

## СИСТЕМА НЕПРЕРЫВНОГО СЕЙСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА НА УДАРООПАСНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ НОРИЛЬСКА



Ю. Н. НАГОВИЦИН,  
начальник отдела  
совершенствования  
технологии горных работ  
Центра геодинамической  
безопасности



Л. В. КАКОШИНА,  
начальник отдела  
сейсмического мониторинга  
Центра геодинамической  
безопасности



Е. В. РОДИОНОВА,  
зам. начальника отдела  
сейсмического мониторинга  
Центра геодинамической  
безопасности



С. Н. МУЛЁВ,  
зав. лабораторией  
геофизических  
исследований

Основу сырьевой базы ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель» составляют залежи медно-никелевых руд Талнахского и Октябрьского месторождений, разрабатываемых рудниками «Комсомольский», «Октябрьский» и «Таймырский». Горные работы на рудниках ведут на глубинах до 1500 м. При этом, в соответствии с «Положением по безопасному ведению горных работ на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам» [1], Талнахское и Октябрьское месторождения полиметаллических руд ниже глубины 700 м отнесены к опасным по горным ударам (шахта «Скалистая», частично шахта «Комсомольская», рудники «Октябрьский» и «Таймырский»).

Геодинамические явления (горно-тектонические, горные удары и др.) являются прежде всего результатом толчкообразного хрупкого разрушения зон или участков горного массива в результате действия накопленной внутренней энергии очаговой области или потери устойчивого состояния вследствие технологических процессов [1]. Одним из проявлений геодинамических событий является сейсмическая активность.

Представлены система сейсмического мониторинга удароопасных рудников ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель» и комплекс противоударных мероприятий по обеспечению геодинамической безопасности разработки Талнахского и Октябрьского месторождений медно-никелевых руд. Показаны их научно-техническая обоснованность; современное организационное, методическое и техническое оснащение; эффективность, направления дальнейшего совершенствования и развития.

**Ключевые слова:** удароопасные месторождения, сейсмический мониторинг, сейсмоактивные зоны, подземные рудники, геодинамическая безопасность, сеть наблюдений, напряженное состояние массива, прогноз удароопасности, разгрузочные скважины.

**DOI:** <http://dx.doi.org/10.17580/gzh.2015.06.07>

Выделение сейсмоактивных зон, опасных по горным ударам, и управление горным давлением на рудниках ЗФ осуществляют на региональном и локальном уровне. Проблема региональной (в пределах рудного поля) геодинамической безопасности решается путем контроля и изучения сейсмических процессов с помощью специально рассчитанной сейсмической сети на основе пространственной модели напряженно-деформированного состояния массива горных пород и базируется на кинематических и динамических особенностях сейсмических волн. Сеть наблюдения должна быть объемной, регулярной и охватывать весь контролируемый массив горных пород (МГП). Региональный прогноз геодинамических явлений на основе сейсмического мониторинга данных реализует Центр геодинамической безопасности.

Для реализации метода геодинамического контроля на основе регистрации происходящих в горном массиве сейсмических процессов на рудниках ЗФ установлены и функционируют следующие системы сейсмического мониторинга:

- «Релос-РШ-64» (ЗАО НТЦ «Автоматика», г. Красноярск) для рудников «Октябрьский» и «Таймырский»;
- IMS (Institute of Mine Seismology, Австралия) для шахты «Скалистая» рудника «Комсомольский»;
- «Вулкан» (НПП «Вулкан», г. Обнинск).

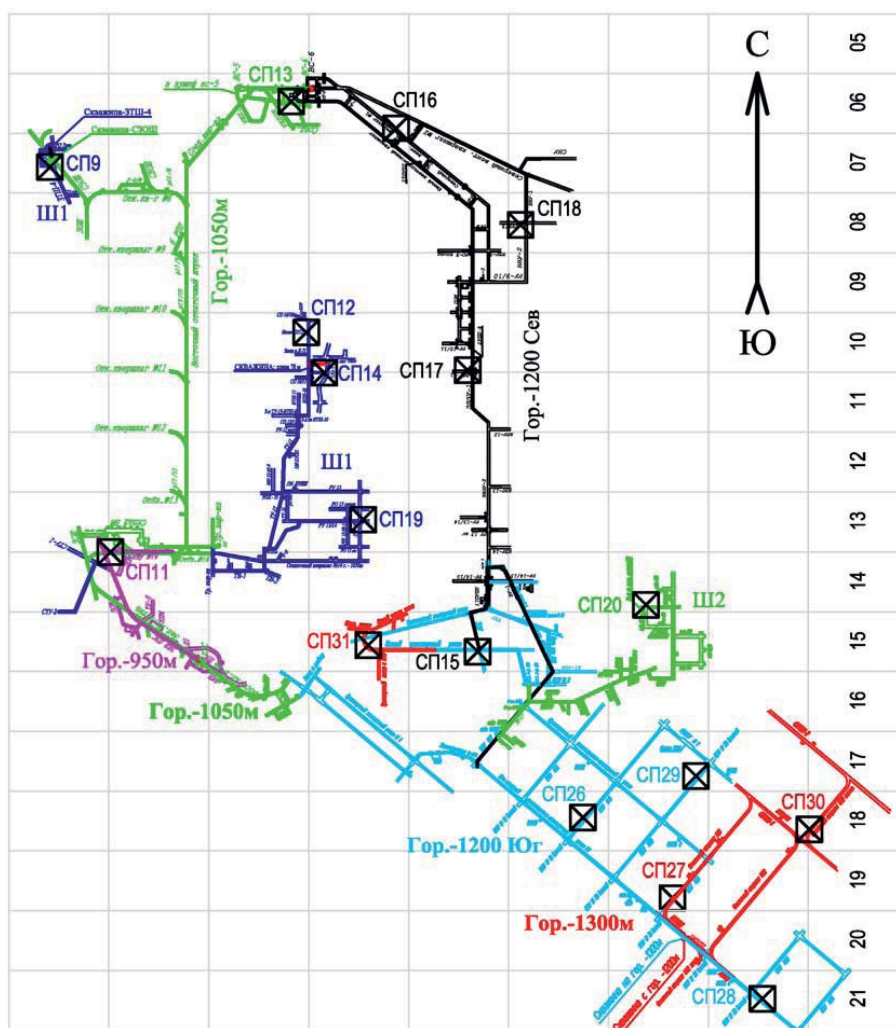
Системы сейсмического мониторинга обеспечивают регистрацию микросейсмических и сейсмоакустических сигналов, возникающих при динамических проявлениях горного давления в породных массивах; их селекцию на фоне технологических и электрических помех; расчет характеристик и параметров сейсмоявлений; непрерывный мониторинг потенциально опасных

шахтных полей и их участков в автоматическом режиме и автоматизированную обработку информации для оценки степени удароопасности.

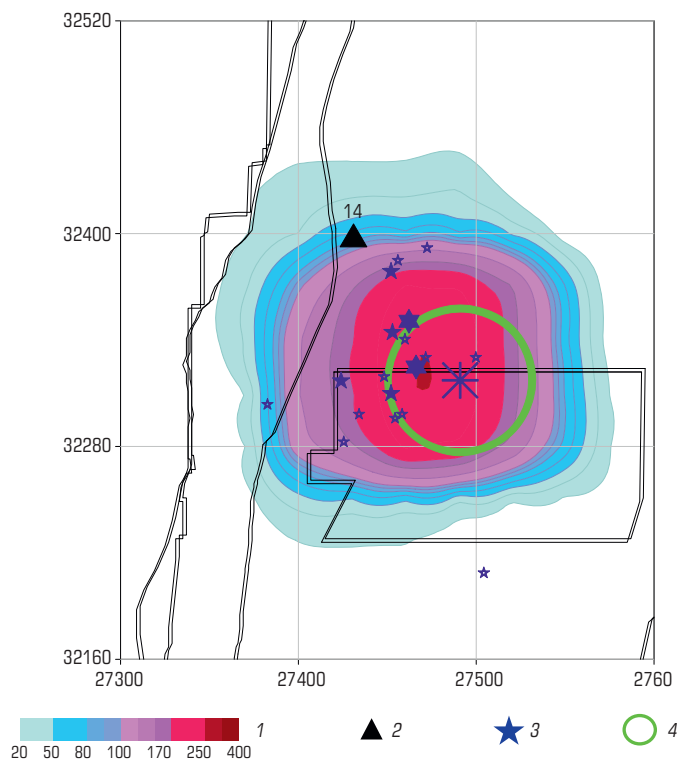
Технические средства систем сейсмического мониторинга имеют двухуровневую структуру — наземную и подземную. Наблюдениями охвачены шахтные поля рудников «Октябрьский» и «Таймырский» (рис. 1), где размещены 30 сейсмопавильонов, и шахта «Скалистая» рудника «Комсомольский», где развернута сеть из 12 сейсмопавильонов. Пункты наблюдения в совокупности обеспечивают регистрацию явлений с сейсмической энергией от 10 Дж и выше. Система «Вулкан» имеет два пункта регистрации — на рудниках «Комсомольский» и «Кайерканский» (шахта «Ангидрит») — и предназначена для регистрации удаленных землетрясений и оценки их влияния на сейсмическую активность контролируемого МГП. Региональный прогноз удароопасности [2, 3], по данным непрерывной регистрации сейсмических событий, основан на оценке их распределения в пределах шахтного поля, распределения числа событий  $N$  за интервал времени  $T$  (активности), плотности распределения энергии  $E$ , уровня параметра  $F$ .

Методика построения прогнозных карт [4, 5] основана на обработке данных о колебаниях, вызванных одним событием и зафиксированных разными пунктами приема (сейсмоприемниками и сейсмопавильонами); ручным способом оценивают время начала приема события в каждом сеймопункте ( $t_{0i}$ ) и длительность ( $\tau_{0i}$ ) каждого события для каждого датчика. На основании этих данных, а также координат сейсмопавильонов и оценок скоростей распространения сейсмических волн программным способом, вычисляются следующие параметры: время начала события в очаге координаты ( $t_0$ ), координаты очага ( $X_0, Y_0, Z_0$ ), длительность события ( $\tau_0$ ) и сейсмическая энергия в очаге ( $E$ ). Обработку сейсмического события проводят в течение 30 мин после регистрации звукового сигнала. Результаты обработки хранятся в базе данных SQL-сервера.

Для оценки сейсмоактивности и прогноза удароопасности используют совокупность данных о координатах и энергии событий в единичном объеме за 31 сутки до дня оценки для системы сейсмического мониторинга «Релос-РШ-64» и за 91 сутки — для системы IMS. Распределение сейсмичности в плане используют



**Рис. 1. Схема расположения сейсмических павильонов в шахтном поле рудника «Таймырский»:**  
СП — сейсмический павильон; 05–21 — номера панелей



**Рис. 2. Пример построения карты удароопасности по параметру  $F$ :**

1 — величины параметра  $F$ ; 2 — сейсмические павильоны; 3 — сейсмические события; 4 — радиус опасной зоны ( $R$ )

для регионального прогноза удароопасных областей. Основным показателем количественной и энергетической оценки и прогноза сейсмической активности является параметр  $F$ :

$$F_t = \sum_1^T N_t + D_t, \quad (1)$$

где  $N$  — активность: приведенное число сейсмических событий на участке  $120 \times 120$  м с энергией свыше  $E_0 = 70$  Дж за предельный удельный интервал времени регистрации  $T = 31$  сутки (91 — для системы IMS) до прогнозирования;  $D$  — суммарная деформация: приведенная сумма деформаций (квадратных корней энергии) сейсмических событий с энергией свыше  $E_0 = 70$  Дж, отнесенная к деформации события с энергией 10 Дж (50 Дж — для системы ISS).

По результатам выполненной ВНИМИ научно-исследовательской работы [3], в процессе анализа параметра  $F$  в расчеты были внесены следующие изменения:

- введен поправочный коэффициент  $\beta$ , позволяющий учитывать степень влияния числа низкоэнергетических событий на величину параметра  $F$  ( $F = F/\beta$ );
- скорректирован коэффициент, учитывающий степень затухания сейсмической активности во времени: прямая зависимость влияния энергии сейсмических событий заменена на экспоненци-

альную (чем дальше сейсмическое событие отстоит от даты показания параметра  $F$ , тем меньше значение его энергии):

$$E_{\text{тек}} = e^{-0,1t} (E_{\text{соб}} - t \frac{E_{\text{соб}}}{31}); \quad (2)$$

- введен порог значимости сейсмических событий по величине энергии: события с энергией менее 70 Дж в результате затухания в расчет не принимаются.

Учет горно-технологических факторов при оценке параметров сейсмических событий осуществляется путем сопоставления зон с высокими уровнями сейсмической активности с расположением действующих горных выработок [6]. Прогноз потенциальной удароопасности опирается на установленные относительно высокие значения коэффициентов корреляции ( $R = 0,55 \pm 0,6$ ) текущих значений  $F$  с наблюдающимися в следующую неделю после дня составления прогноза. Высокие значения  $F$  указывают на интенсивное протекание геодинамических процессов, а их нарастание свыше критических уровней — на активизацию геодинамических процессов. Однако само по себе нарастание геодинамической активности не дает прямых оснований для прогнозирования роста удароопасности, необходимо учитывать также близость гипоцентров сейсмических событий к действующим горным выработкам, а также направление движения очагов геодинамических процессов.

Ежедневно в системе сейсмического мониторинга «Релос-РШ-64» отстраиваются карты сейсмической активности с выделением динамически активных зон (рис. 2). Базовым является построение горизонтального плана, где в качестве исходных используются максимальные значения параметра  $F$  по блокам с одинаковыми горизонтальными координатами центров и разными значениями координаты  $Z$ . На схеме указывают также проекции линии отработки рудного тела и наносят данные о местоположении очагов событий в виде символов, спроектированных с разных глубин на заданный уровень горизонта. Уровень энергии сейсмических событий отображают размером символа на схеме в шести диапазонах градации: 1 — от 1 до 150 Дж; 2 — от 150 до 500; 3 — от 500 до 1500; 4 — от 1500 до 4500; 5 — от 4500 до 10000; 6 — свыше 10000 Дж. С увеличением номера градации размер символа увеличивают. Радиус влияния вокруг гипоцентра крупного сейсмического события, в котором за счет сотрясений пород от прохождения упругих волн возможны разрушения крепления и стенок горных выработок, наносят на карту текущего прогноза в виде окружности зеленого цвета для событий свыше 4500 Дж и красного — для событий свыше 10000 Дж. Расчетный размер опасной зоны влияния события вычисляют по формуле

$$R_E = 1,5E^{1/3} + \Delta R, \text{ м}, \quad (3)$$

где  $R_E$  — радиус опасной зоны (круга) на плоскости;  $E$  — сейсмическая энергия события, Дж;  $\Delta R$  — 15 м.

Система сейсмического мониторинга IMS находится в опытно-промышленной эксплуатации. По предложенным ВНИМИ параметрам (плотность сейсмических событий  $N = 70$ , плотность сейсмической энергии  $E = 107$ ,  $F = 90$ ) ежедневно отстраиваются карты сейсмической активности с периодом накопления 3 ме-

сяца. Для углубленного анализа сейсмически активных зон в обеих системах имеется возможность построения планов, разрезов, различных графиков и диаграмм.

Каталоги событий и прогнозные карты ежесуточно заносятся в базу данных, доступ к которой имеют участки прогнозирования и предотвращения горных ударов рудников, которые осуществляют анализ горнотехнической ситуации в районах выделенных опасных зон, визуальные обследования расположенных в них горных выработок, выбирают места наиболее вероятного проявления динамических разрушений и проводят инструментальную оценку категории удароопасности участка локальными методами. По результатам локального прогноза удароопасности принимают решения о необходимости проведения конкретных профилактических противоударных мероприятий.

Основным способом предотвращения горных ударов является формирование в массиве защищенных и защитных зон путем бурения разгрузочных скважин, критерием эффективности которых является снижение напряжений до значений, исключающих проявление горного давления в динамической форме на максимально длительный срок эксплуатации выработки или участка массива горных пород. Виды и параметры мероприятий регламентируются действующими нормативными документами [7]. Вместе с тем, в действующих «Указаниях . . .» отсутствуют четкие критерии выбора направления, очередности и параметров проведения разгрузки в зависимости от горно-геологических и горнотехнических условий.

В связи с этим в настоящее время выполняется научно-исследовательская работа с привлечением ВНИМИ. В ходе исследований установлено, что, кроме горно-геологических, горнотехнических и технологических факторов, на эффективность разгрузочных мероприятий значительное влияние оказывают непосредственно параметры разгрузочных скважин, а именно: расстояние между стенками скважин; их ориентация относительно линии падения и простирания рудного тела; углы наклона и длины скважин; глубина горизонта проводимых мероприятий.

По результатам физического моделирования получена логарифмическая зависимость и разработана методика определения расстояния между стенками скважин (шпуров) для формирования защищенных зон с учетом прочности и степени нарушенности горных пород, ориентации скважин относительно линий падения и простирания рудного тела. Проверку эффективности предложенных параметров разгрузочных скважин, формирующих защитную и защищенную зону, проводили методом конечных элементов в постановке упругого восстановления. Установлено, что зоны нагруженности распространяются на расстояние до  $3d$  ( $d$  — диаметр скважин) от стенок скважин. Расчеты показали также, что с увеличением глубины горизонтов проводимых мероприятий размеры защитных зон и значения коэффициента концентрации напряжений не меняются.

Установлено также, что наиболее эффективным является угол наклона разгрузочных скважин, при котором максимальные действующие напряжения будут направлены по нормали к плоскости разгрузки. Даны рекомендации по определению направ-

ления вектора максимальных нормальных напряжений. Предельная глубина бурения зависит от характеристик применяемого бурового оборудования, ограничивается условием критических (максимальных) отклонений забоев скважин от заданных (проектных) направлений, которые (отклонения) не должны превышать величину  $3d$ . Что касается «недобуров» скважин до стенки встречной горной выработки, то с учетом  $m_{от}$  толщины зоны «отжатия» у боков горной выработки мощность целика между забоями скважин и стенкой встречной выработки не должна превышать  $l_{ц} = m_{от} + a/2$ .

Результаты научных исследований намечено апробировать комплексом опытно-промышленных испытаний при научно-методическом сопровождении ВНИМИ, что позволит отработать порядок выбора наиболее эффективных параметров бурения разгрузочных скважин в разных горно-геологических условиях, использовать для разгрузки не только специализированное оборудование, но и самоходную буровую технику, применяемую на очистных работах, с существенным снижением затрат на реализацию противоударных мероприятий. Например, для наиболее распространенного типа богатых руд — халькопирит-пирротиновой руды средней нарушенности, при бурении разгрузочных скважин диаметром 130 мм и расстоянии между скважинами 0,97 м экономия по отношению к базовому расстоянию (0,7 м) составит 24,5 % (сокращение объемов бурения).

Вместе с тем в реальных условиях необходим инструмент, позволяющий оценивать результаты осуществленных противоударных мероприятий [8, 9]. Таким инструментом является, например, показанный выше сейсмический мониторинг. По результатам проведенных ВНИМИ в 2012–2014 гг. исследований установлено непосредственное влияние разгрузочных мероприятий на параметры сейсмической активности: снижение энергии сейсмических событий и сдвигение опасных зон в глубину массива. Кроме того, сейсмические наблюдения позволяют выборочно применять дорогостоящее бурение разгрузочных скважин, снижая тем самым затраты на противоударные мероприятия.

#### Библиографический список

1. Ризниченко Ю. В. Проблемы сейсмологии. Избранные труды. — М.: Наука, 1985. — 408 с.
2. Петухов И. М., Смирнов В. А., Винокур Б. Ш., Дальнов А. С. Геофизические исследования горных ударов. — М.: Недра, 1975. — 132 с.
3. Маловичко А. А., Дягилев Р. А., Шулаков Д. Ю., Кустов А. К. Мониторинг техногенной сейсмичности на рудниках и шахтах Западного Урала // Горная геофизика: материалы междунар. конф. — СПб., 1998. С. 147–151.
4. Ломакин В. С., Григорович С. В., Потехин Р. П., Халевин Н. И. О связи объема очаговой зоны разрушения с сейсмической энергией горного удара // Геология и геофизика. 1989. № 5. С. 129–132.
5. Баранов С. В., Виноградов А. Н., Николаева С. Б., Петров С. И. Сейсмичность Кольского полуострова по инструментальным данным // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических



- данных : материалы VI Междунар. сейсмологической школы. — Обнинск : ГС РАН, 2011. С. 47–51.
6. Воинов К. А., Краков А. С., Ломакин В. С., Халевин Н. И. Сейсмологические исследования горных ударов на Североуральских месторождениях бокситов // Физика Земли. 1987. № 10. С. 96–104.
7. Указания по безопасному ведению горных работ на Талнахском и Октябрьском месторождениях, склонных и опасных по горным ударам. — Норильск — СПб., 2007. — 99 с.
8. Крейтер В. М. Структуры рудных полей и месторождений. — М. : Госгеолтехиздат, 1956. — 172 с.
9. Чернышев С. Н. Трещины горных пород. — М. : Наука, 1983. — 240 с. **ГЖ**
- Наговицин Юрий Николаевич,  
тел.: +7 (3919) 37-19-78  
Какошина Лариса Владимировна,  
тел.: +7 (3919) 37-82-83  
Родионова Елена Вячеславовна,  
тел.: +7 (3919) 38-15-53  
Мулёв Сергей Николаевич,  
тел.: +7 (812) 327-21-22

«GORNYI ZHURNAL»/«MINING JOURNAL», 2015, № 6, pp. 36–40	
<b>Title</b>	<b>Continuous seismic monitoring at rockburst-hazardous deposits in the Norilsk area</b>
<b>DOI:</b>	<b><a href="http://dx.doi.org/10.17580/gzh.2015.06.07">http://dx.doi.org/10.17580/gzh.2015.06.07</a></b>
<b>Author 1</b>	Name & Surname: <b>Nagovitsin Yu. N.</b>
	Company: <b>Polar Division of PJSC “MMC “NORILSK NICKEL” (Norilsk, Russia)</b>
	Work Position: <b>Head of Geotechnology Improvement Department, Center for Geodynamic Safety</b>
	Contacts: <b>phone: +7 (3919) 37-19-78</b>
<b>Author 2</b>	Name & Surname: <b>Kakoshina L. V.</b>
	Company: <b>Polar Division of PJSC “MMC “NORILSK NICKEL” (Norilsk, Russia)</b>
	Work Position: <b>Head of Seismic Monitoring Department, Center for Geodynamic Safety</b>
<b>Author 3</b>	Name & Surname: <b>Rodionova E. V.</b>
	Company: <b>Polar Division of PJSC “MMC “NORILSK NICKEL” (Norilsk, Russia)</b>
	Work Position: <b>Deputy Head of Seismic Monitoring Department, Center for Geodynamic Safety</b>
<b>Author 4</b>	Name & Surname: <b>Mulev S. N.</b>
	Company: <b>VNIMI (Saint-Petersburg, Russia)</b>
	Work Position: <b>Head of Geophysical Research Laboratory</b>
<b>Abstract</b>	The article describes the seismic monitoring system deployed in the rockburst-hazardous mines of the Polar Division of Norilsk Nickel and the rockbursting countermeasures aimed at safe copper-nickel ore mining at the Talnakh and Oktyabrsky deposits. The issues of scientific relevance, latter-day organizational, methodical and technical support, efficiency and ranges of further improvement and progression of the monitoring system and rockbursting countermeasures are discussed.
	In spotlight are the detection, mapping and forecasting of rockburst-hazardous zones for the purpose of selection and advance implementation of rockbursting countermeasures, and a detailed description is devoted to the method of stress relaxation in rock mass by means of destressing drilling. The recommended parameters of the destressing drilling are validated and presented: inclination, spacing and orientation of drill holes relative to the dip and strike of an ore body.
	The authors emphasize the importance and essentiality of the scientific supervision and technical support of the geodynamic safety system deployed in the Norilsk area mines, and its updating and improvement.
<b>Keywords</b>	Rockburst-hazardous deposits, seismic monitoring, seismically active zones, underground mines, geodynamic safety, observation network, rock mass stress state, rockburst hazard prediction, relief drill holes.
<b>References</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>Riznichenko Yu. V. <i>Problemy seismologii. Izbrannye trudy</i> (Seismology problems. Selected proceedings). Moscow : Nauka, 1985. 408 p.</li> <li>Petukhov I. M., Smirnov V. A., Vinokur B. Sh., Dalnov A. S. <i>Geofizicheskie issledovaniya gornyykh udarov</i> (Geophysical researches of rock bumps). Moscow : Nedra, 1975. 132 p.</li> <li>Malovichko A. A., Dyagilev R. A., Shulakov D. Yu., Kustov A. K. Monitoring tekhnogennoy seysmichnosti na rudnikakh i shakhtakh Zapadnogo Urala (Monitoring of anthropogenic seismicity at mines and shafts of Western Urals). <i>Gornaya geofizika : materialy Mezhdunarodnoy konferentsii</i> (Mining geophysics : materials of International Conference). Saint Petersburg, 1998. 147–151 pp.</li> <li>Lomakin V. S., Grigorovich S. V., Potekhin R. P., Khalevin N. I. O svyazi obema ochagovoy zony razrusheniya s seysmicheskoy energiyey gornogo udara (About the connection of volume of focal destruction zone with seismic energy of rock bump). <i>Geologiya i geofizika = Russian Geology and Geophysics</i>. 1989. No. 5. pp. 129–132.</li> <li>Baranov S. V., Vinogradov A. N., Nikolaeva S. B., Petrov S. I. Seysmichnost Kolskogo poluostrova po instrumentalnym dannym (Seismicity of Kola Peninsula according to instrumental data). <i>Sovremennye metody obrabotki i interpretatsii seysmologicheskikh dannykh : materialy VI Mezhdunarodnoy seysmologicheskoy shkoly</i> (Modern methods of processing and interpretation of seismological data : materials of the VI International seismological school). Obninsk : Geological Service of Russian Academy of Sciences, 2011. pp. 47–51.</li> <li>Voinov K. A., Krakov A. S., Lomakin V. S., Khalevin N. I. Seysmologicheskie issledovaniya gornyykh udarov na Severouralskikh mestorozhdeniyakh boksitov (Seismological investigations of rock bumps on North-Urals bauxite deposits). <i>Fizika Zemli = Izvestiya. Physics of the Solid Earth</i>. 1987. No. 10. pp. 96–104.</li> <li><i>Ukazaniya po bezopasnomu vedeniyu gornyykh rabot na Talnakhskom i Oktyabrskom mestorozhdeniyakh, sklonnykh i opasnykh po gornym udaram</i> (Regulations of safe mining at Talnakh and Oktyabrskoe deposits, liable and hazard to rock bumps). Norilsk – Saint Petersburg, 2007. 99 p. (in Russian)</li> <li>Kreyter V. M. <i>Struktury rudnykh poley i mestorozhdeniy</i> (Structures of ore fields and deposits). Moscow : Gosgeoltekhizdat, 1956. 172 p.</li> <li>Chernyshev S. N. <i>Treshchiny gornyykh porod</i> (Rock fissures). Moscow : Nauka, 1983. 240 p.</li> </ol>