

# ОТЧЕТ О ПРОДЕЛАННОЙ РАБОТЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОБОРУДОВАНИЯ ИВЦ НГУ

## Информация о коллективе:

Панов Антон Владимирович, м.н.с., Институт горного дела СО РАН

Назаров Леонид Анатольевич, д.физ.-мат.н., Институт горного дела СО РАН.

## Информация о гранте:

Проект РФФИ № 16-17-00029 (2016-2018 гг.) «Диагностика состояния и прогноз катастрофических событий в углепородном массиве при ведении горных работ на основе натуральных наблюдений, лабораторных экспериментов, геомеханического моделирования и ретроспективного анализа», рук. д.физ.-мат.н. Назарова Л.А.

## Аннотация

Разработана трехмерная модель геомеханического пространства шахты Воркутинская-Заполярная, учитывающая деформационно-прочностные свойства пород и изменение конфигурации выработанного пространства при панельной отработке угольного пласта. Модель реализована методом конечных элементов с использованием оригинального кода, адаптированного для многопроцессорных кластеров. Выполнен мультипараметрический анализ напряженно-деформированного состояния углепородного массива и, с использованием лабораторных данных о зависимости скоростей  $V_p$  и  $V_s$  упругих волн от напряжений, построены необходимые для томографии карты пространственного распределения  $V_p$  в угольном пласте на различных стадиях отработки.

## Постановка задачи

На рис.1 изображен в пространстве угольный пласт (мощностью 3 м) с нанесенной на него сеткой конечных элементов. Белыми треугольниками отмечены места расположения сейсморегистрирующей аппаратуры. Серой областью показано текущее отработанное пространство на участке. Размеры расчетной области:  $3.7 \times 1.9 \times 0.4$  км.

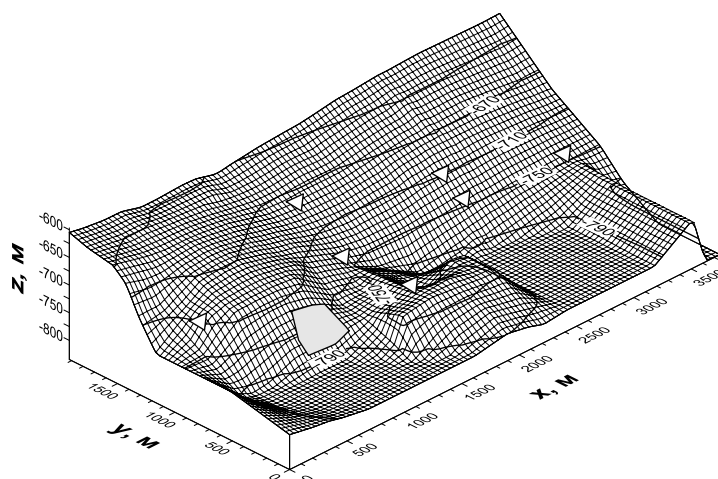


Рис.1. Дискретизация расчетной области на конечные элементы

Свойства горных пород (плотность  $\rho$ , модуль Юнга  $E$ , коэффициент Пуассона  $\nu$ ), слагающих массив приведены в табл. 1.

Таблица 1.

Порода	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$E$ , ГПа	$\nu$
Вмещающие породы	2200	50	0.25

Уголь	1500	35	0.25
Отработанное пространство	10	0,5	0.25

Расчеты проводились с использованием оригинального кода [3] методом конечных элементов. Область разбивалась на  $189 \times 97 \times 27$  элементов по осям  $x, y, z$ . Верхняя граница  $z = h$  области находилась на глубине 550 м. Информацию о величине горизонтальных напряжений в природном поле получили путем экстраполяции данных [4]. В районе объекта исследования имеет место сбросовый геодинамический режим [5], поэтому коэффициенты бокового отпора  $q_x \leq q_y < 1$ , и напряжения во внешнем поле равны (1).

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= q_x \cdot \sigma_v \\ \sigma_{yy} &= q_y \cdot \sigma_v, \\ \sigma_v &= \rho gh \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\sigma_v$  - литостатическое напряжение равное весу вышележащих пород. Деформирование среды описывается системой уравнений линейной теории упругости: закон Гука, уравнение равновесия и соотношения Коши. Расчеты проводились при  $q_x = q_y = 0.5$ .

### Результаты расчетов

На рис.2 показано распределение напряжения  $\sigma_{xx}$  в области отработанного участка угольного пласта (серая прямоугольная область, расположенная между 800 м и 1150 м по оси  $x$ ). Наблюдается: а) сгущение изолиний напряжения по краям отработки, б) уменьшение напряжений в области выработанного (частично заложеного) пространства. Отрицательные значения напряжений соответствуют сжатию.

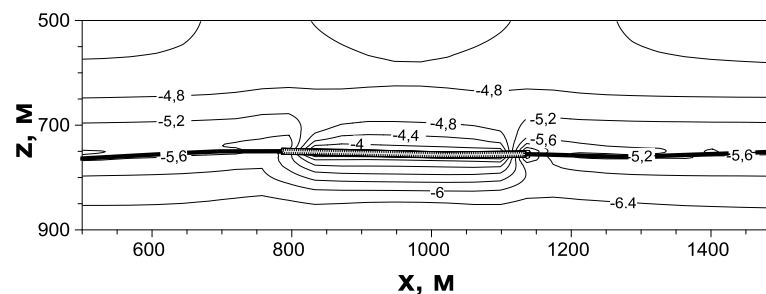


Рис.2. Изолинии горизонтальной компоненты тензора напряжений  $\sigma_{xx}$  (МПа) в сечении пласта  $y = 700$  м.

Для томографии часто применяются системы мониторинга породного массива [6]. Точность такой системы во многом зависит от выбора референтной модели участка. Лабораторные эксперименты [7] по определению скорости распространения сейсмических волн в нагруженных угольных образцах позволили установить эмпирическую зависимость (2).

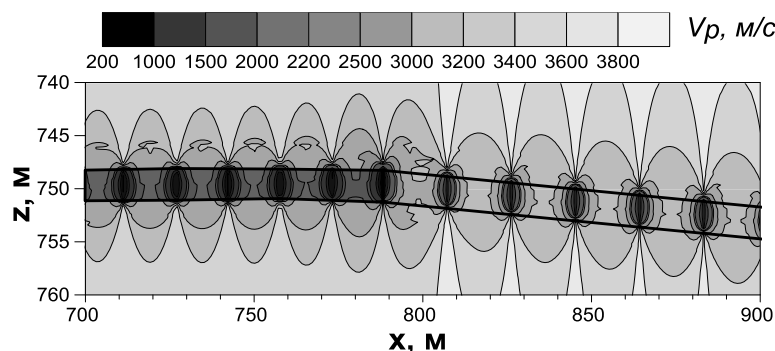
$$\begin{aligned} V_p(\sigma) &= A - (A - B) \cdot \exp(-\beta \sigma / \sigma_0) \\ \sigma &= 1/3(\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}) \end{aligned} \quad (2)$$

где  $V_p$  - скорость распространения продольных волн, константы  $A, B, \beta, \sigma_0$  приведены в табл.2,  $\sigma$  - среднее напряжение.

Таблица 2.

	$A, \text{ м/с}$	$B, \text{ м/с}$	$\beta$	$\sigma_0, \text{ МПа}$
Вмещающие породы	4518	3946	0.47	10
Уголь	2697	2214	0.78	10

На рис.3 показано распределение скорости продольных волн на участке: угольный пласт (серая область слева до уровня  $x = 790 \text{ м}$ ) – выработанное пространство. Виден значительный градиент изменения скорости при переходе с вмещающей породы на угольный пласт и выработанное пространство. Выработанное пространство частично заполнено обрушенными породами, поэтому при расчетах полагали, что скорость в 20 раз меньше, чем в угле при тех же напряжениях.

Рис.3. Изолинии  $V_p$  (м/с) в сечении пласта  $y = 700 \text{ м}$ .

Наблюдается концентрация изолиний в узлах сетки в области угольного пласта. Такая концентрация не является физическим процессом и связана только расчетной сеткой. Сама сетка выбиралась из условия, что бы один расчет проходил в «обозримый промежуток времени». Пристальное внимание ко времени расчета необходимо, т.к. на следующем этапе данной работы будет решаться обратная задача. Отметим, что один расчет проходил 15 часов.

Построены карты распределения скоростей  $V_p$  на участке шахты «Воркутинская-Заполярная», позволяющие производить оперативный мониторинг НДС массива в процессе отработки угольного пласта методами сейсмотомографии.

1. В. Н. Захаров Сейсмоакустическое прогнозирование и контроль состояния и свойств горных пород при разработке угольных месторождений. М.: ИГД им. А.А. Скочинского, 2002, 172 с.
2. Zhenbi, L., Baiting, Zh. Microseism Monitoring System for Coal and Gas Outburst // International Journal of Computer Science Issues. 2012. V. 9. Issue 5. N 1. P. 24-28.
3. П. Г. Дядьков, Л. А. Назаров, Л. А. Назарова. Трехмерная вязкоупругая модель литосферы Центральной Азии: методология построения и численный эксперимент// Физическая мезомеханика. 2004. Т. 7. № 1. С. 91-101.
4. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.dc-app3-14.gfz-potsdam.de](http://www.dc-app3-14.gfz-potsdam.de)
5. Л. А. Назарова. Использование сейсмотектонических данных для оценки полей напряжений и деформаций земной коры // ФТПРПИ. 1999. № 1. С. 28-36.
6. Luxbacher, K.D., Westman, E.C., Swanson, P.L. Karafakis, M. Three-Dimensional Time-Lapse Velocity Tomography of an Underground Longwall Panel // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 2008. V. 45(4). P. 478-485.
7. В. Л. Шкуратник, П. В. Николенко, А. Е. Кошелев. Зависимость скорости распространения и амплитуды продольных упругих волн от напряжений при различных режимах нагружения образцов каменного угля // ФТПРПИ. 2016. № 5. С. 48-53.

**Эффект от использования кластера в достижении целей работы.**

Проведение численного моделирования с использованием порядка миллиона узлов сетки расчетной области невозможно на обычных стационарных компьютерах в следствии большого объема требуемой памяти (порядка 100 ГБ ОЗУ) и времени расчетов (около 15 часов). Поэтому использование кластера являлось необходимым условием для реализации расчетов по определению напряжений в трехмерной постановке задачи.

### **Перечень публикаций, содержащих результаты работы:**

1. *Захаров В.Н., Назарова Л.А., Протасов М.И., Назаров Л.А., Панов А.В., Аверин А.П.* **Оценка горизонтальных компонент внешнего поля напряжений шахты “Воркутинская” по данным сейсмической томографии** Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, 2017, № 6, с. 23-31 (Импакт-фактор РИНЦ 1,132).
2. *Панов А.В., Назаров Л.А., Аверин А.П., Николенко П.В., Назарова Л.А.* **Объемное напряженно-деформированное состояние шахты «Воркутинская-Заполярная» по данным геомеханического моделирования** ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ, 2017, Т. 2, № 2, С. 254-259. (Импакт-фактор РИНЦ 0,301).
3. *Панов А.В., Назарова Л.А., Николенко П.В., Аверин А.П.* **Определение объемного напряженно-деформированного состояния участка массива по сейсмическим данным шахт «Воркутинская» и «Заполярная»** Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках: Материалы XXVII Международ. науч. школы им. ак. С.А.Христиановича, 2017, С. 182-186.