

sklonnykh i opasnykh po gornym udaram (Regulations for safe mining operations at Talnakh and Oktyabrskoe deposits, inclined and prone to rock-bumps). Norilsk, Saint Petersburg, 2015. 88 p. (in Russian)

- Borshch-Kompaniets V. I., Makarov A. B. *Gornoe davlenie pri obrabotke moshchnykh pologikh rudnykh zalezhey* (Rock pressure during thick flat ore deposits mining). Moscow : Nedra, 1986. 271 p.
- Kuranov A. D. *Primenenie chislennogo modelirovaniya dlya vybora bezopasnykh parametrov sistem razrabotki rudnykh mestorozhdeniy v vysokonapryazhennykh massivakh* (Application of numerical modeling for the choice of safe parameters of ore deposit mining systems in high-stressed massifs). *Zapiski Gornogo instituta = Proceedings of the Mining Institute*. 2013. Vol. 206. pp. 60–64.
- Gornaya geomekhanika i marksheyderskoe delo: sbornik nauchnykh trudov* (Mining geomechanics and mine surveying: collection of scientific proceedings). Saint Petersburg : Research Institute of Mining Geomechanics and Mine Surveying, 1999. 496 p. (in Russian)
- Petukhov I. M., Linkov A. M. *Mekhanika gornykh udarov i vybravov* (Mechanics of rock bumps and discharges). Moscow : Nedra, 1983. 279 p.
- Sokolov I. V., Antipin Yu. G. *Sistematzatsiya i ekonomiko-matematicheskoe modelirovanie variantov vskrytiya podzemnykh zapasov pri kombinirovannoy razrabotke mestorozhdeniy* (Systematization and economic-mathematical modeling of methods of underground reserves opening during the combined deposit mining). *Gornyi Zhurnal = Mining Journal*. 2012. No. 1. pp. 67–71.
- Wang Yi-Zhuang, Li Xiao-Zhao, Zhang Yans-Song, Zhao-Bao, Yuan Liang, Cheng Jin-Yuan. *Fangzai jianzai gongcheng xuebao*. International Journal of Disaster Risk Reduction. 2011. No. 4. pp. 441–449.
- Stefanov Yu. P., Chertov M. A., Aidagulov G. R., Myashikov A. V. *Dynamics of inelastic deformation of porous rocks and formation of localized compaction zones studied by numerical modeling*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 2011. Vol. 59, No. 11.
- Wang N., Wan B. H., Zhang P., Du X. L. *Analysis on deformation development of open-pit slope*

under the influence of underground mining. Proceedings of International Symposium on Land Reclamation and Ecological Restoration. Beijing, China, 2015. pp. 53–58.

- Wang D. S., Chang J. P., Yin Z. M., Lu Y. G. *Deformation and failure characteristics of high and steep slope and the impact of underground mining*. Transit Development in Rock Mechanics-Recognition, Thinking and Innovation : Proceedings of the 3rd ISRM Young Scholars Symposium on Rock Mechanics. USA, 2014. pp. 451–457.
- Karelin V. N., Marysyuk V. P., Nagovitsin Yu. N., Vilchinsky V. B. *Issledovanie geomekhanicheskogo sostoyaniya rudoporodnogo massiva v pole rudnika «Skalisty»* (Investigation of geomechanical state of ore-rock massif in the Skalisty mine field). *Gornyi Zhurnal = Mining Journal*. 2010. No. 6. pp. 63–65.
- Galaov R. B., Zvezdkin V. A., Shabarov A. N. *Geomekhanicheskoe obosnovanie bezopasnykh sposobov razrabotki tektonicheski napryazhennykh blokovykh struktur rudnykh zalezhey Talnakhskogo uzla* (Geomechanical substantiation of safe methods of development of tectonically stressed block structures of Talnakh cluster ore deposits). *Gornyi Zhurnal = Mining Journal*. 2013. No. 12. pp. 17–21.
- Ter-Martirosyan A. Z., Mirnyy A. Yu., Sidorov V. V., Sobolev E. S. *Opreделение parametrov modeli Hardening Soil po rezultatam laboratornykh ispytaniy* (Definition of Hardening Soil model parameters according to the results of laboratory investigations). *Geotekhnika. Teoriya i praktika: obshcherossiyskaya konferentsiya molodykh uchenykh, nauchnykh rabotnikov i spetsialistov: mezhdunarodnyy tematicheskiy sbornik trudov* (Geotechnics. Theory and practice: All-Russian conference of young scientists, researchers and specialists: inter-university thematic collection of proceedings). Saint Petersburg : Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 2013. pp. 141–146.
- Olovyannyi A. G. *Gravitatsionnyy bokovoy raspor i tektonicheskie napryazheniya v massive gornykh porod* (Gravitation horizontal stress and tectonic stresses in rock massif). *Marksheyderskiy Vestnik = Mine Surveying Bulletin*. 2011. No. 3. pp. 40–46.

УДК 622.012.2:550.343.6

## ОСОБЕННОСТИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ НА ШАХТЕ «СКАЛИСТАЯ»



**В. П. МАРЫСЮК**,  
директор, канд. техн. наук,  
marysyukvp@tf.nk.nornik.ru



**М. В. ТЕРЕЩЕНКО**,  
инженер 2-й категории

Центр геодинамической безопасности  
ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель», Норильск, Россия



**С. В. ЦИРЕЛЬ**,  
старший научный сотрудник,  
д-р техн. наук,  
Санкт-Петербургский  
национальный минерально-  
сырьевой университет «Горный»,  
Санкт-Петербург, Россия



**С. Н. МУЛЁВ**,  
зав. лабораторией,  
АО «ВНИМИ»,  
Санкт-Петербург, Россия

Рассмотрены методы оценки сейсмической активности и региональной удароопасности на шахте «Скалистая» рудника «Комсомольский» ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель». Показано, что методика, рекомендованная для установленной на шахте сейсмостанции ISS и основанная на соотношении сейсмической энергии и сейсмического момента (полной энергии), оказалась малоэффективной для оценки сейсмической опасности, поэтому была принята методика, основанная на комплексном показателе F. Для уточнения применения данной методики анализируется зависимость максимального значения F от размера ячейки. Показано, что эта зависимость является линейной и, как правило, крупным сейсмособытиям предшествует возрастание коэффициента пропорциональности и затем некоторый спад в самой опасной зоне.

**Ключевые слова:** шахта, рудник, горный массив, сейсмоактивность, удароопасность, сейсмическая энергия, прогностические признаки, методы оценки, линейная зависимость.

**DOI:** dx.doi.org/10.17580/gzh.2016.07.03

### Введение

Шахта «Скалистая» относится к наиболее глубоким рудникам России и обрабатывает удароопасные руды. Для сейсмического мониторинга, в отличие от остальных рудников и шахт России, используется сейсмостанция ISS [1, 2].

Исходно планировалось для оценки сейсмической обстановки и прогноза сейсмических рисков применять методику ISS [3–8],

основанную на соотношении сейсмической энергии и сейсмического момента. Суть этой методики состоит в том, что в первые месяцы эксплуатации строится соотношение логарифма сейсмической энергии и логарифма сейсмического момента (энергетический индекс —  $E/L$ ). Чем больше доля сейсмической энергии в общей энергии, тем жестче и опаснее динамическое событие и тем выше сейсмические риски.

Однако проведенные наблюдения показали, что данный критерий обладает невысокой информативностью, вариации отношения логарифмов лишь в малой степени коррелируют с сейсмической обстановкой, практически не наблюдается многократно отмеченное возрастание доли сейсмической энергии при увеличении общей энергии событий.

По-видимому, причиной является большое разнообразие динамических явлений на руднике, в том числе событий, не описываемых моделью Брюна [3]. Вариации соотношений, связанные с особенностями тектонического строения массива и ведения горных работ, оказывают на энергетический индекс не меньшее влияние, чем напряженное состояние в окружающей зоне, и не дают возможности достоверно оценить сейсмические риски.

Поэтому при ведении регионального геодинамического мониторинга на шахте в первую очередь применяется показатель  $F$ , используемый на рудниках «Октябрьский» и «Таймырский», где мониторинг ведется с помощью сейсмостанций «Релос» [9, 10]. Комплексный показатель  $F$  включает три параметра сейсмического процесса: количество сейсмособытий  $n$  с энергий, больше минимальной  $E_{\min}$  (как правило,  $E_{\min} = 70$  Дж) за время  $T$ , суммарную сейсмическую деформацию  $D \sim \sqrt{E}$ , определяемую методом Беньюфа [11], а также наклон графика повторяемости сейсмических событий  $\beta$ :

$$F = \frac{\sum n(t) + \alpha \sum \sqrt{E(t)}}{\beta}, \quad (1)$$

где  $n(t)$  — число сейсмособытий с энергией, превышающей минимальную (70 Дж), и с учетом давности сейсмособытий (см. ниже);  $E(t)$  — энергия сейсмособытий с учетом давности, Дж;  $\alpha$  — константа, подбираемая на основе длительного использования формулы таким образом, чтобы оба слагаемых в числителе имели примерно равные значения. Начальное значение  $\alpha = 0,1^{-1/2}$  Дж.

В формуле (1) указано время  $t$ , прошедшее от момента регистрации сейсмического события с энергий, больше минимальной, до окончания проведения расчетов. Суть учета времени состоит в том, что принимается во внимание давность произошедших событий, т. е. учитываемое значение энергии в формуле не равно фактической энергии, а вычисляется по формуле

$$E_{\text{уч}} = E_{\text{факт}} \exp(-3t/T), \quad (2)$$

где  $t$  — длительность времени учета, сутки. При этом при расчете числа событий  $n(t)$  не учитываются события с расчетной энергией, меньше минимальной, т. е. фактически из «старых» собы-

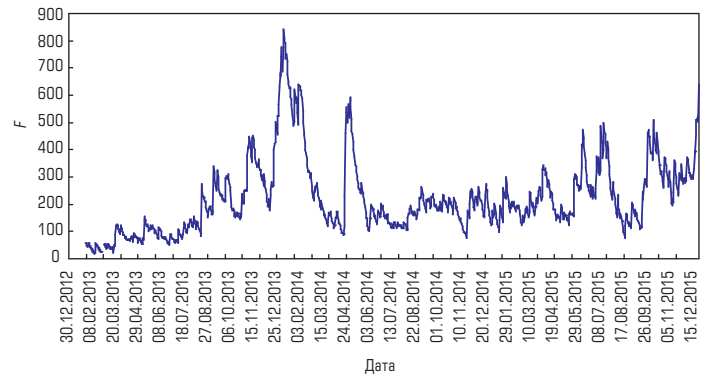


Рис. 1. График параметра  $F$  за трехлетний период наблюдений по всей шахте

тий, произошедших 3–4 недели назад, рассматриваются только крупные сейсмособытия. Первоначально при малом числе событий принимались в расчет сейсмособытия за 3 месяца, а по мере развития сейсмоактивности стали учитываться сейсмособытия за 30 суток, как и на других рудниках. Более подробное описание методики представлено в [9].

### Исследование сейсмической активности на шахте «Скалистая»

Применение показателя  $F$  для сейсмостанции иного типа заставило внимательнее рассмотреть зависимости данного показателя от параметров, используемых в расчетах при построении карт удароопасности. Значения коэффициента  $F$  зависят от нескольких констант, входящих в расчет. Эти константы определяются эмпирическим путем.

Основной целью проведенных исследований ставилось определение возможности более детального выделения зон удароопасности. Для построения зависимости выбран период наибольшей сейсмической активности шахты «Скалистая» — январь 2014 г. (рис. 1).

В настоящей статье представлена зависимость значений  $F$  от  $L$  — линейного размера квадратной матрицы-ячейки, на которые разбивается горный массив при расчете  $F$  (рис. 2). Для объемных построений матрица должна быть трехмерной. В расчетах авторов матрица имеет вид параллелепипеда с высотой, равной разнице минимальной и максимальной глубины гипоцентров сейсмических событий. Все события проецируются на план горных работ.

Для построения зависимости карты удароопасности рассчитывались матрицами различных размеров — от 50 до 130 м. Пример расчета карты с размером матрицы 100×100 м показан на рис. 2. Из рассчитанной сетки значений выбирали  $F_{\text{макс}}$ . На рис. 3 представлены два примера графиков — для периода сейсмической активизации в январе 2014 г. и для данных самого последнего времени (декабрь 2015 г.).

Как видно, в обоих случаях получились прямые с очень высокими значениями коэффициентов детерминации. При этом обе

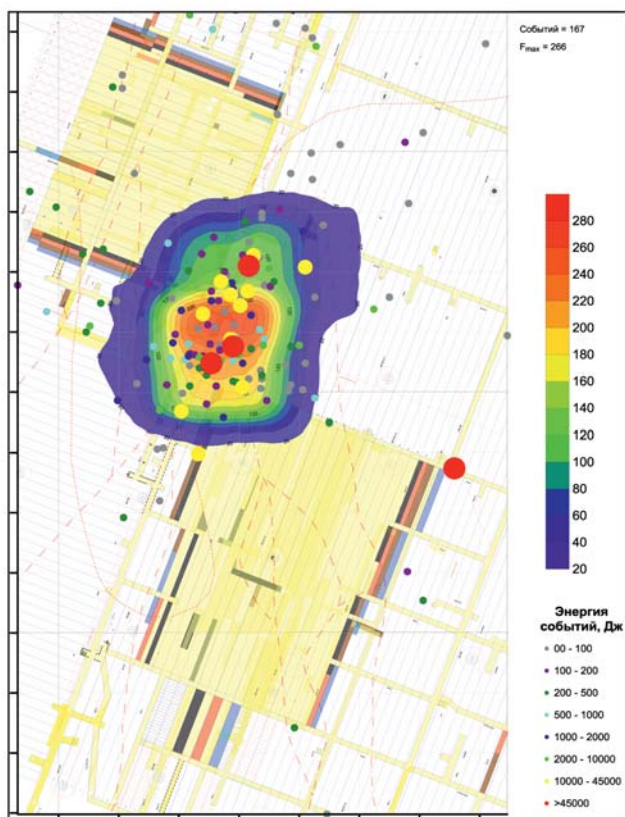


Рис. 2. Сейсмическая активность центральной части шахты по параметру  $F$  за январь 2014 г. (матрица  $100 \times 100$  м)

прямые имеют малые значения свободного члена, поэтому зависимости можно представить в виде формулы

$$F = b_L \cdot L, \quad (3)$$

где  $b_L$  — коэффициент пропорциональности,  $L$  — линейный размер матрицы.

Если бы значение  $F$  определялось одним главным событием с максимальной энергией, то оно просто не зависело бы от площади  $L$ . Если бы  $F$  определялось числом событий  $n$ , а сами события равномерно распределялись по площади, то  $F$  было бы пропорционально  $L^2$ . Если бы  $F$  определялось числом событий  $n$ , а сами события были расположены вдоль линии, то  $F$  было бы пропорционально  $L$ . Если бы события располагались вокруг одной точки, то показатель степени определялся бы степенью «стянутости» к этой точке и находился бы в диапазоне от 0 до 2.

Получившаяся простая линейная зависимость дает перспективный инструмент для оценки влияния концентрации событий в наиболее опасной зоне на дальнейшее развитие сейсмического процесса [12, 13].

На рис. 4 показаны график суммарной суточной энергии событий (красные пики с синими вершинами) и ход более простой характеристики, грубо определяющей  $b_L$  — отношения значения  $F$  на всем рудном поле к его значению в самом активном квадрате с  $L = 100$  м. Как можно заметить, крупным сейсмическим

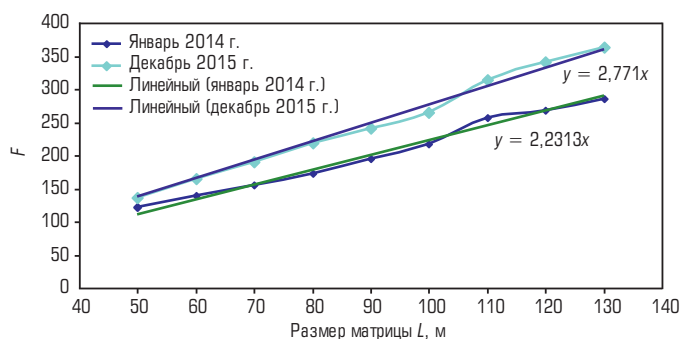


Рис. 3. Графики зависимости  $F(L)$ , аппроксимированные линейными зависимостями без свободного члена

в большинстве случаев предшествует резкое возрастание показателя  $b_L$ , т.е. распространение сейсмоактивности по всему полю и потом резкий его спад (концентрация событий в самой опасной зоне).

По-видимому, резкий спад значения  $b_L$  может стать одним из признаков возможного проявления крупного сейсмического события. Поэтому были проведены более детальные расчеты изменений  $b_L$  и сопоставлены с проявлениями сейсмоактивности. Для этого были выбраны периоды высокой активности (см. рис. 1) — январь 2014 г. и октябрь – декабрь 2015 г. Для каждых суток были построены зависимости  $F(L)$  и рассчитаны значения коэффициента  $b_L$ . Для этих же периодов были выделены последовательности крупных сейсмических событий во времени.

Как правило, перед крупными сейсмическими событиями присутствует предполагаемый спад  $b_L$ , но не настолько надежно выделяемый, чтобы использовать его как единственный критерий. Учет данного критерия мог бы осуществляться по методу, построенному на совокупности различных критериев [14].

В эту совокупность, по мнению авторов, должны входить в первую очередь только самые простые показатели, характеризующие реальную ситуацию в зоне ведения горных работ. Поэтому, кроме значения  $b_L$ , предлагается учитывать прежде всего сам показатель  $F$ , энергию наиболее мощного события, произошедшего в течение времени  $T$  (как правило,  $T = 30$  суток), состояние локальной удароопасности в выработках, оцененное как инструментальными методами (дискование кернов, конвергенция стенок, акустическая и электромагнитная эмиссия), так и с помощью визуальных наблюдений (шелушение, щелчки, появление трещин и т. д.), а также изменения состояния крепи выработок. Для практической реализации такого подхода необходимо будет создать численные или ранговые шкалы каждого показателя.

Для получения более точных прогнозов представляется оправданным продолжить исследования в данном направлении с целью уточнения признаков приближения крупных сейсмических событий, а также для определения факторов, влияющих на значения введенного коэффициента. Также было бы весьма по-

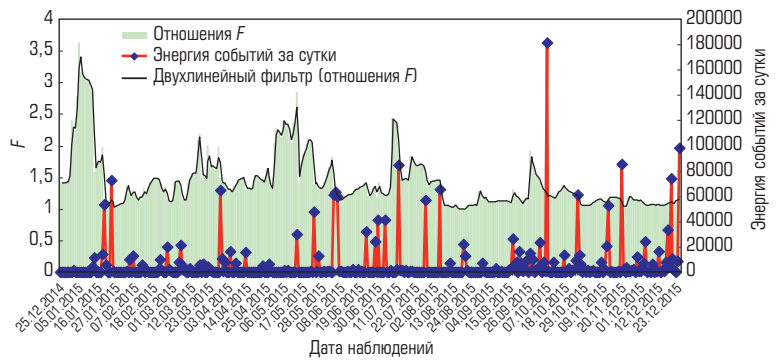
лезно распространить данные исследования на другие рудники с различными горно-геологическими условиями, чтобы выяснить общность и особенности проявления выявленной закономерности.

На шахте «Скалистая» за период с 01.10.2013 по 31.10.2014 г. было зарегистрировано 1199 сейсмических событий, их энергия варьировалась от 1 до 157 тыс. Дж. Наибольшее число событий (68,8 %) имели энергию до 500 Дж. Событие с максимальной энергией 157 тыс. Дж произошло 01.01.2014 г. в ленте 2, пикета 199, панели 3.

Вблизи Норильско-Хараелахского разлома (НХР) событий практически нет, что объясняется его разгружающим эффектом из-за наличия раздробленных пород и большого числа опережающей разрывной тектоники. Анализ распределения событий (низкой и средней энергии — до 45 тыс. Дж) по площади показал, что в 2014 г. события группировались в двух зонах — впереди северного фланга отработки панелей 1 и 2, а также в районе примыкания панелей 2–4 (см. рис. 2). По глубине сейсмические события проявлялись в основном в почве рудного тела на удалении до 50 м.

Основные высокоэнергетические сейсмические события (более 45 тыс. Дж) происходили в кровле рудной залежи, причем на значительном удалении — до 250 м выше зоны ведения горных работ. Такой характер проявления сейсмической активности может говорить о том, что в процессы сдвижений вовлечены блоковые структуры высокого ранга. В таких условиях благоприятное влияние оказывает ослабленная зона НХР, которая имеет существенный демпферный ресурс и может нейтрализовать как горизонтальные, так и вертикальные деформации, возникающие при взаимном смещении крупных тектонических блоков.

Высокая концентрация сейсмической активности на границе панелей 2–4 связана с ведением работ в панели 3. Происходит процесс перераспределения напряжений в многолетней стационарной зоне опорного давления от восточного торца панели 2 и северного торца панели 4. В сложившихся условиях огромное значение имеют разработанные специалистами Центра геодинамической безопасности и Горного управления профилактические мероприятия, направленные на снижение горного давления — бурение разгрузочных скважин в угловых частях рудного массива, за счет которых данный процесс происходит плавно, без резких динамических скачков, что особенно важно в условиях ярко выраженной тектонической блочности массива.



**Рис. 4. Зависимость отношения значения  $F$  на всем поле к его значению в самом активном квадрате и энергия сейсмических событий в течение года**

Использование на шахте результатов сейсмостанции ISS позволило максимально повысить интенсивность ведения горных работ, своевременно разрабатывать в прогнозных повышенных зонах профилактические мероприятия по снижению проявлений горного давления, свести к минимуму аварийность и остановки горных работ.

### Заключение

1. Для условий рудников ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель» комплексный показатель  $F$  является более информативной характеристикой сейсмической опасности, чем используемое в методиках ISS отношение сейсмической энергии к сейсмическому моменту (оценка полной энергии сейсмического события по модели Брюна).


2. В условиях шахты «Скалистая» максимальное значение  $F$  линейно зависит от площади ячеек, на которые разбивается исследуемая территория.

3. Крупным сейсмическим событиям, как правило, предшествует возрастание коэффициента  $b_L$  и отношения значения  $F$  на всем поле к значению в самом активном квадрате значения  $F$  и затем некоторый спад коэффициента  $b_L$  в самой опасной зоне. Данная закономерность может иметь прогностическое значение для оценки опасности крупных динамических событий.

4. Использование результатов сейсмостанции ISS позволяет своевременно вносить корректировку в текущие технические решения по безопасной и эффективной отработке богатых и медистых руд шахты «Скалистая».

Библиографический список

1. Mendecki A. J. Seismic monitoring in mines. — London : Chapman and Hall, 1997. — 262 p.
2. Mendecki A. J., van Aswegen G., Mountfort P. A guide to routine seismic monitoring in mines. A handbook on rock engineering practices for tabular hard rock mines / Eds. A. J. Jager, J. A. Ryder. — Cape Town : Creda Communications, 1999. — 371 p.
3. Brune J. N. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes // Journal of Geophysical Research. 1970. Vol. 75. P. 4997–5009.
4. Young D. P. Energy variations in mining-induced seismic events using apparent stress : MASC Thesis, Laurentian University, 2012. — 85 p.
5. Wesseloo J., Woodward K., Pereira J. Grid-based analysis of seismic data // The Journal of Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2014. Vol. 114. P. 815–822.
6. Braun L. G. Seismic hazard evaluation using apparent stress ratio for mining-induced seismic events : Ph. D. Thesis, Laurentian University. 2015. — 257 p.
7. Xu N. W., Tang C. A., Sha C., Liang Z. Z., Yang J. Y., Zou Y. Y. Microseismic monitoring system establishment and its engineering applications to left bank slope of Jinping I Hydropower Station // Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. 2010. Vol. 29. P. 915–925.

8. Liang Z. Z., Xing H., Wang S. Y. et al. A three-dimensional numerical investigation of the fracture of rock specimens containing a pre-existing surface flaw // Computers and Geotechnics. 2012. Vol. 45. P. 19–33.
9. Яковлев Д. В., Цирель С. В., Мулев С. Н. Закономерности развития и методика оперативной оценки техногенной сейсмической активности на горных предприятиях и в горнодобывающих регионах // ФТПРПИ. 2016. № 2. С. 34–47.
10. Сейсмостанция «Релос». 2015. URL : <http://krasavt.ru/products/sejsmometricheskij-monitoring/as-relos> (дата обращения: 24.06.2016).
11. Benioff H. Earthquakes and rock creep // Bulletin of the Seismological Society of America. 1951. Vol. 41. No. 1. P. 31–62.
12. Мулев С. Н., Беляева Л. И., Скакун А. П. Методика прогноза удароопасного состояния массива в сейсмогеологических условиях поля шахты «Комсомольская» // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. № 12. С. 241–249.
13. Анохин А. Г., Семенов К. А., Дарбинян Т. П., Цирель С. В., Мулев С. Н. Методология учета степени влияния нарушения рудопородного массива на сейсмический риск // Горный журнал. 2014. № 4. С. 19–24.
14. Козырев А. А., Федотова Ю. В., Журавлева О. Г. Вероятностный прогноз сейсмоопасных зон в условиях удароопасных месторождений Хибинского массива // Вестник МГТУ. 2014. Том 17. № 2. С. 225–230. 

«GORNYI ZHURNAL»/«MINING JOURNAL», 2016, № 7, pp. 14–18

DOI: [dx.doi.org/10.17580/gzh.2016.07.03](https://doi.org/10.17580/gzh.2016.07.03)

Features of seismic activity in Skalistaya mine

Information about author

V. P. Marysyuk<sup>1</sup>, Director, Candidate of Engineering Sciences, marysyukvp@tf.nk.norilsk.ru

M. V. Tereshchenko<sup>1</sup>, II Category Engineer

S. V. Tsirel<sup>2</sup>, Senior Researcher, Doctor of Engineering Sciences

S. N. Mulev<sup>3</sup>, Head of Laboratory

<sup>1</sup> Center for Geodynamic Safety, Polar Division, Norilsk Nickel, Norilsk, Russia

<sup>2</sup> Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia

<sup>3</sup> VNIMI, Saint-Petersburg, Russia

Abstract

The article considers approaches to estimating seismic activity and regional rockburst hazard in Skalistaya mine field. It is shown that the procedure recommended for the mine seismic station ISS and based on the ratio of seismic energy and seismic moment (overall energy) is low-efficient in assessment of seismic hazards. Probably, the reason is a wide variety of dynamic events in the mine, including events omitted in the Brune model. Therefore, the procedure accepted in the mine is based on the integrated index  $F$  and is used in other mines of the Polar Division of Norilsk Nickel, where seismic monitoring employs seismic stations Relos. The integrated index  $F$  involves three seismic parameters — number of seismic events; seismic deformation determined using the Benioff method; and slope of frequency plot of seismic events. Aiming to improve efficiency of the index  $F$  to be used by seismic stations of different type, a detailed analysis embraces the relation between the values of  $F$  and the linear size  $L$  of a cell of a mesh to represent rock mass in calculation of  $F$ . According to the results, under conditions of Skalistaya mine, the maximum value of  $F$  linearly depends on the area of cells of the mesh representing the area under study,  $F = b_1 \cdot L$ . As a rule, large seismic events are preceded by an increase in the coefficient  $b_1$  and by a rise in the ratio of  $F$  of the overall area to  $F$  in the most active zone, and then follows a certain decrease in  $b_1$  in the most hazardous zone.

**Keywords:** mine, rock mass, seismic activity, rockburst hazard, seismic energy, prognostic signs, estimation methods, linear dependence.

References

1. Mendecki A. J. Seismic monitoring in mines. London : Chapman and Hall, 1997. 262 p.
2. Mendecki A. J., van Aswegen G., Mountfort P. A guide to routine seismic monitoring in mines. A handbook on rock engineering practices for tabular hard rock mines. Editors: A. J. Jager, J. A. Ryder. Cape Town : Creda Communications, 1999. 371 p.

3. Brune J. N. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. Journal of Geophysical Research. 1970. Vol. 75. pp. 4997–5009.
4. Young D. P. Energy variations in mining-induced seismic events using apparent stress : MASC Thesis, Laurentian University. 2012. 85 p.
5. Wesseloo J., Woodward K., Pereira J. Grid-based analysis of seismic data. The Journal of Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2014. Vol. 114. pp. 815–822.
6. Braun L. G. Seismic hazard evaluation using apparent stress ratio for mining-induced seismic events : Ph. D. Thesis, Laurentian University. 2015. 257 p.
7. Xu N. W., Tang C. A., Sha C., Liang Z. Z., Yang J. Y., Zou Y. Y. Microseismic monitoring system establishment and its engineering applications to left bank slope of Jinping I Hydropower Station. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. 2010. Vol. 29. pp. 915–925.
8. Liang Z. Z., Xing H., Wang S. Y., et al. A three-dimensional numerical investigation of the fracture of rock specimens containing a pre-existing surface flaw. Computers and Geotechnics. 2012. Vol. 45. pp. 19–33.
9. Yakovlev D. V., Tsirel S. V., Mulev S. N. Zakonomernosti razvitiya i metodika operativnoy otsenki tekhnogennoy seysmicheskoy aktivnosti na gornyykh predpriyatiyakh i v gornodobyvayushchikh regionakh (Regularities of development and method of operational assessment of technogenic seismic activity at mining enterprises and in mining regions). *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh = Journal of Mining Science*. 2016. No. 2. pp. 34–47.
10. *Seysmostantsiya «Relos»* (Seismic station “Relos”). 2015. Available at: <http://krasavt.ru/products/sejsmometricheskij-monitoring/as-relos> (accessed: June 24, 2016). (in Russian)
11. Benioff H. Earthquakes and Rock Creep. Bulletin of the Seismological Society of America. 1951. Vol. 41, No. 1. pp. 31–62.
12. Mulev S. N., Belyaeva L. I., Skakun A. P. Metodika prognoza udaropasnogo sostoyaniya massiva v seysmogeologicheskikh usloviyakh polya shakhty «Komsomolskaya» (The technique of forecasting the bump hazardous state of rock mass at seismological conditions of “Komsomolskaya” mine field). *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten = Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2009. No. 12. pp. 241–249.
13. Anokhin A. G., Semenko K. A., Darbinyan T. P., Tsirel S. V., Mulev S. N. Metodologiya ucheta stepeni vliyaniya narushennosti rudopородного массива на seysmicheskiy risk (Methodology of accounting for effect of ore and host rock damage ratio on seismic risk). *Gornyy Zhurnal = Mining Journal*. 2014. No. 4. pp. 19–24.
14. Kozыrev A. A., Fedotova Yu. V., Zhuravleva O. G. Veroyatnostnyy prognoz seysmo-opasnykh zon v usloviyakh udaropasnykh mestorozhdeniy Khibinskogo massiva (Probabilistic prediction of seismic hazardous zones in rockburst-prone ore mines of the Khibiny massif). *Vestnik Murmanskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta = Proceedings of the Murmansk State Technical University*. 2014. Vol. 17, No. 2. pp. 225–230.