

РАЗВИТИЕ ТЕХНОГЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ ПРИ ОТРАБОТКЕ ТАШТАГОЛЬСКОГО ЖЕЛЕЗОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ: РЕТРОСПЕКТИВНЫЙ АНАЛИЗ И ПРОГНОЗ

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, (383)205-30-30 доп. 174, e-mail: mna@misd.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, (383)205-30-30 доп. 337, e-mail: larisa.a.nazarova@mail.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 лаборатории горной информатики, (383)205-30-30 доп. 173, e-mail: anton-700@yandex.ru

На примере Таштагольского железорудного месторождения реализован подход, позволяющий выявить пространственно-временные связи между параметрами случайных и детерминированных процессов различной физической природы, протекающих в породном массиве при ведении крупномасштабных горных работ. Подход заключается в кросскорреляционном анализе длинных временных рядов «число и энергия слабых и умеренных динамических событий» и «вариация параметров поля напряжений» в различных областях геомеханического пространства исследуемого объекта. По данным автоматизированной системы микросейсмического контроля рудника (с 1989 по 2019 гг.) и результатов расчетов по разработанной трехмерной модели месторождения установлены величины коэффициентов корреляции r между числом N сейсмособытий с энергией до 3 кДж и приращениями максимального касательного T и среднего S напряжений в различных блоках. Построенные для статистически значимых r регрессионные зависимости $N(T)$ и $N(S)$ верифицированы посредством сравнения прогнозных и реальных значений величины N в 2020 г. Полученные зависимости могут быть использованы для геомеханического обоснования планов отработки запасов посредством форвардных расчетов напряженного состояния и на этой основе – оценки уровня сейсмической активности с использованием установленных корреляционных зависимостей.

Ключевые слова: породный массив, техногенная сейсмичность, эволюция поля напряжений, прогноз, объемная геомеханическая модель, кросскорреляционный анализ, Таштагольское железорудное месторождение

DEVELOPMENT OF INDUCED SEISMICITY IN MINING TASHTAGOL IRON ORE DEPOSIT: RETROSPECTIVE ANALYSIS AND FORECAST

Nelly A. Miroshnichenko

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Cand.Sci (Phys.-Math.), Researcher, Mining Informatics Laboratory, office: +7 (383)205-30-30 ext. 174, e-mail: mna@misd.ru

Larisa A. Nazarova

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Dr.Sci (Phys.-Math.), Principal Researcher, Mining Informatics Laboratory, office: +7 (383)2053030, ext. 337, e-mail: larisa.a.nazarova@mail.ru

Anton V. Panov

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Junior Researcher, Mining Informatics Laboratory, office: +7 (383)205-30-30 ext. 173, e-mail: anton-700@yandex.ru

Using the example of the Tashtagol iron ore deposit, an approach has been implemented that makes it possible to reveal the space-time relationships between the parameters of random and deterministic processes of various physical nature, which occur in the rock mass during large-scale mining operations. The approach consists in cross correlation analysis of long time series “number and energy of weak and moderate dynamic events” and “variation of stress field parameters” in different areas of geomechanical space of the object under study. According to the data of automated microseismic control system of the mine (from 1989 to 2019) and calculation results based on the developed 3D model of the deposit, the values of correlation coefficients r between number N of seismic events with an energy of up to 3 kJ and increments of the maximum tangential T and average S stresses in different blocks were determined. The regression dependences $N(T)$ and $N(S)$ constructed for statistically significant r were verified by comparing the predicted and real values of N in 2020. The obtained dependences can be used for geomechanical justification of reserves mining using forward calculations of the stress state and, on this basis, for assessing seismic activity level using the found correlation dependences.

Key words: rock mass, induced seismicity, stress field evolution, forecast, 3D geomechanical model, cross correlation analysis, Tashtagol iron ore deposit

Введение

Крупномасштабные горные работы, связанные с перемещением больших объемов породы, добыча углеводородов и разработка геотермальных месторождений, эксплуатация подземных хранилищ газа, захоронение жидких и газообразных отходов производства в природных пластах – вот далеко не полный перечень антропогенных воздействий, влияющих на напряженно-деформированное состояние недр [1-5]. Изменение напряжений в породном массиве сопровождается повышением сейсмической активности [6-10] вплоть до возникновения сильных динамических событий, которые можно квалифицировать как горные удары и даже техногенные землетрясения [11]. Задача краткосрочного прогноза природных катастроф, по-видимому, до конца неразрешима вследствие неопределенности информации о состоянии и свойствах геофизической среды и количественных характеристиках геодинамических процессов [12-15]. Перспективы форвардной оценки параметров техногенной сейсмичности более оптимистические, хотя бы потому, что изменение полей напряжений, например, при ведении горных работ – процесс детерминированный.

В настоящей статье с использованием сейсмических данных и геотехнической информации, полученных при эксплуатации Таштагольского железорудного месторождения (ТЖМ) в 1989-2020 гг., посредством ретроспективного

анализа проведена верификация разработанного в [16,17] подхода, позволяющего установить количественные зависимости между параметрами детерминированных и стохастических природных и техногенных процессов.

Геомеханическая модель объекта и эволюция полей напряжений

Промышленная эксплуатация ТЖМ, расположенного в Алтае-Саянской складчатой области, началась с сороковых годов прошлого века. К настоящему времени горные работы достигли абсолютных глубин 800 м. Естественное поле напряжений соответствует взбросовому геодинамическому режиму (рис. 1а): максимальная σ_H (ориентирована по простиранию рудных тел) и минимальная σ_h горизонтальные компоненты соответственно в 2.5 и 1.3 раза больше вертикальной σ_V [18].

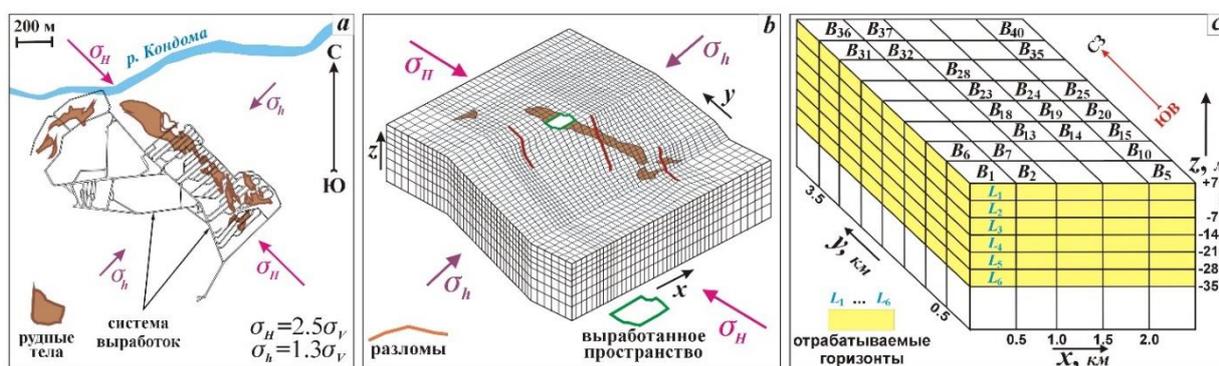


Рис. 1. Структурная схема ТЖМ, максимальное σ_H и минимальное σ_h горизонтальные напряжения во внешнем поле (а); фрагмент 3D сетки конечных элементов (b); разбиение расчетной области на блоки для пространственно-временного анализа техногенной сейсмичности (с)

В [19] разработана и на основе оригинального алгоритма [20] реализована детальная модель геомеханического пространства ТЖМ (рис. 1b демонстрирует фрагмент конечноэлементной дискретизации расчетной области, показанной на рис. 1с), с использованием которой рассчитаны поля напряжений $\sigma_{ij}(s)$ (s ассоциирован с календарным годом, $i, j = x, y, z$) на различных этапах отработки.

На рис. 2 представлены изолинии нормальных напряжений σ_{xx} и σ_{yy} на горизонте $z = -280$ м (глубина 780 м) для $s = 2009, 2014$ и 2020 , иллюстрирующие эволюцию поля напряжений по мере отработки месторождения: области концентрации мигрируют в соответствии с изменением конфигурации очистного пространства и продвижением фронта горных работ.

Оценка параметров техногенной сейсмичности

На каждом горизонте L_n разобьем расчетную область на блоки B_m (размеры $500 \times 500 \times 70$ м, рис. 1с), введем интегральную характеристику напряженного состояния

$$T_{mn}(s) = V^{-1} \iiint_{B_m} \tau_{max}(s) dV$$

(τ_{max} – максимальное касательное напряжение, V – объем B_m) и на каждом этапе отработки s подсчитаем число слабых и умеренных (энергия не превышает 3 кДж) динамических событий $N_{mn}(s)$, гипоцентры которых расположены внутри B_m .

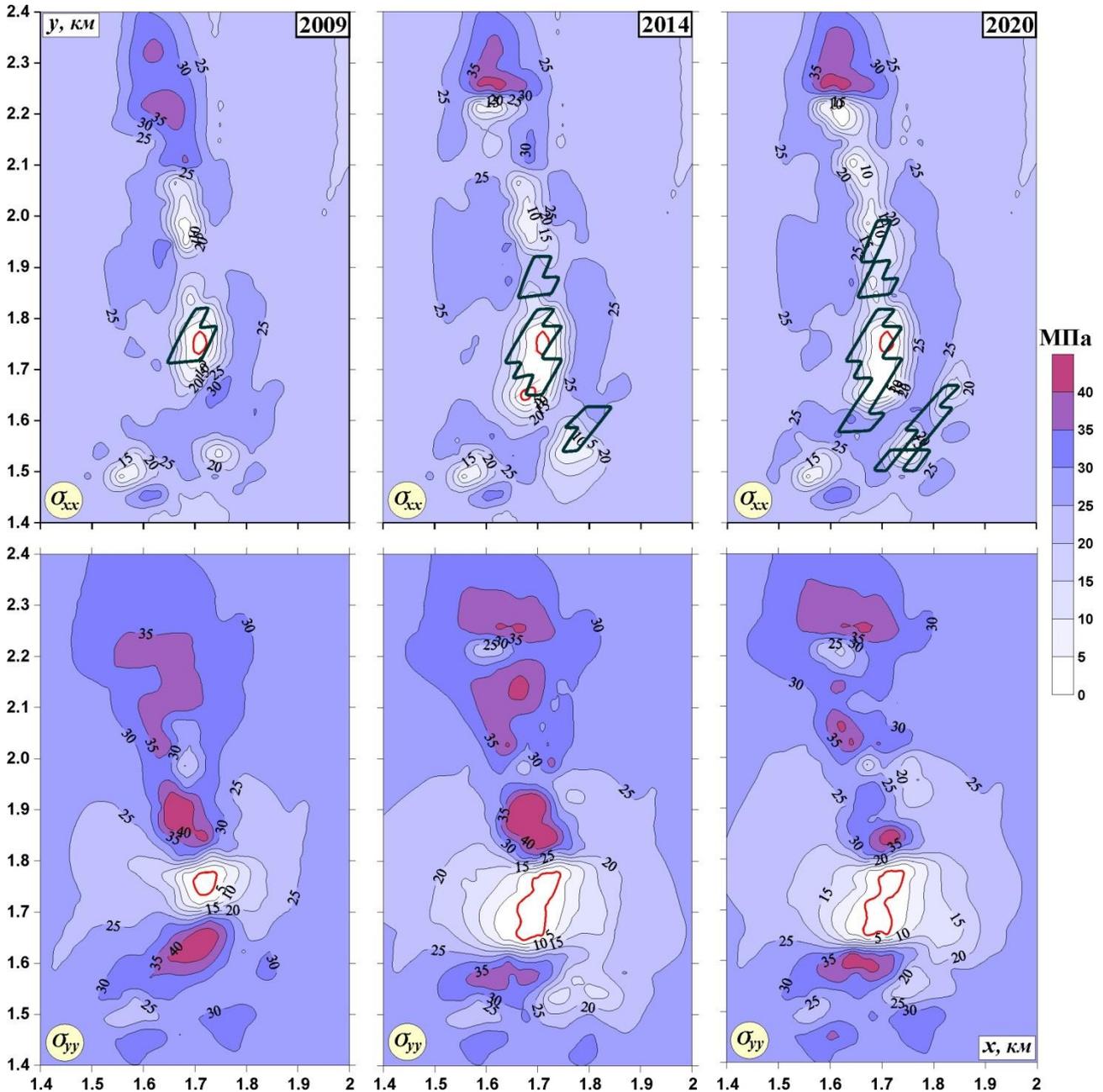


Рис. 2. Линии уровня компонент тензора напряжений $\sigma_{xx}(s)$ и $\sigma_{yy}(s)$ на различных этапах отработки ($s = 2009, 2014, 2020$)

Рассмотрим временные ряды детерминированных $\{T_{mn}(s)\}$ и случайных $\{N_{pq}(s)\}$ величин ($s=1989, 1990, \dots, 2020$; $m, p=1, \dots, 40$; $n, q=1, \dots, 7$) и для всех пар (T_{mn}, N_{pq}) рассчитаем коэффициент корреляции

$$\rho(m, n, p, q, S) = \frac{D(T_{mn}, N_{pq}, S)}{\sqrt{D(T_{mn}, T_{mn}, S)D(N_{pq}, N_{pq}, S)}}$$

где $\bar{T}_{mn} = (S - 1988)^{-1} \sum_{s=1989}^S T_{mn}(s)$, $\bar{N}_{pq} = (S - 1988)^{-1} \sum_{s=1989}^S N_{pq}(s)$,
 $D(T_{mn}, N_{pq}, S) = (S - 1988)^{-1} \sum_{s=1989}^S T_{mn}(s)N_{pq}(s) - \bar{T}_{mn}\bar{N}_{pq}$.

Если $|\rho(m, n, p, q, S)|$ близок к 1 (табл. 1), то геотехническая информация о блоках B_m и B_p пригодна для прогноза уровня сейсмической активности в обрабатываемом породном массиве. Запишем уравнение линейной регрессии

$$N_{pq}(s, S) = \rho(m, n, p, q, S) \frac{\sqrt{D(N_{pq}, N_{pq}, S)}}{\sqrt{D(T_{mn}, T_{mn}, S)}} (T_{mn}(s) - \bar{T}_{mn}) + \bar{N}_{pq}, \quad (1)$$

которое при $s \leq S$ связывает число динамических событий в блоке B_p (горизонт L_q) и напряжения в блоке B_m (горизонт L_n). Далее, проведя в соответствии с перспективным планом развития горных работ форвардный расчет напряженно-деформированного состояния на «момент времени S », по (1) можно определить ожидаемое в блоке B_p число динамических событий и верхнюю оценку выделившейся суммарной сейсмической энергии.

Таблица 1

Статистически значимые коэффициенты корреляции ρ

$\rho(24,5,23,5,2014) = 0.75$	$\rho(24,5,23,5,2020) = 0.83$
$\rho(19,7,18,7,2014) = 0.78$	$\rho(19,7,18,7,2020) = 0.70$
$\rho(23,4,24,4,2014) = -0.81$	$\rho(23,4,24,4,2020) = -0.74$

Для верификации такого подхода построены корреляционные зависимости (1) по геомеханической и сейсмической информации за 1989-2014 гг. (рис. 3, синяя линия) и за 1989-2020 гг. (красная линия).

Проведем ретроспективную оценку точности предлагаемой методики прогноза уровня техногенной сейсмичности посредством экстраполяции корреляционной зависимости $N_{pq}(s, 2014)$ на временной промежуток $2015 \leq s \leq 2020$ (рис. 3, синяя пунктирная линия). Среднеквадратичная невязка между «предсказанными» $N_{pq}(s, 2014)$ и «истинными» $N_{pq}(s, 2020)$ значениями числа событий

$$J = \frac{1}{6} \sum_{s=2015}^{2020} \left(1 - \frac{N_{pq}(s, 2014)}{N_{pq}(s, 2020)} \right)^2 = 0.1533$$

($N_{pq}(s, S)$ находятся по формуле (1)), что свидетельствует о принципиальной возможности использования предложенного подхода как одного из этапов при геомеханическом обосновании планов развития горных работ.

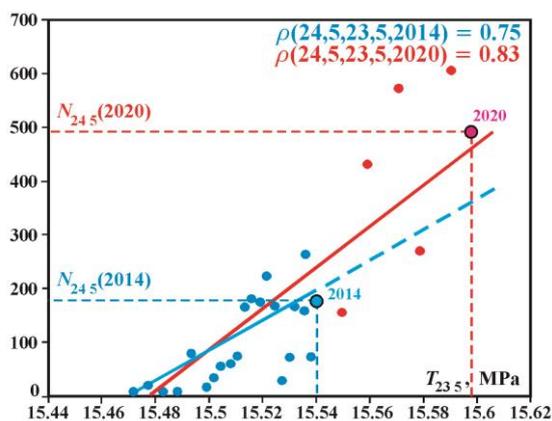


Рис. 3. Корреляционные зависимости числа динамических событий от напряжений, построенные по данным за 1989-2014 гг. (синяя линия) и за 1989-2020 гг. (красная линия)

Заключение

На основе ретроспективного анализа геотехнической и сейсмической информации, полученной при эксплуатации Таштагольского рудника, выполнена верификация разработанного подхода, позволяющего выявить пространственно-временные зависимости между параметрами стохастических и детерминированных физических полей. Точность получаемых форвардных оценок числа и суммарной энергии динамических событий в ограниченном объеме геофизической среды зависит от объема и надежности входных данных и может быть улучшена привлечением дополнительной информации, например, об эволюции параметров электромагнитных полей при развитии горных работ.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № АААА-А17-117121140065-7).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ellsworth W. Injection-Induced Earthquakes // Science. – 2013. – Vol. 341. – P. 1225942-1–1225942-8.
2. Grigoli F., Cesca S., Priolo E., Rinaldi A. P., Clinton J., Stabile T. A., Dost B., Garcia-Fernandez M., Wiemer S., Dahm T. Current challenges in monitoring, discrimination, and management of induced seismicity related to underground industrial activities: A European perspective // Reviews of Geophysics. – 2017. – Vol. 55, Issue 2. – pp. 310–340.
3. Gaucher E., Schoenball M., Heidbach O., Zang A., Fokker P.A., Van Wees J.D., Kohl T., Induced seismicity in geothermal reservoirs: A review of forecasting approaches // Renew. Sustain. Energy Rev. – 2015. – Vol. 52. – pp. 1473–1490.

4. Langenbruch C., Weingarten M., Zoback M.D. Physics-based forecasting of manmade earthquake hazards in Oklahoma and Kansas // *Nat. Commun.* – 2018. – Vol. 9. – pp. 1–10.
5. Ruiz-Barajas S., Santoyo M.A., Benito Oterino M.B. *et al.* Stress transfer patterns and local seismicity related to reservoir water-level variations. A case study in central Costa Rica // *Scientific Reports*, 2019. – 9-5600.
6. Konicek P., Schreiber J., Nazarova L. Volumetric changes in the focal areas of seismic events corresponding to destress blasting // *International Journal of Mining Science and Technology.* – 2019. – Т. 29, № 4. – pp. 541-547.
7. Foulger G.R., Wilson M.P., Gluyas J.G., Julian B.R., Davies R.J. Global review of human-induced earthquakes // *Earth-Science Reviews.* – 2018. – Vol. 178. – pp. 438-514.
8. Keranen K. M., Weingarten M. Induced seismicity // *Annual Review of Earth and Planetary Sciences.* – 2018. – Vol. 46. – pp. 149–174.
9. Shapiro S. A. *Fluid-induced seismicity.* – Cambridge: Cambridge University Press, 2015. – 289 pages.
10. Zoback M.D., Kohli A.H. *Unconventional reservoir geomechanics: Shale gas, tight oil, and induced seismicity.* – Cambridge: Cambridge University Press, 2019. – 492 pages.
11. Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В., Лескова Е.В., Шевкунова Е.В., Подкорытова В.Г. Техногенная сейсмичность разрезов Кузбасса (Бачатское землетрясение 18 июня 2013 г.) // *ФТПРПИ.* – 2014. – № 2. – С. 41–46.
12. Holliday J., Nanjo K., Tiampo K., Rundle J., Turcotte D. Earthquake forecasting and its verification // *Nonlinear Process. Geophys.* – 2005. – No. 12. – pp. 965–977.
13. Khaled G. and Zainah I. Earthquake Prediction, In: Zouaghi, T., Ed., *Earthquakes –Tectonics, Hazard and Risk Mitigation*, IntechOpen, London, 2017. <https://www.intechopen.com/books/earthquakes-tectonics-hazard-and-risk-mitigation/earthquake-prediction>.
14. Seif S., Mignan A., Zechar J. D., Werner M. J., Wiemer S. Estimating etas: The effects of truncation, missing data, and model assumptions // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth.* – 2017. – 122 (1). – pp. 449–469.
15. Scholz C.H. *The Mechanics of Earthquakes and Faulting.* – 3rd ed. – Cambridge: Cambridge University Press, 2019. – 512 pages.
16. 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.
17. Nazarova L. Diagnostics and prediction of geomechanical objects state based on back analysis // *Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses: Proceedings of the 2018 European Rock Mechanics Symposium (ISRM 2018, Saint Petersburg, Russia, 22-26 May 2018).* – CRC Press/Balkema. – Vol. 1. – pp. 73-86.
18. Nazarova L.A., Zakharov V.N., Nazarov L.A. *et al.* Stress evolution and induced seismicity in mining: lab test, observation and modeling. In: *Rock Dynamics - Experiments, Theories and Applications. Proceedings of the 3rd Int. Conf. on Rock Dynamics and Applications, ROCODYN-3 2018.* –P. 461-467.
19. Назаров Л.А., Назарова Л.А., Панов А.В., Мирошниченко Н.А. Эволюция напряженно-деформированного состояния породного массива при отработке Таштагольского железорудного месторождения по результатам 3D-моделирования // *ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ – 2016. Том 2 Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология: сб. матер. XII Межд. научн. конгресса.* – Новосибирск: Изд. СГУГиТ, 2016. – С. 87–91.
20. 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.

© Н. А. Мирошниченко, Л. А. Назарова, А. В. Панов, 2021