

УДК 550.34

Журавлева Ольга Геннадьевна
кандидат технических наук,
научный сотрудник,
Горный институт КНЦ РАН
184209 г. Апатиты, Мурманская обл.,
ул. Ферсмана, 24
e-mail: ZhuravlevaOG@goi.kolasc.net.ru

**КЛАСТЕРИЗАЦИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ
СОБЫТИЙ В УСЛОВИЯХ
УДАРООПАСНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ
ХИБИНСКОГО МАССИВА***

Аннотация:

Рассматривается применение кластерного анализа сейсмической активности в высоконапряженных массивах горных пород при ведении горных работ. Кластерный анализ позволяет выделить группы сейсмических событий и оценить их взаимосвязь с горно-геологическими факторами.

Ключевые слова: сейсмическая активность, кластерный анализ

DOI: 10.18454/2313-1586.2017.01.014

Zhuravleva Olga G.
candidate of technical sciences,
researcher,
The Mining Institute KSC RAS,
184209 Apatite, 24 Fersman st.,
e-mail: ZhuravlevaOG@goi.kolasc.net.ru

**SEISMIC EVENTS CLUSTERING
IN THE CONDITIONS OF ROCKBURST
ORE DEPOSITS OF THE Khibinsky
Rock Mass Region**

Abstract:

The paper deals with application of cluster analysis method of seismic activity in highly stressed rock masses during mining operations. The cluster analysis allows selecting seismic events groups and analyzing interrelation between seismic events groups and mining and geological factors.

Key words: seismic activity, cluster analysis.

Постоянное техногенное воздействие на массив горных пород приводит к изменению в структуре массива и к росту уровня сейсмической активности в пределах отрабатываемых месторождений. Сейсмическая активность массива горных пород зависит от его напряженно-деформированного состояния, которое определяет степень изменения в зависимости от влияния геомеханических и геодинамических процессов, происходящих в нем [1].

Каждое сейсмическое событие вносит свой вклад в изменение конфигурации поля напряжений, т. е. оно является следствием действия предыдущих сейсмических событий или, в случае техногенной сейсмичности, следствием действия взрыва. Поэтому очаг сильного сейсмического события можно рассматривать как суммарный итог развития процесса разрушения в некоторой окрестности этого очага. В свою очередь, сильное сейсмическое событие оказывает существенное влияние на последующую сейсмическую активность региона. В результате чего, например, могут проявиться множественные афтершоки. Также могут быть спровоцированы другие крупные события [2].

Наличие геодинамически активных структур в пределах отрабатываемого месторождения приводит к рискам возникновения горных ударов регионального и локального происхождения – геодинамическим рискам, которые, в свою очередь, подразделяются на риски возникновения сейсмической опасности и удароопасности. Зоны сопряжения геодинамически активных структур представляют собой наиболее опасные участки недр, характеризующиеся самыми высокими рисками развития опасных геодинамических процессов и явлений.

Если разрабатываемые месторождения расположены в районах с достаточно густой сетью сейсмических станций, то для оценки геодинамического риска могут быть

* Исследования выполнены в рамках гранта по приоритетному направлению деятельности РФФИ «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований отдельными научными группами» № 14-17-00751

привлечены данные сейсмологических наблюдений. При этом в качестве критериев для выделения границ блоковых структур может использоваться уровень сейсмической активности, характеризующий сейсмический режим данного района, а также его флуктуацию во времени и пространстве.

Объект исследований

Кировский рудник АО «Апатит» (Кр) ведет обработку Кукисвумчоррского и Юкспорского апатит-нефелиновых месторождений подземным способом. Эксплуатируемые месторождения представляют собой пластолинзообразную залежь и образуют единое рудное тело, имеющее северо-западное простирание, падение на северо-восток с углами падения от 15° до 50° . Разделителем рудного тела на два месторождения является Саамский разлом – разрывное нарушение, мощность зоны которого на разных участках колеблется в пределах от 1 до 136 м (в пределах рудника в среднем 10 – 40 м). В отработке находятся горизонты +410 м, +320 м, +250 м, +170 м и +90 м.

В целях обеспечения безопасности горных работ оценка уровня сейсмической активности на действующих и строящихся горизонтах является актуальной задачей. На Кировском руднике до 2008 г. велись сейсмологические наблюдения на Кукисвумчоррском и Юкспорском месторождениях двумя автоматизированными системами контроля состояния массива (АСКСМ-К и АСКСМ-Ю, соответственно). Начиная с 2008 г. регистрация сейсмических событий обеспечивается единой системой АСКСМ-Кр, зона уверенной регистрации которой охватывает Кукисвумчоррское и Юкспорское месторождения, а также Саамский разлом. Обеспечивается регистрация событий с энергией от 10^4 Дж.

Максимальное качество регистрации обеспечивается в районах повышенной точности, в которых регистрируются события в энергетическом диапазоне 10^3 – 10^9 Дж. Погрешность определения координат гипоцентра в районах повышенной точности не более 25 м.

С января 2013 г. группой геофизического мониторинга Службы прогноза и предупреждения горных ударов АО "Апатит" применяется новая система обработки данных сейсмических наблюдений. Если раньше базы данных сейсмических событий содержали информацию о дате, времени, координатах события и его энергии, то сейчас наряду с этими параметрами определяются сейсмический момент, механизм очага события и др.

Методика исследований

Многолетними исследованиями установлено, что сейсмические события на рудниках проявляются неравномерно, и зачастую представляют собой скопления близкорасположенных событий, которые могут рассматриваться как кластеры. Так, например, изучение сейсмического режима Кукисвумчоррского месторождения за длительный период наблюдений (2008 – 2016 гг.) показало, что кластеры сейсмических событий приурочены к местам активного ведения горных работ, к разрывным нарушениям, к формирующимся разрывным нарушениям в консоли пород всяческого бока, а также могут образовываться под влиянием других факторов, как природных, так и техногенных [1, 3].

Важной задачей является не только определение числа кластеров сейсмособытий, но и возможность дальнейшего изучения каждого кластера.

В общем случае кластерный анализ предназначен для объединения некоторых объектов в группы таким образом, чтобы в один класс попадали максимально схожие объекты, а объекты различных классов максимально отличались друг от друга. Количественный показатель сходства рассчитывается в зависимости от данных, характеризующих объекты.

Кластерный анализ зарегистрированных сейсмических событий позволяет разрабатывать классификации этих событий; проводить исследования схем группирования сейсмособытий; формулировать гипотезы возникновения сейсмических событий и осуществлять оценку выдвинутых гипотез.

Существуют различные методы кластерного анализа групп данных. Их разнообразие объясняется как разными вычислительными методами, так и различными концепциями, лежащими в основе кластеризации. Основным критерием выбора того или иного метода кластеризации является практическая полезность результата.

Большой объем данных сейсмических наблюдений с одной стороны и предварительное представление относительно числа кластеров сейсмособытий с другой стороны обуславливают выбор метода кластерного анализа *k-средних* [4]. В общем случае с помощью данного метода строится ровно *k* различных кластеров, расположенных на возможно больших расстояниях друг от друга. Таким образом, целью является разбиение сейсмических событий на группы, характеризующиеся одинаковой или схожей причиной возникновения, которая впоследствии изучается более детально при выполнении многоэтапного анализа.

Результаты исследований

Кластерный анализ сейсмических событий проведен для событий с энергией от 10^3 Дж, зарегистрированных на Кукисвумчоррском крыле Кр в районе повышенной точности АСКСМ-Кр в течение 2015 – 2016 гг. (рис. 1).

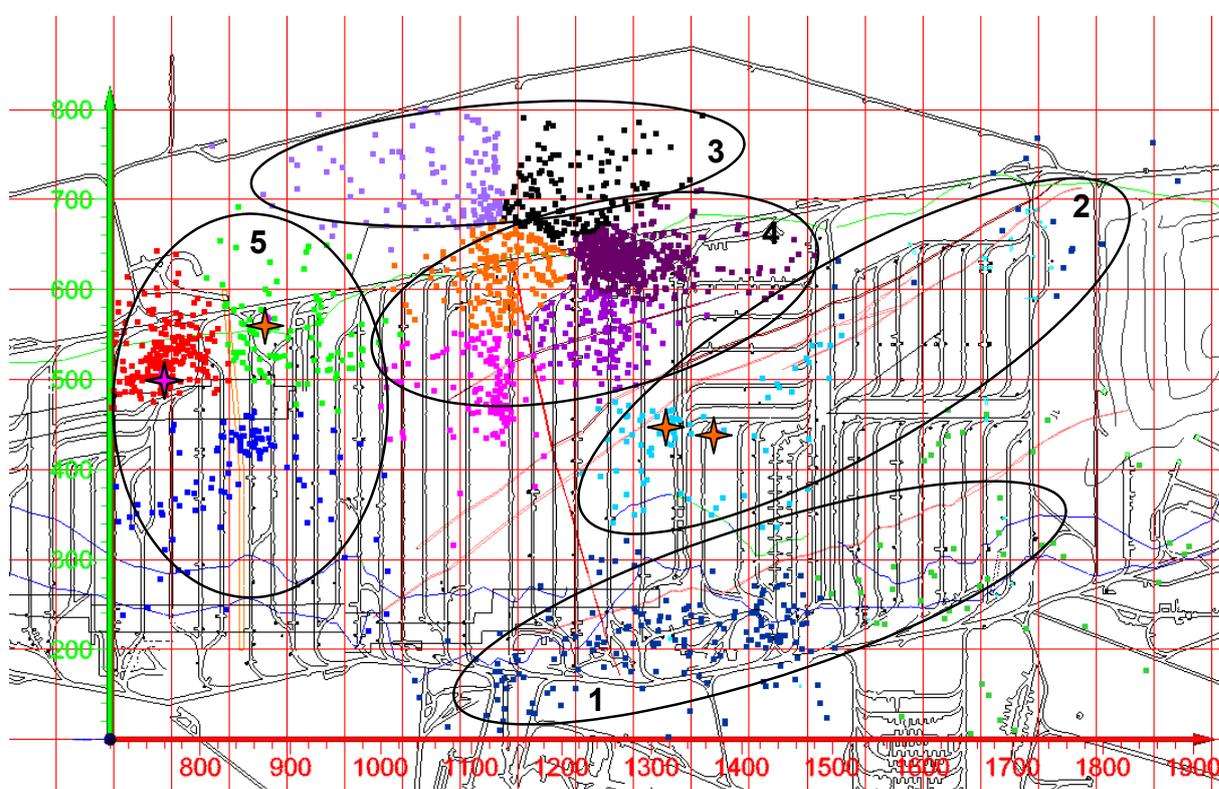


Рис. 1 – Кластеризация сейсмических событий Кукисвумчоррского месторождения, совмещенная с планом горизонта +250 м

Всего в районе повышенной точности Кукисвумчоррского крыла Кр выделено 15 кластеров сейсмических событий.

Два кластера – это кластеры, объединяющие сейсмические события, нехарактерные для района наблюдений на протяжении рассматриваемого периода времени, а именно наиболее сильные сейсмические события, т. е. выбросы сейсмической энергии. В кластере из трех событий объединены события с энергией порядка 10^7 Дж. В кластере из одного события – событие с энергией порядка 10^8 Дж, зарегистрированное 27.01.2016.

В районе лежачего бока месторождения выделены два кластера событий № 1 (рис. 1) с энергией порядка 10^3 - 10^6 Дж (с энергией порядка 10^6 Дж зарегистрировано одно событие). В целом уровень сейсмоактивности в этих кластерах низкий.

В районе окисленной зоны выделены два кластера событий № 2 (рис. 1) с энергией порядка 10^3 - 10^6 Дж (с энергией порядка 10^6 Дж зарегистрировано одно событие). Необходимо отметить, что два сильных события с энергией порядка 10^7 Дж, выделенные в отдельный кластер, зарегистрированы также в районе окисленной зоны.

Два кластера № 3 (см. рис. 1) приурочены к висячему боку месторождения и разделены разломом. Зарегистрированы события с энергией порядка 10^3 - 10^7 Дж.

Четыре кластера № 4 (см. рис. 1) образуют плотную группу событий в районе ведения горных работ. В двух кластерах не зарегистрированы сильные сейсмические события (максимум энергии $5,2 \cdot 10^5$ Дж и $3,1 \cdot 10^4$ Дж). Местоположение событий этих кластеров – на пересечении двух разломов. Другие два кластера расположены ближе к висячему боку месторождения. Энергия событий также не очень высока, однако зарегистрированы сильные события (максимум энергии $1,3 \cdot 10^6$ Дж и $3,9 \cdot 10^6$ Дж).

Три кластера сейсмических событий № 5 (рис. 1) выделены в блоке 7/10. Рассмотрим более детально сейсмоактивность данного блока (рис. 2).

Важным результатом кластеризации сейсмических событий является местоположение двух кластеров по разные стороны от разлома (на рис. 1 - кластеры красного и зеленого цвета). Благодаря этому выделена группа событий, которые можно считать областью подготовки сильного сейсмического события с энергией порядка 10^8 Дж, зарегистрированного 27.01.2016.

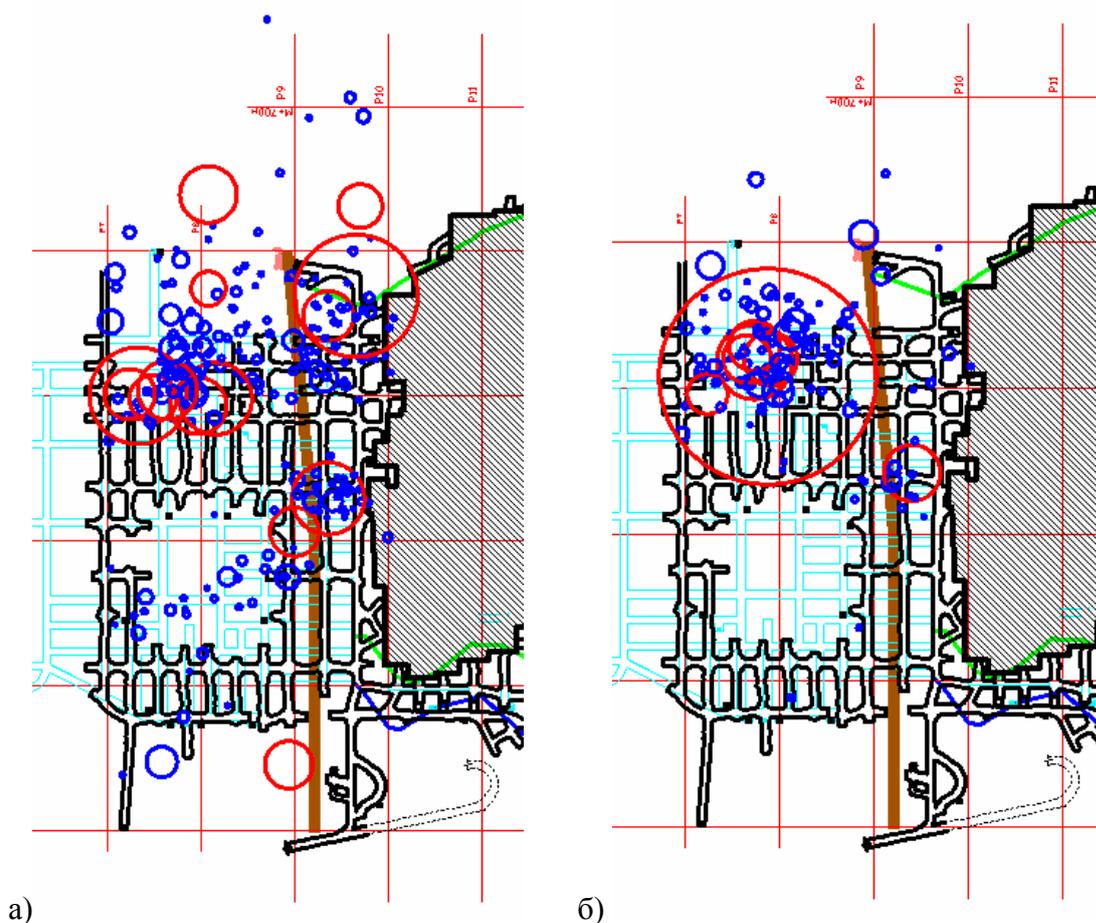


Рис. 2 – Сейсмоактивность блока 7/10: а) – 2015 г., б) – 2016 г.

○ $E > 10^6$ Дж

○ $E = 10^3 - 10^6$ Дж

В блоке 7/10 на горизонте +170 м 27.01.2016 был зафиксирован рост сейсмической активности, который сопровождался динамическими проявлениями горного давления в выработках. Отмечались стреляние, звонкие хлопки, толчки. Событие квалифицировано как микроудар, причиной которого является действие высоких тектонических напряжений в массиве, наличие зоны опорного давления от очистных работ горизонта +262 м и влияние консоли вышележащих покрывающих пород.

На гор. +236 м, где произошел микроудар, в последние несколько месяцев активно велись работы по проходке выработок непосредственно в зоне опорного давления. В выработках наблюдались проявления горного давления в динамической форме (интенсивное заколообразование, стреляние).

Выделенный кластер сейсмических событий отражает подготовку мощного сейсмособытия с энергией $1,6 \cdot 10^8$ Дж (27.01.2016), после которого зарегистрирована серия афтершоков (21 сейсмическое событие, причем в первые 5 минут – 11 сейсмособытий).

Формирование очага события происходило в стороне от разлома, центр очага – в районе разреза Р8. Активизация сейсмичности отмечена в начале ноября. Рост сейсмоактивности продолжался до момента возникновения сильнейшего события в данном блоке. После серии афтершоков сейсмоактивность блока значительно снизилась, однако требуется дальнейшее ее изучение. Отметим, что в зоне подготовки события постоянно производились технологические взрывы при проходке выработок (рис. 3). Из данных, представленных на рис. 4, видно, что в день проводилось не более четырех технологических взрывов. В некоторые дни взрывы не проводились. Периоды активизации сейсмоактивности блока 7/10 сменялись периодами спада.

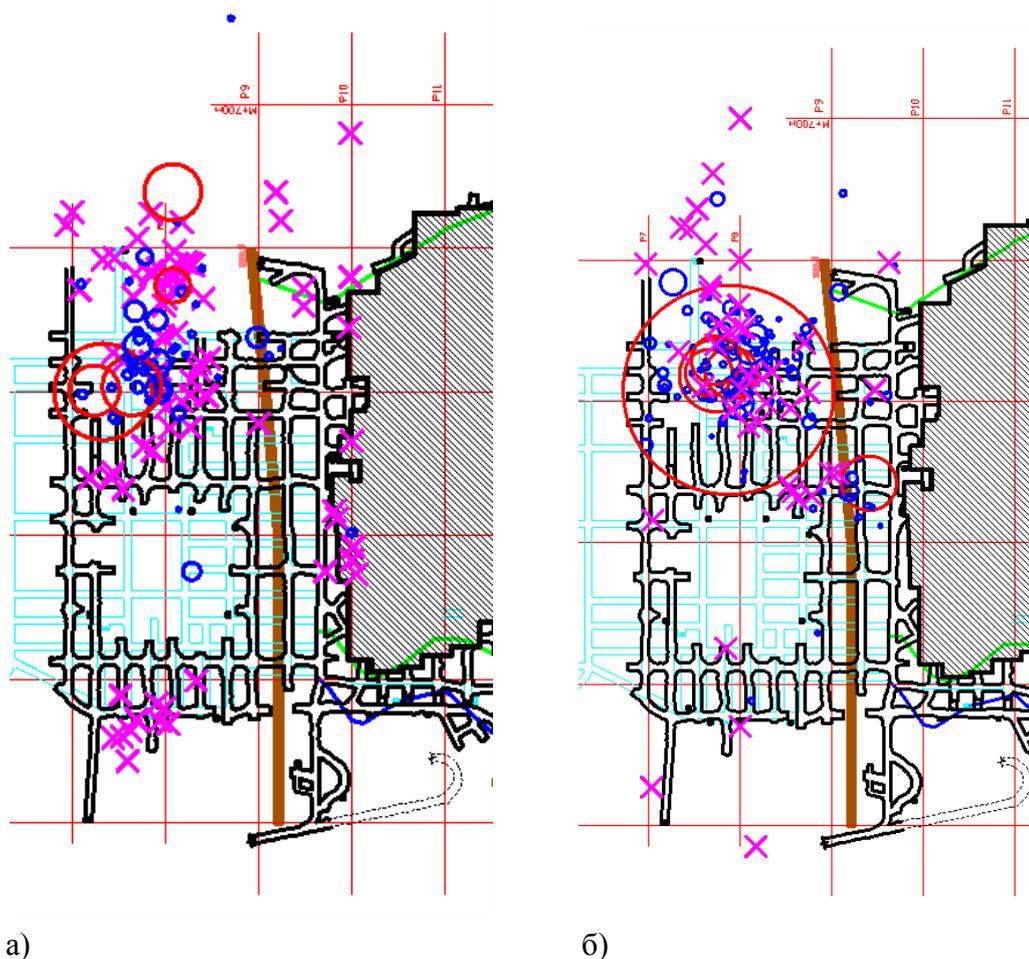


Рис. 3 – Сейсмоактивность блока 7/10 и проходка выработок:
а) – ноябрь – декабрь 2015 г.; б) – январь 2016 г.

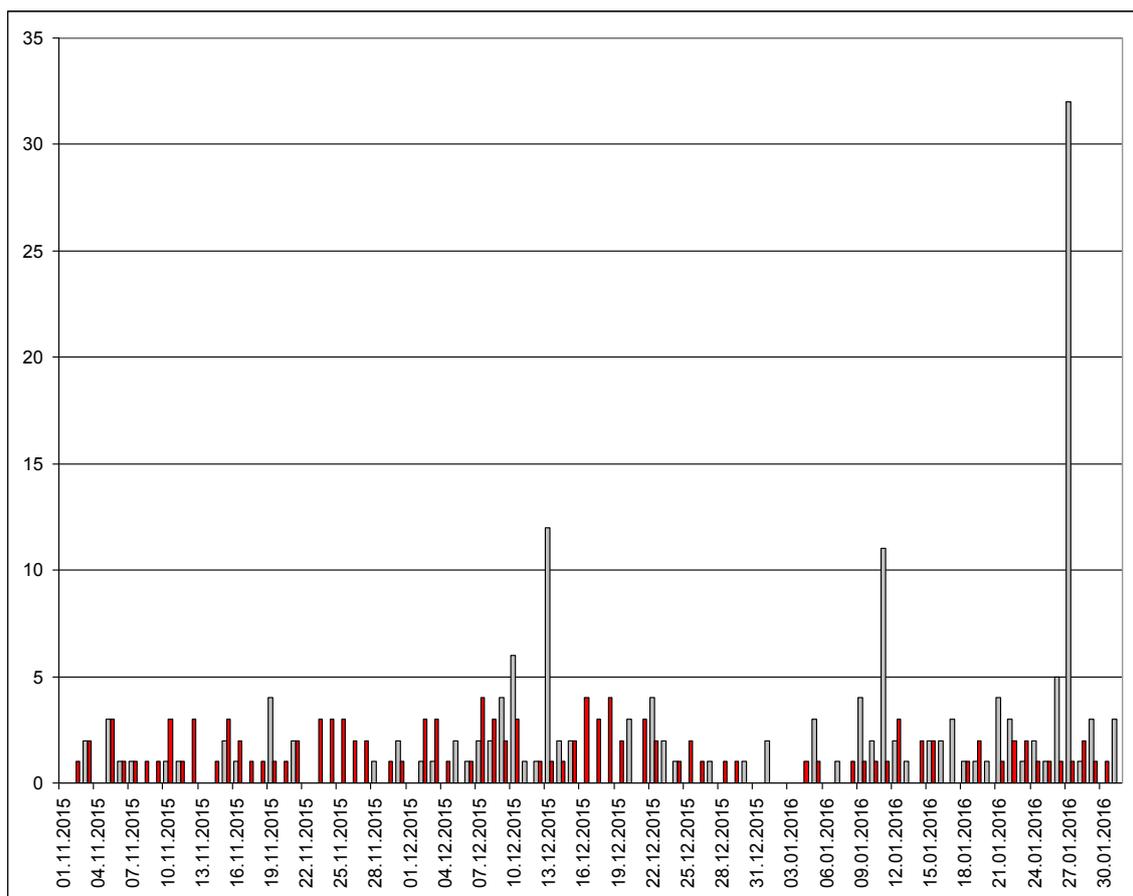


Рис. 4 – Ежедневное распределение числа сейсмических событий и технологических взрывов при проходке выработок (красный цвет – взрывы, серый – сейсмособытия)

Выводы

Проведенными исследованиями установлено, что места пространственного распределения зарегистрированных сейсмических событий связаны с зонами активного ведения горных работ и приурочены как к имеющимся разрывным нарушениям (в массиве), так и к формирующимся разрывным нарушениям (в консоли пород висячего бока). Зачастую после проведения взрывных работ наблюдается спад сейсмоактивности. Однако технологические взрывы могут быть и триггерами реализующихся после них сильных сейсмических событий. Поэтому при проектировании и ведении горных работ необходимо учитывать специфику отклика массива на сейсмическое воздействие, оказываемое взрывными работами.

Проведение кластерного анализа позволяет более детально исследовать структуру множества сейсмических событий, разбив их на группы схожих событий. Благодаря этому в некоторой степени упрощается обработка данных и принятие решений, поскольку исследуется каждый кластер или группа кластеров по отдельности. Также с помощью кластерного анализа можно выделить нетипичные сейсмические события, которые не подходят ни к одному из кластеров.

Таким образом, для обеспечения безопасности и эффективности ведения горных работ необходимо осуществлять анализ уровня сейсмической активности массива и его изменений (в режиме реального времени), а также оценку степени влияния различных возмущающих техногенных и природных факторов.

Литература

1. Козырев А.А. О кластеризации сейсмических событий при отработке удароопасных месторождений Хибинского массива / А.А. Козырев, О.Г. Журавлева, Ю.В. Федотова // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук* / ИГД СО РАН им. Н.А.Чинакала. – 2015. - № 2. - С.108 - 113.
2. Виноградов С.Д. Экспериментальное изучение сейсмического режима / С.Д. Виноградов, В.С. Пономарев // *Природа*. - № 3. – 1999. - С. 77 - 89.
3. Козырев А.А. Методические положения и некоторые результаты прогноза тектонических землетрясений на рудниках Кольского полуострова / А.А. Козырев, Ю.В. Федотова, О.Г. Журавлева // *Геодинамика и напряженное состояние недр Земли: сб. науч. тр.* — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2008. — С. 502 – 506.
4. Мандель И.Д. Кластерный анализ / И.Д. Мандель. - М.: Финансы и статистика, 1988.