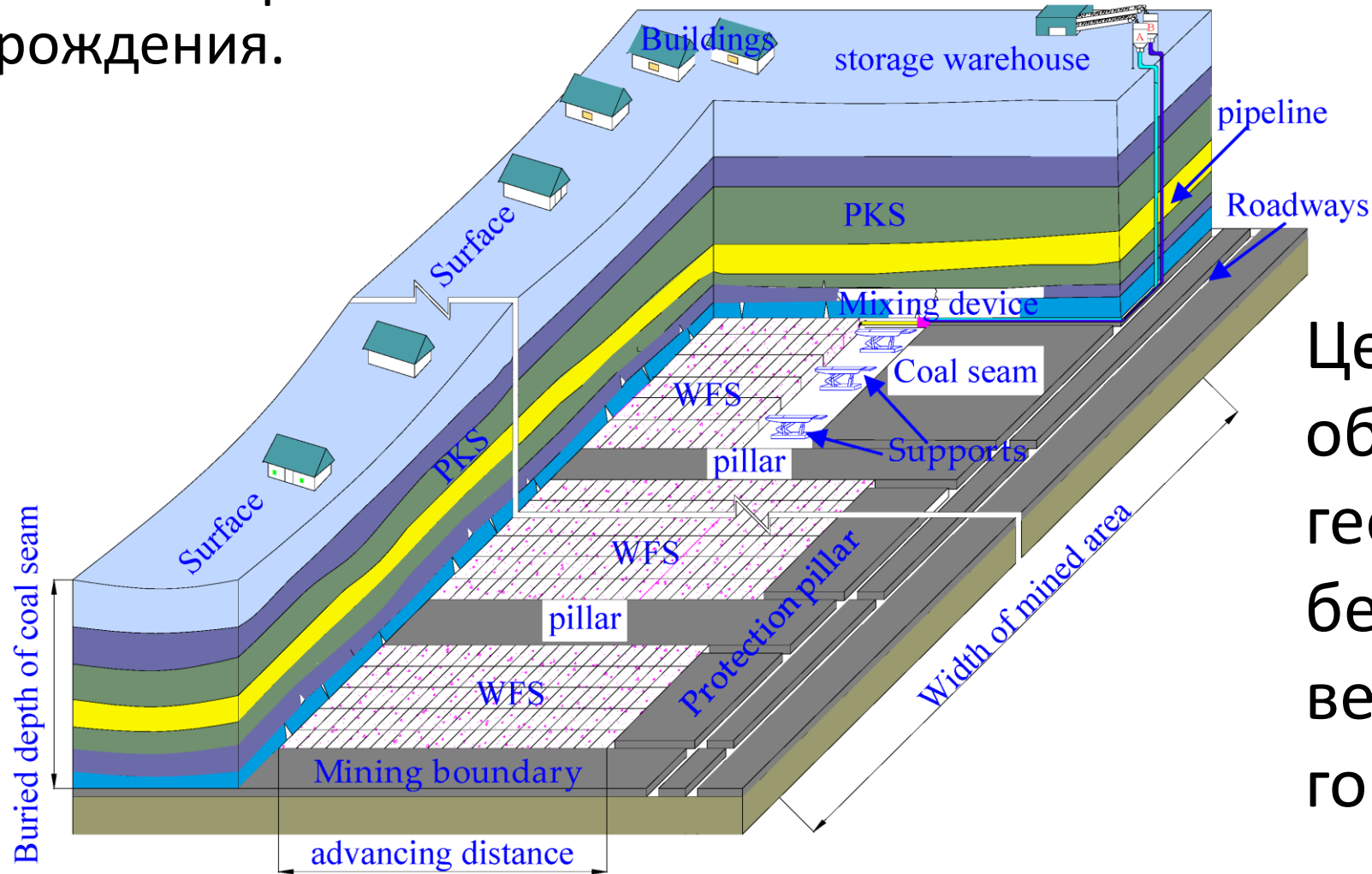
³Павлова Л.Д., ³Фрянов В.Н.

¹ИФПМ СО РАН, Томск, Россия

²Independent engineer, Pittsburgh, USA

³СибГИУ, Новокузнецк, Россия

Рис. 1. Схема отработки месторождения.



Целик
обеспечивает
геодинамическую
безопасность
ведения
горных работ

Что представляет охранный целик?

Математическая постановка задачи.

Основные уравнения

$$\rho V = \rho_0 V_0 \quad (1)$$

$$\rho \dot{v}_i = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

$$2\dot{\varepsilon}_{ij}^T = v_{i,j} + v_{j,i} \quad (3)$$

$$2\dot{\omega}_{ij} = v_{i,j} - v_{j,i} \quad (4)$$

$$\dot{P} = -K(\dot{\theta}^T - \dot{\theta}^P) \quad \dot{\theta}^T = \dot{\varepsilon}_{ii}^T \quad (5)$$

$$\dot{S}_{ij} + S_{ik}\dot{\omega}_{kj} - S_{kj}\dot{\omega}_{ik} = 2\mu \left(\dot{\varepsilon}_{ij}^T - \frac{1}{3}\dot{\theta}^T \delta_{ij} - \dot{\varepsilon}_{ij}^P \right) \quad (6)$$

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^T = \dot{\varepsilon}_{ij}^E + \dot{\varepsilon}_{ij}^P \quad (7)$$

ρ_0, ρ, V_0, V – начальные и текущие значения плотности и объёма, соответственно
 v_i – компоненты вектора скорости
 σ_{ij} – компоненты тензора напряжений Коши
 x_i – декартовы координаты.

K – модуль объёмного сжатия
 μ – модуль сдвига
 P – гидростатическое давление
 θ – объёмная деформация
 S_{ij} – компоненты девиатора тензора напряжений
 ε_{ij}^P – компоненты тензора пластических деформаций

Математическая постановка задачи.

Определяющие уравнения для неупругого деформирования

- Для описания неупругого деформирования элементов горного массива за основу принята модель упруго-пластической среды Друкера-Прагера [Drucker and Prager, 1952], дополненная неассоциированным законом пластического течения:

$$f(\sigma_{ij}) = -\alpha P + \tau - Y \quad P = -\frac{1}{3} \sigma_{ii} \quad (8)$$

$$\tau = \sqrt{J_2} = \sqrt{\frac{1}{2} S_{ij} S_{ij}} \quad (9)$$

- где τ – напряжение фон Мизеса
- Y является параметром материала, связанным с когезией, α параметр, характеризующий внутреннее трение

Математическая постановка задачи.

Определяющие уравнения для неупругого деформирования

- Уравнение пластического потенциала:

$$g(\sigma_{ij}) = \tau - \Lambda P + const \quad (10)$$

- приращения компонентов тензора неупругой деформации:

$$d\varepsilon_{ij}^P = d\lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} \quad d\varepsilon_{ij}^P = d\lambda \left[\frac{S_{ij}}{2\tau} + \frac{\Lambda}{3} \delta_{ij} \right] \quad (11)$$

- приращение интенсивности неупругой деформации:

$$d\gamma^P = \sqrt{\frac{2}{3} de_{ij}^P de_{ij}^P} = \frac{d\lambda}{\sqrt{3}} \quad (12)$$

- приращение дилатансии:

$$d\varepsilon^P = \Lambda d\lambda \quad (13)$$

Математическая постановка задачи.

Деградация свойств при деформировании

$$\sigma_c = \frac{\tau}{Y + \alpha P} \quad (14)$$

$$\frac{dD}{dt} = \frac{\sigma_c^2}{t^*} \quad (15)$$

t^* имеет физический смысл
времени инкубации разрушения

$$Y = Y_0(1 - D), \quad D \leq 1 \quad (16)$$

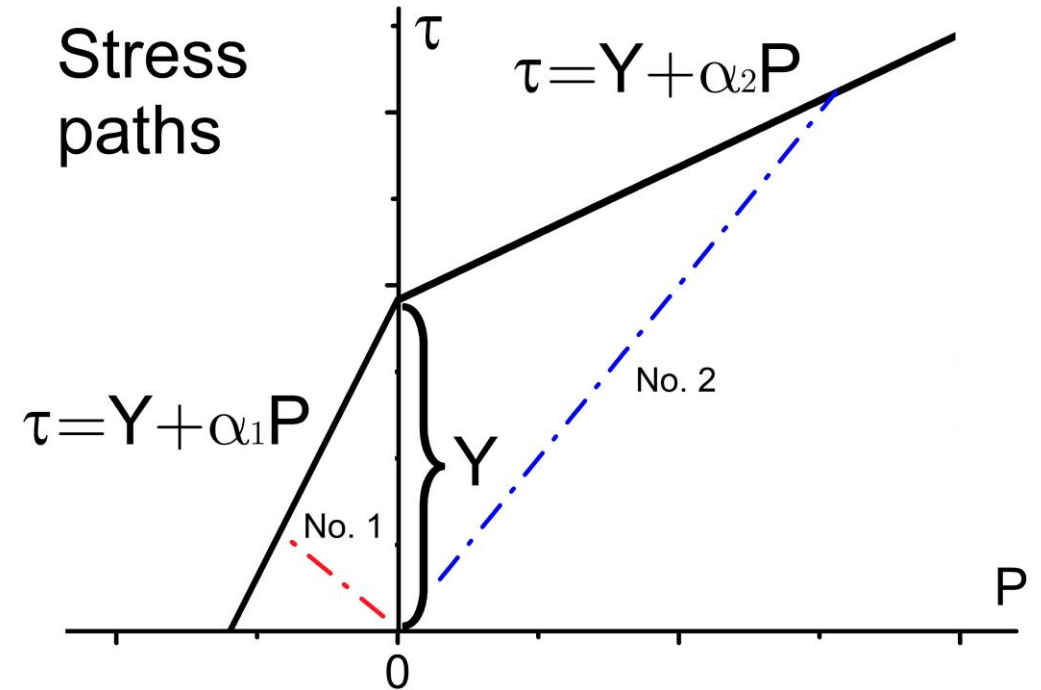
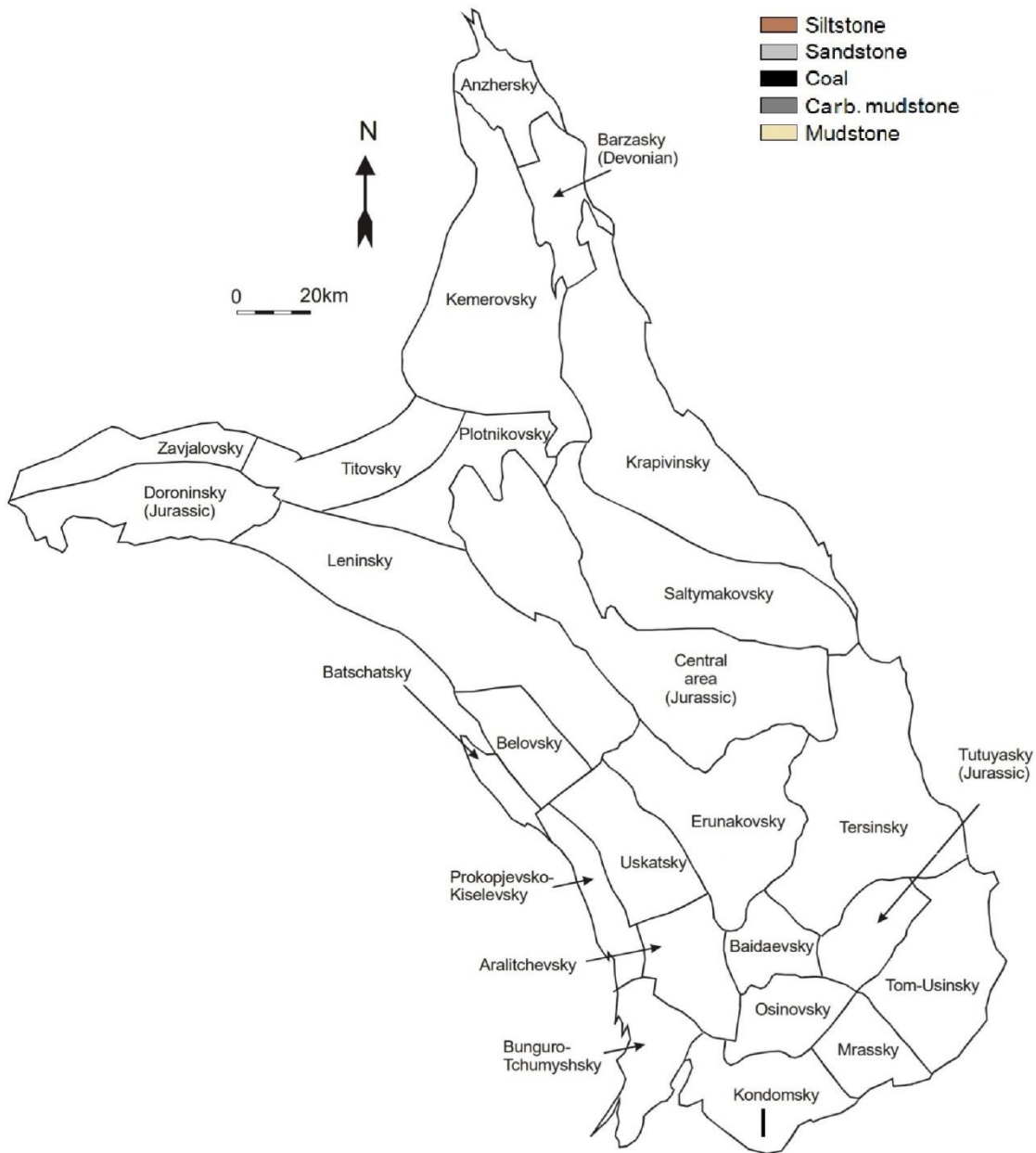


Рис. 2. Схематическое представление предельной поверхности в пространстве напряжений $\tau - P$.



I: Kondomskiy typical borehole log

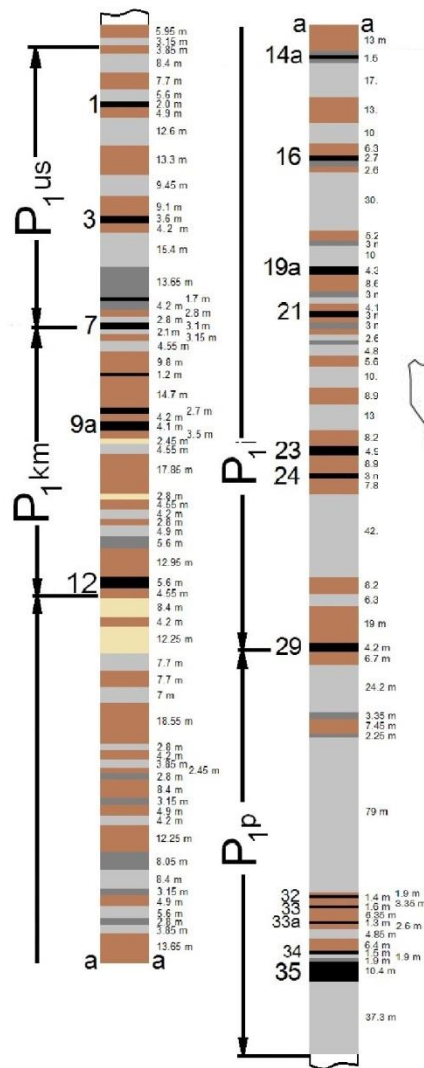


Рис. 3. Разделение Кузнецкого бассейна на промышленные районы разработки [Jones, 2005].

Формирование начального гравитационного НДС

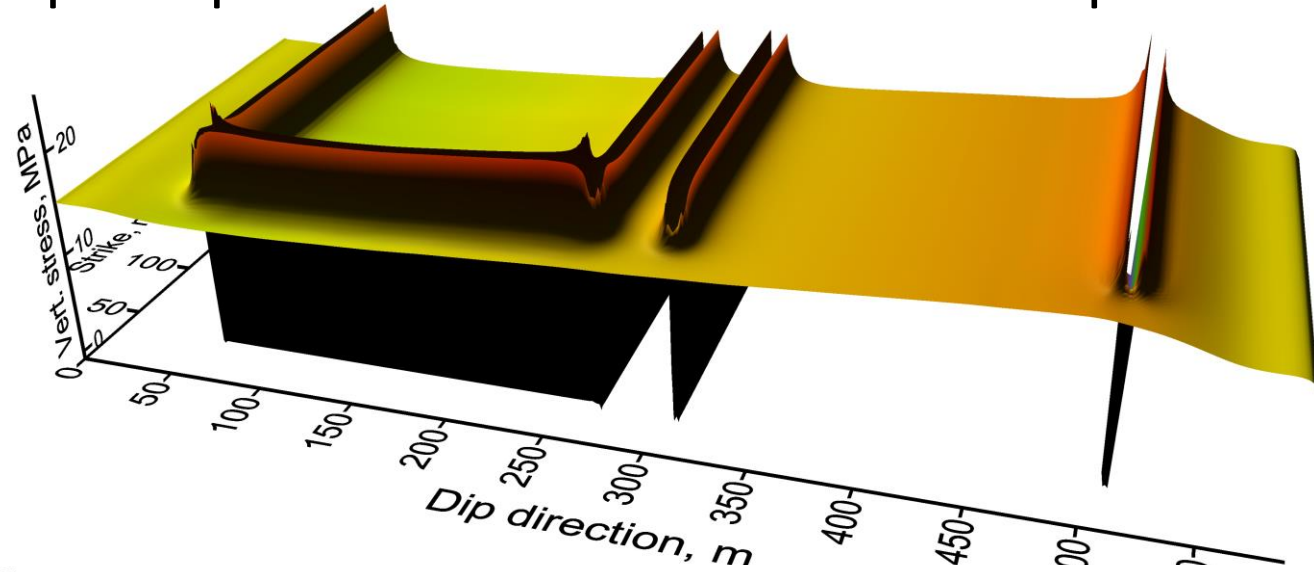


Рис. 5. Распределение вертикальных напряжений на горизонте обрабатываемого пласта.

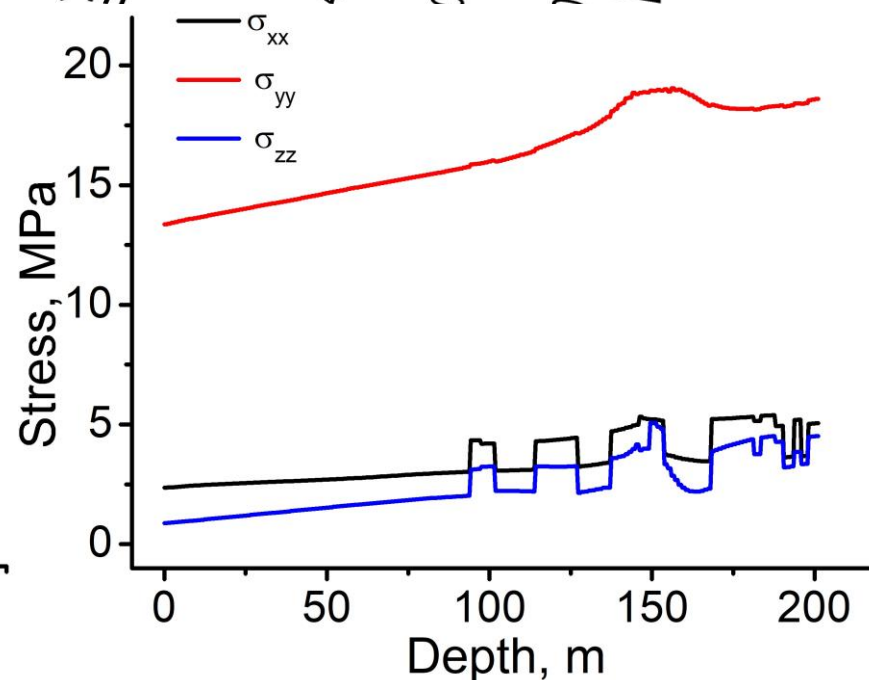
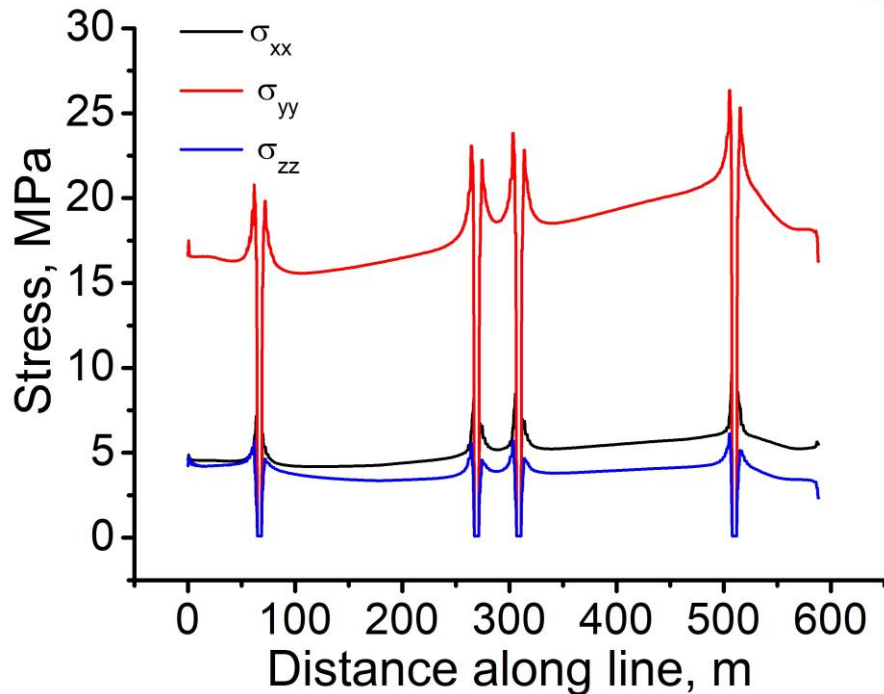


Рис. 6. Распределение диагональных компонент тензора напряжений вдоль вертикальной и горизонтальной линий, проведенных через центры модели.

Оценка шагов обрушения кровли. Валидация модели

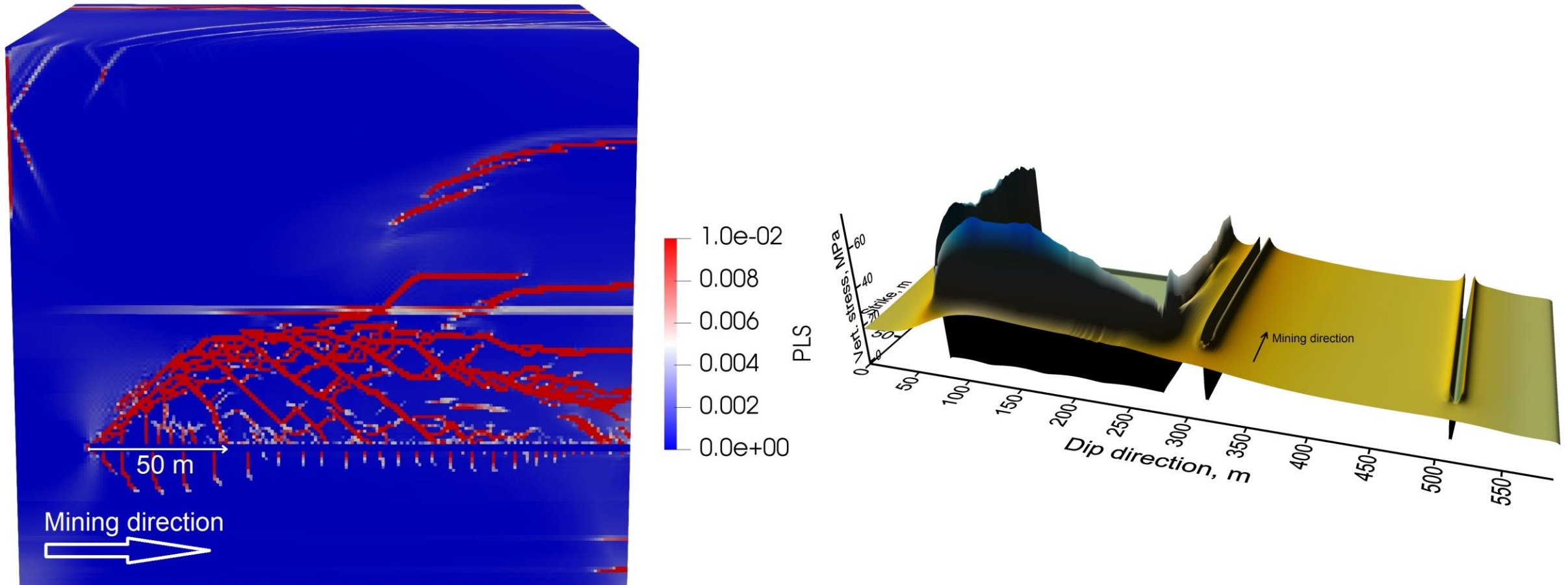


Рис. 6. Распределение интенсивности неупругих деформаций в сечении, проведенном через центр первой выработки (а), вертикальное напряжение после отработки первого выемочного столба (б).

Отработка первого выемочного столба

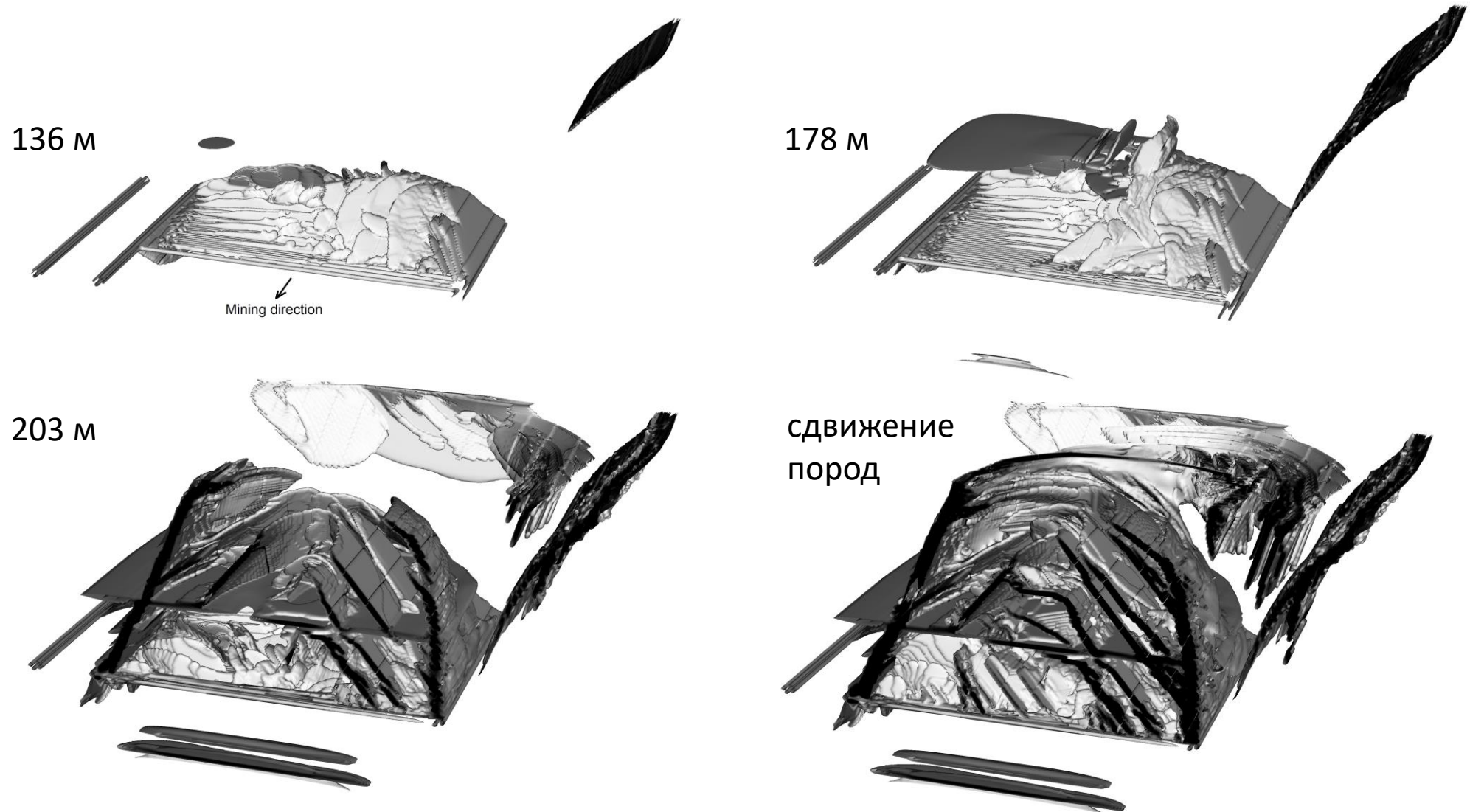


Рис. 7. Распределение интенсивности неупругих деформаций в объеме модели при различных длинах выработанного пространства.

Отработка второго выемочного столба

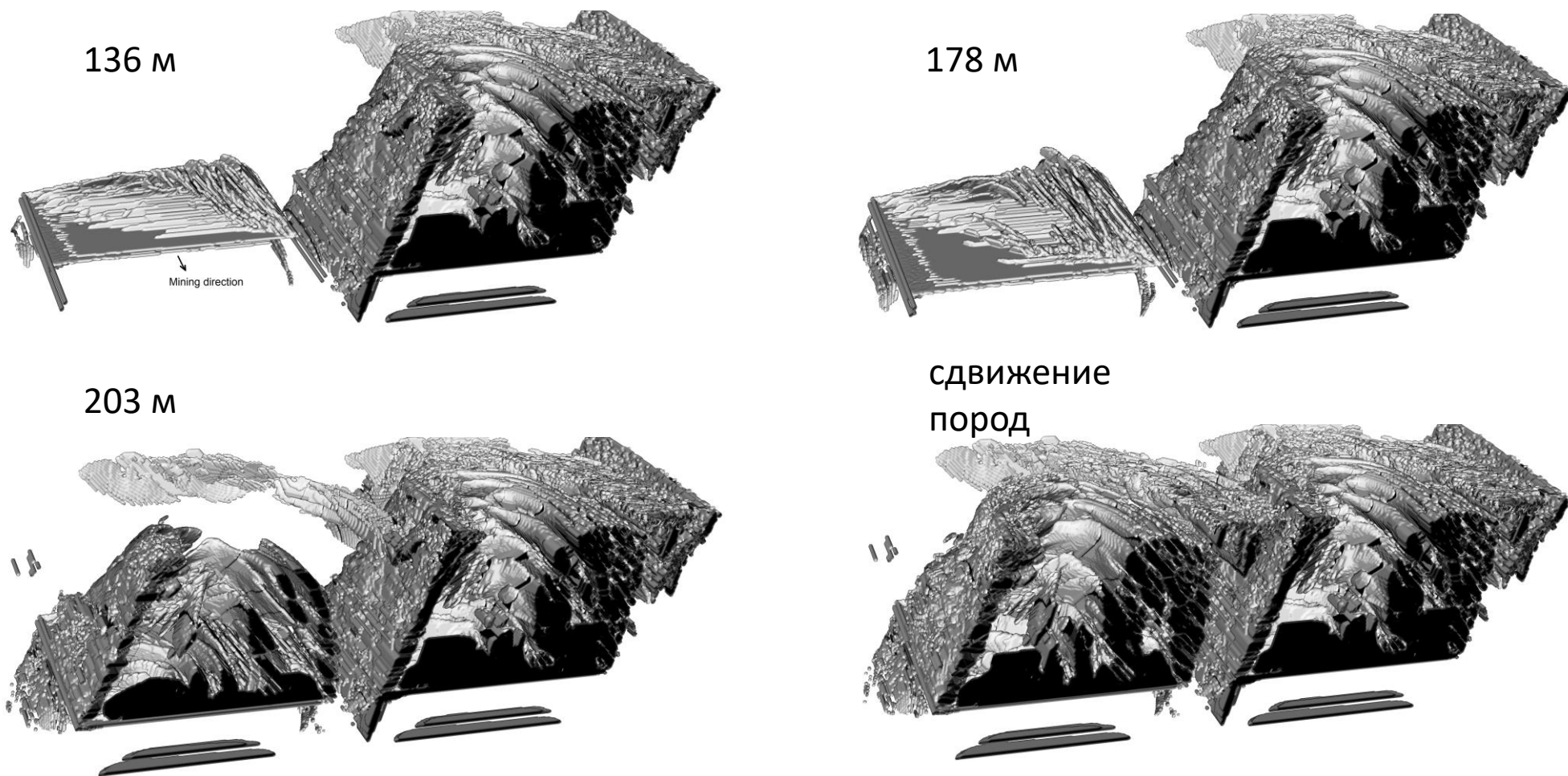


Рис. 8. Распределение интенсивности неупругих деформаций в объеме модели при различных длинах выработанного пространства.

Анализ распределения параметров НДС

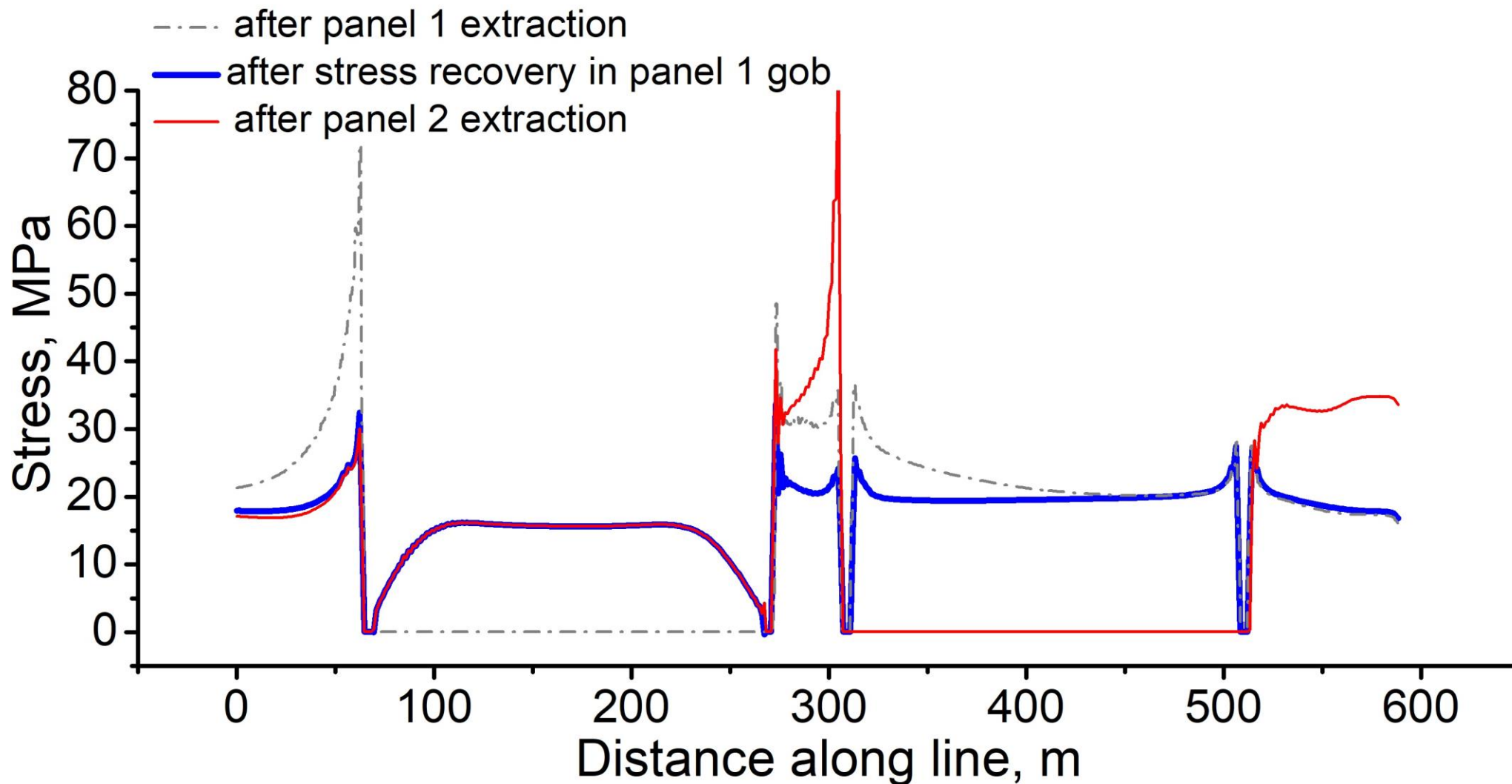


Рис. 9. Распределение вертикальных напряжений на горизонте угольного пласта в центральном сечении на разных этапах обработки столбов.

Модификация формулы для расчета устойчивости охранных целиков

Классическая формула

$$F_S = \frac{\sigma_{UCS}}{\sigma}$$



Модифицированная формула

$$F_S = \frac{\tau_S}{\tau} = \frac{Y + \alpha P}{\sqrt{\frac{1}{2} S_{ij} S_{ij}}}$$

Оценка коэффициента запаса прочности

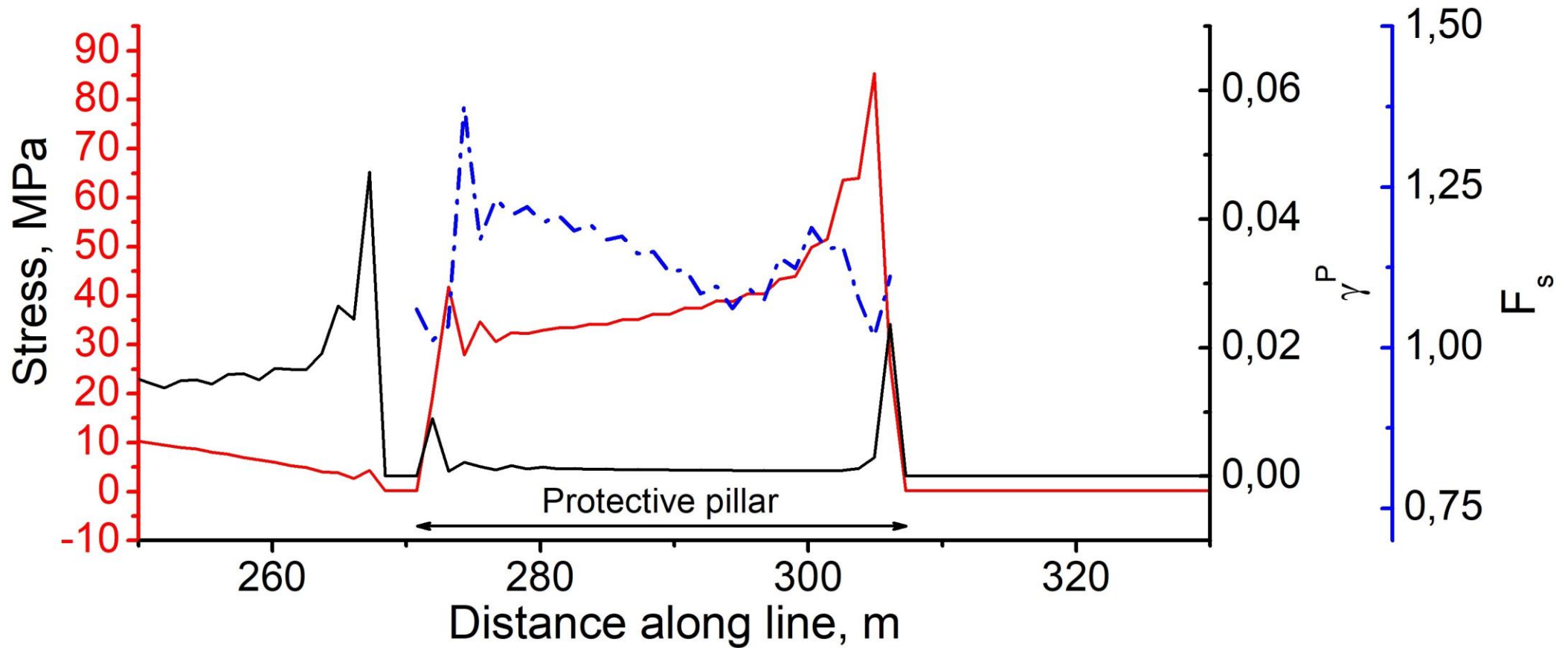


Рис. 10. Распределение вертикальных напряжений, интенсивности неупругих деформаций и коэф. запаса прочности на горизонте угольного пласта в центральном сечении после отработки обоих столбов.

Оценка коэффициента запаса прочности

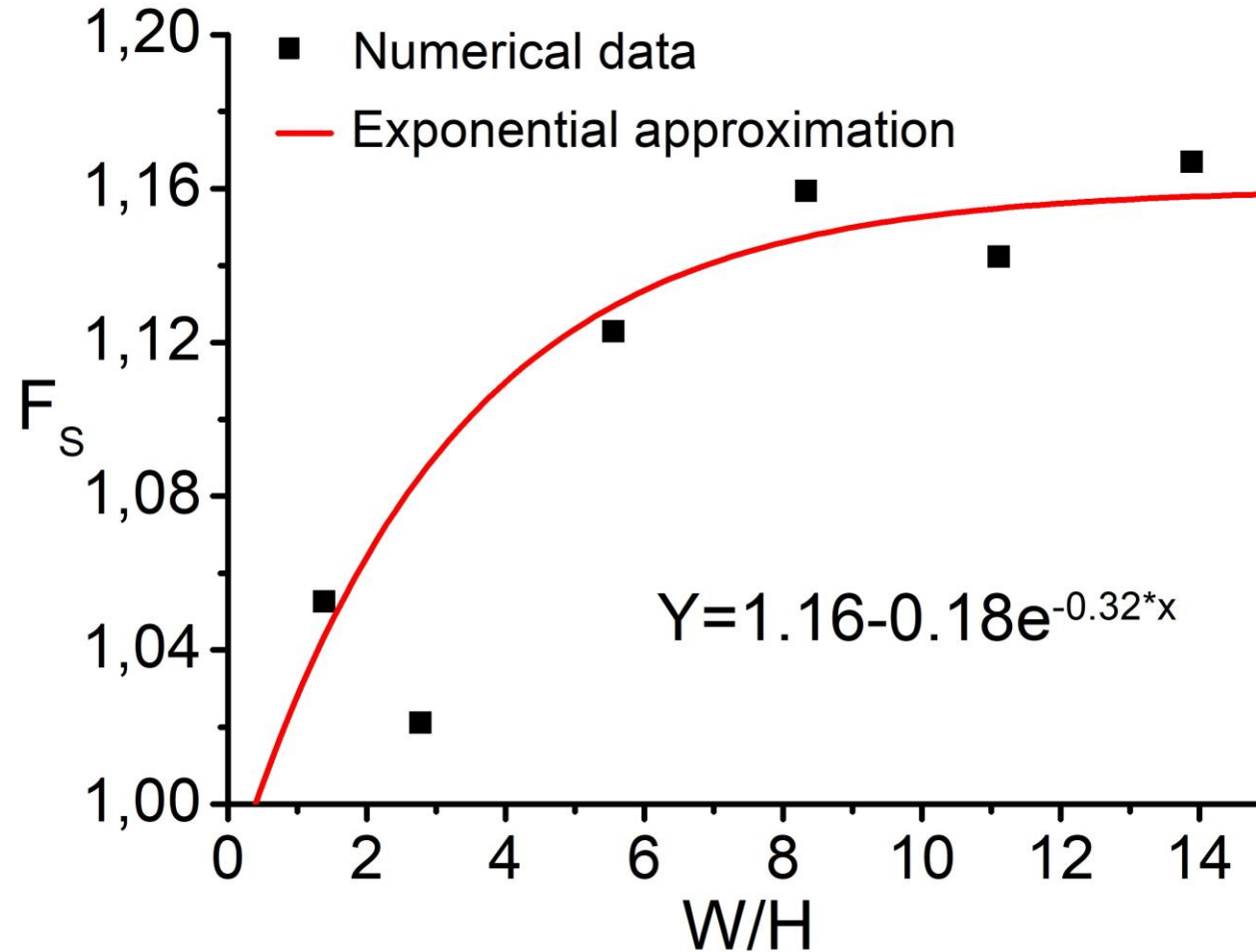


Рис. 11. Зависимость коэф. запаса прочности от соотношения высоты к ширине целика.

Выводы по результатам моделирования

1) наклон пластов приводит к сильной несимметрии в распределении параметров НДС;

(ii) формирование более мощной области повреждений наблюдается в окрестностях 1го и 3го штреков;

(iii) штреки 1 и 3, вероятно, более склонны к ухудшению их эксплуатационных свойств, чем 2 и 4.

(iv) предложен новый численный подход к оценке устойчивости охранных целиков наклонных угольных пластов.

Спасибо за внимание