

УДК: 622.831.32

DOI: 10.18454/2313-1586.2017.01.072

Терешкин Андрей Александрович
младший научный сотрудник,
Институт горного дела ДВО РАН,
680000 г. Хабаровск, ул. Тургенева, 51
e-mail: andrey.tereshkin@bk.ru

Tereshkin Andrey A.
junior researcher,
The Institute of Mining FEB RAS,
680000 Khabarovsk, 51 Turgenev st.
e-mail: andrey.tereshkin@bk.ru

Мигунов Дмитрий Сергеевич
научный сотрудник,
Институт горного дела ДВО РАН
e-mail: dimisi@mail.ru

Migunov Dmitry S.
researcher,
The Institute of Mining FEB RAS
e-mail: dimisi@mail.ru

Аникин Павел Александрович
старший научный сотрудник,
Институт горного дела ДВО РАН
e-mail: pav.anik@mail.ru

Anikin Pavel A.
senior researcher.,
The Institute of Mining FEB RAS
e-mail: pav.anik@mail.ru

Гладырь Андрей Владимирович
старший научный сотрудник,
Институт горного дела ДВО РАН
e-mail: rush3112@mail.ru

Gladyr Andrew V.,
senior researcher,
The Institute of Mining FEB RAS
e-mail: rush3112@mail.ru

Рассказов Максим Игоревич
младший научный сотрудник,
Институт горного дела ДВО РАН
e-mail: rasm.max@mail.ru

Rasskazov Maksim I.
junior researcher,
The Institute of Mining FEB RAS
e-mail: rasm.max@mail.ru

ОЦЕНКА ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ УДАРООПАСНОГО МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД ПО ДАННЫМ ЛОКАЛЬНОГО ГЕОАКУСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

EVALUATION GEO-MECHANICAL DANGEROUS ROCK MASS STATE ACCORDING TO LOCAL CONTROL GEOACOUSTIC DATA

Аннотация:

На ряде рудных месторождений, опасных по горным ударам, проведены измерения параметров акустической эмиссии с применением портативного прибора нового поколения «Prognoz L», разработанного в ИГД ДВО РАН. Получены новые данные об особенностях проявления акустической активности на различных участках рудничного поля и обоснованы критерии удароопасности массива горных пород.

Ключевые слова: геофизический метод, прибор локального контроля, удароопасность, акустическая эмиссия

Abstract:

On a number of impact dangerous ore deposits measurements of acoustic emission parameters using the "Prognoz L" portable device of a new generation, worked out by the Institute of Mining FEB RAS are performed.. New data on the peculiarities of displaying acoustic activity in different areas of the mine fields are obtained and criteria of rock mass impact hazard are grounded.

Key words: geo-physical method, the local control unit, impact hazard, acoustic emission.

Разработка месторождений полезных ископаемых и подземное строительство в сложных горно-геологических условиях и на больших глубинах сопровождаются повышенным горным давлением, которое проявляется в таких опасных формах, как сдвигение и обрушение участков массива, внезапные выбросы породы и газа, стрельяния пород, горные и горно-тектонические удары, что нередко приводит к катастрофическим последствиям. Они наносят большой материальный и социальный урон горнодобывающим предприятиям, приводят к длительным остановкам добычи полезного ископаемого из-за необходимости вести масштабные восстановительные работы на больших площадях шахтного поля.

Важное значение для прогноза и предупреждения опасных проявлений горного давления имеет достоверная и оперативная информация о геомеханическом состоянии массива горных пород, которая может быть получена в том числе с помощью геофизических методов и измерительных средств [1], из которых наиболее широко применяются микросейсмический (сейсмоакустический) и геоакустический методы. С помощью последнего, в зависимости от применяемых технических средств, можно осуществлять как локальный, так и региональный контроль состояния массива горных пород. Он базируется на экспериментально наблюдаемом и теоретически изученном явлении акустической эмиссии (АЭ), которая сопровождает процесс механического нагружения и разрушения горных пород [2 – 3].

Вместе с тем сложившиеся в настоящее время представления о массиве горных пород как о литологически и структурно неоднородной среде требуют более совершенного инструмента для регистрации, обработки результатов измерения и анализа не только основных параметров регистрируемого сигнала АЭ, но и ряда дополнительных показателей (временных, их производных и градиентов, вариаций фазово-частотных спектров и т. п.). Необходимо также иметь возможность автоматизированной настройки и выбора режима измерения в различной шумовой обстановке действующего горнодобывающего предприятия.

Интенсивное развитие в последние годы микропроцессорных и цифровых технологий создало условия для разработки в ИГД ДВО РАН значительно более совершенного геоакустического портативного прибора для локального контроля удароопасности «Prognoz L» [4], позволяющего не только регистрировать большое число параметров АЭ, но и осуществлять обработку и детальный анализ полученной информации, что значительно повышает надежность оперативной оценки геомеханического состояния массива горных пород.

Портативный прибор для локального контроля удароопасности «Prognoz L» состоит из двух основных частей (рис. 1а): первичного приемного преобразователя (датчика) и измерительного блока. По результатам детального анализа характеристик современных акустических регистраторов лабораторных и полевых испытаний в качестве первичного приемного преобразователя для прибора «Prognoz L» определен акселерометр серии AP99-1000 (фирма «GlobalTest», г. Саров) (рис. 1б).

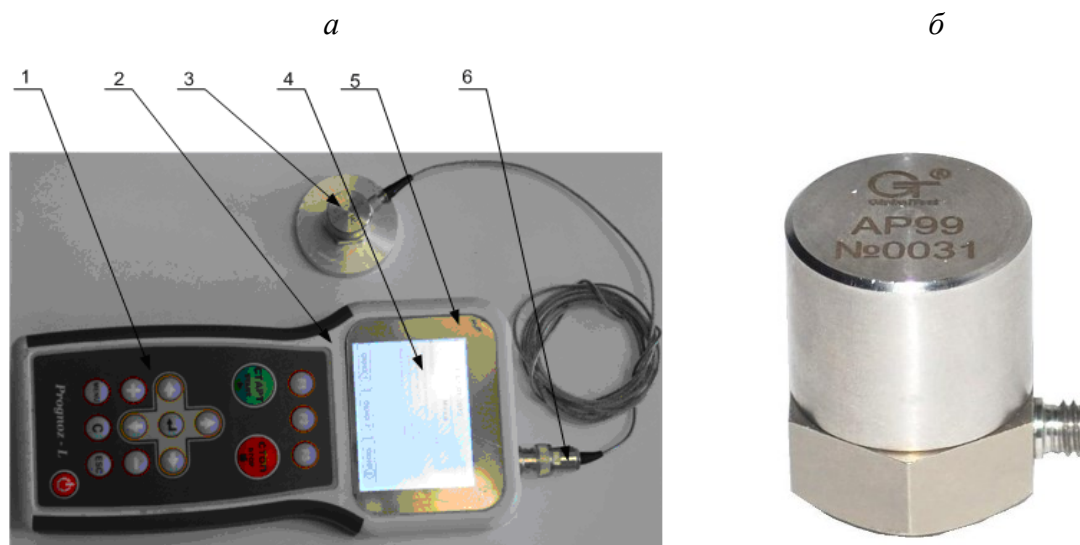


Рис. 1 – Внешний вид прибора «Prognoz L»:

- а – измерительный блок: 1 – пленочная клавиатура; 2 – корпус прибора;
- 3 – выносной датчик (акселерометр); 4 – жидкокристаллический дисплей;
- 5 – защитное стекло из поликарбоната; б – разъем подключения выносного датчика;
- б – акселерометр AP99-1000

В основе измерительной части прибора лежит ARM микроконтроллер STM32F405 производительностью 210 DMIPS, с помощью которого осуществляется как управление прибором, так и обработка регистрируемого сигнала акустической эмиссии. Высокая производительность позволяет в полной мере использовать DSP-библиотеку с возможностью цифровой обработки АЭ-сигнала.

Хранение результатов измерений, а также истории работы прибора производится на flash-карточку формата micro-SD. Интерфейс обмена с картами данного формата реализован в микроконтроллере STM32F405 в виде аппаратного модуля, который позволяет считывать и записывать данные, не используя вычислительное ядро микроконтроллера.

Сигнал с пьезодатчика поступает на усилитель – фильтр верхних частот, в котором он отфильтровывается от помех с частотой выше 30 кГц и преобразуется в диапазон входных сигналов АЦП, а затем оцифровывается с частотой дискретизации 100 кГц. После чего оцифрованные отсчеты поступают в микропроцессор, где обрабатываются в соответствии с алгоритмом выделения импульсных сигналов.

На рис. 2 изображены основные окна настройки и проведения измерений: главное окно (а), отражающее процесс измерения, окно представления результатов АЭ контроля (б), пользовательское (в) и инженерное (г) меню для настройки прибора «Prognoz L»



Рис. 2 – Главное окно (а), отражающее процесс измерения, окно представления результатов АЭ контроля (б), пользовательское (в) и инженерное (г) меню для настройки прибора «Prognoz L»

Непосредственно перед выполнением процесса измерения параметров АЭ выполняется настройка прибора, где имеется возможность не только изменить общие параметры замера, такие как дата/время, запись на цифровой носитель, громкость звука и др., но и подобрать частотный, амплитудный и временной фильтр детекции АЭ импульсов. Для этого используются пользовательское и инженерное меню (рис. 2в, 2г).

Для прибора «Prognoz L» разработано специальное программное обеспечение, функционирующее на микроконтроллере и состоящее из набора программных модулей.

Модуль получения данных осуществляет непрерывное считывание данных, поступающих с аналого-цифрового преобразователя в цифровом виде. Далее поток цифровых данных поступает на модуль цифрового фильтра. В приборе «Prognoz L» реализован цифровой фильтр с конечной импульсной характеристикой полосового типа. Отфильтрованные данные записываются на карту памяти модулем записи для осуществления возможности просмотра и дальнейшего анализа на персональном компьютере с помощью специально разработанной программы для операционной системы Microsoft Windows.

Модули расчета параметров импульса и его частотных, амплитудных и временных характеристик осуществляют анализ выделенного импульса. Они позволяют рассчитывать следующие параметры и характеристики АЭ импульсов: время начала и окончания, амплитуду, длительность, энергетическую характеристику, количество осцилляций, спектр, частоту основной гармоники.

Для осуществления визуального контроля за процессом измерения часть рассчитанных параметров выводится на дисплей в режиме реального времени модулем отображения состояния процесса измерения.

Рассчитанные параметры и частотные характеристики аккумулируются в модуле накопления и обработки результатов измерений. По окончании процесса измерения, продолжительность которого устанавливается пользователем в меню настроек программы, данный модуль проводит расчет удароопасности по принятой методике с использованием критериев, значения которых устанавливаются для условий конкретного месторождения в процессе экспериментальных исследований. Итоговые результаты измерения параметров АЭ и результаты расчета удароопасности выводятся на дисплей прибора в виде текстовой и графической информации, а также сохраняются на карте памяти в виде текстового файла. Записанные результаты геоакустического контроля могут просматриваться и детально анализироваться с помощью специально разработанной программы «Prognoz L Configurator» для операционной системы Microsoft Windows, адаптированной под работу как со средне-, так и с высокочастотными импульсами "Sound Forge Pro".

В приборе локального контроля реализован ряд алгоритмов для выделения полезных сигналов АЭ и фильтрации технологических помех различной природы.

Для оценки состояния горного массива прибором локального контроля «Prognoz-L» используются методики, в которых в качестве критериев выступают интенсивность АЭ без видимого влияния технологических процессов $N_{АЭ}$ и показатель амплитудного распределения b [5]. Показатель интенсивности $N_{АЭ}$ позволяет судить о достижении предельных нагрузок в горных породах краевой части массива. Показатель амплитудного распределения b характеризует неустойчивость процесса деформирования, нарастание количества импульсов высокой энергии и рассчитывается по формуле

$$b = \lg \frac{N_{АЭ}^1}{N_{АЭ}^2} / \lg \frac{A_2}{A_1},$$

где b – соотношение числа акустических импульсов с разной амплитудой (энергией); A_1 и A_2 – пороги (уровни чувствительности прибора); $N_{АЭ}^1$ и $N_{АЭ}^2$ – интенсивность АЭ при различных порогах.

Процесс измерения заключается в последовательной регистрации акустических сигналов при различных порогах (уровнях чувствительности прибора) A_1 и A_2 . Нижний (более чувствительный) порог A_1 устанавливается таким образом, чтобы обеспечить прием импульсов АЭ в радиусе не менее 5 м от датчика при превышении уровня полезного сигнала АЭ над фоном акустических помех не менее чем на 10 дБ. Верхний (II) порог A_2 , используемый для регистрации импульсов с большей амплитудой, устанавливается так, чтобы выполнялось соотношение $A/A_1 > 2$. Уменьшение b ($b < 1$) свидетельствует об увеличении доли импульсов с большей амплитудой, что указывает на процесс прорастания трещин, являющийся признаком удароопасности массива горных пород.

Помимо указанных критериев ($N_{AЭ}$ и b) для оценки состояния горного массива возможно использовать дополнительные параметры АЭ, к числу которых относятся спектральные характеристики АЭ сигналов.

В приборе локального контроля реализован ряд оригинальных алгоритмов для выделения полезных сигналов АЭ и фильтрации технологических помех различной природы, что чрезвычайно важно, так как измерения очень часто проводятся в сложной шумовой обстановке подземного рудника. Фильтрация осуществляется по основным параметрам, которые характеризуют импульсы АЭ. Амплитудная фильтрация позволяет исключать сигналы фоновых помех рабочего оборудования. Частотный фильтр исключает из алгоритма расчета как низкочастотные, так и высокочастотные импульсы техногенного происхождения. Также сигналы фильтруются по длительности.

Натурные испытания прибора «Prognoz L» проводились в условиях подземных рудников Николаевского (АО «ГМК Дальполиметалл»), Глубокого (ПАО «ППГХО»), а также объединенных Кировского и Расвумчоррского рудников (АО «Апатит»).

Оценка геоакустического состояния массива месторождений прибором локального контроля проводилась в потенциально удароопасных выработках, в которых присутствовали явные визуальные признаки повышенного давления (нарушение целостности крепи, шелушение и интенсивное заколообразование породы кровли или бортов выработок, стрельание пород), а также на участках рудничного поля, в пределах которого наблюдается повышенный уровень напряжений в массиве, установленный стационарными сейсмоакустическими системами контроля.

Достаточно представительный объем экспериментальных данных был получен на рудниках АО «Апатит» в 2014 – 2015 гг., где было проведено более 130 измерений параметров АЭ. На рис. 3 изображены сигналограммы измерений АЭ в выработках, с различной степенью удароопасности произведенных на Кировском руднике (АО «Апатит»).

Увеличение доли импульсов акустической эмиссии говорит о наличии процесса микро- и макроразрушения горных пород в связи с избыточным давлением и деформацией массива горных пород.

В связи с дискретностью и случайным характером процессов разрушения в массиве, оценку состояния его краевой части проводят на основе статистической обработки данных.

В процессе анализа данных акустической эмиссии по наблюдениям геомеханического состояния массива глубоких горизонтов Кировского и Расвумчоррского рудников выявлены основные параметры частоты импульсов, амплитуды, а также длительности сигналов АЭ в выработках, где присутствовали явные признаки напряжения краевой части массива. Значения основных параметров лежат в следующем диапазоне:

- частота импульсов АЭ 10600 – 16700 Гц;
- амплитуда импульсов АЭ 15 – 64 дБ;
- длительность импульсов АЭ 5 – 380 мс.

Для условий горных выработок, пройденных в апатит-нефелиновых рудах и вмещающих породах на горизонтах Кировского и Расвумчоррского рудников, установлен уровень $N_{алкрит} = 7,5$ импульсов за интервал времени $\Delta t = 15$ сек. Для категории "ОПАСНО" $b \leq 1$.

Также весьма представительные данные о параметрах акустической активности удароопасного массива горных пород были получены на Николаевском руднике (АО «ГМК Дальполиметалл») с октября по декабрь 2015 г., в период проявления техногенной сейсмичности.

Всего с октября по декабрь 2015 г. на Николаевском руднике зарегистрировано 25 толчков, что в 5 – 8 раз превышает среднее количество динамических проявлений за такой же период в предыдущие годы.

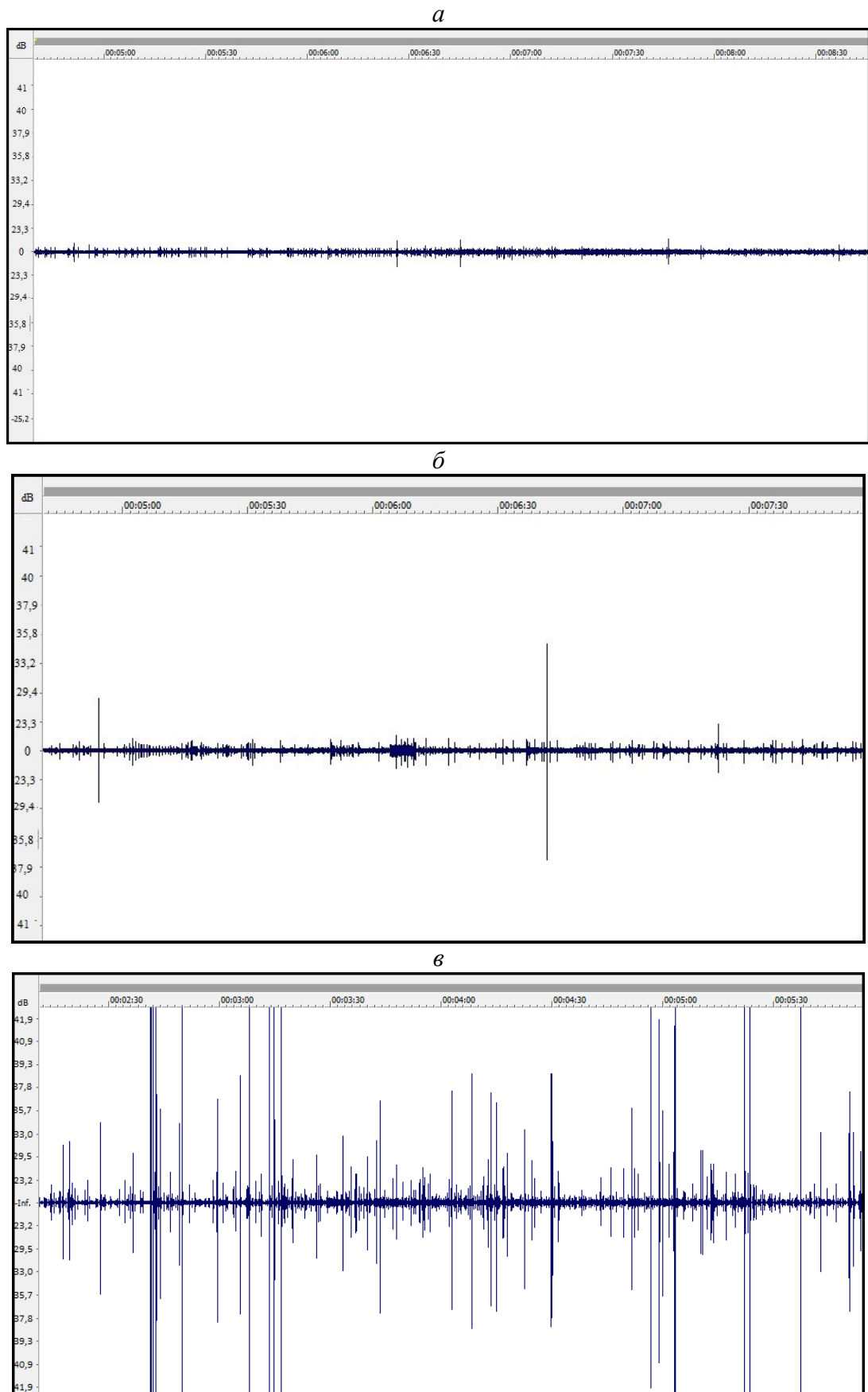


Рис. 3 – Сигналограммы измерений в выработках с различной степенью удароопасности:
a – спокойное состояние массива; *б* – начальные признаки напряжения массива;
в – удароопасное состояние массива

По результатам детального изучения условий и факторов серия сильных толчков в глубине массива Николаевского месторождения вызвана активизацией геодинамических процессов вдоль границ подработанного горными работами тектонического блока объемом более 5 млн м³. Геодинамические процессы протекали в форме перестройки и самоорганизации массива в природно-техногенном поле напряжений и сопровождалась смещениями и подвижками вдоль тектонических нарушений различного масштабного уровня. Примером таких подвижек могут являться, в частности, наблюдаемые смещения на величину до 5 см в наклонных и вертикальных взрывных скважинах на расстоянии от 4 до 7 м от их устья.

На рис. 4 представлены очаговые зоны крупных геодинамических событий, произошедших с октября по декабрь 2015 г. Выброс горной массы в результате мгновенного высвобождения энергии составил 10 – 18 м³.

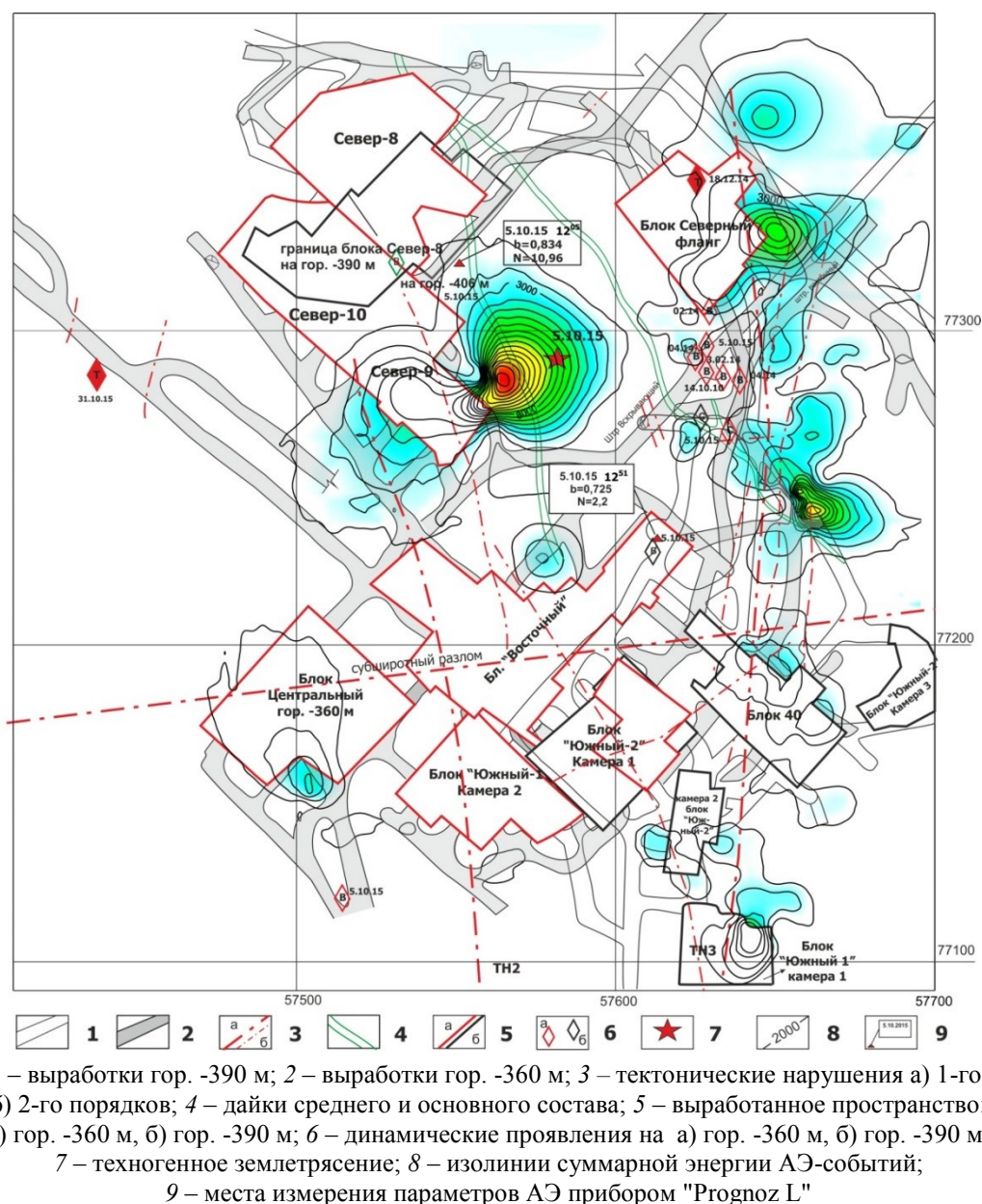


Рис. 4 – Сейсмоакустическая активность массива Николаевского месторождения в районе зарегистрированных с октября по декабрь 2015 г. геодинамических явлений

По результатам анализа и обобщения экспериментальных данных определены критерии перехода массива горных пород на глубоких горизонтах Николаевского месторождения в неустойчивое предразрушающее состояние.

В целом по результатам начального этапа экспериментальных исследований удароопасности с применением прибора "Prognoz-L" определены основные параметры полезных сигналов АЭ (амплитуда и длительность импульсов), зарегистрированных в массиве Николаевского месторождения, которые также лежат в достаточно широких диапазонах: от 15 до 65 дБ и от 7,5 до 450 мс, соответственно. Частота при этом изменяется от 12000 до 19000 Гц.

На основе применения современных микропроцессорных и цифровых технологий разработан и апробирован в шахтных условиях геоакустический портативный прибор для локального контроля удароопасности «Prognoz L», который позволяет регистрировать и определять параметры АЭ даже в условиях наличия технологических шумов.

Для работы прибора разработаны эффективные алгоритмы и программное обеспечение, обеспечивающие регистрацию в шахтных условиях действующих рудников АЭ сигналов, определение их параметров (интенсивность акустической эмиссии; основную частоту импульсов АЭ; длительность, амплитуду и относительную энергетическую характеристику АЭ-событий и др.); углубленный анализ результатов геомеханического контроля.

В условиях глубоких горизонтов Кировского, Расвумчоррского рудников, а также Николаевского полиметаллического месторождения (Восточное Приморье) получены новые экспериментальные данные о параметрах акустической активности массива горных пород и определены критерии его перехода в неустойчивое предразрушающее состояние. Установлено, что признаком удароопасного состояния краевых участков горного массива является его акустическая активизация с параметрами:

- Для Кировского и Расвумчоррского рудников – интенсивность акустической эмиссии $N_1 = 30$ имп./мин; показатель амплитудного распределения АЭ $b \leq 1$.
- Для Николаевского полиметаллического месторождения – интенсивность акустической эмиссии $N_1 = 24$ имп./мин; показатель амплитудного распределения АЭ $b \leq 1$.

Литература

1. Инструкция по безопасному ведению горных пород на рудниках и нерудных месторождениях, объектах строительства подземных сооружений, склонных и опасных по горным ударам (РД 06-329-99). – М.: ГП НТЦ по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России, 2000.
2. Кулаков Г.И. Акустическая эмиссия и стадии процесса трещинообразования горных пород / Г.Е. Яковицкая, Г.И. Кулаков // ФТПРПИ. – 1993. – № 2.
3. Регистрация и обработка сигналов электромагнитного излучения горных пород / М.В. Курленя и др. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000.
4. Совершенствование технических средств локального контроля удароопасности при ведении горных работ в сложных горно-геологических условиях / И.Ю. Рассказов, Д.С. Мигунов, А.В. Гладырь, В.В. Макаров, П.А. Аникин, А.Ю. Искра, Д.О. Желнин, А.В. Сидляр // Проблемы освоения георесурсов Дальнего Востока. Вып. 5 ГИАБ (специальный выпуск). – 2014. – № 12.
5. Методические указания по сейсмоакустическим и электромагнитным методам получения критериев степени удароопасности. – Л.: ВНИМИ, 1986.
6. Вознесенский А.С. Системы контроля геомеханических процессов / А.С. Вознесенский. – М.: Изд-во МГГУ, 2002.
7. Геофизические исследования горных ударов / И.М. Петухов, В.А. Смирнов, Б.Ш. Винокур, А.С. Дальнов. – М.: Недра, 1975.
8. Рассказов И.Ю. Контроль и управление горным давлением на рудниках Дальневосточного региона / И.Ю. Рассказов. – М.: Издательство «Горная книга», 2008.
9. Турчанинов И.А. Основы механики горных пород / И.А. Турчанинов, М.А. Иофис, Э.В. Каспарьян. – Л.: Недра, 1989.

10. Laboratory and field investigations of rock-burst phenomena using concurrent geotomographic imaging and acoustic emission // R. Joung, D. Hutchins, S. Taltbi, T. Chow, S. Falis, L. Farrell, D. Jansen, J. McGaughey, J. Towers, T. Urbancic // *Microseismic techniques. Pure and Appl. Geophys.* – 1989. – N 3-4.

11. Геоакустический портативный прибор нового поколения для оценки удароопасности массива горных пород / И.Ю. Рассказов, Д.С. Мигунов, П.А. Аникин, А.В. Гладырь, А.А. Терёшкин, Д.О. Желнин // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых.* – 2015. – № 3. – С. 169 - 179.

12. Methods and results of burst-hazardous assessment in the underground mines of Russian Far East / I.Yu. Rasskazov, B.G. Saksin, P.A. Anikin, M.I. Potapchuk, A.V. Gladyr, A.V. Sidlyar, E.E. Damaskinskaya, B.A. Prosekin, S.P. Osadchiy // *Proceedings of the 8-th International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines (Russia, Saint-Petersburg – Moscow. 1-7 September 2013).* – Obninsk-Perm, 2013. – P. 319 - 322.