

УДК 622.83 : 550.3

С.А. Козырев, Е.А. Усачев

## Проявление техногенной сейсмичности при производстве массовых взрывов на подземных рудниках ОАО "Апатит"

S.A. Kozyrev, E.A. Usachev

### Occurrence of mining-induced seismicity during bulk blasts at the underground mines, "Apatit" JSC

**Аннотация.** Приведены результаты исследований по выявлению реакции массива горных пород на динамические воздействия при ведении горных работ на подземных рудниках. Выполнена оценка влияния массовых взрывов на общее проявление сейсмичности, а также за трое суток до и после производства массовых взрывов. Установлены некоторые пространственно-временные закономерности проявления очагов сейсмических событий, инициированных взрывом в окрестности взрыва и границ очистного пространства. Определены стадии потери устойчивости массива в зависимости от внешнего воздействия, что позволяет повысить надежность районирования сейсмоопасных участков шахтного поля и создает реальные предпосылки для улучшения временной локализации периодов повышенного риска.

**Abstract.** The research results on identifying the rock mass reaction on dynamic impacts during mining operations at underground mines have been presented. Impact of bulk blasts has been assessed on the general occurrence of seismicity and its occurrence in 3 day period before and after bulk blasts. Several space-time regularities for occurrence of seismic events sources have been stated, they were triggered by a blast in the vicinity of blast and boundaries of stoping face. The stages of rock mass instability depending on external impacts have been determined. This allows increasing reliability of zoning seismic hazardous sectors of a mine field and creates feasible prerequisites for improving temporal location of increased risk periods.

**Ключевые слова:** подземные рудники, техногенная сейсмичность, массовые взрывы

**Key words:** underground mines, mining-induced seismicity, bulk blasts

#### 1. Введение

В последние годы проблема техногенной сейсмичности в рудниках и шахтах приобрела особую актуальность в мире и в частности в нашей стране. Интенсивная добыча полезных ископаемых на подземных рудниках и постоянное воздействие мощных технологических взрывов сопровождается сейсмическими явлениями с катастрофическими последствиями. Реакция горных пород на техногенные воздействия зависит не только от интенсивности и вида воздействия, но и от характера естественного деформационного процесса, энергонасыщенности структур коры, распределения и величины напряженного состояния, которая отражается как в динамических проявлениях горного давления (горные и горно-тектонические удары, техногенные землетрясения), так и в деформировании массива пород (крип по структурным нарушениям и дезинтеграция массива, обусловленная релаксацией напряжений) (Адушкин, 2001). Практика отработки глубоких горизонтов апатитовых рудников свидетельствует о том, что основная доля динамических проявлений приходится на участки с тектоническими нарушениями.

Массовые взрывы, осуществляемые на Хибинских рудниках для отбойки руды, существенно влияют на активизацию сейсмичности массива пород. Непосредственно после массового взрыва количество сейсмических событий возрастает в 10-50 раз по сравнению с фоновым значением. Многие мощные сейсмические события, в том числе тектонические горные удары и техногенные землетрясения, происходят в момент проведения взрыва или непосредственно после него. Массовый взрыв, являясь мощным энергетическим воздействием на окружающий массив пород, с одной стороны, может привести к подготовке опасного сейсмического события, а с другой – явиться спусковым механизмом уже подготовленного ранее сейсмического события. Поэтому, вероятно, управляя параметрами массовых взрывов, можно управлять процессами подготовки и реализации сейсмических событий большой энергии. Для этого, в качестве первого шага, необходимо изучить закономерности изменения параметров сейсмичности массива пород после проведения массовых взрывов на руднике. Анализ проводился по данным Кукисвумчоррской подсистемы автоматизированного контроля сейсмичности.

## 2. Влияние массовых взрывов на общее проявление сейсмичности

В настоящее время на подземных рудниках ОАО "Апатит" применяют в основном две системы разработки – система этажного принудительного обрушения с отбойкой руды массовыми взрывами с порядным короткозамедленным взрыванием вееров скважин и система разработки подэтажного обрушения с торцевым выпуском руды и отбойкой руды веерами глубоких скважин. Массовые взрывы производятся в основном на Объединенном Кировском руднике (ОКР), которыми отбивается 3 500-4 000 т руды или около 40 % от общей добычи. В среднем за год производится 18 массовых взрывов (в 2007 г. – 18, в 2008 г. – 16, в 2009 г. – 19, 2010 г. – 20, 2011 г. – 15, 2012-2013 гг. – по 17 массовых взрывов). На Юкспорском крыле масса ВВ на взрыв изменяется от 50 т до 300 т, а на Кировском крыле от 40 до 110 т ВВ. Уменьшение объемов отбойки на Кировском крыле связано с ограничением по сейсмическому воздействию на здания и сооружения промплощадки и жилые здания поселка Кукисвумчорр. Остальная добыча производится системой подэтажного обрушения с торцевым выпуском руды. В среднем на один технологический взрыв приходится 1 200 кг ВВ, которым отбивается 2 500 т руды. Общее количество технологических взрывов составляет около 2 000 в год или 5-6 взрывов в сутки. Кроме массовых и технологических взрывов на рудниках проводятся горные выработки с помощью буровзрывных работ. В среднем количество взрывов при проведении горных выработок составляет 5 750 взрывов в год или 16 взрывов в сутки. Таким образом массив горных пород постоянно подвергается динамическим воздействиям от взрывных работ.

Реакция массива горных пород на динамические воздействия проявляется по-разному на различных участках массива. Более детально эта реакция рассмотрена на примере Кировского крыла ОКР в период с 2009 по 2012 гг.

Динамика проявления общей техногенной сейсмичности и местоположение сейсмических событий с энергией более  $10^5$  Дж за этот период в пределах шахтного поля Кировского крыла ОКР представлены на рис. 1а, б.

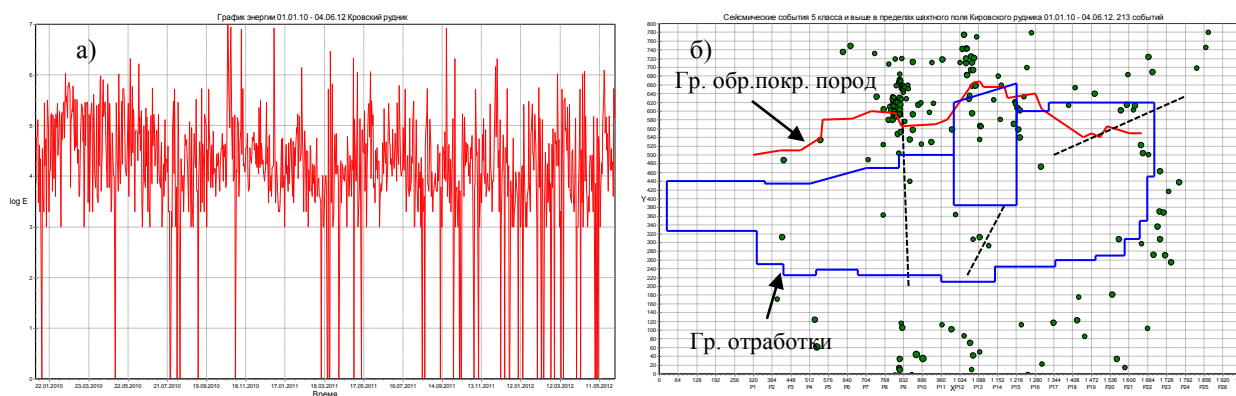


Рис. 1. Динамика проявления общей техногенной сейсмичности (а) и местоположение сейсмических событий с энергией более  $10^5$  Дж (б) в период с 2009 по 2012 гг. в пределах шахтного поля Кировского крыла Объединенного Кировского рудника

Сейсмическая обстановка на Кировском крыле ОКР характеризуется довольно неравномерным выделением энергии из массива горных пород за период наблюдений с нарастанием и спадами проявления сейсмичности. В границах шахтного поля выделяются несколько областей концентрации очагов сейсмических событий, которые в основном приурочены к разломным зонам и границам очистных работ.

На рис. 2 приведены кумулятивные графики затраченной энергии взрывчатых веществ и выделившейся энергии из массива в виде сейсмических событий. Из рис. 2 следует, что, несмотря на равномерное количество затраченной энергии взрывчатых веществ при производстве взрывных работ, количество выделившейся энергии носит скачкообразный характер и подтверждает гипотезу о том, что массовый взрыв, являясь мощным энергетическим воздействием на окружающий массив пород, с одной стороны, может привести к подготовке опасного сейсмического события, а с другой – явиться спусковым механизмом уже подготовленного ранее сейсмического очага.

Для более детального анализа была рассмотрена сейсмичность после производства всех массовых взрывов в 2009-2012 гг. (рис. 3).

Из представленных данных также видно, что вплоть до октября 2010 г. имело место равномерное выделение энергии из массива, несмотря на регулярное проведение массовых взрывов.

После техногенного землетрясения и в течение всего 2011 г. происходило скачкообразное выделение энергии, т.е. активная перестройка всей системы, и массив находился в неустойчивом состоянии. Проведение взрывов в этот период способствовало выделению дополнительной энергии. В 2012 г. процесс стабилизировался, и массив перешел опять в метастабильное состояние.

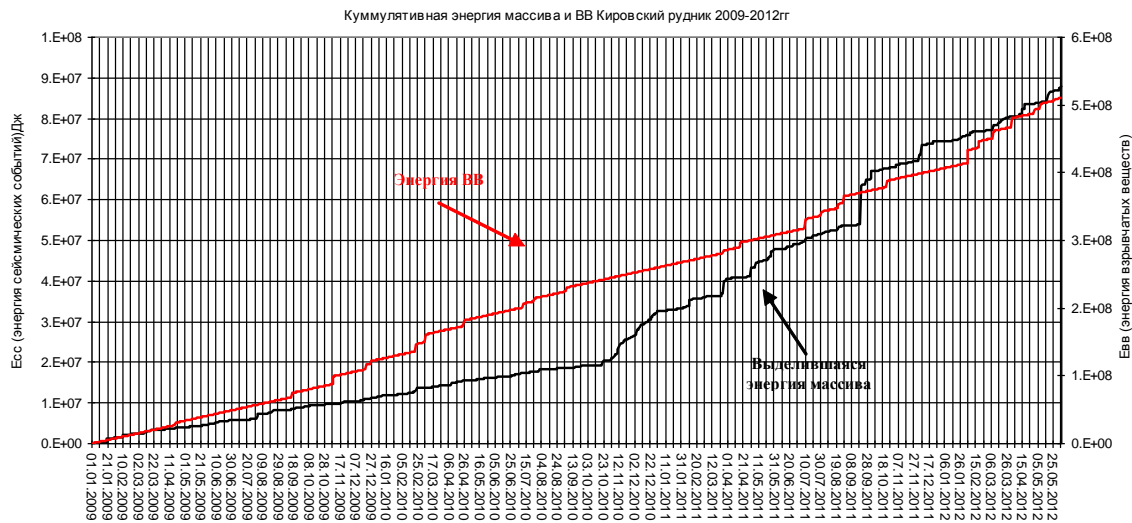


Рис. 2. Кумулятивные кривые высвобожденной из массива упругой энергии и затраченной энергии взрывчатых веществ

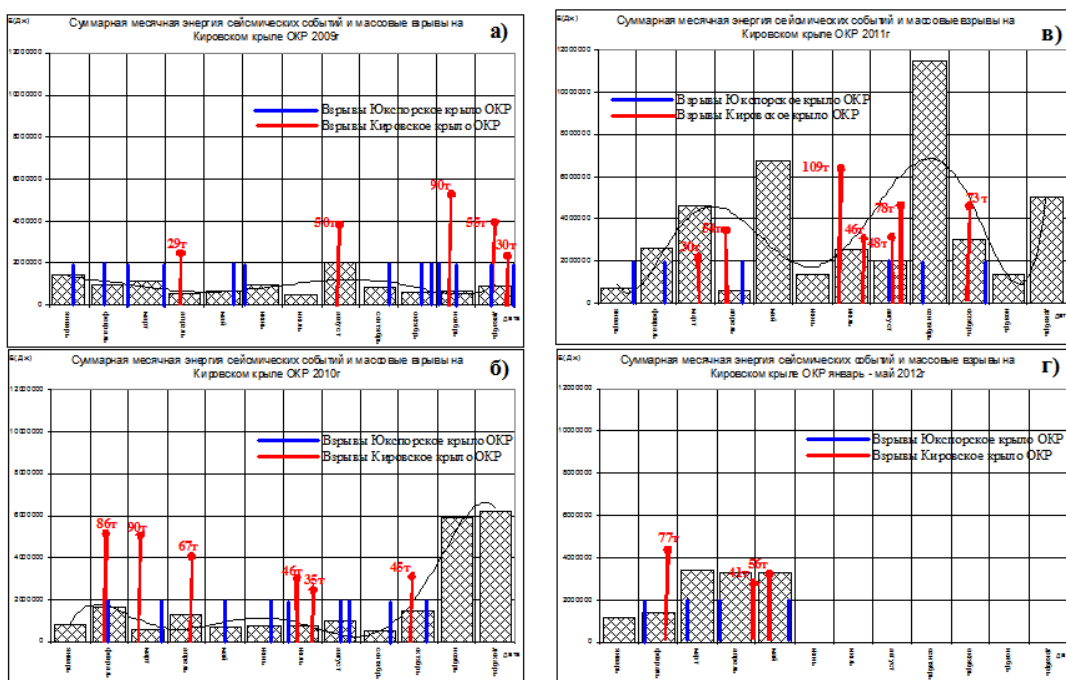


Рис. 3. Проявление сейсмичности по годам в период производства массовых взрывов: а, б, в, г – соответственно в 2009, 2010, 2011 и 2012 гг.

### 3. Проявление сейсмичности при производстве массовых взрывов

Целью данного этапа исследований являлась оценка проявления сейсмичности при производстве массовых взрывов в сравнении с предшествующим состоянием. Для этих целей рассматривалась сейсмичность за трое суток до взрыва и трое суток после взрыва, а также очередности проявления сейсмических событий. Оценка производилась для нескольких взрывов 2011 г., когда массив находился в неустойчивом состоянии.

Наибольшая сейсмичность приурочена к началу разлома по 9-10 разрезу и к зоне обрушения покрывающих пород по разрезам 15-17 (рис. 4). Динамика сейсмической активности за этот период представлена в правой части рисунка.

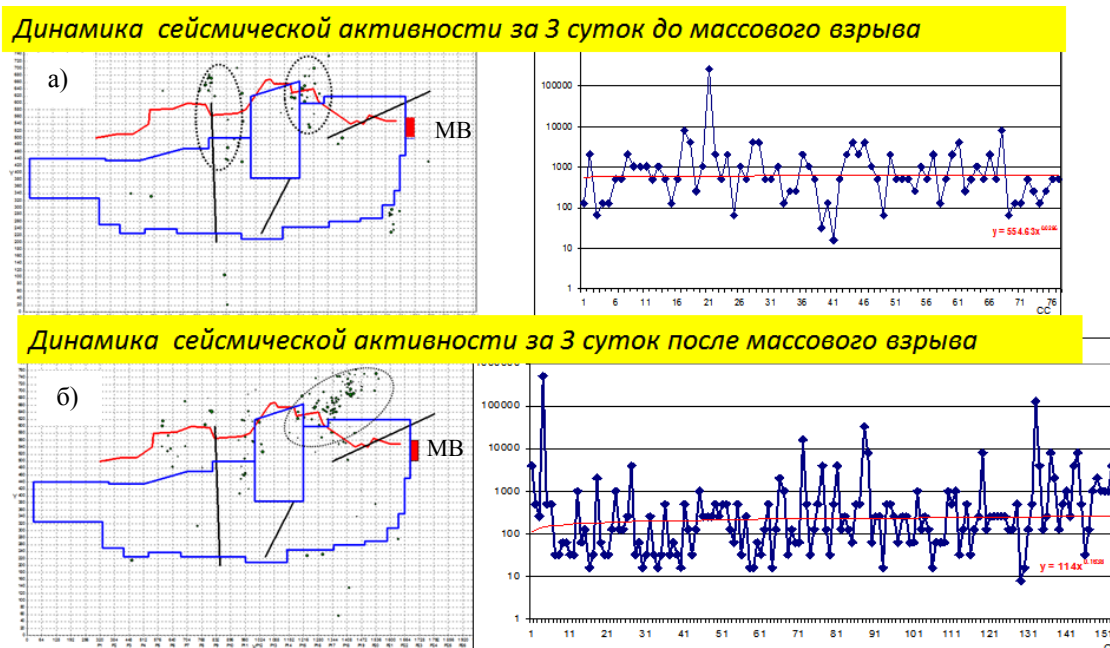


Рис. 4. Сейсмические события и динамика сейсмической активности в пределах шахтного поля за 3 суток до (а) и после (б) производства массового взрыва 10.07.2011 г. (МВ – место проведения массового взрыва)

Среднее значение выделившейся энергии близко к 1 000 Дж. Всего произошло 78 событий.

После проведения массового взрыва (рис. 4б) количество сейсмических событий несколько увеличилось в зоне обрушения покрывающих пород по разрезам 15-20, в то время как в пределах разрезов 7-10 сейсмичность осталась на том же уровне.

Несмотря на увеличение общего количества сейсмических событий до 167, среднее значение выделившейся энергии уменьшилось и составило около 250 Дж (рис. 4б).

Таким образом, взрыв, проведенный 10.07.2011 г. с массой взрываемого ВВ 110 т, вызвал увеличение сейсмической активности в первые сутки после проведения, но общая средняя энергия сейсмических событий понизилась в 3.5 раза.

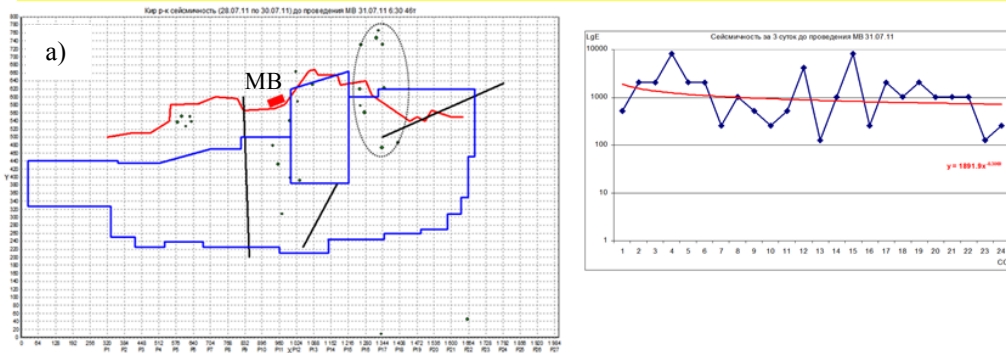
Взрыв 31.07.2011 г. был произведен в наиболее напряженном участке массива (рис. 5).

Сейсмичность приурочена к зоне обрушения покрывающих пород по разрезам 15-18 и границе отбойки 14 горного участка. Динамика сейсмической активности за этот период представлена в правой части рисунка. Среднее значение выделившейся энергии близко к 1 000 Дж. Всего произошло 24 события.

После производства массового взрыва наблюдается резкое изменение сейсмической обстановки (рис. 5б). Можно выделить 3 зоны проявления сейсмической активности. Первая зона приурочена к началу разлома по 9-10 разрезу, вторая зона – в непосредственной близости от места проведения взрыва и третья зона приурочена к области обрушения покрывающих пород по разрезам 15-18. Общее количество сейсмических событий намного увеличилось – до 128, однако общее значение энергии проявленных событий уменьшилось (рис. 5б). Среднее значение энергии сейсмических событий близко к 250 Дж, т.е. наблюдается значительное снижение энергии сейсмических событий. Причем 70 % событий произошли в первые сутки после проведения взрыва. Таким образом, взрыв, проведенный 31.07.2011 г. с массой взрываемого ВВ 46 т, вызвал увеличение сейсмической активности в первые сутки после проведения, но общая энергия сейсмических событий понизилась в 4 раза.

Взрыв 23.10.2011 г. произведен вблизи границы обрушения покрывающих пород в зоне стыковки с Саамским карьером (рис. 6). Сейсмичность приурочена к зоне обрушения покрывающих пород по разрезам 15-18, а также небольшое проявление активности отмечено в разломной зоне по 17-18 разрезу. В остальных областях проявление сейсмичности незначительно либо полностью отсутствует.

**Динамика сейсмической активности за 3 суток до массового взрыва**



**Динамика сейсмической активности за 3 суток после массового взрыва**

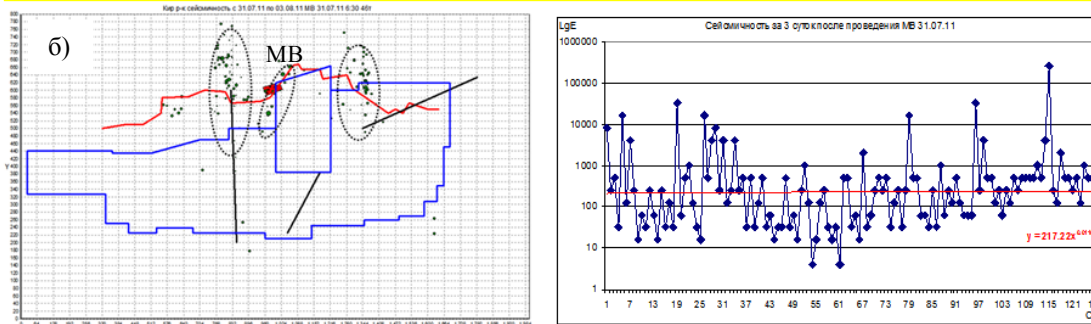
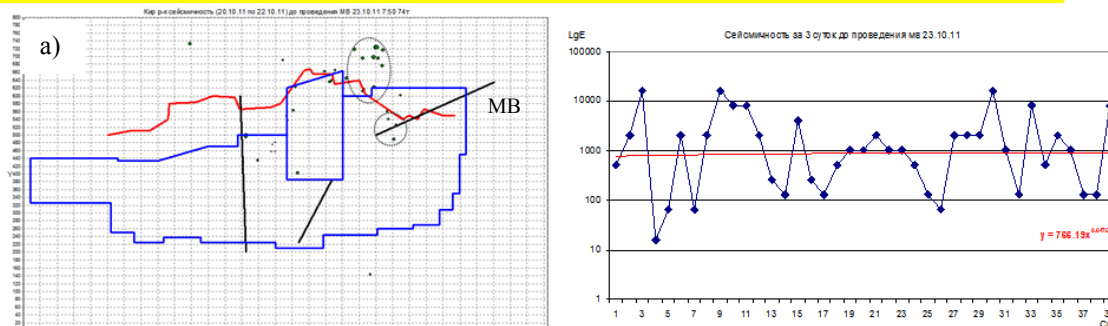


Рис. 5. Сейсмические события и динамика сейсмической активности в пределах шахтного поля за 3 суток до (а) и после (б) производства массового взрыва 31.07.2011 г. (МВ – место проведения массового взрыва)

**Динамика сейсмической активности за 3 суток до массового взрыва**



**Динамика сейсмической активности за 3 суток после массового взрыва**

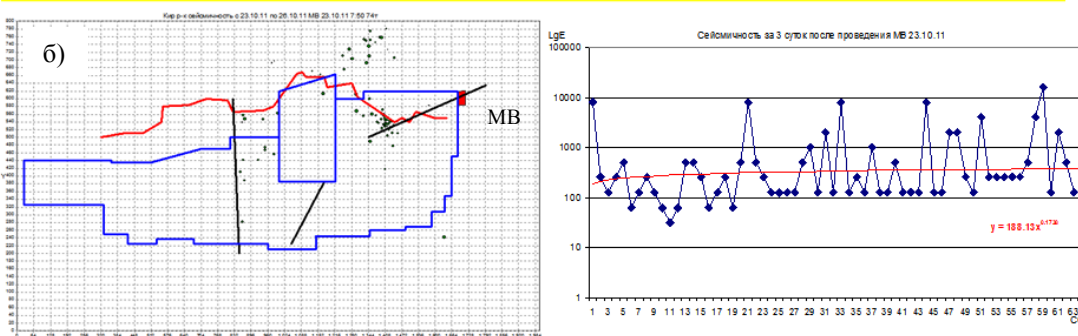


Рис. 6. Сейсмические события и динамика сейсмической активности в пределах шахтного поля за 3 суток до (а) и после (б) производства массового взрыва 23.10.2011 г.

Среднее значение энергии сейсмических событий до производства массового взрыва близко к 1 000 Дж. Всего произошло 39 событий (рис. 6а).

После проведения массового взрыва сейсмичность, приуроченная к зоне обрушения покрывающих пород по разрезам 15-18, практически не изменилась, но значительно увеличилась сейсмическая активность в разломной зоне по 17-18 разрезу (рис. 6б). Среднее значение выделившейся энергии составило около 350 Дж. Причем 73 % событий произошло в первые сутки после проведения взрыва. Всего произошло 64 события.

Таким образом, взрыв, проведенный 23.10.2011 г. с массой взрываемого ВВ 74 т, вызвал увеличение сейсмической активности в первые сутки после его проведения, но общая энергия сейсмических событий понизилась в 3 раза.

В результате проведенного анализа установлено, что после массовых взрывов общее количество сейсмических событий увеличивается, но их суммарная энергия уменьшается, что свидетельствует о релаксации напряжений в массиве горных пород после их производства. Причем чем больше разница в общем количестве сейсмических событий до и после взрыва, тем больше понижается энергия сейсмической активности.

#### 4. Некоторые закономерности проявления очагов сейсмических событий в окрестности взрыва и границ очистного пространства

Статистическим анализом установлены некоторые закономерности проявления очагов сейсмических событий в окрестности взрыва и границ очистного пространства, очередность и временные интервалы их проявления. При этом установлено, что в зоне действия массового взрыва, где возможны необратимые локальные деформации при динамическом нагружении, образуется несколько очаговых зон с определенной последовательностью и цикличностью их проявления (рис. 7). При производстве всех рассмотренных взрывов первоначально наиболее интенсивно сейсмические события проявляются, как правило, в границах наиболее ослабленных структурных блоков – в консоли необрушенных пород и в разломных зонах. Продолжительность

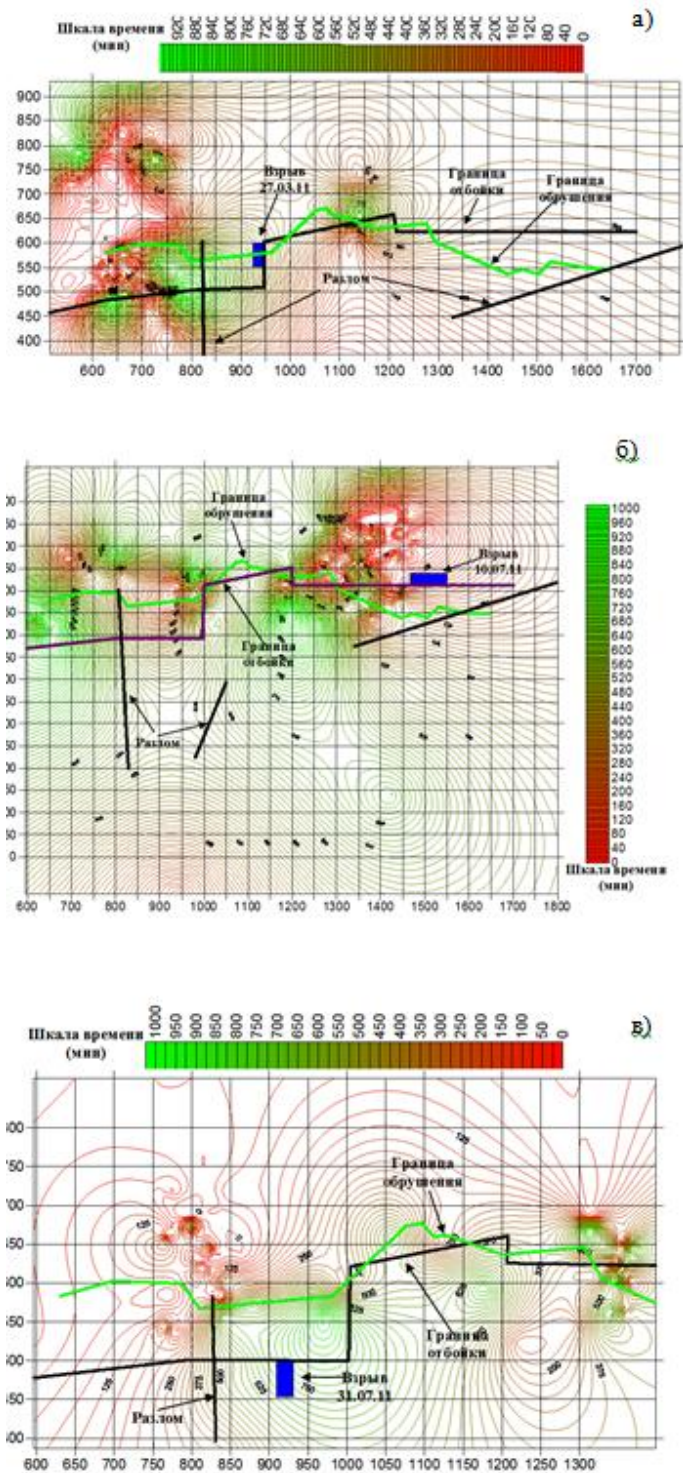


Рис. 7. Очередность проявления сейсмических событий в первые сутки после массовых взрывов: а – 7.03.2011 г.; б – 10.07.2011 г.; в – 31.07.2011 г. (цвет изолиний соответствует шкале времени, представленной на каждом рисунке)

проявления сейсмичности в этой зоне составляет десятки минут и зависит от степени ее готовности к разрядке.

Последующие циклы продолжительностью от 1.5 до 3.5 ч и интервалом между ними от 2 до 4 ч происходят вокруг первоначально образованных зон, смещаясь к периферии и границам отбойки. Такая последовательность проявления зон активности связана с процессами накопления и диссипации энергии. При этом изменение структуры системы происходит не постепенно, а скачкообразно. Эти закономерности при известной структуре массива позволяют выявлять потенциально сейсмоопасные участки массива горных пород и избирательно воздействовать на них путем выбора режима ведения взрывных работ и необходимой мощности массового взрыва.

Оценку степени готовности участков массива к разрядке можно оценить по ранее разработанной методике (Козырев, Усачев, 2011), основанной на теории количественного описания сейсмических процессов в реальной геофизической среде, позволяющей по параметрам крупных сейсмических событий и кумулятивным параметрам событий индикаторов с некоторой точностью предсказывать поведение системы в течение определенного временного интервала (сейсмического цикла) (рис. 8).

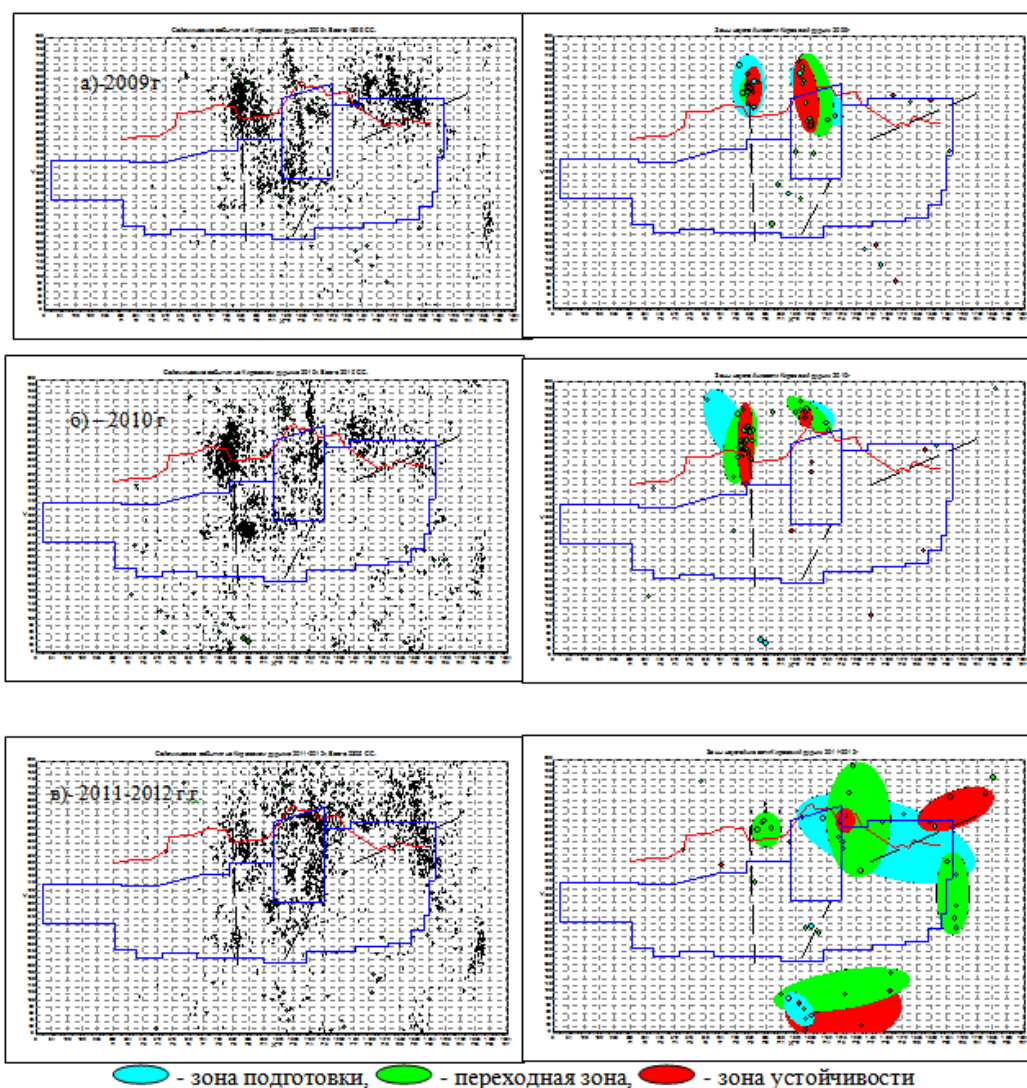


Рис. 8. Проявления сейсмических событий (левая часть рисунка) и зон неустойчивости (правая часть рисунка) в пределах шахтного поля Кукисвумчоррского месторождения в 2009-2012 гг.

В результате проведенного анализа установлено, что сейсмически опасные зоны относительно фронта горных работ могут существовать довольно длительное время. Они также могут как расширяться за счет их объединения, так и в отдельные временные отрезки не проявлять сейсмической активности, а при определенных условиях могут появляться и новые зоны с неустойчивым состоянием, что позволяет

повысить надежность районирования сейсмоопасных участков шахтного поля и создает реальные предпосылки для улучшения пространственно-временного прогноза периодов повышенного геодинамического риска.

## 5. Заключение

Реакция массива горных пород на динамические воздействия по-разному проявляется на различных участках массива. Установлено, что после массового взрыва общее количество сейсмических событий увеличивается, но их суммарная энергия уменьшается, что свидетельствует о релаксации напряжений в массиве горных пород после массовых взрывов. Причем чем больше разница в общем количестве сейсмических событий до и после взрыва, тем больше понижается энергия сейсмической активности.

Установлены некоторые пространственно-временные закономерности проявления очагов инициированных взрывом сейсмических событий, заключающиеся в том, что в зоне действия массового взрыва, где возможны необратимые локальные деформации при динамическом нагружении, образуется несколько очаговых зон с определенной последовательностью и цикличностью их проявления. При этом первоначально наиболее интенсивная сейсмичность концентрируется, как правило, в границах наиболее ослабленных структурных блоков – в консоли необрушенных пород и в разломных зонах. Продолжительность проявления сейсмичности в этой зоне составляет десятки минут и зависит от степени ее готовности к разрядке. В меньшей степени сейсмические события локализуются вблизи границ отбываемых секций.

Определены стадии потери устойчивости массива в зависимости от внешнего воздействия, что позволяет повысить надежность районирования сейсмоопасных участков шахтного поля и создает реальные предпосылки для улучшения временной локализации периодов повышенного риска.

Знание особенностей реакции массива горных пород на мощные динамические воздействия дает возможность выбирать последовательность развития фронта очистных работ, оптимальные мощности массовых взрывов, очередность и периодичность их проведения, позволяющие управлять высвобождением накопленной в массиве упругой энергии без заметных динамических проявлений горного давления в промежутке между массовыми взрывами.

## Литература

**Адушкин В.В.** Актуальные проблемы геомеханики земной коры. *Электр. науч.-информ. журнал "Вестник ОГГГГН РАН"*, № 1(16), 2001. URL: [http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h\\_dgggms/1-2001/adushkin.htm#begin](http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/1-2001/adushkin.htm#begin).

**Козырев С.А., Усачёв Е.А.** Реакция массива горных пород на мощные динамические воздействия. *Вестник Кольского научного центра РАН*, № 3, с. 21-29, 2011.

## References

**Adushkin V.V.** Aktualnyye problemyi geomehaniki zemnoy koryi [Actual questions of rock mechanics of Earth's crust]. *Elektr. nauch.-inform. zhurnal "Vestnik OGGGGN RAN"*, N 1(16), 2001. URL: [http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h\\_dgggms/1-2001/adushkin.htm#begin](http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/1-2001/adushkin.htm#begin).

**Kozyrev S.A., Usachyov E.A.** Reaktsiya massiva gornyyih porod na moschnyye dinamicheskie vozdeystviya [Rock mass reaction on powerful dynamic impacts]. *Vestnik Kolskogo nauchnogo tsentra RAN*, N 3, p. 21-29, 2011.

## Информация об авторах

**Козырев Сергей Александрович** – Горный институт (ГоИ) КНЦ РАН, д-р техн. наук, зав. лабораторией технологических процессов при добыче полезных ископаемых, e-mail: [skozirev@goi.kolasc.net.ru](mailto:skozirev@goi.kolasc.net.ru)

**Kozyrev S.A.** – Mining Institute KSC RAS, Dr of Tech. Sci., Head of Laboratory of Technological Processes of Mining Operations, e-mail: [skozirev@goi.kolasc.net.ru](mailto:skozirev@goi.kolasc.net.ru)

**Усачев Евгений Андреевич** – Горный институт (ГоИ) КНЦ РАН, науч. сотрудник, e-mail: [madly@bk.ru](mailto:madly@bk.ru)

**Usachev E.A.** – Mining Institute KSC RAS, Research Fellow, e-mail: [madly@bk.ru](mailto:madly@bk.ru)