

УДК 622. 83 + 530. 1 (075. 8)

О.А. Хачай, О.Ю. Хачай

ХАЧАЙ ОЛЬГА АЛЕКСАНДРОВНА – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник (Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН, Екатеринбург).

E-mail: olgakhachay@yandex.ru

ХАЧАЙ ОЛЕГ ЮРЬЕВИЧ – кандидат физико-математических наук, ассистент кафедры математического анализа (Институт математики и компьютерных наук Уральского федерального университета, Екатеринбург). E-mail: khachay@mail.ru

## Сценарий подготовки резонансных энергетических откликов породных массивов под воздействием взрывов (по данным сейсмического каталога)

Разработан новый алгоритм обработки сейсмологической информации детального шахтного каталога с учетом кинематических и динамических характеристик деформационных волн, распространяющихся с разными скоростями в массиве горных пород, находящемся под интенсивным внешним воздействием в виде массовых или технологических взрывов. Установлено, что волны, распространяющиеся со скоростями от 10 до 1 м/ч, являются преимущественным переносчиком энергии в массиве, способствующим ее выделению. События, происходящие в массиве с этими скоростями и обладающие энергией выделения меньше чем  $10^4$  Дж, способствуют криповой перестройке массива. События, происходящие в массиве с этими скоростями и обладающие энергией выделения больше чем  $10^5$  Дж, могут быть использованы как предвестники, которые рекомендуется принимать во внимание при корректировке производства взрывов в той или иной части массива. Полное отсутствие этих событий свидетельствует об увеличении напряженного состояния в массиве шахты в целом. Полученная комплексная информация из данных сейсмологического каталога является важной для прогноза опасных явлений в рудных шахтах. Построен алгоритм сценария подготовки горных ударов в породных массивах.

*Ключевые слова:* отклик массива, волны деформации, сейсмический каталог, алгоритм обработки, горные удары, сценарий подготовки.

### Введение

Исследования состояния массива с использованием подходов теории динамических систем [2, 8, 9] производились с целью выяснения критериев смены режимов диссипативности для реальных горных массивов, находящихся под сильным техногенным воздействием. Для реализации этого исследования были использованы данные сейсмического каталога Таштагольского подземного рудника за два года наблюдений, с июня 2006 г. по июнь 2008 г. В качестве данных использованы пространственно-временные координаты всех динамических явлений – откликов массива, произошедших за этот период внутри шахтного поля, и взрывов, произведенных для отработки массива, а также значения зафиксированной сейсмической станцией энергии взрывов и откликов массива [8]. Все шахтное поле было разделено на две половины: выработки северо-западного участка, районы стволов Западная и Ново-Капитальная и выработки с 0

по 13 обозначены нами как северный участок, а выработки с 14 по 31, южный вентиляционный и полевой штреки, ствол Южной шахты, выработки юго-восточного участка – как южный участок. Были проанализированы все события-отклики с горизонтов с отметками – 140 м, – 210 м, – 280 м, – 350 м. Взрывы производились на южном, юго-восточном, северо-западном и северном участках. Сейсмологический каталог был также разделен на две части: северную и южную, по событиям: откликам и по взрывам, происходившим в северной и южной части шахтного поля.

Фазовые портреты состояния массивов северного и южного участков построены в координатах  $E_v(t)$  и  $d(E_v(t))/dt$ ,  $t$  – время, выраженное в долях суток,  $E_v$  – выделенная массивом сейсмическая энергия в Дж. В работе [8] проанализирована морфология фазовых траекторий сейсмического отклика на взрывные воздействия в различные последовательные промежутки времени южного участка шахты. В этот период, по данным о произведенных технологических и массовых взрывах, большая часть энергии была закачана именно в южный участок шахты. Кроме того, в конце 2007 г. именно в южном участке произошел один из самых сильных горных ударов за всю историю работы рудника. В результате анализа выделена характерная морфология фазовых траекторий отклика массива, находящегося локально во времени в устойчивом состоянии. На фазовой плоскости имеется локальная область в виде клубка переплетенных траекторий и небольшие выбросы от этого клубка, не превышающие по энергии значений  $10^5$  Дж. В некоторые промежутки времени этот выброс превышает  $10^5$  Дж, достигая  $10^6$  Дж и даже  $10^9$  Дж [12]. Очевидно, что имеют место два взаимозависящих друг от друга процесса. Процесс накопления энергии, что отражается в области, притягивающей фазовые траектории, и процесс резонансного сброса накопленной энергии. Интересно отметить, что после этого сброса система возвращается снова в эту же притягивающую фазовые траектории область. Это подтверждается и детальным анализом фазовых траекторий сейсмического отклика массива до и после самого сильного горного удара. Однако на процесс изменения состояния массива сильно влияет процесс достаточно регулярного внешнего воздействия в виде взрывов различной мощности. За время между взрывами массив не успевает выделить полученную им энергию. Это приводит к реакции запаздывания отклика и нелинейности его проявления, что затрудняет прогноз по времени сильно энергетического разрушительного события [5, 10–12].

Исходя из идей, изложенных в работах [1, 3, 4], мы решили дополнить анализируемую базу данными пространственных координат взрывов, ввести их в предложенный ранее метод обработки данных сейсмологического мониторинга и дополнить его новыми параметрами.

### Алгоритм обработки сейсмической информации

Будем рассматривать каждую точку взрыва как источник сейсмических и деформационных волн. Используя кинематический подход обработки сейсмической информации, будем каждую точку отклика массива использовать как пространственно-временную точку первого вступления деформационной волны для вычисления скорости волны. Введем следующие две группы градаций скоростей от 1–6 в каждой группе. Первая группа: от 1000 до 500 м/ч (1); от 500 до 100 м/ч (2); от 100 до 50 м/ч (3); от 50 до 10 м/ч (4); от 10 до 1 м/ч (5); от 1 до 0.01 м/ч (6). Вторая группа: от 1000 до 500 м/с; от 500 до 100 м/с; от 100 до 50 м/с; от 50 до 10 м/с; от 10 до 1 м/с; от 1 до 0.01 м/с. Все отклики массива вместе с их пространственно-временными, скоростными и энергетическими характеристиками распределим соответственно этим градациям. Затем вычислим средние значения скоростей деформационных волн, участвующих в динамических явлениях массива для каждой градации от взрыва к взрыву.

На рис. 1, а, б отчетливо видно, что волны со скоростями из различных градаций воздействуют на массив последовательно, при этом имеет место наложение влияния деформационных волн, которое зависит от строения массива и от мощности взрыва. Как правило, наложение влияния происходит для волн со скоростями из соседних градаций, при этом волны совместно действуют на разных расстояниях от источника взрыва и возбуждение массива имеет не точечный, а объемный характер.

Параллельно с вычислением средних значений скоростей деформационных волн, участвующих в динамических явлениях массива, для каждой градации от взрыва к взрыву вычислим суммарное значение выделенной энергии массивом в рамках волнового деформационного процесса для каждой градации скоростей. Этот алгоритм был применен ко всему имеющемуся материалу сейсмологического шахтного мониторинга. В качестве примера его использования приводим рис. 2. Результаты рис. 2 показывают: несмотря на то что взрывы происходили только на юго-востоке, после третьего взрыва произошел толчок энергией  $10^5$  Дж для градации  $V_s=4$ . Кроме того, до значений  $10^3$  Дж энергия выделяется волнами для всех градаций, кроме 1 и 6, от  $10^3$  до  $10^4$  Дж – для градации 2, 4, 5, от  $10^4$  до  $10^5$  Дж – для градаций 4 и 5. Эта особенность прослеживается и при обработке данных для следующих временных интервалов.

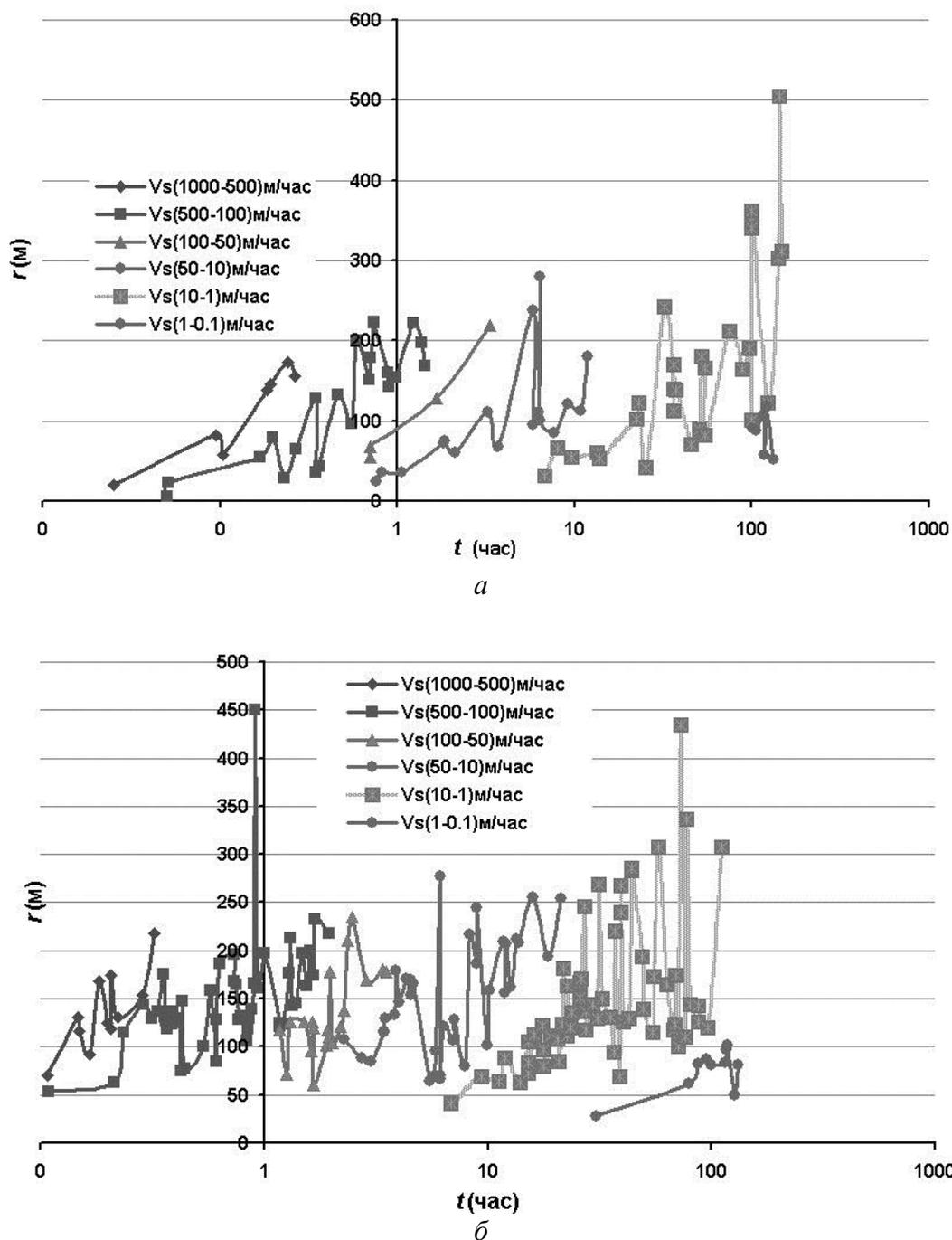


Рис. 1. Зависимость времени прихода деформационной волны от расстояния до источника взрыва: а – 19.11.2006. Массовый взрыв, блок 18, горизонт (–350)–(–280), обрушение, 167.8 т ВВ.,  $E=1.21 \cdot 10^9$  Дж; б – 24.12.2006. Массовый взрыв, блок 26, горизонт (–350)–(–280), обрушение, 200.2 т ВВ.,  $E=9.5 \cdot 10^7$  Дж

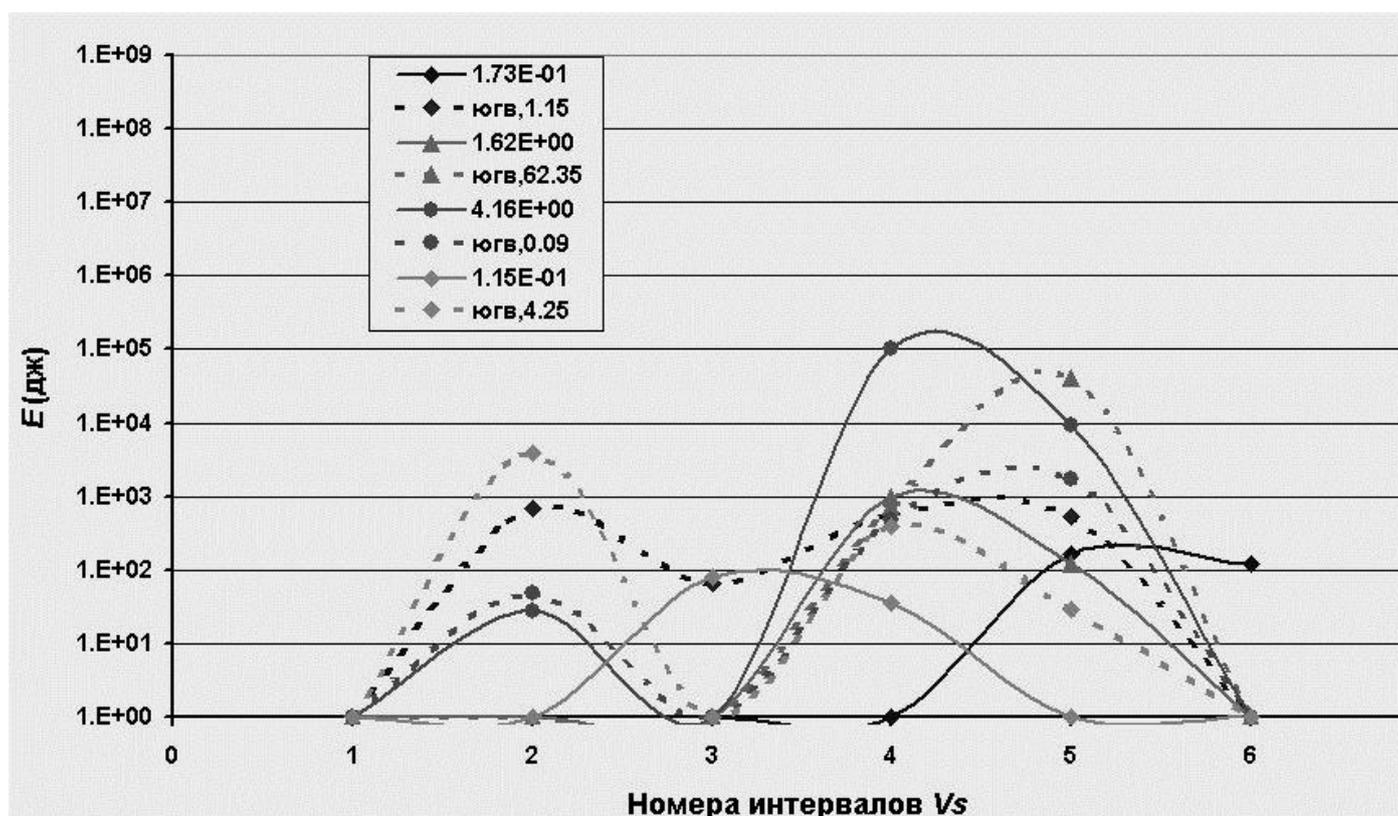


Рис. 2. Распределение выделяемой массивом энергии по грациям средних скоростей деформационных волн от взрыва к взрыву за период (1) 14.01.2007–18.02.2007. Пунктирные линии – выделенная энергия в южной части шахты, сплошные линии – в северной части шахты, числа в легенде при сплошной и пунктирной кривым соответствуют отношению выделенной массивом энергии к поглощенной в момент взрыва в процентах в соответственных частях шахты; югв – взрыв произведен на юго-востоке шахты

### Сценарий подготовки горных ударов с энергией более $10^5$ Дж

В таблице отражены результаты анализа динамических характеристик медленных деформационных волн за 2006–2008 гг. Этот период был разделен на 7 интервалов, включающих в себя по 4 или 5 технологических или массовых взрывов. Буквой «ю» или «с» в таблице обозначено место, где происходило динамическое явление: в южной либо в северной части шахтного поля. Цифры в скобках обозначают номер интервала средней скорости деформационных волн. Результаты таблицы (часть I) свидетельствуют: за период 14.01.2007–30.12.2007 динамических явлений в южной и в северной части шахтного поля с энергией более  $10^5$  Дж было не много. В основном по количеству этих явлений они распределены для северной и южной части шахтного поля практически равномерно. Однако в 7-м временном интервале динамическое явление в южной части шахты обладало энергией чуть меньше чем  $10^9$  джоуля. Что предшествовало этому событию? Весь шестой временной интервал характеризуется зоной затишья, при этом ни в I части, ни во II части таблицы не отмечено ни одного события с энергиями более  $10^4$  и  $10^5$  Дж.

В части I таблицы можно увидеть форшоки в 3-м, 4-м и 5-м временных интервалах, после совершения разрушительного события активизируется северная часть шахты (части I и II), несмотря на то что взрывы продолжали производиться в южной части шахты. Это отражает синергетическую взаимосвязь состояния массива в целом в шахте [12].

Динамические явления, происходящие в массиве, связанные с деформационным волновым процессом с 2006 по 2008 г.

Временные интервалы	I. Выделенная энергия более $10^5$ Дж					II. Выделенная энергия более $10^4$ Дж				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
2006–2007 гг.										
1	0	0	0	0	0	0	0	ю(4)	0	0
2	0	0	0	с(4)	0	0	ю(4)	0	с(4)	0
3	ю(5) )	0	0	с(5)	0	ю(5)	0	с(1)	с(5), с(4)	с(5), с(4)
4	с(5)	0	0	0	0	с(5),ю(5) )	с(5)	0	с(5)	0
5	0	с(6) )	с(5) )	0	ю(4)	с(4),ю(5) )	с(6),с(5), с(4),ю(6)	с(5)	0	ю(4), ю(3),ю(2), ю(1), с(5)
6	с(5)	с(5) )	0	0	с(5)	с(5)	с(5),ю(2)	0	0	с(5), с(4)
7	0	0	с(2) )	0	0	0	0	с(2),ю(4) )	ю(5)	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	ю(4),ю(5)
Временные интервалы	I. Выделенная энергия более $10^5$ Дж					II. Выделенная энергия более $10^4$ Дж				
2007–2008 гг.										
1	0	0	с(4)	0	0	0	ю(5)	с(4)	0	0
2	0	0	0	0	0	с(4,5)	ю(5)	0	ю(4)	0
3	0	0	0	(ю+с)(5)	0	с(6)	0	0	(ю+с)(5) )	0
4	ю(5)	0	с(5)	0	0	(ю+с)(5)	с(6),ю(4) )	с(5)	0	0
5	0	0	0	0	ю(5)	0	0	ю(4) )	0	ю(5)
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	ю(3)	0	0	0	0	с(5)	ю(3)	с(4)	0	с(4)

**Выводы**

Нами разработан новый алгоритм обработки сейсмологической информации детального шахтного каталога с учетом кинематических и динамических характеристик деформационных волн, распространяющихся с разными скоростями в массиве горных пород, находящемся под интенсивным внешним воздействием в виде массовых или технологических взрывов. В результате удалось проследить сценарий подготовки горных ударов с энергией более  $10^5$  Дж. Установлено, что волны, распространяющиеся со скоростями от 10 до 1 м/с, являются преимущественным переносчиком энергии в массиве, способствующим ее выделению. События, происходящие в массиве с этими скоростями и обладающие энергией выделения меньше чем  $10^4$  Дж, способствуют криповой перестройке массива. События, происходящие в массиве с этими скоростями и обладающие энергией выделения более  $10^5$  Дж, могут быть использованы как предвестники, которые рекомендуется принимать во внимание при корректировке производства взрывов в той или иной части массива. Полное отсутствие этих событий свидетельствует об увеличении напряженного состояния в массиве шахты в целом. Построен алгоритм сценария подготовки сильно энергетических динамических явлений в горном массиве. Полученная комплексная информация из данных сейсмологического каталога является важной для моделирования и

интерпретации распространения сейсмических и деформационных волн в иерархических структурах [6, 7].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курленя М.В., Опарин В.Н., Востриков В.И. О формировании упругих волновых пакетов при импульсном возбуждении блочных сред. Волны маятникового типа  $U\mu$  // ДАН СССР. 1993. Т. 333, № 4. С. 473–475.
2. Наймарк Ю.И., Ланда П.С. Стохастические и хаотические колебания. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. 424 с.
3. Опарин В.Н., Востриков В.Н., Тапсиев А.П. и др. Об одном кинематическом критерии прогнозирования предельного состояния массивов горных пород по шахтным сейсмологическим данным // ФТПРПИ. 2006. № 6. С. 3–10.
4. Опарин В.Н., Леонтьев А.В. Квазистатика и динамика массива горных пород в областях сильного техногенного воздействия // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли. Труды конференции с участием иностранных ученых, 6–10 июля 2009. Новосибирск, ИГД СО РАН. Новосибирск, 2010. С. 15–29.
5. Хачай О.А. Геосинергетика: теория, методика, эксперимент // Комплексный анализ электромагнитных и других геофизических данных. Гл. 8 / под ред. В.В. Спичака. М.: КРАСАНД, 2011. 192 с.
6. Хачай О.А., Хачай А.Ю. Изучение напряженно-деформированного состояния иерархических сред // Третья тектонофизическая конф. в ИФЗ РАН: материалы конф., 8–12 окт. 2012. М.: ИФЗ РАН, 2012. С. 114–117.
7. Хачай О.А., Хачай А.Ю. Моделирование электромагнитного и сейсмического поля в иерархически неоднородных средах // Вестник ЮУрГУ. Сер. «Вычислительная математика и информатика». 2013. Т. 2, № 2. С. 48–55.
8. Хачай О.А., Хачай О.Ю., Клишко В.К., Шипеев О.В. Отражение синергетических свойств состояния массива горных пород под техногенным воздействием в данных шахтного сейсмологического каталога // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2010. № 6. С. 259–271.
9. Чуличков А.И. Математические модели нелинейной динамики. М.: Физматлит, 2003. 294 с.
10. Nachay O.A., Khachay A.Yu., Khachay O.Yu. Construction of a State Evolution dynamical Model of a Rock Massive, which is in a regime of energetic Pumping. Geophysical Research abstracts. 2011;13:1528. EGU2011.
11. Nachay O.A., Khachay A.Yu., Khachay O.Yu. Dynamical model for evolution of Rock Massive State as a Response on a Changing of Stress-Deformed State. Fractal analysis and Chaos in Geosciences, chapter 5. Edited by Sid-Ali Quadfeul. In Tech, Croatia, 2012, 174 p.
12. Nachay O.A. Khachay O.Yu., Klimko V.K., Shipeev O.V. The reflection of synergetic Features in the Response of geological Medium on outer Force Actions. Advances in heterogeneous Material Mechanics, Shanghai, China. 2011, pp. 361–366.

**THIS ARTICLE IN ENGLISH SEE NEXT PAGE**

Hachay O.A., Hachay O.Yu.

OLGA A. HACHAY, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher (Institute of Geophysics UB RAS, Ekaterinburg, Russia), e-mail: olgakhachay@yandex.ru; OLEG Yu. HACHAY, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Assistant Professor, Department of Mathematical Analysis (Institute of Mathematics and Computer Science, Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia), e-mail: khachay@mail.ru

## Scenarium of preparation to resonance energetic response in rock massif affected by explosion (using Seismic Catalogue Data)

There has been developed a new algorithm to process seismologic information of the detailed catalogue of mines with the consideration of kinematic and dynamic characteristics of deformation waves spreading with different velocities in the rock massif affected by heavy single blasts or technologic explosions. It has been found that the waves spreading with the velocities from 10 to 1 metre per hour are primary carrier of energy in the massif and promote its release. The events which occur in the massif with these waves having the releasing energy less than  $10^4$  joules involve a creep reconstruction of the massif. The events which occur in the massif with the waves releasing energy more than  $10^5$  joules can be used as rock burst precursory and they are recommend to be taken into consideration when correcting the explosions in the individual parts of the massif. The total absence of such events testifies to the increased stressed state of in the mine itself. The comprehensive information obtained from the seismic catalogue is very significant to forecast dangerous events in the rock mines.

*Key words:* massif response, deformation waves, seismic catalogue, processing algorithm, rock shocks, preparation scenario.

### REFERENCES

1. Kurlenya M.V., Oparin V.N., Vostrikovs V.I. On the formation of elastic wave packets under pulsed excitation block media. *Waves Pendulum Uμ. Akad.* 1993;(333)4:473-475. (in Russ.). [Kurlenja M.V., Oparin V.N., Vostrikov V.I. O formirovanii uprugih volnovyh paketov pri impul'snom vozvuzhdenii blochnyh sred. *Volny majatnikovogo tipa Uμ // DAN SSSR.* 1993. T. 333, № 4. S. 473-475].
2. Naimark Y.I., Landa P.S. Stochastic and chaotic oscillations. M., Book House "LIBROKOM", 2009, 424 p. (in Russ.). [Najmark Ju. I., Landa P.S. Stohasticheskie i haoticheskie kolebanija. M.: Knizhnyj dom "LIBROKOM", 2009, 424 s.].
3. Oparin V.N., Vostrikovs V.N., Tapsiev A.P. et al. A kinematic criteria for predicting the limit state of rocks in mining seismic data. *FTPRPI.* 2006;6:3-10. (in Russ.). [Oparin V.N., Vostrikov V.N., Tapsiev A.P. i dr. Ob odnom kinematicheskom kriterii prognozirovanija predel'nogo sostojanija massivov gornyh porod po shahtnym sejsmologicheskim dannym // *FTPRPI.* 2006. № 6. S. 3-10].
4. Oparin V.N., Leont'ev A.V. Quasi-static and dynamic rock mass in areas of strong anthropogenic impact. *Geodynamics and stress state of the Earth's interior, Proceedings of a conference with the participation of foreign scientists, July 6-10, 2009, Novosibirsk, IM SB RAS.* Novosibirsk, 2010, pp 15-29. (in Russ.). [Oparin V.N., Leont'ev A.V. Kvazistatika i dinamika massiva gornyh porod v oblastjah sil'nogo tehnogennogo vozdejstvija // *Geodinamika i naprjazhennoe sostojanie nedr Zemli. Trudy konferencii s uchastiem inostrannyh uchenyh, 6-10 ijulja 2009.* Novosibirsk, IGD SO RAN. Novosibirsk, 2010. S. 15-29].
5. Khachai O.A. Geosinergetika: theory, technique, experiment. Comprehensive analysis of electromagnetic and other geophysical data. Chap. 8, ed. V.V. Spichak. M., KRASAND, 2011, 192 p. (in Russ.). [Hachaj O.A. Geosinergetika: teorija, metodika, jeksperiment // *Kompleksnyj analiz jelektromagnitnyh i drugih geofizicheskikh dannyh. Gl. 8 / pod red. V.V. Spichaka.* M.: KRASAND, 2011. 192 s.].
6. Khachai O.A., Khachai A.Y. The study of stress-strain state of hierarchical media, Third tectonophysical conference IPE: Conference Proceedings, 8-12 October. 2012, M., IPE RAS, 2012, p. 114-117. (in Russ.). [Hachaj O.A., Hachaj A.Ju. Izuchenie naprjazhenno-deformirovannogo sostojanija ierarhicheskikh sred //

- Tret'ja tektonofizicheskaja konferencija v IFZ RAN: materialy konferencii, 8–12 okt. 2012. M.: IFZ RAN, 2012. S. 114–117].
7. Khachai O.A., Khachai A.Y. Modeling of electromagnetic and seismic fields in inhomogeneous media hierarchically. Herald SUSU. Series "Computational Mathematics and Computer Science". 2013;(2)2:48-55. (in Russ.). [Hachaj O.A., Hachaj A.Ju. Modelirovanie jelektromagnitnogo i sejsmicheskogo polja v ierarhicheski neodnorodnyh sredah // Vestnik JuURGU. Ser. Vychislitel'naja matematika i informatika. 2013. T. 2, № 2. S. 48–55].
  8. Khachai O.A., Khachai O.Y., Klimko V.K. Shipeev O.V. Reflection synergistic properties of the state of the rock mass under the influence of man-made mine seismological data directory. Mining information-analytical bulletin. 2010;6:259-271. (in Russ.). [Hachaj O.A., Hachaj O.Ju., Klimko V.K., Shipeev O.V. Otrazhenie sinergeticheskikh svojstv sostojanija massiva gornyh porod pod tehnogennym vozdejstviem v dannyh shahtnogo sejsmologicheskogo kataloga // Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten'. 2010. № 6. S. 259–271].
  9. Chulichkov A.I. Mathematical models of nonlinear dynamics. M., Fizmatlit, 2003, 294 p. (in Russ.). [Chulichkov A.I. Matematicheskie modeli nelinejnoj dinamiki. M.: Fizmatlit, 2003. 294 s.].
  10. Hachay O.A., Khachay A.Yu., Khachay O.Yu. Construction of a State Evolution dynamical Model of a Rock Massive, which is in a regime of energetic Pumping. Geophysical Research abstracts. 2011;13:1528. EGU2011.
  11. Hachay O.A., Khachay A.Yu., Khachay O.Yu. Dynamical model for evolution of Rock Massive State as a Response on a Changing of Stress-Deformed State. Fractal analysis and Chaos in Geosciences, chapter 5. Edited by Sid-Ali Quadfeul. In Tech, Croatia, 2012, 174 p.
  12. Hachay O.A. Khachay O.Yu., Klimko V.K., Shipeev O.V. The reflection of synergetic Features in the Response of geological Medium on outer Force Actions. Advances in heterogeneous Material Mechanics, Shanghai, China. 2011, pp. 361-366.