

УДК 550.34.013.2

**М.М. Каган, Д.С. Чернобров**

**ПРОСТРАНСТВЕННАЯ КЛАСТЕРИЗАЦИЯ  
СЕЙСМОАКТИВНОСТИ В ПРИБОРТОВОЙ ЗОНЕ  
КАРЬЕРА (НА ПРИМЕРЕ РУДНИКА «ЖЕЛЕЗНЫЙ»  
КОВДОРСКОГО ГОКА)**

*Представлены результаты решения задачи классификации и идентификации природы сейсмических событий, наблюдаемых в прибортовой зоне карьера рудника «Железный» (Ковдор), с помощью иерархического кластерного анализа. Зарегистрированные в карьере «Железный» сейсмические события проанализированы с помощью иерархического кластерного анализа. Установлено, что выделенные кластеры сейсмических событий концентрируются в двух зонах карьера: в районе дна и в районе восточной части борта. Положение кластеров на восточном участке борта карьера, совпадает с существующей в этом районе зоной структурных нарушений. На основании моделирования механизмов очагов сейсмических событий в выделенных кластерах, можно сказать, что разрушения происходили в виде разрывов, ориентированных по падению. Данный материал представляет интерес для специалистов занимающихся геофизическим контролем состояния геологических сред при техногенных воздействиях и геомеханикой открытых и подземных горных работ.*

*Ключевые слова: сейсмичность, открытые горные работы, кластерный анализ, мониторинг, напряжения, деформации.*

---

**К** ластеризация сейсмических событий

Сейсмические события, регистрируемые системами микросейсмического мониторинга, представляются набором параметров в очаге, восстанавливаемых расчетным способом из сейсмограмм. К этим параметрам, в первую очередь, относятся время и пространственные координаты сейсмособытий, параметры, характеризующие упругие (излученная энергия) и неупругие деформации (сейсмический момент, величина сброса напряжения, размеры очага и направления плоскостей разрушения). Как правило, результаты регистрации сейсмической эмиссии интерпретируются на основе пространственно-временного анализа распределения параметров одиночных сейсмических явлений [1]. Выявление в рамках такого анализа групп по ряду выбранных признаков является основой для выявления действующих факторов, обуславливающих закономерности проявлений сейсмической эмиссии

в массиве пород, и, в конечном счете, позволяет использовать результаты сейсмического мониторинга для оценки состояния породного массива. Учитывая трехмерное распределение сейсмособытий в пространстве, и сложность сопоставления результатов представляется целесообразным использовать для выявления групп методы кластерного анализа. Кластерный анализ – это формальное разделение элементов некоторого множества на группы (кластеры) по принципу схожести [2].

Мера схожести определяет подобие двух объектов. Чем больше мера, тем более схожими являются объекты, а мера дистанции определяет несхожесть объектов.

Кластерный анализ проводился по схеме:

1. Выбор переменных.
2. Определение меры сходства между наблюдениями,
3. Выбор метода кластеризации,
4. Определение числа кластеров и проверка кластерного решения.

Мы провели кластерный анализ распределения сейсмических событий, зарегистрированных системой микросейсмического мониторинга карьера рудника «Железный» Ковдорского ГОКа в течение 2013 года.

#### **Кластерный анализ сейсмических событий рудника «Железный»**

Для анализа пространственного распределения сейсмических событий были применены методы иерархического кластерного анализа [2]. Кластерный анализ использовался в двух вариантах:

1 – по минимальному расстоянию — в пространственном распределении сейсмособытий выделялись структуры (кластеры), для которых расстояние между ближайшими событиями не превышало определённой пороговой величины, а число событий в кластере было не менее статистически значимой величины. Такая кластеризация позволяет выделить пространственные структуры, состоящие из сейсмических событий, произошедших в примерно одинаковых условиях в связи с их геометрической близостью

2 – по зонам подготовки — в пространственном распределении сейсмособытий выделялись кластеры, в состав которых входят сейсмические события, которые происходили в зоне подготовки ранее происшедших событий. Здесь под зоной подготовки понимается величина  $R = k \cdot L$ , где  $L$  – линейный размер очага,  $k = 3–5$ . Смысл такой кластеризации в выявлении областей, где

сейсмические события, с определённой долей вероятности могут происходить в рамках единого механизма разрушения массива [3].

По результатам кластерного анализа по минимальному расстоянию при пороговом расстоянии – 30 м, и минимальном числе событий в кластере – 10, выделено 11 кластеров. Их пространственное распределение и характеристики представлены на рис. 1 (**см. Приложение, с. 451**) и в табл. 1.

Из приведенных данных следует, что кластеры 0, 2, 3, 8 попадают в зону под дном карьера, кластеры 1, 4, 5, 6, 7, 9, 10 расположены в прибортовом массиве (рис. 1).

По результатам кластерного анализа по зонам подготовки выделено 4 кластера (рис. 2) (**см. Приложение, с. 452**). Среди выделенных кластеров 3 находятся в зоне под дном карьера, 1 – в прибортовом массиве.

*Сейсмоактивность в зоне под дном карьера.*

Массив под дном карьера является источником повышенной сейсмической активности. В этой зоне в течение 2013 года были зарегистрированы 14 сейсмических событий с энергией большей  $10^4$  Дж.

Как указывалось ранее, в данной зоне выделено 3 кластера событий (кластеры с номерами 0, 1, 2), в которых сейсмоактивность развивалась по взаимоувязанному пространственно-временному сценарию, что позволяет говорить о том, что сейсмоактивность в этом районе вызвана существенной перестройкой НДС массива.

*Сейсмоактивность на юго-восточном и восточном участках борта карьера.*

Проявления сейсмоактивности в восточном и юго-восточном участках борта карьера имеют значение для своевременного выявления деформационных процессов в массиве пород, приводящих, в конечном счете, к потере устойчивости борта карьера. Следует отметить, что этот район находится в центре зоны регистрации системы, что позволяет с относительно большой точностью определять координаты очагов сейсмических событий даже с малыми энергиями (единицы Джоулей). Кроме того, расположение сейсмических датчиков относительно очагов событий в этом районе позволяет производить оценку механизмов реализации событий [4].

Как указывалось выше, эти события локализируются в семи пространственных кластерах, общая информация о которых содержится в табл. 3. Анализ этих данных позволяет отметить следующее:

1. Все кластеры, за исключением кластера №5, расположены на Юго-Восточном борту карьера.

2. Положение кластеров на Юго-Восточном участке борта карьера, в целом, совпадает с выделяемой ранее в этом районе сейсмоактивной зоной.

3. Средняя энергия событий в этих кластерах не превышает 400 Дж, однако условия динамических проявлений таковы, что суммарная доля проросших в их результате трещин достигает 1200 м.

4. Очаги событий находятся на глубинах порядка 150 м, что указывает на то, что они обусловлены глубинными процессами в прибортовом массиве и непосредственного влияния на устойчивость борта на этом участке в настоящее время не оказывают.

5. Кластер № 5 – выделяет новую сейсмоактивную зону, ранее не отмечавшуюся по результатам работы системы. Следует отметить, что этот же кластер выделяется по результатам анализа зон подготовки (рис. 3, см. Приложение, с. 452), кластер № 3). Отсюда следует, что, в данном случае, имеет место вновь формируемая активная сейсмическая зона в нижней части борта. Несмотря на значительное заглубление этой зоны, можно предположить возможность её дальнейшего развития с выходом на свободную поверхность, что создаёт потенциальную опасность для устойчивости борта в этом районе.

Таким образом, можно констатировать, что уровень сейсмичности в указанном районе относительно невелик. Тем не менее, проявления сейсмичности свидетельствуют о наличии активных динамических процессов, формирующих напряженно-деформированное состояние массива пород на борту карьера.

#### **Механизмы очагов сейсмособытий в восточном и юго-восточном участках борта карьера**

Для оценки параметров механизмов очагов зарегистрированных сейсмических событий использовалась методика расчета механизмов очагов сейсмических событий, которая базируется на анализе знаков вступлений продольных волн, зарегистрированных сейсмическими датчиками, окружающими очаг.

Очаг восстанавливается на основе модели разрушения за счет сдвига под действием двойного диполя. При этом определяется положение в пространстве нодальных плоскостей, отделяющих область сжатия и растяжения, одна из которых является плоскостью разрыва сплошности в очаге. По положению нодальных плоскостей определяется направление осей сжатия и растяжения [5].

В рамках этой методики был проведен анализ механизмов очагов сейсмособытий в прибортовом массиве Восточного и Юго-Восточного участков борта карьера. С целью получения более

Таблица 3

**Параметры кластеров сейсмических событий, зарегистрированные в восточном и юго-восточном борту карьера в 2013 году**

№ кластера	1	4	5	6	7	9	10	Сумма
Число событий в кластере	27	11	25	12	29	11	13	128
X <sub>ц</sub>	-1337	-1334	-1127	-1362	-1409	-1266	-1314	
Y <sub>ц</sub>	-1977	-1636	-1892	-1748	-1875	-1797	-1919	
Z <sub>ц</sub>	18	101	-75	84	60	10	-10	
Длина по X	72	57	66	29	115	31	129	
Длина по Y	59	29	72	24	65	23	84	
Длина по Z	77	29	51	20	79	27	26	
Глубина, м	124	161	157	154	164	178	152	
Сумм. Момент	1.E+10	3.E+09	4.E+10	3.E+09	7.E+09	3.E+09	2.E+10	8.E+10
Сумма длина трещин, м	320	129	363	146	369	166	246	1739
Сумм. Энергия, Дж	2134	239	9005	400	573	43	12652	25046
Сред. Энергия событий, Дж	79	22	360	33	20	4	973	

представительных данных и получения лучшего пространственно-го разрешения, анализ проводился для отдельных пространственных кластеров сейсмических событий, выделенных в этом районе. Сводные результаты анализа представлены в графическом и табличном виде на рис. 3.

Как следует из приведенных результатов, ориентация осей напряжений в выделенных кластерах существенно варьируется. Особо сильно, в этом смысле, отличается кластер № 4, расположенный у верхней кромки карьерной выемки.

Тем не менее, в полученных данных можно выделить общее свойство: разрушение породного массива происходило в виде разрывов, ориентированных, в основном, по падению. К сожалению, применяемая методика реконструкции механизмов очагов не обеспечивает однозначной интерпретации разрывов (сброс или надвиг). Во всяком случае, очевидно, что в выявленных очагах динамические явлений в массиве практически отсутствовали разрушения сдвигового типа, т.е. разрывы со смещением по простиранию.

### **Выводы**

Зарегистрированные сейсмические события проанализированы с помощью иерархического кластерного анализа. Подтверждено, что выделенные кластеры сейсмических событий концентрируются в двух зонах карьера: в районе дна и в районе восточной части борта. Сейсмоактивность в зоне под дном карьера развивалась по взаимоувязанному пространственно-временному сценарию и свидетельствует о существенном изменении в напряженном состоянии массива по мере развития карьера. В этом районе зафиксированы самые мощные сейсмические события.

Положение кластеров на восточном участке борта карьера, совпадает с существующей в этом районе зоной структурных нарушений. На основании моделирования механизмов очагов сейсмических событий в выделенных кластерах, можно сказать, что разрушения происходили в виде разрывов, ориентированных по падению.

---

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. *Mendecki A.J.* Seismic monitoring in mines. — London: Chapman and Hall. 1997. — 280
2. *Мандель И.Д.* Кластерный анализ //М.: Финансы и статистика, 1988, — 176 с.
3. *Томилин Н.Г., Дамаскинская Е.Е., Павлов П.И.* Статистическая кинетика разрушения горных пород и прогноз сейсмических явлений. // ФТГ. 2005. Т. 47. № 5. С. 955–959.

4. Kozyrev A.A., Kagan M.M., Chernobrov D.S. Results related Pit wall Microseismic Monitoring («Zhelezny» mine, Kovdorsky GOK, JSC). Proceedings of 8<sup>th</sup> International Symposium on Rockbursts and Seismicity in mines. Perm. Mining Institute of RAS. 2013 – pp. 501–505.

5. Воронина Е.В. Механика очага землетрясения. // Москва: МГУ, 2004. – 92 с. **ИДБ**

#### **КОРОТКО ОБ АВТОРАХ**

---

Каган Михаил Моисеевич – научный сотрудник, mkagan@goi.kolasc.net.ru,  
Чернобров Дмитрий Сергеевич – инженер, dchernobrov@goi.kolasc.net.ru,  
Горный институт КНЦ РАН,



---

UDC 550.34.013.2

#### **SPATIAL CLUSTERING OF SEISMIC ACTIVITY IN OPEN-PIT BOUNDARY ZONE (CASE STUDY OF THE ZHELEZNY MINE, KOVDOR)**

Kagan M.M., Researcher, Mining Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, mkagan@goi.kolasc.net.ru, Russia.

Chernobrov D.S., Engineer, Mining Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, dchernobrov@goi.kolasc.net.ru, Russia.

---

*The article presents the results of solving a problem of classification and identification of origin of local seismic events observed in open-pit boundary area of the Zhelezny mine (Kovdor) by using a method of hierarchical cluster analysis. Seismic events registered in the Zhelezny mine have been analyzed by hierarchical cluster analysis. It has been confirmed that the clusters of the seismic events are concentrated in two zones of the open-pit: in the bottom area and in the eastern part. The clusters' location at the eastern part coincides with an existing zone of structural disturbances. Based on modeling the focal mechanisms of the seismic events in the selected clusters we can say that disturbances occurred in the form of faults oriented to the dip. The information given is of interest for the specialists dealing with geophysical control for geological media state under man-made impacts and geomechanics of open and underground mining operations.*

*Key words: seismicity, open-pit mining, cluster analysis, monitoring, stresses, deformations*

#### **REFERENCES**

1. Mendecki A J. *Seismic monitoring in mines* (Seismic monitoring in mines). London: Chapman and Hall. 1997. 280 p.
2. Mandel' I.D. *Klasternyj analiz* (Cluster analysis) // Moscow: Finansy i statistika, 1988, 176 p.
3. Tomilin N.G., Damaskinskaja E.E., Pavlov P.I. *Statisticheskaja kinetika razrushenija gornyh porod i prognoz sejsmicheskikh javlenij* (Statistical kinetics of fracture of rocks and prediction of seismic phenomena) // FTT. 2005. V. 47. No 5. pp. 955–959.
4. Kozyrev A.A., Kagan M.M., Chernobrov D.S. *Results related Pit wall Microseismic Monitoring («Zhelezny» mine, Kovdorsky GOK, JSC)* (Chernobrov Results related Pit wall Microseismic Monitoring («Zhelezny» mine, Kovdorsky GOK, JSC)) // Proceedings of 8th International Symposium on Rockbursts and Seismicity in mines. Perm. Mining Institute of RAS. 2013. pp. 501–505.
5. Voronina E.V. *Mehanika ochaga zemletrjasenija* (Mechanics of the earthquake source). // Moscow: MGU, 2004. 92 p.