



**ОЦЕНКА ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВОВ
ГОРНЫХ ПОРОД НА ГЛУБОКИХ РУДНИКАХ
НОРИЛЬСКО-ТАЛНАХСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПОЛИМЕТАЛЛОВ**

В. И. Востриков¹, В. Н. Опарин¹, О. М. Усольцева¹, С. Н. Мулев²

¹*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: vvi.49@mail.ru,
Красный проспект 54, г. Новосибирск, Россия*

²*ОАО “Научно-исследовательский институт горной геомеханики и маркшейдерского дела” –
Межотраслевой научный центр ВНИМИ,
22 линия Васильевского острова 3, корп. 1, г. Санкт-Петербург 199106, Россия*

Выполнен анализ обширного банка сейсмологической информации по одному из глубоких рудников Норильско-Талнахского месторождения полиметаллов с целью оценки удароопасности массивов горных пород. Предложен критерий, основанный на отношении кинематических характеристик сейсмических процессов, в качестве которых используются скорость миграции приведенного центра сейсмоэнерговыведения и кажущаяся скорость смежных по времени их проявления афтершоков отдельных крупных сейсмособытий в пределах контролируемых зон концентрации напряжений шахтных полей. Установлено, что минимальное значение этого параметра характеризует состояние контролируемого участка массива горных пород как удароопасное. В такие периоды времени происходят наиболее значимые по энергии сейсмособытия, в результате которых массив горных пород “сбрасывает” накопленную энергию. Затем значение параметра удароопасности увеличивается, и контролируемый участок переходит в неудароопасное состояние. Верификация предлагаемого параметра оценки удароопасности массивов горных пород по руднику “Скалистый” Норильского месторождения полиметаллов за период 2015–2017 гг. показала, что отношение кинематических характеристик сейсмических процессов с высокой степенью достоверности может служить в качестве критерия удароопасности контролируемых участков массивов горных пород.

Рудник, сейсмологическая информация, кинематические характеристики, параметр удароопасности, массив горных пород

**THE ASSESSMENT OF THE GEODYNAMIC STATE OF ROCK MASSIFS
IN DEEP MINES OF THE NORILSK-TALNAKH POLYMETALLIC DEPOSIT**

V. I. Vostrikov¹, V. N. Oparin¹, O. M. Usoltseva¹, and S. N. Mulev²

¹*Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
E-mail: vvi.49@mail.ru, Krasny pr. 54, Novosibirsk 630091, Russia*

²*Institute for Geomechanics and Surveying – Interbranch Research Center VNIMI,
22 liniya Vasil'yevskogo ostrova, 3, korp. 1, Saint-Petersburg 199106, Russia*

The extensive seismological data bank for one of the deep mines of the Norilsk-Talnakh polymetallic deposit is analyzed in order to assess the rock-burst hazard of rock massifs. The criterion proposed for this assessment is based on the relation of kinematic characteristics of seismic processes used as migration velocity of reduced center of seismic energy release and apparent rate of aftershocks related to the time of their occurrence for selected major seismic events within the controlled zones of mine field stresses concentration. The minimum value of this parameter characterizes the state of controlled area of the rock mass as rock-burst hazardous. The most significant energy-related seismic events occurring in such time periods result in the rock massif “discharging” the accumulated energy. Then the value of the rock-burst hazard parameter increases, and the controlled area passes into non-hazardous state. Verification of the proposed parameter for assessing the rock-burst hazard, performed for the “Skalisty” mine of the Norilsk polymetallic deposit for the period 2015–2017, has demonstrated that the ratio of the kinematic characteristics of seismic processes can serve with a high degree of reliability as a criterion for rock-burst hazard of controlled areas of rock massifs.

Mine, seismological information, kinematic characteristics, the parameter of rock-burst hazard, rock massif

В настоящее время в России и за рубежом на крупнейших горнодобывающих предприятиях действуют многоканальные системы оперативного контроля сейсмической активности массивов горных пород в пределах шахтных полей, индуцированной ведением открытых и подземных горных работ. Системы мониторинга ориентированы на оценку напряженно-деформированного состояния массивов горных пород и прогнозирование техногенных и природных катастрофических явлений, таких как горные и горно-тектонические удары. Особенно они актуальны при отработке месторождений, находящихся в геодинамически активных регионах с высокой концентрацией шахт и рудников, а также в условиях больших глубин со сложным геологическим строением породных массивов [1 – 5].

На рудниках Норильского месторождения полиметаллов сейсмический мониторинг осуществляется Центром автоматизированной системы контроля геодинамической безопасности с 1993 г. В качестве основных параметров, по которым ведется анализ сейсмической информации используются следующие: уровень сейсмической активности, уровень сейсмической энергии, пространственно-временное распределение зон сейсмической активности, максимальный энергетический класс происходящих сейсмособытий и др. По полученным данным ежедневно строятся карты сейсмической активности, характеризующие усредненную оценку сейсмической активности за месяц, выдаются каталоги по количеству и энергии сейсмособытий по шахтным полям [4]. За время работы сейсмостанции накоплен обширный объем сейсмологической информации, систематизация, обработка и анализ которой позволил установить закономерности в развитии индуцированных горными работами сейсмоземиссионных процессов.

Норильское месторождение полезных ископаемых разрабатывается несколькими рудниками: “Октябрьским”, “Таймырским”, в том числе и рудником “Комсомольский”, в состав которого входят шахты: “Маяк”, “Комсомольская” и “Скалистая”. Протяженность шахтного поля составляет 12 км, максимальная ширина — 3.5 км. Общая протяженность выработок превышает 450 км.

На рис. 1 изображена карта сейсмической активности по рудникам: “Октябрьский”, “Таймырский” и “Скалистый” за период 2015 – 2017 гг. За этот период времени очистные работы по рудникам “Октябрьский” и “Таймырский” продолжали сокращаться. Это отразилось в уменьшении сейсмоактивности по этим рудникам. В табл. 1, 2 представлены данные по суммарному количеству сейсмособытий N , суммарному сейсмозэнерговыделению $\sum E$, максимальной энергии сейсмособытия E_{\max} и удельной энергии E/N .

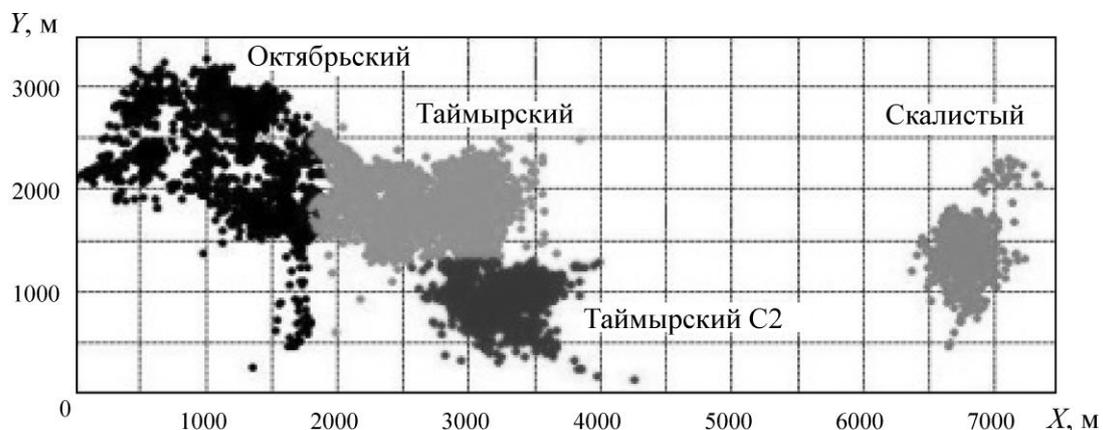


Рис. 1. Карта сейсмической активности по рудникам Норильского комбинат за 2015 – 2017 гг.

ТАБЛИЦА 1. Данные по сейсмическим событиям рудников “Октябрьский” и “Таймырский” за 2015 – 2017 гг.

Рудник	Год	N	$\sum E$	E_{\max}	E/N	Примечание
"Октябрьский"	2015	1532	756949	14934	494	
	2016	1956	1334733	15795	682	
	2017	1406	917552	9499	652	По 29.09.2017
“Таймырский”	2015	6128	2298480	15093	371	
	2016	9315	4343140	23981	466	
	2017	4588	2151894	12359	469	По 29.09.2017
“Таймырский С2”	2015	3538	915310	9829	258	
	2016	3553	1148639	13681	323	
	2017	1738	599988	12178	345	По 29.09.2017

В связи с увеличением объемов добычи руды на руднике “Комсомольский”, в частности на шахте “Скалистая”, на этой шахте обострилась геодинамическая обстановка. В табл. 2 приведены данные по N , $\sum E$, E_{\max} и E/N по всему полю этой шахты.

ТАБЛИЦА 2. Данные по сейсмическим событиям рудника Комсомольский, шахта Скалистая за 2015 – 2017 гг.

Рудник	Год	N	$\sum E$	E_{\max}	E/N	Примечание
“Комсомольский”, шахта “Скалистая”	2015	877	3085767	204000	3518	
	2016	1366	2887991	379000	2114	
	2017	822	1930949	145000	2349	По 29.09.2017

Общие сведения об условиях обработки и геомеханическом состоянии массивов горных пород рудника “Скалистый”. Рудник “Скалистый”, общий план которого показан на рис. 2, действует на базе запасов глубоких залежей сульфидных медно-никелевых руд месторождений Талнахского рудного узла. В целом горно-геологические и горно-геомеханические условия разработки залежей в пределах рудника “Скалистый” следует считать весьма сложными, требующими разработки при проектировании и ведении горных работ специальных мероприятий, направленных на обеспечение безопасности труда рабочих.

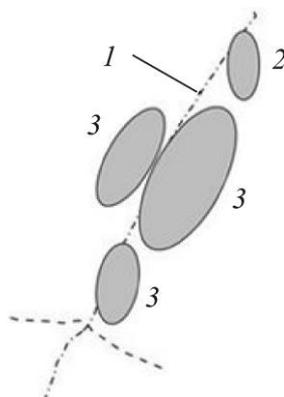


Рис. 2. Поле рудника “Скалистый”: 1 — Норильско-Хараелахский разлом; 2 — линза; 3 — залежи

Тектоническая обстановка определяется влиянием Норильско-Хараелахского разлома и активным развитием разрывных нарушений сбросовзбросового типа, ориентированных, в основном, субпараллельно или под острым углом к главному шву этого разлома. В поле рудника “Скалистый” преобладают крутопадающие разрывные нарушения с амплитудой 4–6 м, образующие в массиве узкие линзовидные блоки, но отмечены и пологие (до 30°) дизъюнктивные

нарушения. Большая часть крупных крутопадающих тектонических нарушений прослеживается на земной поверхности и пересекает рудные залежи. Однако часть нарушений, наблюдаемых на поверхности, затухает в налегающей толще.

Нарушения субмеридионального простирания в большинстве своем являются сбросами, имеющими в основном падение, согласное Норильско-Хараелахскому разлому. Такие нарушения ограничивают и секут залежи и “безрудное окно”. Субширотные нарушения в поле рудника “Скалистый” преимущественно являются субвертикальными сбросами или сбрососдвигами северного падения. К югу от поля прослеживается серия взбросов южного падения. Амплитуды смещения по некоторым тектоническим нарушениям достигают 60–100 м. Но по основной части нарушений амплитуды смещений обычно не превышают 20 м. В результате большого распространения тектоники горный массив рудного поля разбит на разнонаправленные, имеющие различную форму тектонические блоки. Блоки ступенчато опускаются к северу и к центральной части поля.

Для обеспечения безопасных условий отработки запасов руд рудника “Скалистый” необходимо постоянно контролировать напряженное состояние массива горных пород вокруг выработанных пространств в процессе развития очистных работ. Измерения естественных напряжений зафиксировали [1] достаточно большую горизонтальную составляющую общего поля напряжений. Так, например, измерения методом разгрузки на глубине 700 м главных напряжений показывают следующие значения: $\sigma_1 = 50$ МПа (горизонтальное); $\sigma_2 = 30$ МПа (горизонтальное); $\sigma_3 = 20$ МПа (вертикальное). Вертикальная компонента напряжений в этом примере является минимальной.

Диагностический параметр $\chi(t)$. Для количественного анализа полученной информации с позиций контроля уровня “удароопасности” выделенных зон сейсмоактивности по шахтным полям рудников Норильского месторождения полиметаллов в ИГД СО РАН [3] предложен новый геомеханический параметр χ , изменяющийся во времени t :

$$\chi(t) = \frac{V_E(t)}{V_k(t)}, \quad (1)$$

где V_E — среднемесячная скорость миграции приведенного центра сейсмоэнерговыведения для контролируемого участка массива горных пород (например, объема “проблемной” по удароопасности зоны); V_k — “кажущаяся” скорость миграции сейсмособытий, последовательно упорядоченных во времени в пределах того же объема горных пород.

Определение скоростных характеристик $V_E(t)$ и $V_k(t)$ в формуле (1) осуществляется с использованием информационных банков данных зарегистрированных сейсмособытий, охарактеризованных пространственными координатами r_i , временем проявления t_i и энергией E_i в их дискретном представлении i [6].

Весь каталог сейсмособытий для определенного объема горных пород формируется в виде последовательности, упорядоченной по времени t проявления этих сейсмособытий:

$$E_i = E(x_i, y_i, z_i, t_i), \quad i = 1, 2, \dots, N_0, \quad (2)$$

где N_0 — объем каталога сейсмособытий; E_i — энергия сейсмособытия; (x_i, y_i, z_i, t_i) — координаты i -го сейсмособытия, причем $t_i < t_{i+1}$.

Для каждого месяца возникновения сейсмособытий вычисляется осредненный центр с координатами (x_i, y_i, z_i) :

$$(x_i, y_i, z_i) = \sum_{i=1}^{N_0} (x_i, y_i, z_i) \times \frac{E_i}{\sum_{i=1}^{N_0} E_i},$$

где k — номер месяца (1, 2, ..., 12).

Расстояние r_k между осредненными месячными центрами вычисляется по формуле:

$$r_k = \sqrt{(x_k - x_{k+1})^2 + (y_k - y_{k+1})^2 + (z_k - z_{k+1})^2}.$$

Тогда

$$V_E = (r_k - r_{k+1})t,$$

где t — число секунд в месяце, если рассчитывается помесечная миграция осредненного центра.

Для расчета V_k из каталога сейсмособытий за месяц выделяются группы сейсмособытий, в которых значительное сейсмособытие вызывает проявление афтершоков. В каждой группе рассчитывается скорость между смежными афтершоками:

$$V_i = \frac{\Delta r(i, i-1)}{\Delta t(i, i-1)},$$

где $\Delta r(i, i-1) = \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2 + (z_i - z_{i-1})^2}$; $\Delta t(i, i-1) = t_i - t_{i-1}$, и после усреднения получаем смежную скорость V_k .

Верификация диагностического параметра $\chi(t)$. Целью настоящих исследований является верификация диагностического параметра $\chi(t)$ для контроля уровня удароопасности массивов горных пород в процессе отработки твердых полезных ископаемых на рудниках Талнахско-Октябрьского месторождения, в частности, на шахте “Скалистая”. На рис. 3 показаны карты сейсмособытий по руднику “Скалистый” за период 2015–2017 гг., на которых выделена зона 1. По этой зоне за период 2015–2017 гг. рассчитаны критерии удароопасности $\chi = V_E / V_k$, графики которых приведены на рис. 4.

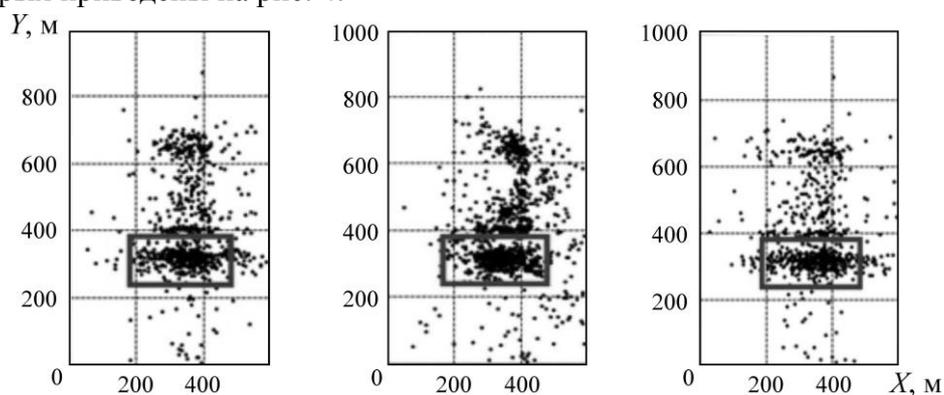


Рис. 3. Карты сейсмособытий рудника “Скалистый” за 2015–2017 г. (прямоугольником выделена зона 1)

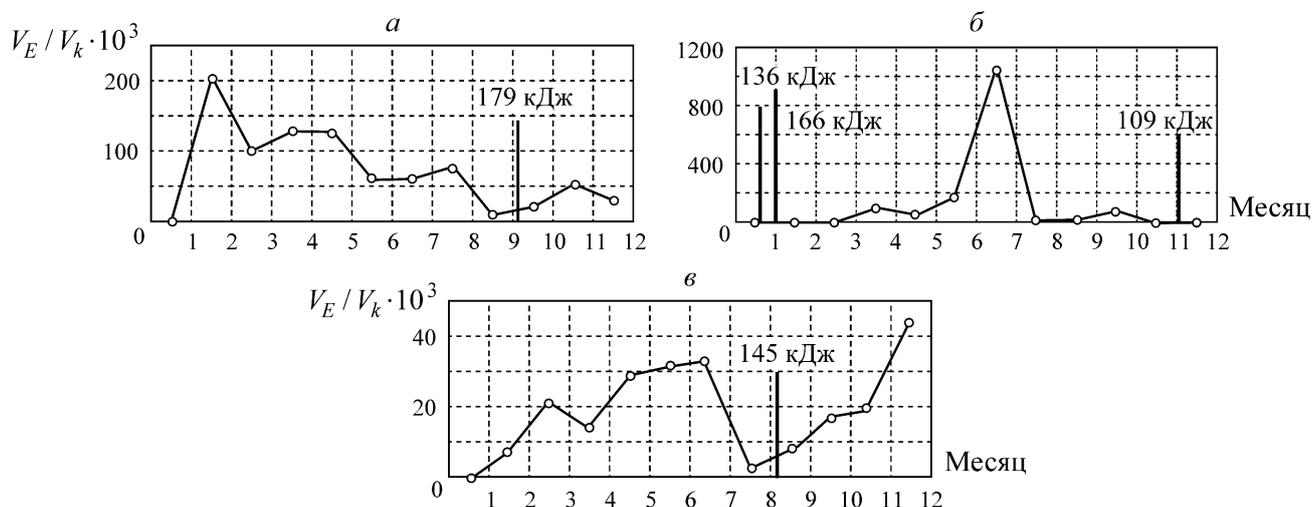


Рис. 4. Графики критерия геодинамического состояния массива горных пород по зоне 1 по годам

В 2015 г. крупное по энергии сейсмособытие 179 000 Дж произошло 07 октября, и по времени оно совпадает с минимальным значением критерия. Это сейсмособытие “разгрузило” массив и значение критерия увеличилось. В 2016 г. существенных отличий не наблюдалось. В этом году зарегистрировано несколько крупных сейсмособытий: 136, 166 и 109 кДж. Все они укладываются по времени в интервалы с минимальным значением параметра удароопасности χ . В 2017 г. 02 сентября произошло одно сейсмособытие с высокой энергией, которое также укладывается по времени в интервал с минимальным значением параметра χ удароопасности.

Как можно видеть, перед проявлениями крупных по энергии сейсмособытий значение диагностического параметра $\chi(t)$ уменьшается. Минимальные значения этого параметра соответствуют накоплению сейсмической энергии, концентрации сейсмоактивности в наиболее напряженном участке массива горных пород с последующим выбросом энергии в виде горных толчков и ударов. После “сброса” аккумулированной энергии диагностический параметр увеличивается.

Таким образом, по верифицированному параметру $\chi(t)$ можно диагностировать не только рост уровня концентрации напряженности контролируемых массивов, но и уровень его релаксации после свершившегося крупного динамического события. А это принципиально важно также для практических приложений в технологических аспектах ведения очистных горных работ.

ВЫВОДЫ

Исследована сейсмическая активность по шахте “Скалистая” за период 2015–2017 гг. Отмечено, что в 2016 г. зафиксировано самое большое число сейсмособытий за рассмотренный период времени, а также максимальное значение энергоемкости одного сейсмособытия. Увеличение сейсмической активности в 2016 г. связано с резким ростом объемов добычи руды.

Анализ обширного банка сейсмособытий показывает, что все крупные сейсмические события проявляются в период наименьшего значения параметра $\chi(t)$, основанного на отношении кинематических характеристик сейсмических процессов V_E и V_k . Подобная верификация критерия осуществлялась на различных рудниках Норильского месторождения полиметаллов в течение нескольких лет, а также на угольных шахтах Кузбасса и везде продемонстрировала эффективность оценки. Для шахты “Скалистая” характерно то, что в 2015–2017 гг. выделяется одна концентрированная зона сейсмоактивности.

Таким образом, показатель $\chi(t)$ с высокой степенью достоверности, может служить в качестве оценки удароопасности контролируемых участков массивов горных пород. Расчеты $\chi(t)$, представленные в данной работе, выполнены в каждом году ежемесячно, но в зависимости от поставленных задач их можно проводить еженедельно или для оперативности принятия профилактических мероприятий ежедневно в текущем режиме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Isaev Yu. S. and Mulev S. N.** Monitoring of technogenic seismicity in mines, Geodynamics and stress state of the earth's interior: Tr. International. Conf., Novosibirsk, Publishing house SB RAS, 1999 (in Russian) [Исаев Ю. С., Мулев С. Н. Мониторинг техногенной сейсмичности на шахтах и рудниках // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли: ТР. Междунар. конф. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999.]
2. **Herman V. I. and Mansurov V. A.** Forecast of collapses at Zhezkazgan copper Deposit, Mining Information Analytical Bulletin, 2010, no. 1, pp. 95–104 (in Russian) [Герман В. И., Мансуров В. А. Прогноз обрушений на Жезказганском медном месторождении // ГИАБ. — 2010. — № 1. — С. 95–104].

3. **Malovichko A. A., Diaghilev R. A., Shulakov D. Yu., and Manko Yu. V.** Regional forecast of seismic zones at mining facilities of Verkhnekamsk industrial district, *Problems of Geotechnology and subsoil use*, Ekaterinburg, Institute of Mining, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, 1998, vol. 3, pp. 262–270 (in Russian) [**Маловичко А. А., Дягилев Р. А., Шулаков Д. Ю., Мынка Ю. В.** Региональный прогноз сейсмоопасных зон на горнодобывающих объектах Верхнекамского промышленного района // *Проблемы геотехнологии и недроведения*. — Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 1998. — Т. 3. — С. 262–270.]
4. **Emanov A. F., Emanov A. A., Leskova E. V., et al.** Seismic activations in coal mining in Kuzbass, *Physical mesomechanics*, 2009, no. 12, pp. 49–64 (in Russian) [**Еманов А. Ф., Еманов А. А., Лескова Е. В. и др.** Сейсмические активизации при разработке угля в Кузбассе // *Физическая мезомеханика*. — 2009. — № 12. — С. 49–64.]
5. **Modern geodynamics** of rock mass of upper part of the lithosphere: sources, parameters, impact on subsurface objects, Rev. ed. M. D. Novopashin, Institute of Mining Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Publishing house Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 2008, 449 pp. (in Russian) [**Современная геодинамика** массива горных пород верхней части литосферы: истоки, параметры, воздействие на объекты недропользования / отв. ред. М. Д. Новопащин, ИГД СО РАН. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. — 449 с.]
6. **Oparin V. N., Tapsiev A. P., Vostrikov V. I., Usol'tseva O. M., et al.** On possible causes of increase in seismic activity of mine fields in the Oktyabrsky and Taimyrsky mines of the Norilsk deposit in 2003, Part I: Seismic regime, *Journal of Mining Science*, 2004, vol. 40, issue 4, pp. 3–22 (in Russian) [**Опарин В. Н., Тапсиев А. П., Востриков В. И., Усольцева О. М. и др.** О возможных причинах увеличения сейсмической активности шахтных полей рудников “Октябрьский” и “Таймырский” Норильского месторождения в 2003 г. Ч. I: Сейсмический режим // *ФТПРПИ*. — 2004. — № 4. — С. 3–22.]