

ЭВОЛЮЦИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОРОДНОГО МАССИВА ПРИ ОТРАБОТКЕ ТАШТАГОЛЬСКОГО ЖЕЛЕЗОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ 3D-МОДЕЛИРОВАНИЯ

Леонид Анатольевич Назаров

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, тел. (383)217-24-46, e-mail: mining1957@mail.ru

Лариса Алексеевна Назарова

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории горной информатики, тел. (383)217-24-46, e-mail: lanazarova@ngs.ru

Антон Владимирович Панов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, младший научный сотрудник, тел. (383)217-06-36, e-mail: anton-700@yandex.ru

Нелли Александровна Мирошниченко

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории горной информатики, тел. (383)217-09-30, e-mail: mna@misd.nsc.ru

Разработана и методом конечных элементов реализована детальная 3D геомеханическая модель Таштагольского железорудного месторождения, описывающая эволюцию напряженно-деформированного состояния в процессе отработки в период 1978–2014 гг. При моделировании учтены следующие факторы: взаимосвязь локальных и региональных полей напряжений, геолого-структурные и тектонические особенности залежи, рельеф местности и изменение конфигурации выработанного пространства. Полученные результаты предназначены для геомеханического обоснования технологии дальнейшей отработки и установления количественной связи между параметрами напряженного состояния и сейсмической активностью месторождения.

Ключевые слова: массив горных пород, напряженно-деформированное состояние, объемная геомеханическая модель, метод конечных элементов, Таштагольское месторождение.

EVOLUTION OF STRESS–STRAIN STATE OF ROCK MASS IN TASHTAGOL IRON ORE MINING BASED ON 3D MODELING

Leonid A. Nazarov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptuyug Prospect 3, Doctor of Science, Principal Scientific Researcher, tel. (383)217-24-46, e-mail: mining1957@mail.ru

Larisa A. Nazarova

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, Krasny Prospect 54, Doctor of Science, Principal Researcher, Mining Information Science Laboratory, tel. (383)217-24-46, e-mail: lanazarova@ngs.ru

Anton V. Panov

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, Krasny Prospect 54, Junior Researcher, tel. (383)217-06-36, e-mail: anton-700@yandex.ru

Nelli A. Miroshnichenko

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, Krasny Prospect 54, Ph. D, Researcher, Mining Information Science Laboratory, tel. (383)217-09-30, e-mail: mna@misd.nsc.ru

Developed and implemented with the finite element method, the detailed 3D geomechanical model of Tashtagol iron ore deposit describes evolution of stress–strain state of rocks in the course of mining from 1978 to 2014. The modeling accounts for the following factors: interaction of local and regional stress fields; geological, structural and tectonic features of the deposit; terrain relief and change in geometry of mined-out voids. The results are intended for geomechanical evaluation of a geotechnology to be used further and for finding quantitative relationship between stress state parameters and seismic activity in the area.

Key words: rock mass, stress-strain state, 3D geomechanical model, finite-element method, Tashtagol deposit.

Геомеханическая модель является одним из основных этапов при обосновании схемы вскрытия и технологии отработки месторождений. Она также необходима для оценки текущего состояния породного массива и прогноза его изменения в ходе ведения горных работ. Промышленная эксплуатация Таштагольского железорудного месторождения (ТЖМ) началась в 1940-х гг. Несмотря на это, была предпринята единственная попытка создания его объемной геомеханической модели [1], где шаг дискретизации (составлявший в среднем 100 м) не позволял детально описать процесс отработки. К настоящему моменту горные работы ведутся уже на более глубоких горизонтах, резко возросла наведенная сейсмичность региона, вплоть до возникновения техногенных динамических событий [2], магнитуда которых сравнима с таковой для умеренных природных землетрясений. Указанные обстоятельства и стали побудительной причиной создания и исследования детальной модели ТЖМ, являющейся предметом настоящей статьи.

На ТЖМ разрабатывают сближенные рудные тела линзообразной формы субвертикального падения. Мощность рудной зоны изменяется от 4 до 100 м, длина по простиранию – до 600 м, по падению они прослеживаются на глубину до 1500 м. Вмещающий массив представлен сиенитами, скарнами, диоритами, сланцами, гранодиоритами, порфиритами и известняками. Рудные тела секутся дайками микросиенитпорфира и диабазы мощностью от нескольких сантиметров до 12 м и разрывными нарушениями мощностью от 5 до 30 м, по которым наблюдается смещение крыльев до 120 м [3]. Разработка запасов предусматривает разделение рудного тела на этажи высотой 70 м, которые делятся на панели шириной 13.5÷27 м и длиной, равной мощности рудного тела. Основная технология отработки – взрывание сближенных зарядов ВВ. В настоящее время очистные работы достигли отметки 760 м, вскрытие осуществляется на глубине свыше 900 м (гор. –350 м).

Для построения 3D геомеханической модели месторождения отсканированы копии производственных планов горных работ на горизонтах +70, 0, -70, ..., -490 м, а затем произведена их оцифровка в локальной декартовой системе координат с шагом около 25 м. Во введенной локальной системе координат начало координат находится на нулевом горизонте, ось Ox направлена вкост простирания рудных тел, ось Oy – по простиранию (азимут 140°), ось Oz – вертикально вниз. Далее проводилась привязка данных оцифровки к географическим координатам для учета в модели рельефа местности. Рельеф снимался с карты М 1:50000; при необходимости применялась линейная интерполяция.

Моделируемая область имеет размеры $2.5 \times 4 \times 1$ км по соответствующим осям координат и полностью содержит Таштагольский рудник. Верхняя граница области расположена на отметке +70 м, ниже минимальной отметки рельефа +120 м. В пределах расчетной области учтены данные о нарушениях сплошности; все они – крутопадающие, с углом наклона $80-90^\circ$.

Дискретизация расчетной области на конечные элементы ассоциировалась с геолого-структурными и тектоническими особенностями залежи. В соответствии с подходом, предложенным в [4], на первом этапе осуществлялось разбиение на четырехугольники горизонтальных сечений области с шагом по вертикальной оси 35 м (половина этажа отработки), а затем из 2D-элементов производилась компоновка 3D-сетки элементов-гексаэдров. Разломные нарушения моделировались контакт-элементами. На внутренних границах – контурах рудных тел и вдоль линий разломов – сетка сгущалась. В целом расчетная область содержит 95 тыс. элементов, средние размеры которых – $25 \times 25 \times 35$ м (рис. 1).

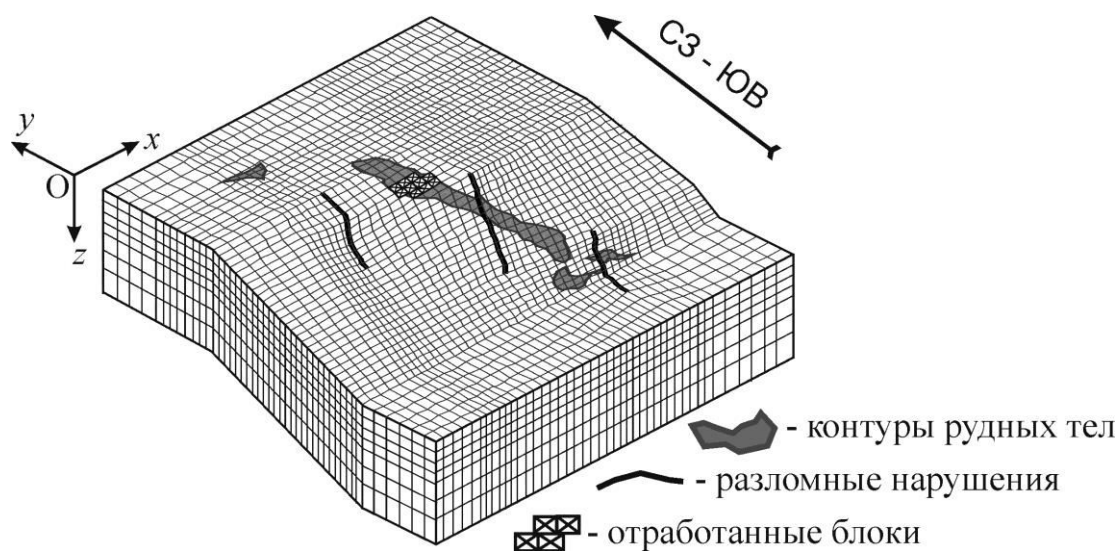


Рис. 1. Фрагмент конечноэлементной 3D-модели Таштагольского железорудного месторождения (верхняя плоскость – горизонт -210 м)

Физические свойства пород с учетом конфигурации выработанного пространства по состоянию на 1978, 1989, 1998, 2009 и 2014 гг. задавались анало-

гично [1], а горизонтальные напряжения в нетронутом массиве – по [5]. Реализация модели осуществлялась с использованием оригинального кода [1, 4].

Было рассчитано напряженно-деформированное состояние ГЖМ на всех перечисленных выше этапах отработки, но вследствие ограниченного объема статьи приводится лишь один пример, иллюстрирующий эволюцию поля напряжений: рис. 2 демонстрирует распределение компоненты σ_{yy} (по простиранию рудных тел) на горизонтах -140 м и -210 м.

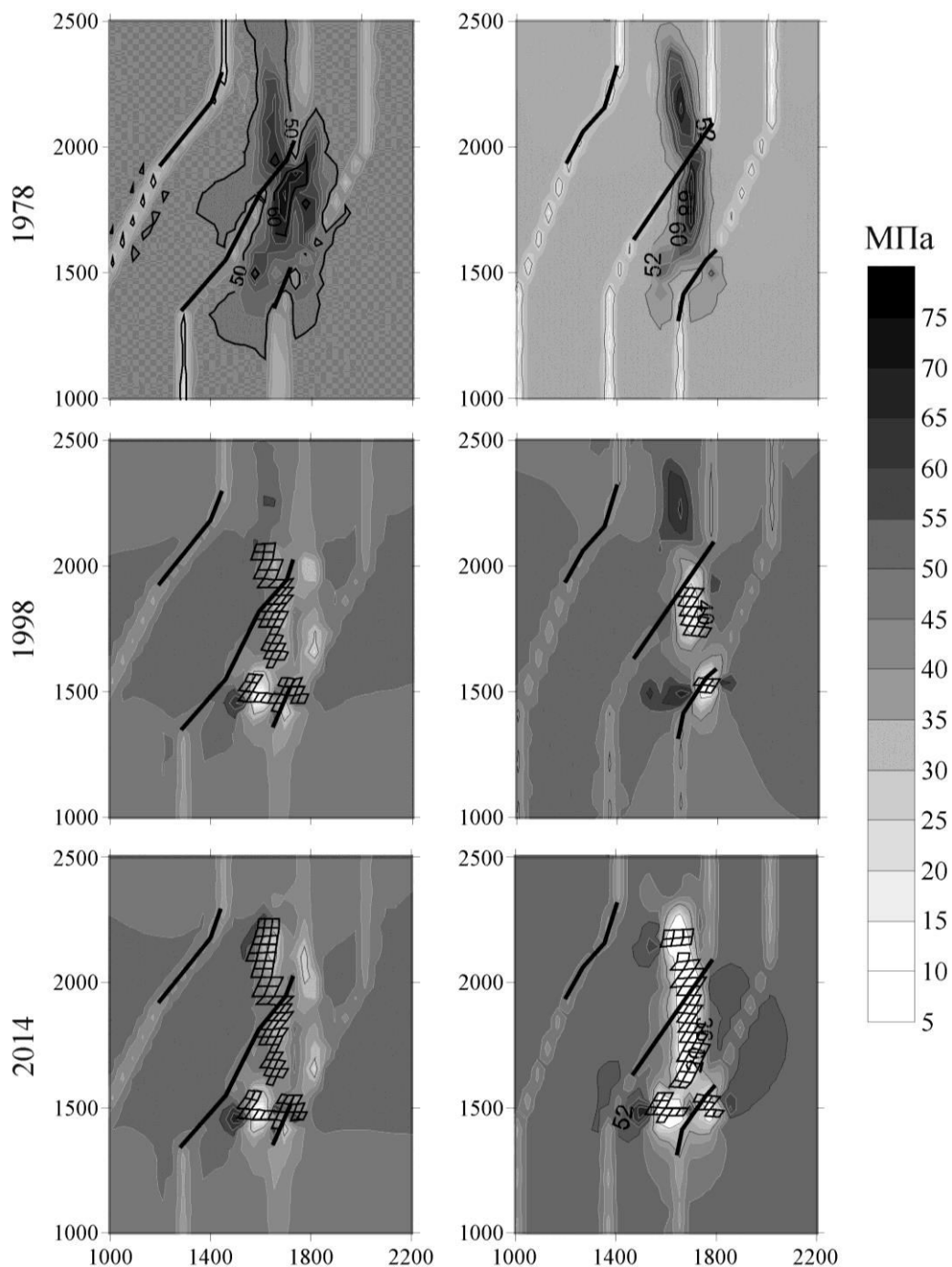


Рис. 2. Изолинии напряжения σ_{yy} на различных этапах отработки (столбец слева – горизонт -140 м, справа -210 м)

Здесь отчетливо виден процесс миграции зон повышенных напряжений: на ранних этапах отработки они располагаются перед фронтом горных работ, затем перемещаются на фланги выработанного пространства. Высокий уровень напряжений (по сравнению с литостатическими, составляющими на горизонте –210 м около 20 МПа) обусловлен взбросовым геодинамическим режимом природного поля напряжений (коэффициент бокового отпора в направлении у принят, согласно [3, 5, 6], равным 2.5).

Полученные результаты служат входными данными для совместного анализа эволюции детерминированных полей напряжений и деформаций и стохастической информации о техногенной сейсмичности, основанного на подходах, предложенных в [7] для природных и в [8] для антропогенных объектов.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (проект № 15-05-06977).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Назарова Л.А., Назаров Л.А., Леонтьев А.В. Объемная геомеханическая модель Таштагольского железорудного месторождения // ФТПРПИ. - 1998. - № 3. - С. 28-37.
2. Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В., Лескова Е.В. Техногенная сейсмичность Кузбасса // Современная тектонофизика. Методы и результаты: Материалы четвертой тектонофизической школы-семинара. - М.: ИФЗ, 2015. - Т. 1. - С.108-111.
3. Курленя М.В., Авзалов И.А., Еременко А.А., Квочин В.А. Геомеханические условия отработки Таштагольского железорудного месторождения // ФТПРПИ. - 1990. - № 5. - С. 3-9.
4. Дядьков П.Г., Назаров Л.А., Назарова Л.А. Трехмерная вязкоупругая модель литосферы Центральной Азии: методология построения и численный эксперимент // Физическая мезомеханика. - 2004. - Т. 7. - № 1. - С. 91-101.
5. Шрепп Б.В., Нохрин А.М. Оценка напряженного состояния массива пород Таштагольского месторождения // Сб: Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния массива шахт и рудников. - Новосибирск, 1990. - С. 138-142.
6. Назарова Л.А. Использование сейсмотектонических данных для оценки полей напряжений и деформаций земной коры // ФТПРПИ. - 1999. - № 1. - С. 28-36.
7. Дядьков П.Г., Назаров Л.А., Назарова Л.А. и др. Сейсмотектоническая активизация Байкальского региона в 1989-1995 годах: результаты экспериментальных наблюдений и численное моделирование изменений напряженно-деформированного состояния // Геология и геофизика. - 1999. - Т. 40. - № 3. - С. 373-386.
8. Назаров Л.А., Назарова Л.А., Ярославцев А.Ф., Мирошниченко Н.А., Васильева Е.В. Эволюция геомеханических полей и техногенная сейсмичность при отработке месторождений полезных ископаемых // ФТПРПИ. - 2011. - № 6. - С. 3-11.

© Л. А. Назаров, Л. А. Назарова, А. В. Панов, Н. А. Мирошниченко, 2016