

## **ОБЪЕМНОЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ШАХТЫ ВОРКУТИНСКАЯ-ЗАПОЛЯРНАЯ ПО ДАННЫМ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

*Антон Владимирович Панов*

Институт проблем комплексного освоения недр РАН, 111020, Россия, г. Москва, Крюковский тупик, 4, младший научный сотрудник лаборатории геотехнологических процессов, тел. (383)205-30-30, доп. 173, e-mail: anton-700@yandex.ru

*Леонид Анатольевич Назаров*

Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор физико-математических наук, зав. лабораторией горной информатики, тел. (383)205-30-30, доп. 337, e-mail: naz@misd.ru

*Андрей Петрович Аверин*

Институт проблем комплексного освоения недр РАН, 111020, Россия, г. Москва, Крюковский тупик, 4, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории геотехнологических процессов, тел. (495)360-07-35, e-mail: averin.andrey@gmail.com

*Петр Владимирович Николенко*

Институт проблем комплексного освоения недр РАН, 111020, Россия, г. Москва, Крюковский тупик, 4, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории геотехнологических процессов, тел. (495)360-07-35, e-mail: petrov-87@mail.ru

*Лариса Алексеевна Назарова*

Институт проблем комплексного освоения недр РАН, 111020, Россия, г. Москва, Крюковский тупик, 4, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории геотехнологических процессов, тел. (383)205-30-30, доп. 335, e-mail: larisa@misd.nsc.ru

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.

**Ключевые слова:** углепородный массив, объемная геомеханическая модель, напряженно-деформированное состояние, метод конечных элементов, скорость упругих волн.

## **VOLUMETRIC STRESS-STRAIN STATE OF VORKUTINSKAYA-ZAPOLYARNAYA MINE FIELD ACCORDING TO GEOMECHANICAL MODELING DATA**

*Anton V. Panov*

Institute of Comprehensive Exploration of Mineral Resources RAS, 111020, Russia, Moscow, 4 Kryukovsky Tupik, Junior Researcher, Geotechnology Laboratory, tel. (383)205-30-30, extension 173, e-mail: anton-700@yandex.ru

**Leonid A. Nazarov**

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, D. Sc., Head, Mining Information Science Laboratory, tel. (383)205-30-30, extension 337, e-mail: naz@misd.ru

**Andrey P. Averin**

Institute of Comprehensive Exploration of Mineral Resources RAS, 111020, Russia, Moscow, 4 Kryukovsky Tupik, Ph. D., Senior Researcher, Geotechnology Laboratory, tel. (495)360-07-35, e-mail: averin.andrey@gmail.com

**Peter V. Nikolenko**

Institute of Comprehensive Exploration of Mineral Resources RAS, 111020, Russia, Moscow, 4 Kryukovsky Tupik, Ph. D., Researcher, Geotechnology Laboratory, tel. (495)360-07-35, e-mail: petrov-87@mail.ru

**Larisa A. Nazarova**

Institute of Comprehensive Exploration of Mineral Resources RAS, 111020, Russia, Moscow, 4 Kryukovsky Tupik, D. Sc., Leading Researcher, Geotechnical Processes Laboratory, tel. (383)205-30-30, extension 335, e-mail: larisa@misd.nsc.ru

3D model of the geomechanical space of Vorkutinskaya-Zapolyarnaya Mine is constructed with consideration for strain-strength rock properties and variations in worked out space shape under panel coal mining. The model is realized by the finite element method with the use of the original code adapted for multi-processor clusters. Multiparameter analysis of the stress-strain state of the coal-rock mass is performed based on laboratory data on relationship of elastic wave velocities  $V_p$  and  $V_s$  vs. stresses. The necessary-for-tomography maps of spatial  $V_p$  distribution in a coal seam at different mining stages are made.

**Key words:** coal-rock mass, 3D geomechanical model, stress-strain state, finite element method, elastic wave velocity.

**Введение.** В России подземным способом добывается около трети всего объема извлекаемого угля. В современных геотехнологиях применяются высокопроизводительные проходческие и очистные комплексы, способные обеспечить скорость продвижения лавы до 15 м/с при протяженности последней 200-300 м [1]. При таких темпах горных работ происходит достаточно быстрое изменение геомеханических полей не только в окрестности забоя, но и в шахте в целом, что может стать причиной формирования и реализации нежелательных геодинамических явлений. Для их прогноза используются системы мониторинга [2,3], которые регистрируют, обрабатывают и интерпретируют микросейсмическую информацию, обычно применяя методы “большой сейсмологии”. При этом напряженно-деформированное состояние, как правило, не учитывается, хотя является основным элементом любого критерия прочности материалов и устойчивости массива горных пород. Как показано в [4], совместный анализ полей напряжений и данных томографии может существенно расширить возможности систем мониторинга, в частности, привлекая данные лабораторных экспериментов, восстановить текущее распределение некоторых параметров напряженного состояния, а также, посредством решения граничной обратной задачи – оценить горизонтальные компоненты внешнего поля напряжений.

К настоящему времени на объектах ОАО “Воркутауголь” разворачивается система шахтного мониторинга. Настоящая работа, в которой построена объемная геомеханическая модель шахты “Воркутинская-Заполярная”, является первым этапом создания методической основы для интерпретации микросейсмической информации.

**Геомеханическая модель: структура объекта и физические свойства пород.**

Размеры расчетной области  $D$  ( $3.7 \times 1.9 \times 0.5$  км) выбраны таким образом, чтобы подготавливаемый выемочный участок оказался в центре (рис. 1). Отрабатываемый пласт (мощность 3 м) в пределах  $D$  расположен на глубинах от 650 до 840 м. Информация о величине региональных горизонтальных напряжений для Печорского угольного бассейна практически отсутствует, поэтому, экстраполируя данные [5], примем, что в окрестности исследуемого объекта имеет место сбросовый геодинамический режим, характеризуемый коэффициентами бокового отпора  $q_x \leq q_y < 1$  [6].

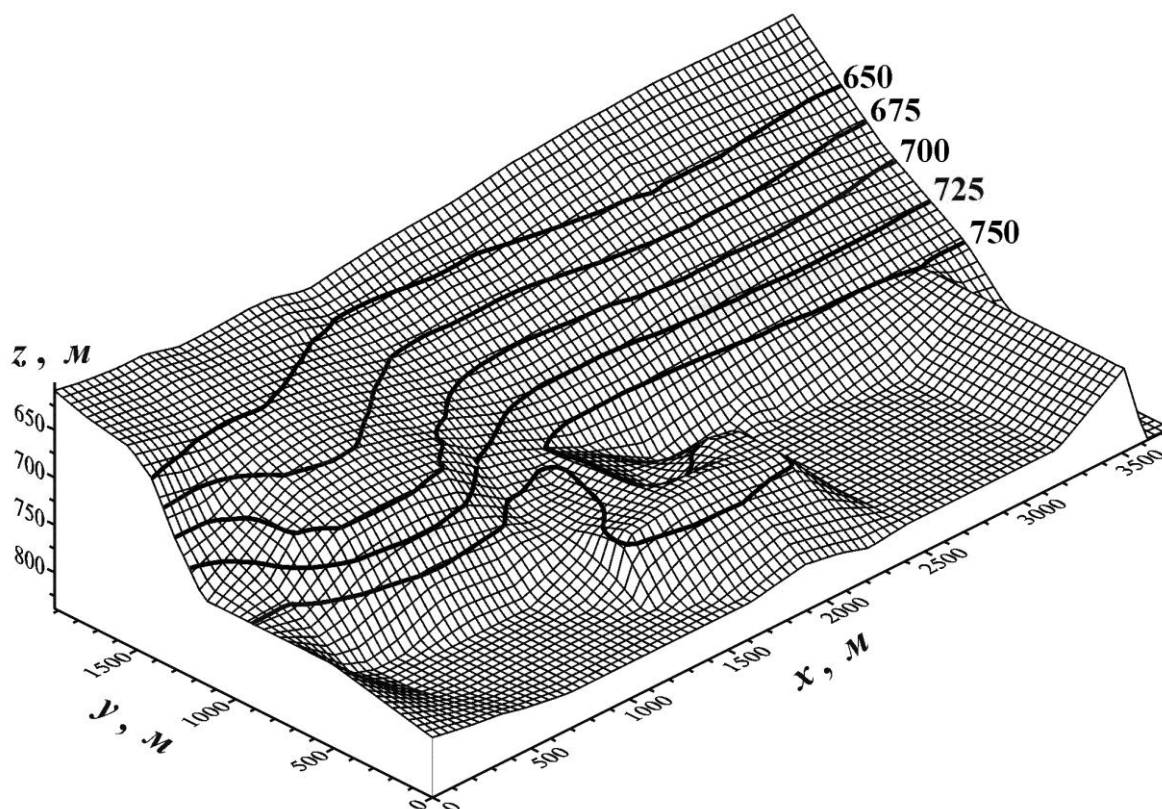


Рис. 1. Фрагмент дискретизации области  $D$  на конечные элементы,  $(x, y, z)$  – декартовы координаты

Свойства горных пород ( $E$ -модуль Юнга,  $\nu$ -коэффициент Пуассона,  $\rho$ -плотность), слагающих массив приведены в таблице. Расчеты велись методом конечных элементов с использованием оригинального кода [7,8], область  $D$  содержала  $371 \times 193 \times 85$  узлов по соответствующим осям координат, верхняя горизонтальная граница  $D$  расположена на расстоянии 550 м от дневной поверхности.

## Физические свойства пород

Порода	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$E$ , ГПа	$\nu$	$A$ , м/с	$B$ , м/с	$\alpha$ , МПа <sup>-1</sup>
Вмещающие породы	2200	40	0.25	2900	1000	0.058
Уголь	1500	10	0.27	2698	484	0.078

**Результаты расчетов.** В качестве примера на рис. 2 показано распределение напряжения  $\sigma_{xx}$  в среднем сечении угольного пласта. Следует отметить, что вследствие перепада глубин залегания последнего, в западной части пласта напряжения существенно выше. Это необходимо учитывать при выборе направления отработки.

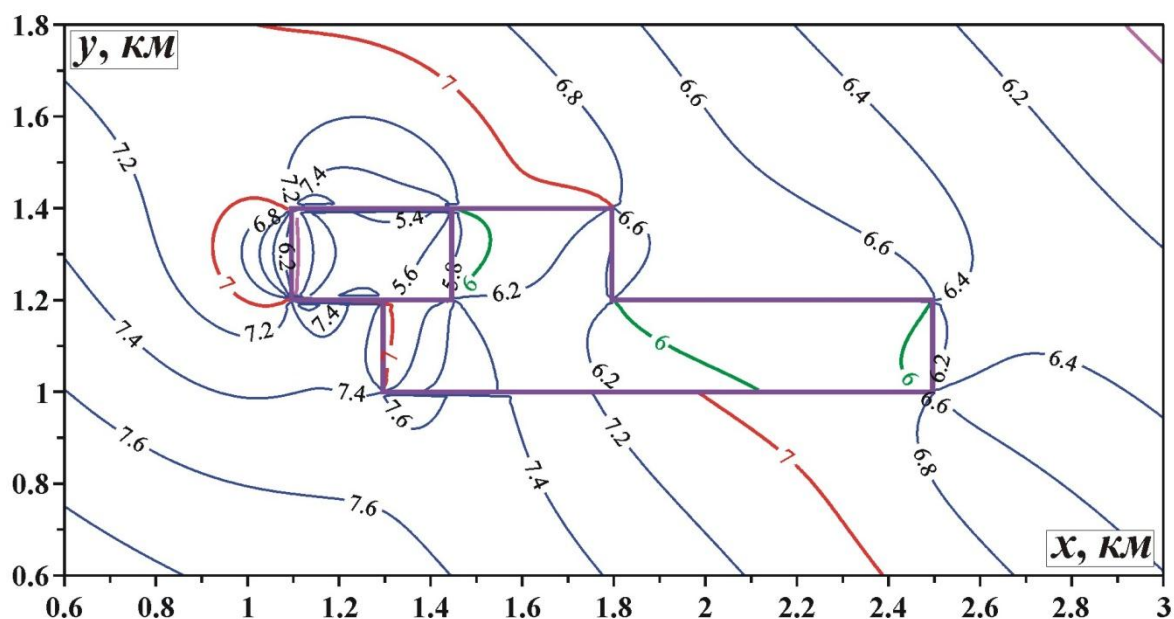


Рис. 2. Изолинии горизонтальной компоненты тензора напряжений  $\sigma_{xx}$  (МПа) в среднем сечении пласта для  $q_x=q_y=0.5$

Данные системы мониторинга состояния породного массива часто используются для томографии [9]. Ее точность во многом зависит от качества выбора референтной модели. При задании начального распределения скоростей распространения продольных волн  $V_p$  в среде необходимо учитывать зависимость  $V_p$  от напряжений. Аппроксимация данных лабораторных экспериментов на углях [10] и песчаниках [11] позволила построить эмпирическую зависимость

$$V_p(\sigma) = A - B \exp(-\alpha \sigma) \quad (1)$$

( $\sigma$ -среднее напряжение), константы  $A$ ,  $B$  и  $\alpha$  приведены в таблице.

Рис. 3 демонстрирует распределение  $V_p$  в среднем сечении пласта, построенное по рассчитанному полю напряжений  $\sigma_{ij}(x,y,z)$  и (1), где  $\sigma = (\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz})/3$ . Следует отметить, что:

♦ как и следовало ожидать, наибольшие изменения  $V_p$  претерпевает в окрестности выработанного пространства;

♦ с увеличением глубины пространственный градиент  $V_p$  падает вследствие выполаживания зависимости  $V_p(\sigma)$  с ростом среднего напряжения.

Построенная геомеханическая модель объекта предназначена для оперативного выбора референтного распределения скорости продольных волн и будет положена в основу разрабатываемого томографического модуля системы мониторинга шахты “Воркутинская-Заполярная”.

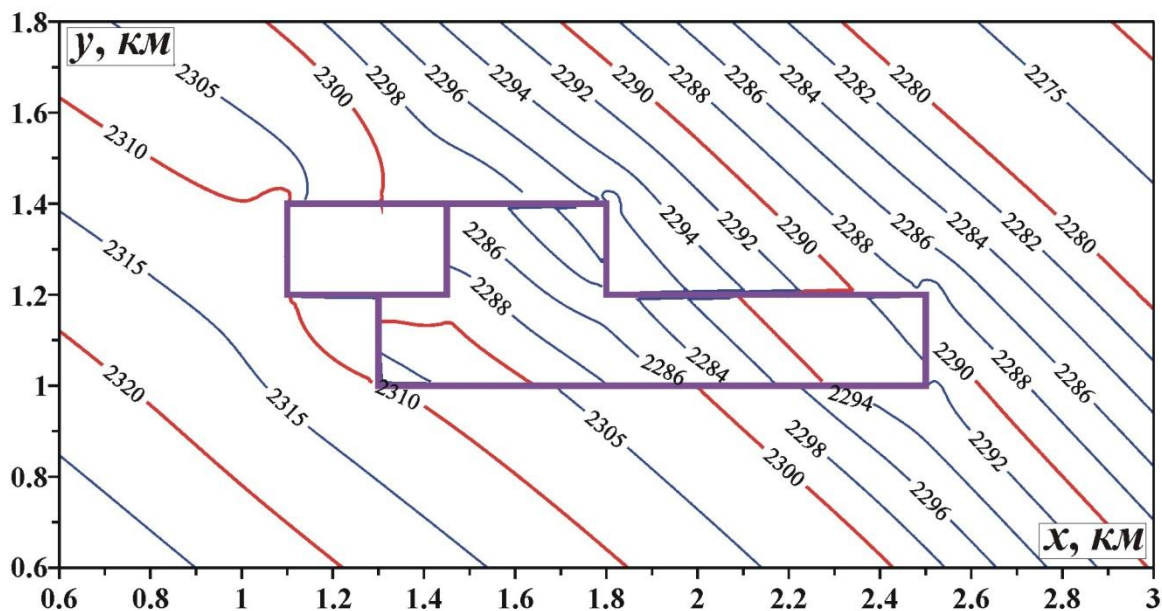


Рис. 3. Изолинии  $V_p$  (км/с) в среднем сечении пласта при  $q_x=q_y=0.5$

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 16-17-00029).*

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. В. Н. Захаров, О. Н. Малинникова, А. П. Аверин. Моделирование вибрационно-колебательных процессов горных пород в призабойной зоне углепородного массива при техногенном воздействии // Горный журнал. 2016 № 12. С. 28-32.
2. 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.
3. 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.
4. Л. А. Назарова, Л. А. Назаров, М. И. Протасов. Реконструкция объемных полей напряжений в углепородном массиве на основе решения обратной задачи по томографическим данным // ФТПРПИ. 2016. № 4. С. 12 – 21.
5. [www.dc-app3-14.gfz-potsdam.de](http://www.dc-app3-14.gfz-potsdam.de)
6. Л. А. Назарова. Использование сеймотектонических данных для оценки полей напряжений и деформаций земной коры // ФТПРПИ. 1999. № 1. С. 28-36.

7. П. Г. Дядьков, Л.А. Назаров, Л.А. Назарова. Численное моделирование напряженного состояния земной коры и условий возникновения динамической неустойчивости сейсмоактивных разломов при рифтогенезе // Геология и геофизика. 1997. Т. 38. № 12. С. 2001-2010.

8. 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.

9. 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.

10. 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.

12. Pervukhina, M., Gurevich, B., Dewhurst, D.N., Siggins, A.F. Applicability of velocity–stress relationships based on the dual porosity concept to isotropic porous rocks // Geophysical Journal International. 2010. V. 181. N 3. P. 1473–1479.

© А. В. Панов, Л. А. Назаров, А. П. Аверин, П. В. Николенко, Л. А. Назарова, 2017