

УДК 622.831.32

**Л.И. Беляева**

## **МЕТОДИКА ПРОГНОЗА УДАРООПАСНОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА В СЕЙСМОГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ ПОЛЯ ШАХТЫ «КОМСОМОЛЬСКАЯ»**

*Дано описание аппаратурно-программного комплекса «GITS», предназначенного для непрерывной регистрации и обработки сейсмических сигналов, возникающих в пределах шахтных полей.*

*Ключевые слова:* горный массив, удароопасное состояние, сейсмоустойчивость.

**Семинар № 2**

---

**L.I. Belyaeva  
THE PROCEDURE OF  
FORECASTING THE BUMP  
HAZARDOUS STATE OF THE ROCK  
MASS IN THE GEOSEISMIC  
CONDITIONS OF THE PIT  
“KOMSOMOLSKAYA”**

*The description of the hardware-software system «GITS», designed for the continuous registering and processing of the seismic signals in the pit field area is given.*

*Key words:* rock mass, rock-bump hazard, seismic stability.

**П**оложительные результаты двухлетней работы аппаратурно-программного комплекса «GITS», установленного в шахте «Комсомольская» ОАО «Воркутауголь» ФЗАО «Северсталь-Ресурс» позволили разработать совместно с ОАО ВНИМИ (г. С-Петербург) «Методику прогноза удароопасного состояния горного массива сейсмическим методом в условиях поля шахты «Комсомольская», включающая в себя полный пакет, утвержденных в Печорском межрегиональном управлении по ТЭН, документов:

- технические требования к системам контроля;
- описание сейсмической сети;

- методику обработки и интерпретации сейсмических событий;
- методику построения карт сейсмической активности;
- методические подходы к прогнозу удароопасности;
- описание критериев удароопасности;
- регламент взаимодействия с техническими службами шахты;
- общие принципы оценки эффективности прогноза.

Функциональное назначение аппаратурно-программного комплекса «GITS» заключается в следующем:

- непрерывная регистрация и последующая обработка сейсмических сигналов, возникающих в пределах шахтных полей;
- оценка энергии и координат сейсмических явлений, возникающих в контролируемом массиве горных пород;
- оценка и районирование шахтных полей по сейсмической активности;
- выделение удароопасных зон в пределах сейсмической сети;
- прогноз перехода участков горного массива в удароопасное состояние;
- оценка эффективности разгрузочных мероприятий;

- накопление базы данных сейсмических событий.

Весь аппаратурный комплекс имеет возможность регистрировать в диапазоне частот 0,1–800 Гц сейсмические сигналы, энергетический спектр которых лежит в пределах от  $10^2$  Дж до  $10^6$  Дж. Чувствительность системы позволяет также перекрыть 4–5 порядков по энергиям регистрируемых событий. Это условие необходимо для того, чтобы в рамках отдельной подсистемы осуществлять прогноз наиболее сильных сейсмических событий из данного энергетического диапазона, для чего создается банк данных (каталог) сейсмических событий, которые на 3–4 порядка ниже по энергии, чем прогнозируемые (1).

Кроме каталога сейсмических событий система имеет адаптированную базу данных о горно-технической обстановке на шахте. В ее состав входит: геологическая информация, планы и разрезы горных работ, технология ведения горных работ (прходческих и очистных), данные о физико-механических свойствах горного массива, о взрывных работах, профилактических мероприятиях, результаты оценки напряженного состояния массива локальными геофизическими и инструментальными методами т.п. Эти данные используются при комплексном анализе и прогнозе горнотехнической обстановки, планирования и контроля эффективности применяемых профилактических мероприятий, а также для выработки стратегии ведения горных работ с целью повышения их безопасности.

Выходным документом обрабатывающего комплекса GITS являются прогнозные Карты удароопасности участков шахтного поля, на которых представлены сейсмоопасные зоны увязанные по координатам с планами горных работ, а также и по верти-

кальным разрезам. При этом используют данные о сейсмической активности за определенный период, предшествующего прогнозируемому периоду.

Построение сети системы GITS на шахте «Комсомольская» осуществлено с учетом реальной чувствительности каждого сейсмического пункта. Под реальной чувствительностью принял радиус сферы ( $R_s$ ), в пределах которой сейсмический пункт регистрирует событие заданной энергии. Условием уверенного определения момента первого вступления считаем трехкратное превышение амплитуды сигнала над амплитудой помехи:  $A_{\text{сиг}} \geq 3A_{\text{пом}}$ . Радиус реальной чувствительности определен по эмпирической формуле:

$$R_s \leq 332 \cdot \sqrt[3]{\frac{E}{a^2}}, \text{ м}, \quad (1)$$

где  $E$  – сейсмическая энергия события в Дж,  $a$  – амплитуда помехи в  $10^{-7}$  м/с.  $R_s$  составляет величину порядка 500 м для событий  $10^2$  Дж.

Пункты регистрации сети оборудованы в доступных подземных горных выработках при условии перекрытия радиусов реальной чувствительности минимум от четырех пунктов и максимально возможном разносе точек по координатам X, Y и Z для наилучшего окружения контролируемой области.

Регистрация сейсмических событий производится путем непрерывного мониторинга системой программного комплекса, состоящего из сети подземных и поверхностных пунктов регистрации (нижний уровень комплекса) и приемно-обрабатывающей части (верхний уровень). Сеть из 12 точек регистрации (сейсмических пунктов) обеспечивает уверенное определение координат и сейсмической энергии явлений (толчков, микроударов, горных ударов, технологических

взрывов) от  $10^2$  Дж и выше. Вычисление координат сейсмического явления производится по временам первых вступлений прямых продольных волн, определенных с точностью не менее 1-2 мс, минимум на 4-х точках регистрации при условии хорошего окружения очага данными точками двумя взаимоконтролирующими способами.

Для расчета координат установлены (по ранее многократно проведенным шахтным сейсморазведочным работам методом преломленных волн) скорости упругих волн в пределах 4600-5400 м/с в контролируемом массиве горных пород.

Погрешность определение координат при использовании средней скорости во внутренних точках сети составляет порядка  $\pm 10.0$  м по трем компонентам сейсмического датчика . При этом учитываются и реальные размеры очага.

Для оценки размера очага при различных его формах применены следующие эмпирические формулы:

$$\begin{aligned} r &= 1.85E_c^{0.186}, \text{ м (сфера);} \\ L &= 2.9E_c^{0.24}, \text{ м (плоскость),} \\ W &= 2.0E_c^{0.21}, \text{ м (плоскость),} \end{aligned} \quad (2)$$

где  $E_c$  – сейсмическая энергия события,  $r$  – радиус сферы, охватывающей зону неупругих деформаций,  $L$  – длина разрыва,  $W$  – ширина разрыва.

Энергетической характеристикой события является сейсмическая энергия или та часть полной энергии очага, которая приходится на образование упругих колебаний и их распространение в массиве горных пород. Для шахтных условий она не превышает первых процентов от полной энергии и, чем больше энергия, тем выше доля сейсмической энергии. Для вычисления сейсмической энергии (прямой расчет) используется формула:

$$E_c = 2\pi R^2 \rho (\Sigma V_p A_p^2 \tau_p + \Sigma V_s A_s^2 \tau_s), \text{ Дж,} \quad (3)$$

где  $R$  – гипоцентральное расстояние, м;  $\rho$  - плотность среды;  $V_p$ ,  $V_s$  – скорости продольной и поперечной волн, м/с;  $A_p$ ,  $A_s$  – амплитуды скорости колебаний в продольной и поперечной волнах, м/с;  $\tau_p, \tau_s$  – длительность цуга колебаний в продольной и поперечной волнах, сек.

В результате прямого расчета энергии по большому числу сейсмических явлений получена корреляционная зависимость величины сейсмической энергии от длительности записи:

$$\lg E_c = A + B \lg \tau, \quad (4)$$

где  $\tau$  - полная длительность записи по сейсмограмме.

Для условий шахты «Комсомольская», коэффициенты  $A$  и  $B$  соответственно равны 2.21 и 2.70.

Разброс отдельных измерений от данной зависимости не превышает 0,5 порядка, что вполне допустимо при шахтных сейсмических измерениях.

Расчеты энергии по формуле (4), сделанные в ОАО ВНИМИ, показали их хорошую сходимость с результатами определений по зависимости (3), которая и используется при определении сейсмической энергии событий по длительности сигнала, которая определяется по всем установленным сейсмопунктам сети. Экстремальные значения в  $\max$  или  $\min$  диапазоне выбраковываются. По остальным значениям считается среднее арифметическое с последующим расчетом величины энергия зарегистрированного сейсмического события.

По результатам сейсмических мониторинговых наблюдений на шахте «Комсомольская» установлены закономерности группирования сейсмических событий по координатам их очага в пределах одинаковых элементов

шахтного поля с характерным размером  $L$  и классам энергии от  $E_{min}$  до  $E_i$ . По результатам группирования за период  $T_i$  с периодичностью 1 раз:

- в сутки строится «Карта плотности сейсмических событий» по энергии (рис. 2, а);
- за 15 дней «Карта удороопасности участков шахтного поля» с зонами повышенной активности и изменения критерия удороопасности массива параметру  $F$  (рис. 2, б). Критическим энергетическим порогом сейсмического события, определяющим удороопасность массива принято зареги-стрированное сейсмическое событие с  $E=>30,0$  кДж. Для контроля их состояния во времени с периодичностью раз в сутки оценивают параметры распределения событий по уровням энергии  $N_i=f(E_i)$  по специальным графикам за предшествующий моменту оценки период времени  $T_i$  (рис.3). Для участков шахтного поля с малым количеством событий в блоке за период  $T_i$ , где оценка параметра  $F$  не-надежна, но есть события с большой  $E$ , используется способ оценки развития зон напряженного состояния на основе частоты событий  $N_i$  в классах по  $E_i$  с показателем избыточности  $E_a$  в рамках одного класса.

Построение Карт удороопасности участков шахтного поля заключается в следующем:

- в кубе с линейными размерами 120x120x120 м подсчитывают параметры сейсмической активности ( $\sum N$  – количество сейсмических событий,  $\sum E$  – суммарная энергия событий и др.) и относят к центру куба;
- последовательно смешая этот куб с шагом 30 м по всей контролируемой площади, получают значения по соответствующей сетке;
- проводят изолинии сейсмической активности, осуществляя интерполя-

цию при вычислении промежуточных значений.

Карты удороопасности участков шахтного поля строят в координатах  $XY$  (в плоскости разрабатываемых шахтой угольных пластов), и при необходимости по  $YZ$  и  $XZ$  (разрезы в крест и по простираннию угольной толщи).

Для шахты «Комсомольская», ОАО «Воркутауголь» применяется методика построения Карт удороопасности по параметру  $F$  (коэффициенту удоро-опасности), определенному для различных участков участков массива шахтного поля (2):

$$\begin{aligned} F &= \sum_{k=0}^{14} F_k k_k = \sum_{k=0}^{14} F_k k / 15 \\ F_k &= N_k + D_k \\ D_k &= \sum \sqrt{E_i} / \sqrt{500} \approx \sum \sqrt{E_i} / 22,4 \end{aligned}, \quad (5)$$

где  $D_k$  – сумма деформаций (корней из энергии), отнесенных к деформации события с энергией 500 Дж, за  $k$ -й день;  $N_k$  – количество сейсмических событий за  $k$ -ый день;  $F_k = N_k + D_k$  – суммарное значение показателя  $F$  за  $k$ -ый день;  $F$  – итоговый показатель за 15 дней, предшествующих дню составления прогноза.

В алгоритме построения изолиний количество дней  $n$ , предшествующих дню составления прогноза, задаётся от 15 и до 30.  $F_k$  для каждого предшествующего дня умножается на коэффициент влияния  $-k/n$ , т.е. чем дальше событие от дня прогноза, тем меньше его влияние.

Участок массива шахтного поля покрывается квадратами со стороной 120 м (для поля шахты «Комсомольская», связано с размерами лавы) и со смещением в  $j$  длины стороны по обеим осям. Для каждого квадрата вычисляется своё значение  $F$  и берутся координаты центра квадрата. По полученной сетке строятся изолинии.

Для выделения удароопасных зон  
применительно к условиям шахты



Уровень **0** (фоновый уровень) – за 15 дней в блоке не произошло крупных сейсмических событий,  $F < 5$ .

Уровень **1** – значение  $F < 100$  или внутри блока зарегистрировано событие с энергией  $E \geq 1\,000$  Дж.

Уровень **2** – Значение  $F$  находится в диапазоне от **100 до 200** или внутри блока зарегистрировано событие с энергией  $E \geq 5\,000$  Дж.

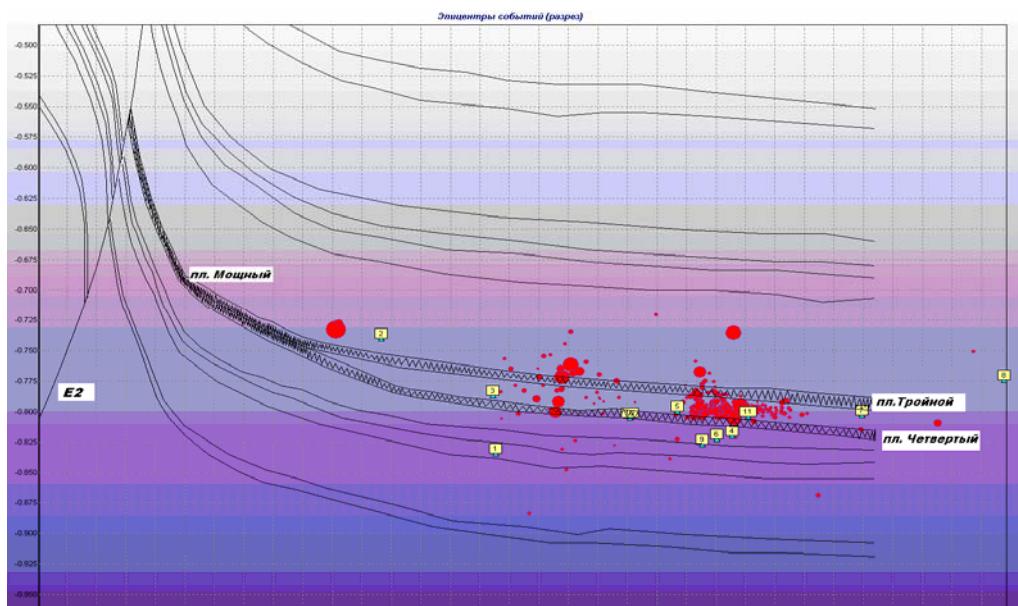
Уровень **3** – Значение  $F$  находится в диапазоне от **200 до 400** или внутри блока зарегистрировано событие с энергией  $E \geq 10\,000$  Дж.

Уровень **4** – Значение  $F$  находится в диапазоне от **400 до 800** или внутри блока зарегистрировано событие с энергией  $E \geq 20\,000$  Дж.

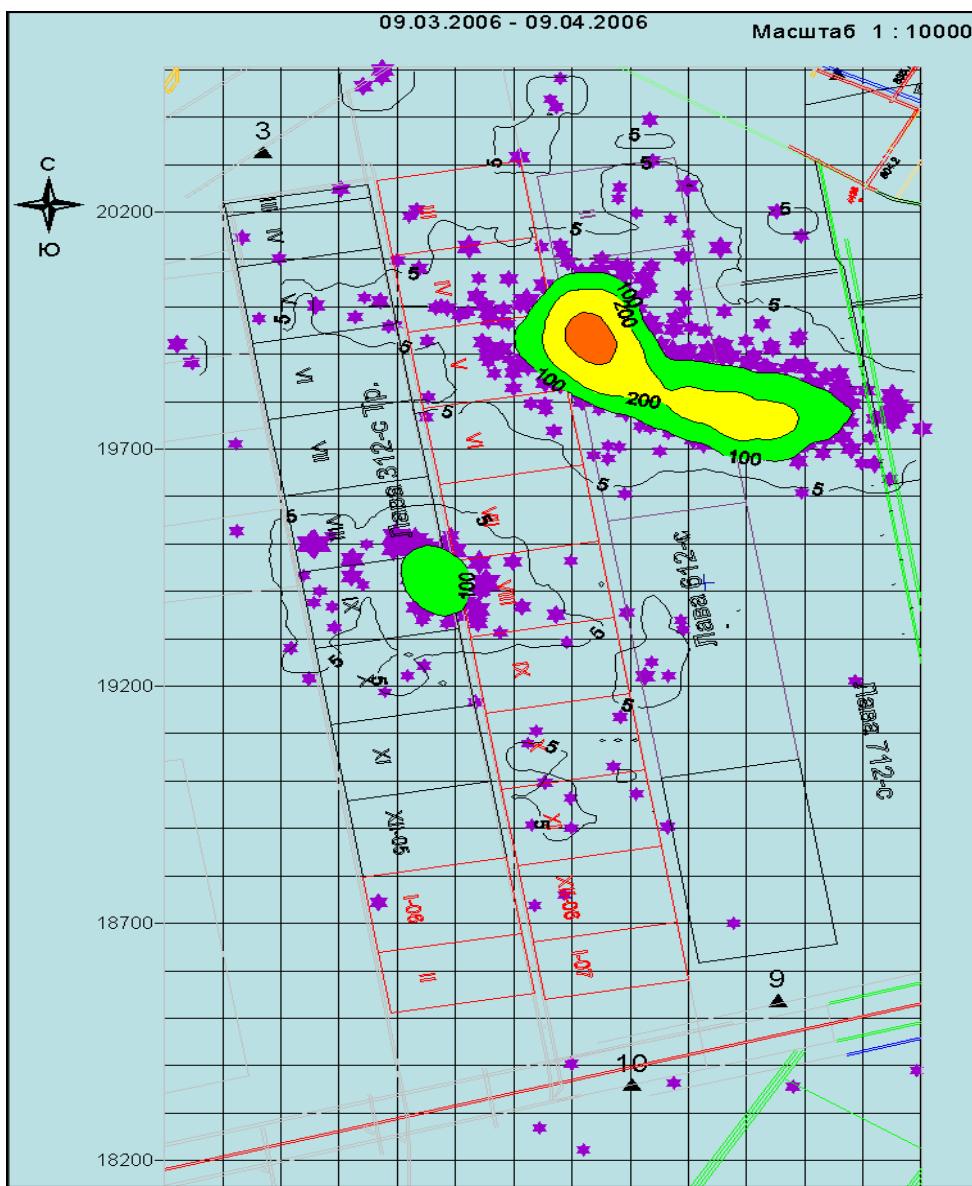
Уровень **5** – Значение  $F$  находится в диапазоне от **800 до 1000** или внутри блока зарегистрировано событие с энергией  $E \geq 30\,000$  Дж.

Уровень **6** – Значение  $F$  превышает **1000** или внутри блока зарегистрировано событие с энергией  $E \geq 35\,000$  Дж.

**Рис. 1. Значения уровней критерия коэффициента удароопасности - параметр  $F$**



**Рис. 2, а. По горизонтам пластов: п<sub>14+13+12</sub> и п<sub>14+13+12+11</sub>**

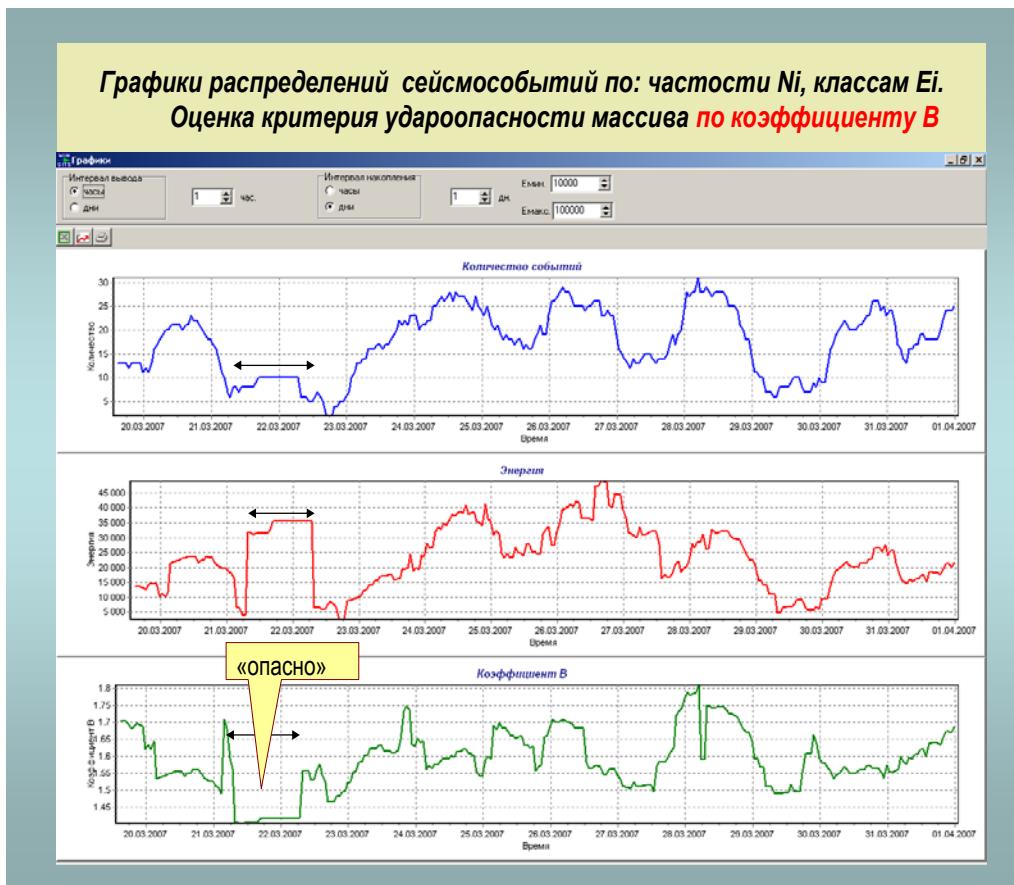


**Рис. 2,-б: По лавам поля шахты «Комсомольская»**

«Комсомольская» получены значения уровней критерия удароопасности (рис. 1). Удароопасными зонами, по нарастанию, считаются области, оконтуренные изолиниями по градации уровней параметра  $F=4-5-6$  (цвет: оранж-красный-синий) и определяются, соответственно, как: «по-

тенциально опасные - опасные-сверхопасные», по проявлению горных ударов.

Положение изолиний выносят на планы горных работ в виде Карт удароопасности участков шахтного поля раздельно по разрабатываемым пластам (рис. 2, а-б).



**Рис. 3. Графики оценки развития зон напряженного состояния массива**

В разработанной «Методике прогноза удароопасности состояния массива...» в качестве критерия прогноза удароопасного состояния массива представлен **коэффициент  $B$** , рассчитанный путем построения кумулятивной зависимости количества событий  $N_k$  от энергетического класса  $E_i$ , произошедших в установленном объеме ( $120 \times 120 \times 120$ ) за выбранный период времен.

По совокупности полученных пар значений  $(N_{ki}, E_{icp})$  рассчитывают коэффициент регрессии  $B$  (тангенс угла наклона) по формулам метода наименьших квадратов для степенной функции ( $Y = N_0 * X^B$ ).

Расчет **коэффициента  $B$**  выполняют по формуле:

$$B = \frac{\sum \ln(E_{icp}) \sum \ln(N_{ki}) - n \sum \ln(E_{icp}) \sum \ln(N_{ki})}{(\sum \ln(E_{icp}))^2 - n (\sum \ln(E_{icp}))^2}$$

Здесь важным условием является, что  $n$  – количество пар  $(N_{ki}, E_{icp})$ , в которых  $N_{ki} > 1$ .

Значения выводятся на конечную дату (рис. 3).

#### Выходы

- Основными параметрами комплексного анализа сейсмической информации, зарегистрированной сейсмостанцией базе системы GITS шахты «Комсомольская», для определения

критерии удароопасного состояния массива с целью разработки «Методики прогноза удароопасного состояния массива...» являются:

- уровень сейсмической активности  $\Sigma N$  - число динамических явлений, происходящих за определенный промежуток времени в фиксированном объеме массива горных пород
- уровень сейсмической энергии  $\Sigma E$  - количество выделившейся энергии за определенный промежуток времени в фиксированном объеме массива горных пород;
- константы закона повторяемости **A** и **B**, которые отражают связь количества динамических явлений  $N$  с величиной их сейсмической энергии  $E$ ;
- максимальный энергетический класс  $K_{max}$  происходящего сейсмического события с энергией  $E$ , измеренной в Джоулях;
- пространственно-временного распределения зон сейсмической активности;
- изменение максимальной плотности сейсмических событий во времени;

- градиент нарастания количества сейсмических событий;
- градиент нарастания суммарной энергии;
- одним из основных характерных параметров процесса сейсмической активности является активность  $N_c$  - число событий за 15-ти дневный интервал времени регистрации;
- за 15 дней сейсмическая активность достаточно представительно отражает процессы, происходящие в массиве горных пород, контролируемом сейсмостанцией на базе системы GITS.

2. На основе «Методики прогноза удароопасного состояния массива в сейсмогеологических условиях поля шахты «Комсомольская» разработаны и утверждены территориальными органами Ростехнадзора РФ: Положение о службе геодинамических наблюдений ОАО «Воркутауголь» и Регламент взаимодействия сейсмостанции с техническим руководством угледобывающего предприятия.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Яковлев Д.В., Исаев Ю.С., Мулев С.Н. и др. «Аппаратно-программный комплекс «GejInfo Trans Sistem (GITS) в системах геодинамического и экологического мониторинга», Междун.конф. «Горная геофизика», 22-25 июня 1998. С-Пб, ВНИМИ.
  2. Ломакин В.С., Мулев С.Н., Скаакун А.П., Цирель С.В., Беляева Л.И., Лопатков Д.Г., Каплуненко А.К. Методика прогноза удароопасного состояния массива, г. С- Пб, ОАО ВНИМИ, 2007 г.
  3. Мендецки А. и др. «Плановый сейсмологический мониторинг на горнодо-
- бывающих предприятиях», Горный институт УРО РАН, май 2007 г.
4. Николаев А.В. Проблемы наведенной сейсмичности.- Сб-к. «Проблемы наведенной сейсмичности». - М.; Наука,1994.- с.5-15.
  5. Ломакин В.С. Региональный прогноз удароопасности на основе сейсмологических исследований. Дис. на соиск. ученыей степени канд. техн. наук. Л.; ОАО ВНИМИ,1984 г. ГИАБ

#### Коротко об авторе

Беляева Л.И. – Главный геофизик, ФЗАО «Северсталь-Ресурс», г. Воркута.