

УДК: 622.831.32

**А.В. Адушкин, Л.И. Беляева, А.И. Гончаров,  
В.И. Куликов**

## **ГЕОДИНАМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ПРИ РАЗРАБОТКЕ УГОЛЬНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ВОРКУТЫ**

*Описана работа станции геодинамического мониторинга SDAS, регистрирующей три компоненты колебаний в одной точке.*

*Ключевые слова: явления геодинамические, сейсмичность, станция SDAS, шахта Комсомольская.*

**Семинар № 3**

---

**Р**азработка Воркутинского угольного месторождения осложнена геодинамическими явлениями (ГДЯ) в массиве горных пород. Для контроля и предупреждения ГДЯ на шахте Комсомольская развернут разработанный ВНИМИ хорошо известный комплекс ГИТС. В него входят 12 датчиков-акселерометров, размещенных в шахтном поле. Частота опроса комплекса 2 кГц и это позволяет получить кинематические параметры ГДЯ и лоцировать очаги ГДЯ с высокой точностью 9 м.

В настоящее время информация от ГИТС дополняется данными станции геодинамического мониторинга SDAS, созданной ИДГ РАН. Станция расположена за городом, в 12 км от шахтного поля Комсомольской. Она состоит из измерительного сооружения (бункер глубиной 6 м, состоящий из двух отсеков расположенных друг над другом) и пункта сбора и первичной обработки сейсмической информации. Внутри бункера на бетонном постаменте установлены 6 сейсμοприемников. Станция оснащена тремя короткопериодными сейсμοприемни-

ками СМ-ЗКВ и тремя широкополостными СМЗ-ОС, блоком сбора и выделения сейсмического сигнала SDAS, системой точного времени GPS, персональным компьютером для архивации и визуализации зарегистрированной информации и системы резервного питания.

Частотный диапазон короткопериодных каналов 0,5—30 Гц данные с этих датчиков регистрируются в памяти компьютера с частотой 100 Гц. Частотный диапазон широкополостного датчика 0,02—20 Гц, его данные запоминаются с частотой 20 Гц. Динамический диапазон 96 дБ. Каждый канал регистрации записывается в память дважды с низким и высоким усилением, что позволяет не пропустить ни сильных, ни слабых сейсмических волн. На каналах высокого усиления чувствительность столь высока, что порог регистрации событий определяется не чувствительностью аппаратуры, а уровнем естественных микросейсмических шумов в данной местности.

Станция SDAS ведет регистрацию трех компонент колебаний в одной

точке. При этом сейсмоприемники адекватно передают колебания земной поверхности, на которой они установлены, так что на сейсмограммах могут быть выделены фазы продольных, поперечных и поверхностных волн. Это позволяет по годографам и поляризации волн локализовать очаги сейсмических событий — совершенно отличная от ГИТС методика лоцирования. Конечно, станция SDAS уступает по точности лоцирования системе ГИТС. Однако у нее другие преимущества. Первое — она лоцирует события во всем угольном бассейне, что не доступно системе ГИТС. Второе — дает динамические параметры ГДЯ. Станция SDAS позволяет напрямую (без упрощений и предположений) определить энергию сейсмических волн или энергетический класс ГДЯ. Энергетика геодинамических процессов в горном массиве является решающей информацией для прогноза катастрофических геодинамических событий. Кроме того, волновые формы позволяют восстановить механизм выделения энергии при ГДЯ (идентифицировать горные удары, внезапные пылегазовые выбросы, технологические взрывы, обрушения в горных выработках и т.д.).

Эксплуатация станции SDAS показала, что она регистрирует все ГДЯ, которые регистрируются системой ГИТС в шахтном поле Комсомольской классом от 3 и выше и вносятся в ее каталог. Также экспериментально было проверено, что она не пропускает заглубленные взрывы массой около 1 кг ВВ на эпицентральной дистанции 10 км. Такие взрывы относятся к событиям класса  $K = 3$ .

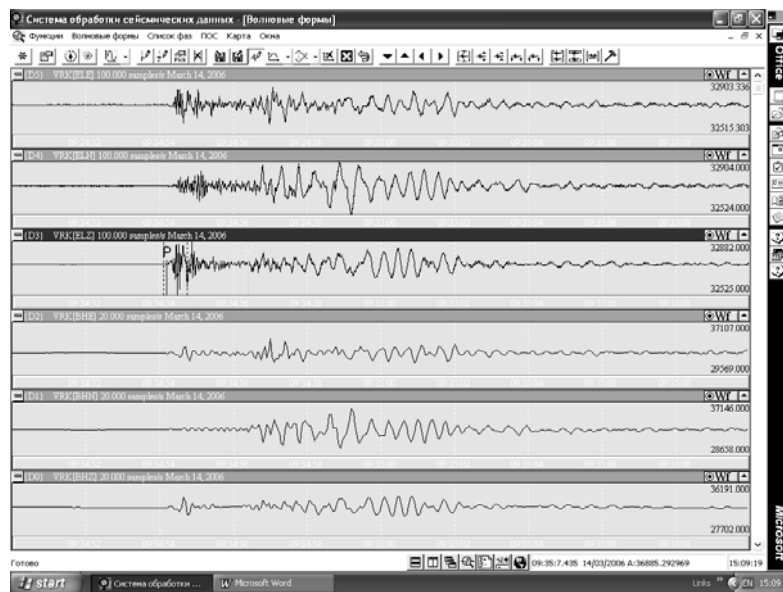
**Региональный годограф.** Лоцирование ГДЯ станцией SDAS подразумевает определение эпицентрального расстояния от очага ГДЯ и азимута на этот очаг. Эпицентральной

расстояние определяется по разности времен прихода продольных, поперечных и поверхностных волн при известном годографе сейсмических волн. Точность определения эпицентрального расстояния зависит от точности построения годографов. Имеются теоретические годографы, которые заложены в систему обработки данных станции SDAS. Однако для повышения точности лоцирования был получен экспериментальный местный годограф.

Для построения регионального годографа был использован взрыв на карьере Юнь-Яга, который проводился 23 мая 2007 г. Взрыв проводился в блоке угля на горизонте +158 м. Блок был разбурен скважинами длиной от 3 до 10 м и диаметром 250 мм. Количество скважин — 65. Сетка скважин 7—8 м. Крепость пород 10—12 по Протодеяконову. Общая масса ВВ в блоке составляла 6800 кг. Скважины были объединены в 4-ре группы по 1700 кг ВВ. Группы подрывались последовательно с замедлением 20 мс.

Регистрация сейсмических колебаний проводилась в трех пунктах: в пос. Советском, на станции геодинамического мониторинга и у главного ствола шахты «Комсомольская». Эпицентральной расстояние от блока до сеймопункта в пос. Советском составляло 1,287 км, от блока до станции геодинамического мониторинга SDAS составляло 12,18 км и от блока до ствола шахты Комсомольская составляло 25,522 км.

В сеймопунктах в пос. Советском и на шахте Комсомольская были установлены мобильные сеймостанции, в состав которых входили три короткопериодных сейсмоприемника СМ-ЗКВ. В каждом пункте регистрации на один из каналов записывались минутные метки времени с приемника



**Рис. 1. Массовый взрыв на карьере Юнь-Яга. Место регистрации — сеймостанция SDAS**

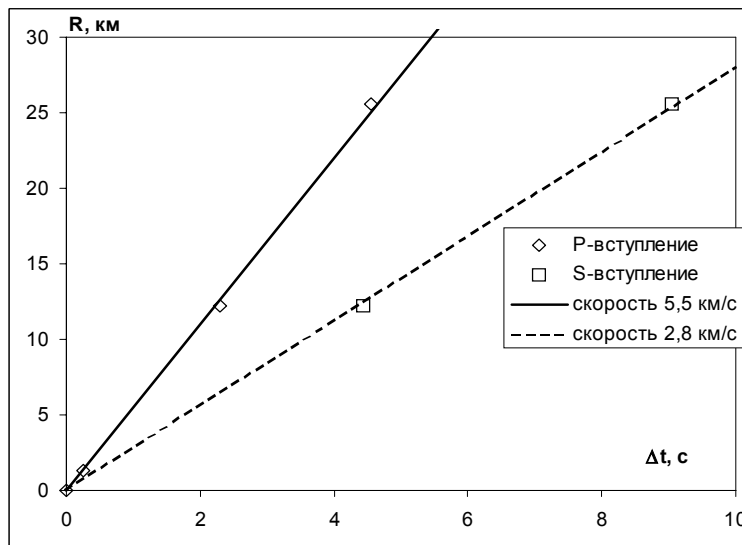
спутниковой системы навигации GPS, что позволило синхронизовать сейсмограммы со всех пунктов регистрации по времени и определить абсолютное время прихода сейсмических волн.

На рис. 1 приведены сейсмограммы взрыва, зарегистрированные сеймостанцией SDAS. Верхние три канала — короткопериодные, нижние три — широкополосные. Амплитуды колебаний по вертикали на короткопериодных каналах составили 0,055 мм/с, по направлению Юг-Север около 0,026 мм/с и по направлению Запад-Восток около 0,04 мм/с. На рисунке четко выделяются вступления продольной волны (метка P) и поперечной волны (метка S).

На мобильных сеймопунктах были получены сейсмограммы аналогичные короткопериодным каналам SDAS. По полученным значениям времен вступления P и S волн были построены времена вступления волн в зависимости от эпицентрального расстояния, так называемые годо-

графы продольных и поперечных волн, которые показаны на рис. 2. Экспериментальные точки лежат на прямых, которым соответствуют скорость продольных волн 5,5 км/с и скорость поперечных волн — 2,8 км/с. Эти значения отличаются в меньшую сторону почти на 10 % от скоростей расчетного регионального годографа. Это является существенной поправкой для обработки данных системы SDAS и позволит повысить точность определения эпицентрального расстояния до нескольких процентов.

Под лоцированием также понимается определение азимута очага. Азимут определяется по поляризации сейсмических волн. В нашем случае азимут строится благодаря тому, что в регистрации участвуют всегда три по разному ориентированных сеймоприемника. Априори, погрешность определения азимута всегда выше, чем эпицентрального расстояния. Но «пристрелка» системы регистрации по



**Рис. 2. Региональный годограф продольных и поперечных волн**

технологическим взрывам позволила существенно уменьшить и эту погрешность.

Азимут очага взрыва на карьере Юнь-Яга, рассчитанный по поляризации волн, и по данным локации очага взрыва с помощью GPS показала удовлетворительную точность системы обработки данных — 10 %.

**Затухание сейсмических волн.**

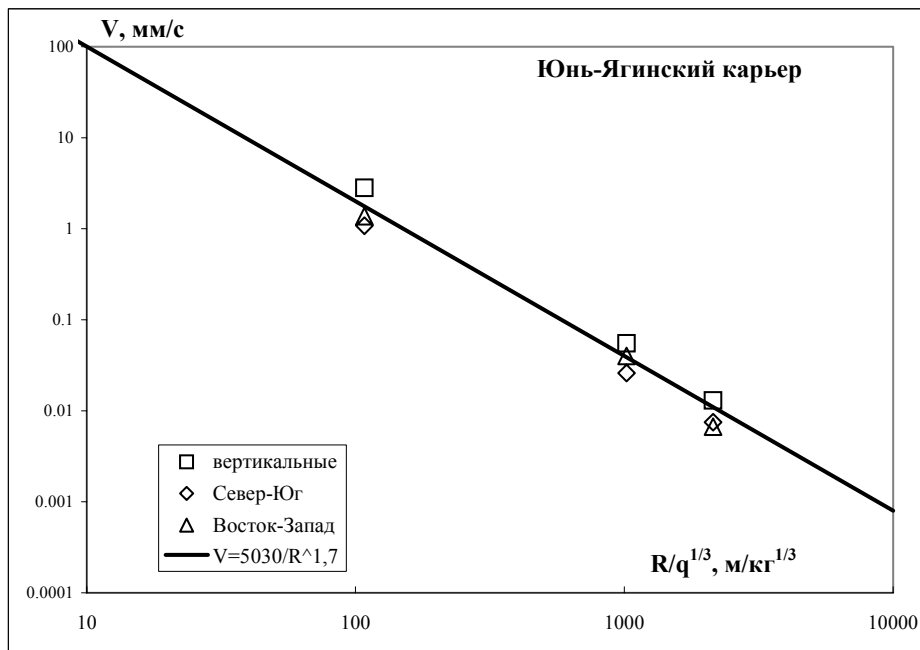
Характер затухания сейсмических волн имеет большое значение для определения энергии источника сейсмических волн. Затухание амплитуды волн связано с геометрической расходимостью фронта волны, с поглощением и рассеянием сейсмических волн. Коэффициенты поглощения и рассеяния определяются свойствами горного массива, его крепостью, трещиноватостью, влагонасыщенностью. Обычно затухание описывают степенной зависимостью, которая объединяет все три механизма затухания. Эту зависимость пишут в виде:

$$V = \frac{A}{R^n}, \tag{1}$$

где  $V$  — амплитуда скорости колебаний,  $R$  — эпицентрального расстояния.

Опыт показывает, что в различных горных породах степень затухания  $n$  изменяется в пределах от 3 до 1, поэтому важно установить степень затухания сейсмических волн, присущую региону, в котором ведется мониторинг ГДЯ. Для этого вновь воспользовались результатами регистрации сейсмических волн от взрыва на карьере Юнь-Яга.

Сейсмический эффект массовых взрывов (амплитуда скорости сейсмических колебаний) зависит от эпицентрального расстояния от заряда до объекта (места регистрации) и от массы заряда в группе (на одну ступень замедления). В 2000—2004 гг. при исследованиях массовых взрывов в железорудных карьерах Курской магнитной аномалии сотрудниками ИДГ была получена зависимость максимальной скорости колебаний от приведенного расстояния, которая описывается формулой [1]:



**Рис. 3. Зависимость амплитуды сейсмозрывных волн от приведенного эпицентрального расстояния**

$$V = A \cdot \left( \frac{q^{1/3}}{R} \right)^n, \quad (2)$$

где  $V$  — скорость колебаний в мм/с,  $q$  — масса заряда в группе (на одну ступень замедления) в кг,  $R$  — эпицентрального расстояние в м.

Естественно было считать, что аналогичная зависимость справедлива для взрывов в карьере Юнь-Яга. На рис. 3 зарегистрированные максимальные скорости колебаний в пос. Советском (точки слева), на станции геодинамического мониторинга SDAS (точки в центре рисунка) и на шахте Комсомольская (точки справа) отложены в зависимости от приведенного расстояния, которое равно эпицентральному расстоянию, деленному на кубический корень из массы заряда в одной ступени замедления. Обработка данных по методу наименьших квадратов позволила установить, что

максимальные скорости колебаний на рис.3 описываются зависимостью:

$$V = 5030 \cdot \left( \frac{q^{1/3}}{R} \right)^{1.7} \quad (3)$$

Эта зависимость приведена прямой линией в двойном логарифмическом масштабе. Из нее следует, что степень затухания амплитуды сейсмических волн с расстоянием в Воркутинском регионе  $n = 1,7$ . Указанная закономерность получена для расстояний 1—25 км и может быть использована для расчета энергии или класса ГДЯ.

**Определение энергетического класса ГДЯ.** В «большой сейсмологии» укоренилось два типа энергетической классификации землетрясений: по потоку энергии сейсмических волн, пересекающих сферу стандартного радиуса с центром в фокусе землетрясения, и по полной энергии

сейсмических волн, излучаемых очагом землетрясения. В первом случае энергию землетрясения характеризуют классом —  $K$ , во втором — магнитудой —  $M$ . В настоящее время построены корреляционные зависимости между классом и магнитудой и поэтому у сейсмологов нет трудностей и какой-либо неоднозначности в характеристике землетрясений при выборе типа энергетической классификации.

Однако практика обработки сейсмограмм показала, что первый подход (определение класса) наиболее продуктивен для случая слабых землетрясений, горных ударов, промышленных химических взрывов, пылегазовых взрывов, обрушений горных выработок, схода горных лавин, гидроразрывов, записанных сеймостанциями на сравнительно небольших расстояниях от очага (до 100 км).

Напомним определение класса [2]. Из общего количества энергии, высвобождаемой в очаге ГДЯ, поддается учету лишь некоторая ее часть, переходящая в энергию упругих волн, или только сейсмическая энергия ГДЯ —  $E$ . Величину ее характеризуют потоком энергии упругих волн через замкнутую сферическую поверхность с центром в очаге ГДЯ за время  $\tau$ , в течение которого происходят колебания.

$$E = \int_0^{\tau} \int_{S_0} (\vec{P} \cdot \vec{n}) ds dt. \quad (4)$$

Здесь  $\vec{P}$  — вектор плотности потока энергии в точках поверхности  $S$ , по которой производится интегрирование,  $\vec{n}$  — единичный вектор нормали к площадке  $ds$ .

Так как вектор потока  $P$  меняется за счет геометрической расходимости волн и за счет затухания амплитуды, для однозначности определения по-

тока энергии в качестве поверхности  $S$  берут референц-сферу радиуса  $R_0 = 10$  км. Тогда выражение (1) можно переписать в виде

$$E = 4\pi \cdot R_0^2 \int_0^{\tau} (\vec{P} \cdot \vec{n}) dt. \quad (5)$$

Вектор Умова равен

$$\vec{P} = \rho \cdot \vec{C} \cdot V_0^2, \quad (6)$$

где  $\rho$  — плотность горного массива,  $C$  — скорость распространения сейсмической волны,  $V_0(t)$  — скорость колебаний в волне на референц-сфере.

Однако сейсмическая волна от ГДЯ обычно регистрируется на некотором расстоянии  $R$ , которое может быть и ближе и дальше этого расстояния. Поэтому зарегистрированную сейсмограмму следует пересчитать с расстояния  $R$  на расстояние  $R_0$ , для чего используется установленный закон затухания амплитуды сейсмической волны (3):

$$V_0(t) = V(t) \cdot \left( \frac{R}{R_0} \right)^{2n}. \quad (7)$$

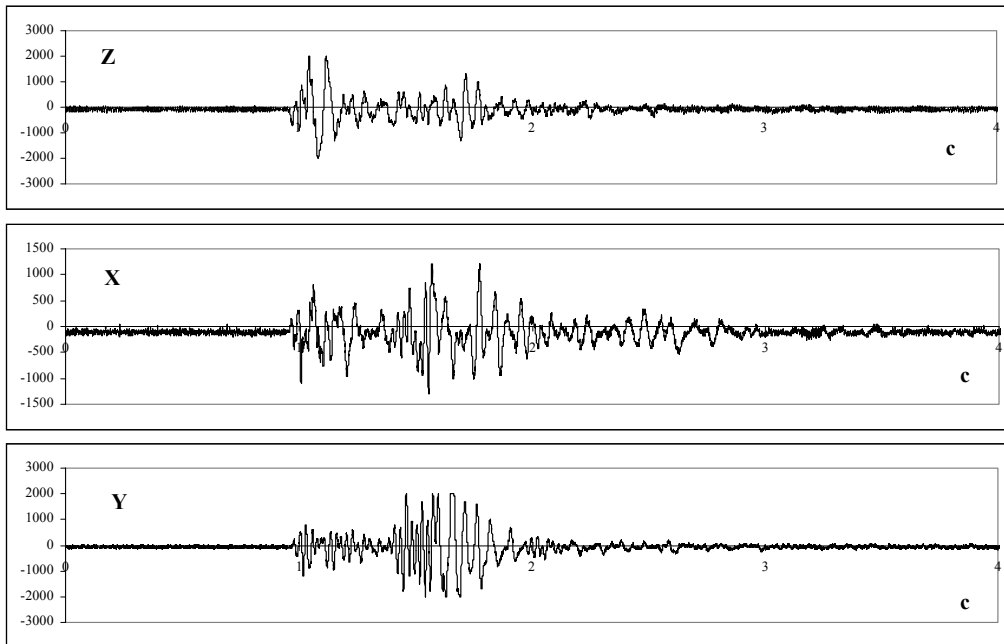
Подставив (7) и (6) в выражение (5), получим:

$$E = 4\pi \cdot R_0^2 \cdot \rho \cdot C \cdot \left( \frac{R}{R_0} \right)^{2n} \int_0^{\tau} V^2 dt \quad (8)$$

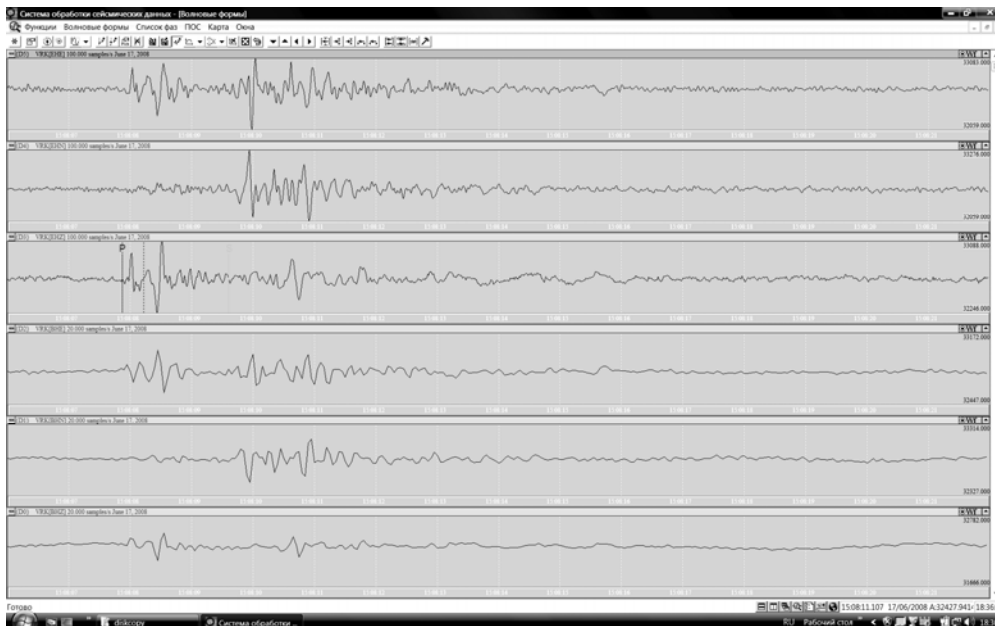
Класс ГДЯ определяется выражением:

$$K = \lg E, \text{ Дж} \quad (9)$$

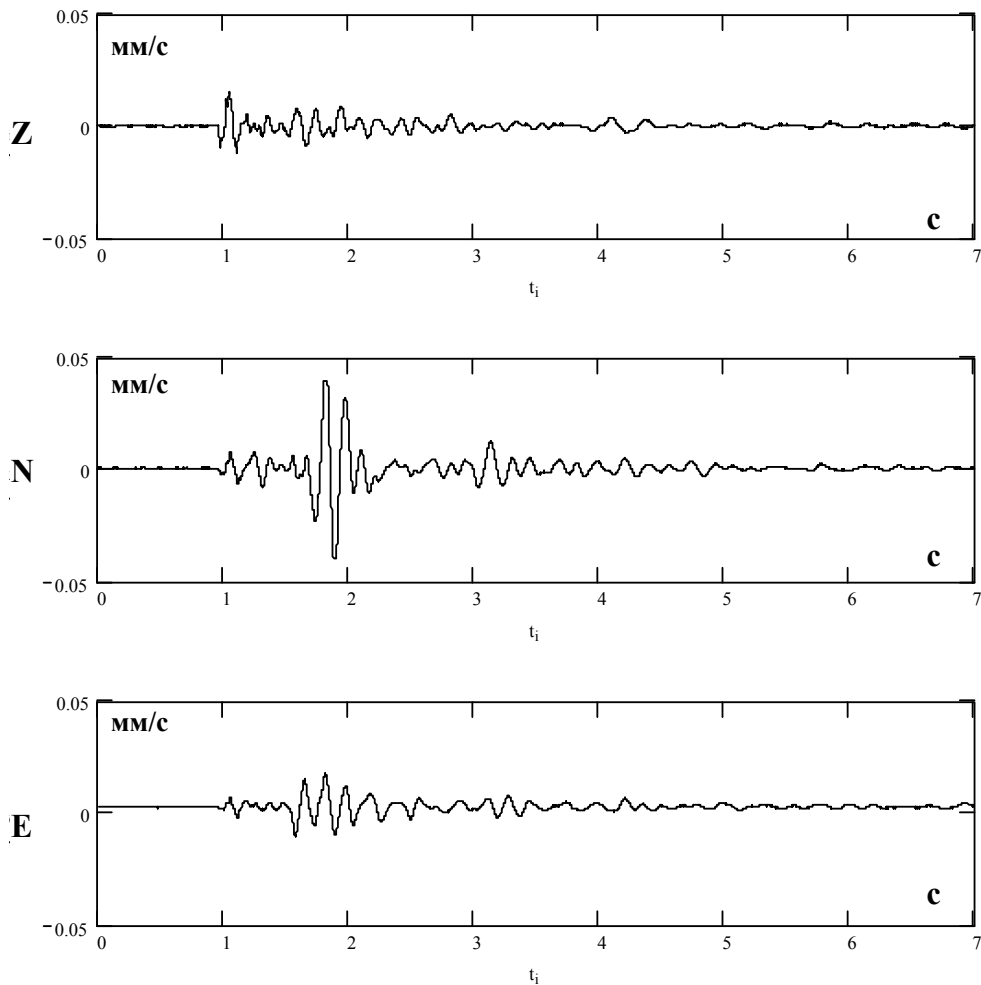
Если в сеймопункте ведется регистрация трех компонент колебаний, то интегралы плотности энергии вычисляют для каждой компоненты отдельно и затем результаты вычислений складывают. Если регистрируется только одна компонента колебаний, то в этом случае результат вычисления интеграла следует утроить, так как компоненты колебаний по трем направлениям отличаются незначительно.



**Рис. 4. Геодинамическое событие на шахте Комсомольская 17 июня 2008 г. 15:08:08 GMT. Система ГИТС, датчик № 1**



**Рис. 5. ГДЯ на шахте Комсомольская, 17.06.2008. 15:08:08,212 GMT**



**Рис. 6. ГДЯ на шахте Комсомольская. 17.06.2008, 15:08:08 GMT. Регистрация в эпицентре события**

Если сейсмоприемники расположены на дневной поверхности, как это имеет место на станции геодинамического мониторинга SDAS, то сейсмические волны приходят на станцию регистрации из глубинных слоев массива и вследствие отражения от свободной поверхности их амплитуды удваиваются. Поэтому в интеграл плотности энергии следует ввести коэффициент  $1/4$ .

Определение класса рассмотрим на примере ГДЯ, произошедшего 17 июня 2008 г. в 15:08:08 GMT. Это событие было зарегистрировано одновременно системой ГИТС, станцией SDAS и мобильной сейсмической станцией, установленной на земной поверхности практически над гипоцентром события. На рис. 4 приведены акселерограммы (в каунтах) этого события, зарегистрированные датчиками системы ГИТС на гипоцен-



тральном расстоянии 2,51 км. Класс ГДЯ в системе ГИТС определяется по длительности акселерограммы и для данного ГДЯ  $K = 3,3$ .

На рис. 5 показаны велосигаммы этого ГДЯ, зарегистрированы станцией SDAS. Гипоцентральное расстояние составляло 9,56 км. Вычислениями по формуле (8) был получен класс  $K = 3,97$ .

На рис. 6 показаны велосигаммы этого ГДЯ, зарегистрированы мобильной станцией на земной поверхности над гипоцентром события. Гипоцентрального расстояния составляло 2,03 км. Вычислениями по формуле (8) был получен класс  $K = 3,9$ .

Как и следовало ожидать, определение класса путем интегрирования велосигамм дает однозначный результат, независимый от размещения станции регистрации. Определение класса ГДЯ по продолжительности колебаний приводит к меньшему значению класса. Поэтому был проведен сравнительный анализ энергии для 53 событий, полученных системой ГИТС —  $e$  и станцией SDAS —  $E$ , который приведен на рис.7. Из него видно, что для слабых ГДЯ с энергией около  $10^3$  Дж энергии в обеих системах близки, однако для сильных ГДЯ энергии отличаются в 100 и более раз. Таким образом, определение энергии ГДЯ по продолжительности колебаний, которое применяется до сих пор на некоторых станциях мониторинга, может привести к значительным погрешностям.

**Геодинамическая активность шахтного поля.** В период опытной эксплуатации системы геодинамического мониторинга ГИТС зарегистрировано 10500 сейсмособытий, сформирован каталог сейсмической активности массива. Статистический анализ выявил прямую зависимость сейс-

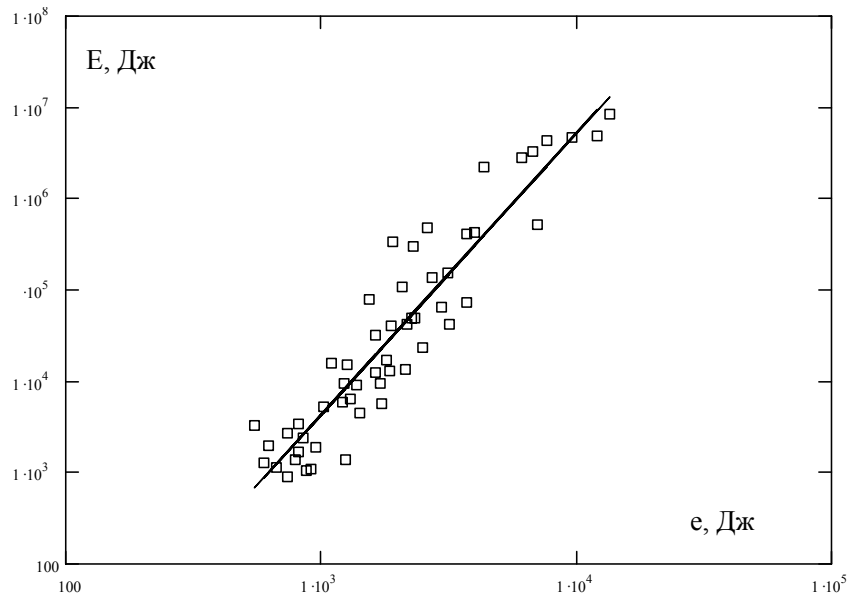
мической активности массива шахтного поля от техногенного воздействия на него очистных работ. На рис.8 показано расположение гипоцентров ГДЯ., которые имеют определенную упорядоченность в пространстве и во времени. Обобщенный анализ циклов горных работ и сейсмичности показал наличие их тесной взаимосвязи. Установлено, что в пределах разрабатываемых участков шахтного поля происходит до 50 % всех событий, 33 % — на прилегающих к горным работам зонам, которые расположены до 200 м вглубь массива. Остальные 17 % событий можно отнести к различным ГДЯ, происходящим в горном массиве вне зоны работ.

**Повторяемость геодинамических явлений.** Это одна из важнейших характеристик сейсмического режима горного массива, как естественного процесса, так и при техногенных воздействиях на массив. Закон повторяемости или закон Гуттенберга-Рихтера пришел из «большой» сейсмологии [3] и успешно применяется при анализе техногенной сейсмичности. Наклон графика отражает соотношение между числом сильных и слабых ГДЯ, уровень графика — суммарную интенсивность ГДЯ в горном массиве.

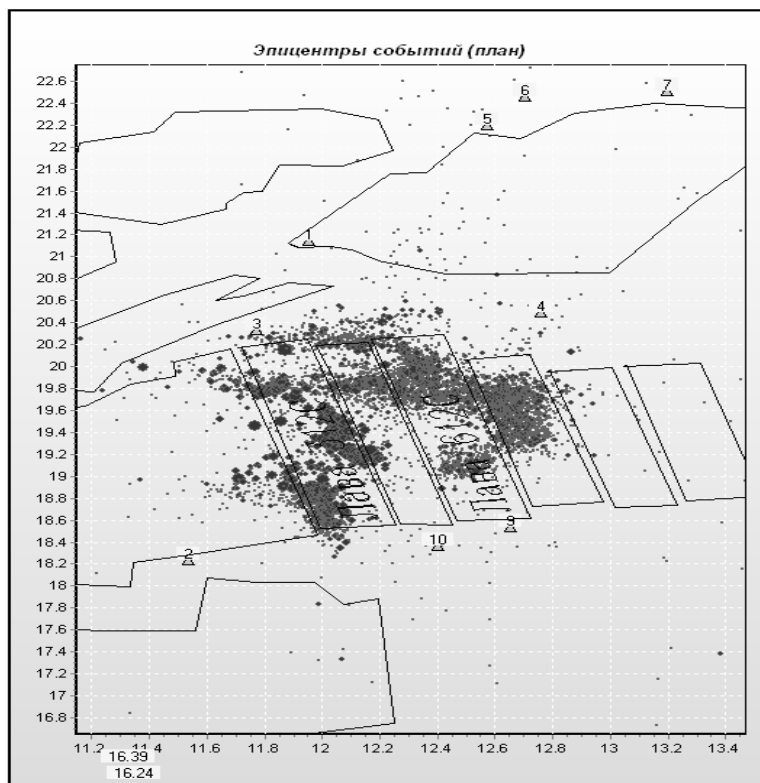
На рис. 9 построен график повторяемости ГДЯ по данным каталога ГДЯ за период с 01.09.2007 г. по 01.09.2008 г., который содержит 4247 событий. График можно описать прямой:

$$\lg N = 4,5 - 0,33 \cdot K . \quad (10)$$

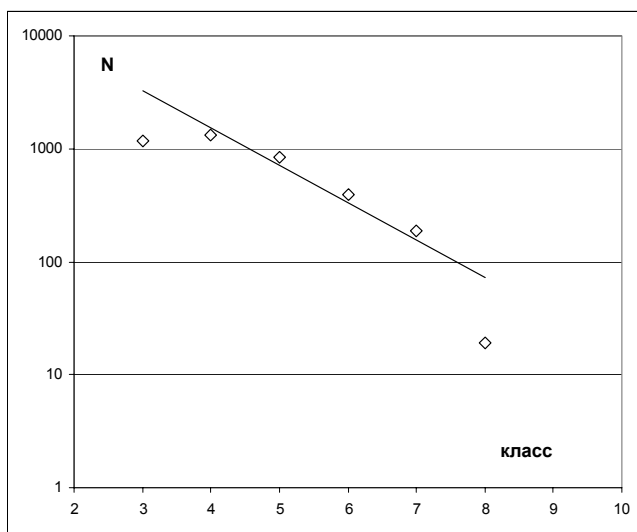
При построении графика повторяемости число событий с  $K = 3$  не учитывалось. Очевидно, число слабых событий с  $K$  от 2,5 до 3,5 в каталоге занижено из-за того, что система регистрации «пропускает» часть таких событий.



**Рис. 7.** Зависимость между энергией ГДЯ, определенной по методике ГИТС ( $e$ ), и SDAS ( $E$ )



**Рис. 8.** Гипоцентры геодинамических событий по данным ГИТС



**Рис. 9. Повторяемость геодинамических явлений**

Отметим особенности графика повторяемости. Угол наклона графика

повторяемости имеет значение 0,33. Это сравнительно низкое значение — в других регионах и других породных массивах угол наклона в 1,5—2 раза выше. Вторая особенность — относительно небольшое число сильных событий с  $K$  от 7,5 до 8,5. График повторяемости претерпевает излом. Накопление данных позволит уточнить эти особенности. Предварительно можно сказать, что эти особенности свидетельствуют о низком уровне напряженно-деформированного состояния горного массива и в нем маловероятны катастрофические ГДЯ класса более 9.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гончаров А.И., Куликов В.И., Минеев В.И., Седоченко В.В. Сейсмическое действие массовых взрывов на открытых и подземных работах. Сб. трудов ИДГ РАН Динамические процессы во взаимодействующих геосферах. Издательство ГЕОС, 2006, С.22—33.

2. Раутиан Т.Т. Затухание сейсмических волн и энергия землетрясений. Труды Института сейсмостойкого строительства и сейсмологии АН Таджикской ССР, выпуск 7, 1960, С. 41—66.

3. Касахара К. Механика землетрясений. Мир, 1985, 264 с. **ИДГ**

#### Коротко об авторах

Адушкин А.В. — кандидат физико-математических наук, ИДГ РАН;  
 Беляева Л.И. — главный геофизик ОАО «Воркутауголь»;  
 Гончаров А.И. — кандидат физико-математических наук, ИДГ РАН  
 Куликов В.И. — кандидат физико-математических наук, ИДГ РАН,  
 e-mail: kulikov@idg.chph.ras.ru

