

Оценка влияния технологии отработки месторождения на уровень сейсмической активности по данным геомеханического моделирования и натурных наблюдений

Л. А. Назарова^{1}, Н. А. Мирошниченко¹, Л. А. Назаров¹*

¹ ФГБУН Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
* e-mail: larisa.a.nazarova@mail.ru

Аннотация. На основе ретроспективного анализа верифицирован оригинальный подход, позволяющий установить количественные связи между параметрами детерминированных и стохастических процессов различной физической природы, который состоит в выявлении статистически значимых корреляционных связей между длинными временными рядами ключевых параметров этих процессов, зарегистрированными в различных пространственных областях целевого объекта. В рамках этого подхода выполнен пространственно-временной анализ техногенной сейсмичности (координаты гипоцентров, время и энергия слабых и умеренных динамических событий) на Таштагольском железорудном месторождении в совокупности с геомеханическим моделированием эволюции полей напряжений, обусловленной ведением горных работ. С использованием полученных корреляционных зависимостей между числом динамических событий и интегральной характеристикой напряженного состояния сделан прогноз числа динамических событий в различных областях геомеханического пространства месторождения при различных технологиях отработки. Сравнение результатов показало, что возведение закладочного массива, как правило, уменьшает уровень сейсмической активности.

Ключевые слова: геомеханическая модель, техногенная сейсмичность, пространственно-временной корреляционный анализ

Assessment of the Mining Technology Influence to the Level of Seismic Activity by Geomechanical Modeling and Field Observations Data

L. A. Nazarova^{1}, N. A. Miroshnichenko¹, L. A. Nazarov¹*

¹ Chinakal Institute of Mining of the Siberian Branch of the RAS, Novosibirsk, Russian Federation
* e-mail: larisa.a.nazarova@mail.ru

Abstract. Based on a retrospective analysis, an original approach was verified that allows establishing quantitative relationships between the parameters of deterministic and stochastic processes of various physical nature. The approach consists in revelation of statistically significant correlations between long time series of key parameters of these processes, recorded in different spatial regions of target object. Within the framework of this approach, a space-time analysis of technogenic seismicity (hypo-center coordinates, time and energy of weak and moderate dynamic events) at the Tashtagol iron ore deposit was performed in conjunction with geomechanical modeling of the stress field evolution due to mining. Using the obtained correlation dependences between the number of dynamic events and the integral characteristic of the stress state, a forecast was made for the number of dynamic events in different areas of the geomechanical space of the deposit under various mining technologies. Comparison of the results shows that due to backfill array construction, as a rule, the level of seismic activity decreases.

Keywords: geomechanical model, induced seismicity, space-time correlation analysis

Введение

Увеличение глубины горных работ и объемов добычи полезных ископаемых обуславливает рост техногенной нагрузки на геомеханическое пространство месторождений, вызывая рост числа негативных проявлений горного давления в динамической форме [1].

Предметом современной количественной сейсмологии является, в основном, апостериорный анализ сейсмограмм для определения фокальных параметров землетрясений и установления статистическими методами пространственно-временных закономерностей сейсмического процесса [2]. Гораздо меньше внимания уделяется выявлению роли вариаций полей напряжений в формировании сейсмичности, по-видимому, из-за чрезвычайной сложности построения и верификации геомеханических моделей крупномасштабных геологических объектов. Возможно, это одна из главных причин отсутствия надежной методики предсказания природных землетрясений [3].

На всех действующих шахтах и рудниках функционируют системы микросейсмического мониторинга [4], что дает возможность формировать базу данных динамических событий и проводить сейсмическую томографию [5], определяя скорости упругих волн во всем объекте. Такая информация в сочетании с данными геологоразведки и деформографических измерений позволяет создать геомеханическую модель, адекватно описывающую эволюцию полей напряжений. Эта модель может быть использована для форвардных расчетов последних в соответствии с планом горных работ.

В [6] теоретически обоснован и практически реализован метод оценки пространственно-временного распределения интегральных параметров техногенной сейсмичности на действующем месторождении твердых полезных ископаемых (Таштагольское железорудное месторождение, ТЖМ), который верифицирован на основе ретроспективного анализа [7]. В настоящей работе проведено уточнение полученных в [7] оценок с учетом возведенного закладочного массива.

Геомеханическая модель исследуемого объекта и поля напряжений

В [6,7] разработана и с использованием оригинального МКЭ кода [8] численно реализована детальная 3D геомеханическая модель ТЖМ (рис. 1а), учитывающая геологическое строение, свойства горных пород и закладочного массива, направление и величину горизонтальных напряжений Σ_H и Σ_h (характеризуются коэффициентами бокового отпора $q_H = 2.5$ и $q_h = 1.3$) вне зоны влияния горных работ, а также ежегодное изменение конфигурации выработанного пространства за период с 1989 по 2020 гг., обуславливающее квазистатическое изменение поля напряжений. Проведенные расчеты позволили получить в каждой точке расчетной области R (параллелепипед $2400 \times 4000 \times 800$ м, включающий все рудные тела месторождения) детерминированные данные – временные ряды компонент тензора напряжений $\sigma_{mn}(x, y, z, t)$ ($m, n = x, y, z; t = 1989, \dots, 2020$).

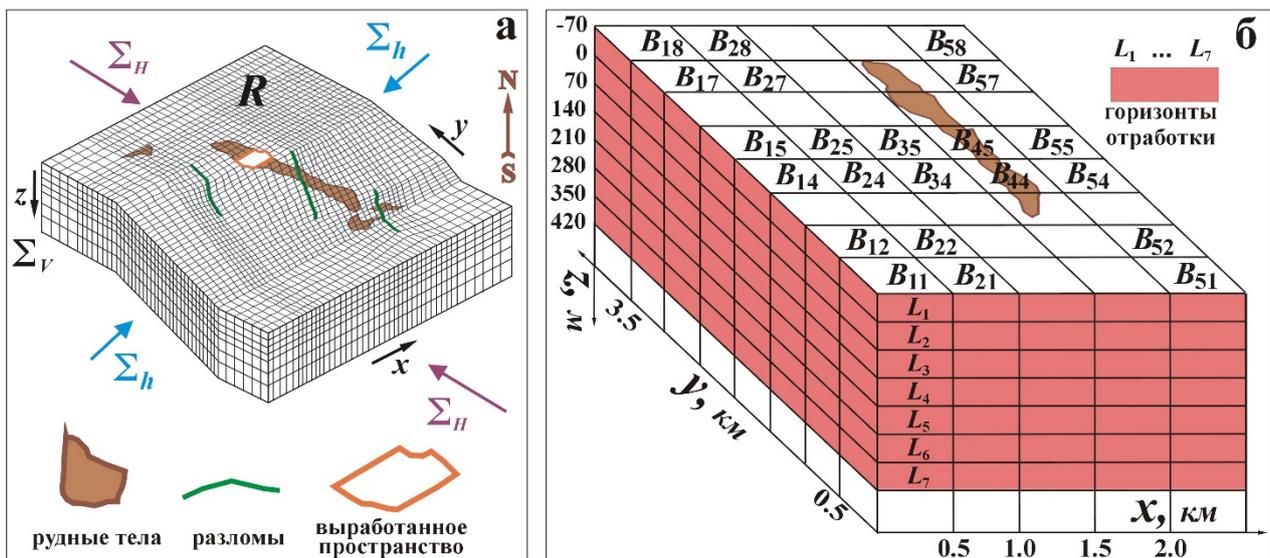


Рис. 1. Фрагмент МКЭ дискретизации R (а); разбиение R на блоки для корреляционного анализа напряженного состояния и техногенной сейсмичности (б)

Рисунок 2 демонстрирует линии уровня нормальных напряжений σ_{xx} на горизонте -210 м (рис. 1б) в различные годы, которые иллюстрируют как мигрируют области повышенных напряжений с изменением конфигурации выработанного пространства.

Влияние закладочного массива на параметры техногенной сейсмичности

В связи с отработкой богатых руд на участках, расположенных под р. Кондома, было принято решение перейти от технологии с обрушением вмещающих пород к технологии с закладкой выработанного пространства твердеющими смесями [9]. Рассмотрим, как влияет смена технологии на параметры техногенной сейсмичности, поскольку возведение закладочного массива приводит к перераспределению напряжений в массиве горных пород.

Для пространственно-временного анализа параметров техногенной сейсмичности на каждом горизонте отработки L_k ($k = 1, \dots, 6$) область R разбивалась на блоки B_{ij} (размеры $500 \times 500 \times 70$ м, рис. 1б) и вводилась интегральная характеристика

$$T_{ij}(t) = \iiint_{B_{ij}} \tau_{max}(t) dV / V_{ij}$$

(τ_{max} – максимальное касательное напряжение, вычисленное по $\sigma_{mn}(x, y, z, t)$, V_{ij} – объем B_{ij}).

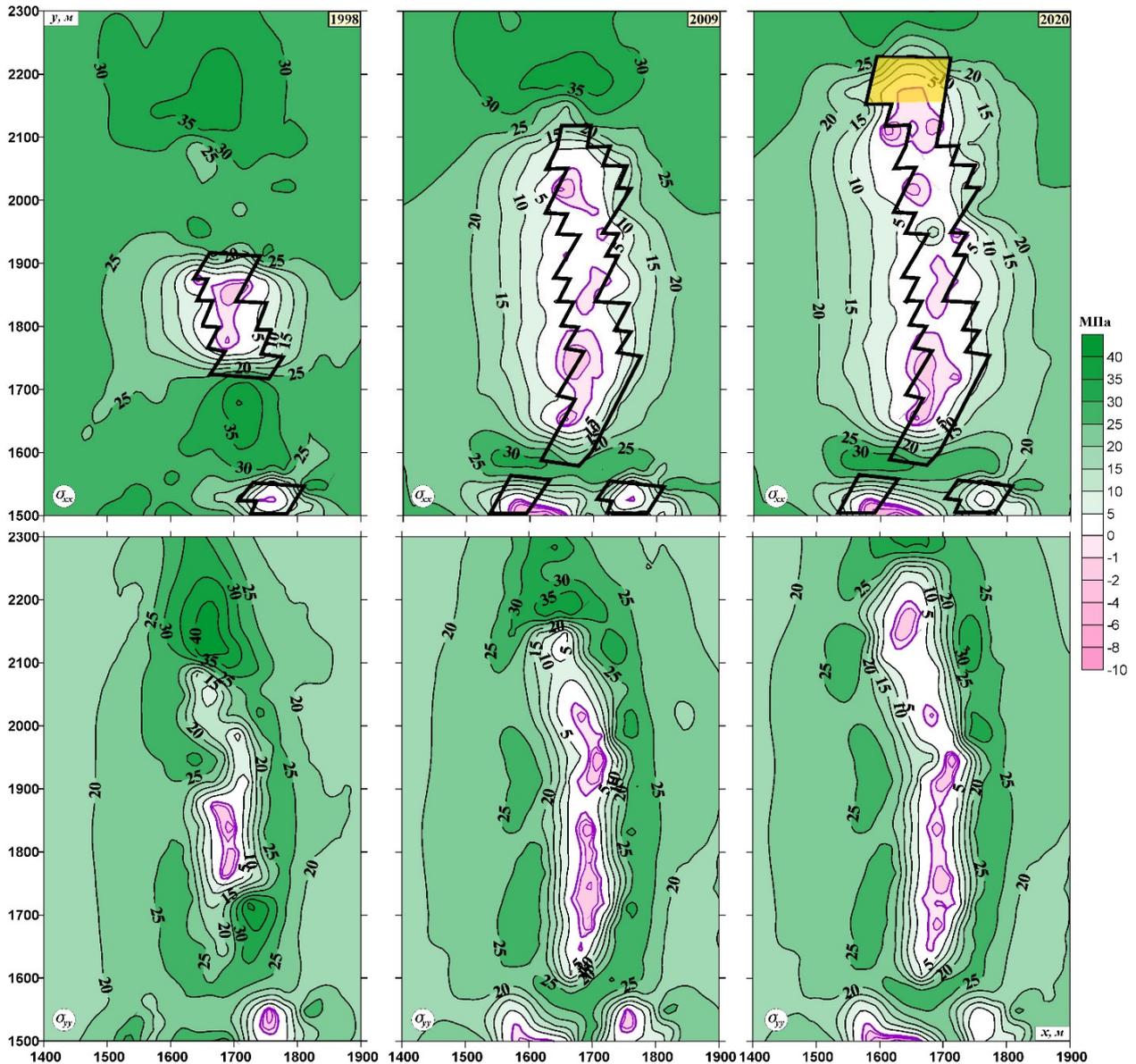


Рис. 2. Изолинии σ_{xx} , σ_{yy} на различных стадиях отработки ТЖМ (желтым цветом обозначен закладочный массив)

На каждом этапе отработки t подсчитывалось число $N_{ij}(t)$ слабых и умеренных динамических событий (энергия меньше 1 кДж), гипоцентры которых расположены в B_{ij} . Рассматривались временные ряды детерминированных $\{T_{ij}(t)\}$ и случайных $\{N_{pq}(t)\}$ величин ($t = 1989, 1990, \dots, 2020$; $i, p = 1, \dots, 5$; $j, q = 1, \dots, 8$), на горизонтах L_k и L_l для всех пар (T_{ij}, N_{pq}) вычислялись коэффициенты корреляции

$$\xi_{kl}(i, j, p, q, t) = \frac{\sum_{s=1989}^t D(T_{ij}, s) D(N_{pq}, s)}{\sigma(T_{ij}, t) \sigma(N_{pq}, t)},$$

$\sigma^2(T_{ij}, t) = \sum_{s=1989}^t D^2(T_{ij}, s)$, $D(T_{ij}, s) = T_{ij}(s) - \bar{T}_{ij}(s)$, $\bar{T}_{ij}(s)$ – среднее значение $T_{ij}(s)$. При этом интегральный параметр T_{ij} , характеризующий уровень напряжений, рассчитывался для двух случаев: без и с учетом возведения закладочного массива в 2018-2020 гг.

Для пары (T_{ij}, N_{pq}) имеет место уравнение линейной регрессии

$$N_{pq}(m, M) = \xi_{kl}(i, j, p, q, M) \frac{\sigma(N_{pq}, M)}{\sigma(T_{ij}, M)} (T_{ij}(m) - \bar{T}_{ij}(M)) + \bar{N}_{pq}(M), \quad (1)$$

связывающее число динамических событий $N_{pq}(m, M)$ в блоке B_{pq} и напряжения в блоке B_{ij} . Дополнительный аргумент M показывает временной промежуток, на котором рассчитывался коэффициент корреляции. Следует отметить, что отрицательные значения ξ_{kl} означают, что число событий N_{pq} уменьшается с ростом T_{ij} : фронт горных работ удаляется от рассматриваемого блока B_{pq} .

Для каждой пары блоков (B_{pq}, B_{ij}) , у которой $|\xi_{kl}| > 0.7$ (сильная корреляционная связь), по (1) рассчитаем прогнозное число динамических событий и сравним с реальным значением N_{pq}^{real} . В табл. 1 приведены выборочные результаты такого анализа, показывающие, что возведение закладочного массива во многих случаях снижает общий уровень сейсмичности.

Таблица 1

Прогнозные значения N_{pq} числа сейсмических событий на горизонте L_5 (–210 м) при различной технологии отработки

Пары блоков		без закладки		с закладкой		N_{pq}^{real}
p, q	i, j	ξ_{55}	N_{pq}	ξ_{55}	N_{pq}	
4,3	4,4	–0.84	98	–0.83	95	127
4,3	4,3	0.83	114	0.85	125	127
4,4	4,4	–0.80	382	–0.79	373	490
4,4	4,3	0.83	460	0.85	499	490

Заключение

На примере Таштагольского рудника верифицирована методика прогноза пространственно-временного распределения параметров техногенной сейсмичности, основанная на корреляционном анализе длинных временных рядов детерминированных (интегральная характеристика поля напряжений) и стохастических (число динамических событий в различных блоках) величин, характеризующих геомеханическое состояние месторождения в процессе отработки. Показано, что в окрестности возведенного закладочного массива уровень сейсмической активности, как правило, снижается.

Работа выполнена в рамках проекта НИР номер государственной регистрации 121062200075-4.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Feng X.T., Feng G., Yu Y. et al. Rockburst: mechanisms, monitoring, warning, and mitigation. – New York: Elsevier, 2017. – 570 p.
2. Shearer P. Introduction to seismology, 2nd Edition. – Cambridge: Cambridge University Press, 2009. – 412 p.
3. Ammon C.J., Velasco A.A., Lay T. et al. Earthquake prediction, forecasting and early warning. In: Foundations of modern global seismology, 2nd Edition. – London: Academic Press, 2021. – P. 223–248.
4. Ma T.H., Tang C.A., Tang S.B. et al. Rockburst mechanism and prediction based on micro-seismic monitoring // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. – 2018. – Vol. 110. – P. 177–188.
5. Zakharov V.N., Nazarova L.A., Protasov M.I. et al. Assessment of horizontal external stresses in the Vorkuta mine field using seismic tomography data // J. Min. Sci. – 2017. – Vol.53, № 6. – P. 993–1000.
6. Nazarov L.A., Nazarova L.A., Yaroslavtsev A.F. et al. Evolution of stress fields and induced seismicity in operating mines // J. Min. Sci. – 2011. – Vol. 47, № 6. – P. 707–713.
7. Мирошниченко Н.А., Назарова Л.А., Панов А.В. Развитие техногенной сейсмичности при отработке Таштагольского железорудного месторождения: ретроспективный анализ и прогноз // ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ – 2021. Т. 2, № 3 Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология: сб. матер. XII Межд. научн. конгресса. – Новосибирск: Изд. СГУГиТ, 2021. – С. 288–294.
8. Nazarova L.A., Nazarov L.A. Dilatancy and the formation and evolution of disintegration zones in the vicinity of heterogeneities in a rock mass // J. Min. Sci. – 2009. – Vol. 45, № 5. – P. 411–419.
9. Еременко А. А., Еременко В. А., Башков В. И., Александров А. Н., Татарников Б. Б. Опыт отработки камеры с закладкой выработанного пространства на Таштагольском месторождении // ГИАБ. – 2013. – № 10. – С. 21–23.

© Л. А. Назарова, Н. А. Мирошниченко, Л. А. Назаров, 2022