

МОНИТОРИНГ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ НА ВОРКУТИНСКОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ

А.Н. Беседина, С.Б. Кишкина, В.И. Куликов

В статье рассмотрены результаты регистрации шахтной сейсмичности в районе Воркутинского каменноугольного месторождения. Сдвиговая модель очага сейсмического события в виде мгновенно вскрывающейся круговой трещины применялась для оценки моментных магнитуд зарегистрированных геодинамических событий, которые варьируются от 0,48 до 2,04. Сопоставление статических и динамических параметров очага позволило получить линейную корреляционную зависимость между моментной магнитудой и энергетическим классом событий. Оценка приведенной сейсмической энергии показала аномально сильную зависимость от масштаба события.

Введение

Проведение подземных работ, связанное с деятельностью горнодобывающих предприятий, разработкой месторождений, добычей углеводородов, сопровождается нарушением начального напряженного состояния горных массивов. Перераспределение напряжений приводит к активизации геодинамических явлений (ГДЯ) – возникновению горнотектонических ударов и техногенных землетрясений.

Сейсмические события, связанные с ведением горных работ, отличаются большим разнообразием, которые в целом можно классифицировать как техногенные, возникающие вследствие изменения естественного поля напряжений вблизи участков ведения работ, и природные, связанные со сдвиговым разрушением в ослабленных тектонических зонах на больших расстояниях от горных выработок [Маловичко, 2004].

При изучении шахтной сейсмичности часто используются методы определения параметров очага из «большой» сейсмологии. Сдвиговая модель очага занимает доминирующее положение, однако, в ряде случаев наблюдается несоответствие характеристик наблюдаемой диаграммы излучения и оценок параметров очага, например, завышенные размеры трещин [Маловичко, 2004]. Более универсальным является способ параметризации сейсмического источника с помощью тензора сейсмического момента, который отражает пространственную геометрию неупругой деформации в очаге [Методы..., 2010]. В силу этого для описания характеристик очага сейсмического события надо учитывать как квазистатические (сейсмический момент, моментная магнитуда, характерный радиус очага), так и динамические параметры (сейсмическая энергия, которая определяется динамикой разрыва). Эти параметры используются для оценки приведенной сейсмической энергии на разных масштабных уровнях. Вопрос о существовании самоподобия для больших и малых сейсмических событий является фундаментальным в сейсмологии и исследовался во многих работах [Kanamori et al., 1993; Ide, Beroza, 2001; Domański, Gibowicz, 2008; Baltay et al., 2010; Madariaga, 2010; Кочарян, 2012]. При рассмотрении данных с моментными магнитудами от $-3,6$ до $8,5$ зависимость приведенной сейсмической энергии от масштаба не обнаруживается [Кочарян, 2012]. Однако при анализе только слабой сейсмичности (события с моментной магнитудой меньше 2) наблюдается сильная зависимость этого параметра от масштаба события [Кочарян, 2012]. Авторы [Ide, Beroza, 2001] показали, что масштабный эффект связан с ограниченной частотной полосой регистрирующей аппаратуры. Возможные причины отклонения от закона подобия подробно рассмотрены в [Кочарян, 2012], где отмечено, что для слабых событий главную роль играет зависимость упругих модулей горной породы от масштаба.

В настоящей работе мы провели анализ результатов регистрации слабой сейсмичности на карьерах и шахтах г. Воркуты с целью оценки взаимосвязи динамических и статических параметров сейсмических событий.

Экспериментальные данные

Мониторинг геодинамической активности проводился одиночной станцией ИДГ РАН, установленной на окраине г. Воркуты в специально построенном подземном сооружении на бетонном постаменте на глубине 6 м от поверхности. Станция была построена на базе системы SDAS, ведущей непрерывную трехкомпонентную регистрацию скоростей колебаний в двух частотных диапазонах: короткопериодном с рабочей полосой 0,5–40 Гц и широкопериодном – 0,02–5 Гц. Данное исследование направлено на регистрацию на небольших эпицентральных расстояниях сейсмических сигналов от геодинамических событий, которые имели малые магнитуды, так что анализировались только короткопериодные каналы. Параметры регистрирующей аппаратуры измерительной системы, включающие чувствительность датчика, рабочую полосу частот с учетом фильтра низких частот (ФНЧ) в измерительном канале и частоты оцифровки записи, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Станция	Тип датчика	Чувствительность, В/м/с	Полоса частот с учетом ФНЧ, Гц	Частота оцифровки, Гц
SDAS	СМ-ЗКВ, велосиметр	125	0,5–20	100

Для анализа результатов мониторинга ГДЯ были выбраны данные за период с 20 по 27 декабря 2007 г. Эпицентральные расстояния для данной выборки событий варьируются от 10 до 12 км. В табл. 2 представлены дата и время ГДЯ, а также их эпицентральные расстояния R . Дополнительно приведены значения энергетического класса K ($K = \lg E_s$) рассматриваемых событий, рассчитанного по значениям сейсмической энергии, определенной путем интегрирования квадрата скорости колебаний грунта. Определение динамических параметров развития разрыва – энергии и класса – выходит за рамки данной работы, мы используем уже рассчитанные параметры в качестве исходной характеристики событий. Мы сосредоточимся на определении статического параметра очага (сейсмического момента M_0), который является интегральной характеристикой подвижки по поверхности разрыва.

Таблица 2

№	Дата	Время GMT	R , м	$V_{\max}$, мкм/с	M_w	M_0 , 10^{10} Нм	f_{Br} , Гц	M_{Br} , $Q = 45$	$M_{Br} - M_w$, $Q = 45$	K
1	21.12.2007	02:19	9915	28.7	1.84	73.43	22.9	1.82	0.02	6.44
2	21.12.2007	14:22	10734	4.9	1.48	20.55	34.8	1.37	0.11	5.18
3	21.12.2007	15:43	11744	8.2	1.49	21.88	34.1	1.59	-0.1	5.61
4	21.12.2007	19:27	10721	2.8	1.31	11.43	42.3	1.2	0.11	4.6
5	22.12.2007	12:56	10707	1.1	1.04	4.54	57.4	0.93	0.11	3.96
6	22.12.2007	17:53	12088	10.4	1.58	29.06	31.1	1.69	-0.11	5.52
7	23.12.2007	02:47	11773	11.3	1.65	37.74	28.5	1.69	-0.04	5.47
8	23.12.2007	04:56	11062	31.9	1.98	117.49	19.6	1.95	0.03	6.69
9	23.12.2007	13:01	11305	33.1	1.93	98.65	20.8	1.98	-0.05	6.51
10	23.12.2007	18:30	10711	1.0	0.99	3.83	60.7	0.91	0.08	3.98
11	23.12.2007	20:44	10659	1.2	1.01	4.06	59.5	0.95	0.06	3.96
12	23.12.2007	22:00	10713	24.6	1.90	87.84	21.6	1.84	0.06	6.33
13	23.12.2007	22:02	11159	0.4	0.76	1.71	79.1	0.69	0.07	3.11
14	24.12.2007	03:48	10705	2.7	1.30	11.18	42.6	1.19	0.11	4.86
15	24.12.2007	04:05	9696	12.5	1.56	27.56	31.6	1.55	0.01	5.71
16	24.12.2007	05:05	10579	0.4	0.68	1.31	86.5	0.62	0.06	2.95
17	24.12.2007	05:46	11059	2.7	1.30	11.09	42.7	1.21	0.09	4.69
18	24.12.2007	10:43	10721	1.5	1.09	5.52	53.8	1.02	0.07	4.18
19	24.12.2007	13:03	10782	0.4	0.78	1.85	77.1	0.64	0.14	3.05
20	24.12.2007	14:36	10968	46.7	1.91	92.93	21.2	2.04	-0.13	6.93
21	24.12.2007	15:22	10750	0.3	0.66	1.21	88.7	0.55	0.11	3.13

№	Дата	Время GMT	R, м	$V_{\max}$, МКМ/с	M_w	M_0 , 10^{10} Нм	f_{Br} , Гц	M_{Br} , Q = 45	$M_{Br} - M_w$, Q = 45	K
22	24.12.2007	15:32	10757	0.4	0.68	1.31	86.4	0.64	0.04	3.28
23	24.12.2007	16:48	10618	0.6	0.76	1.75	78.6	0.74	0.02	3.27
24	24.12.2007	17:11	10729	1.8	1.17	7.28	49.1	1.07	0.1	4.35
25	24.12.2007	21:48	10923	0.6	0.84	2.30	71.8	0.76	0.08	3.38
26	24.12.2007	23:03	11100	0.2	0.60	0.99	95.0	0.48	0.12	3.22
27	25.12.2007	00:34	10739	1.1	1.05	4.66	56.9	0.93	0.12	4.13
28	25.12.2007	10:46	9997	0.8	0.90	2.84	66.9	0.78	0.12	3.75
29	25.12.2007	15:58	11082	0.8	0.93	3.18	64.5	0.86	0.07	3.72
30	25.12.2007	19:39	10777	2.1	1.13	6.16	51.9	1.12	0.01	4.62
31	25.12.2007	19:40	10704	1.6	1.02	4.24	58.7	1.03	-0.01	3.64
32	25.12.2007	21:26	10650	0.6	0.83	2.23	72.5	0.75	0.08	3.42
33	25.12.2007	22:32	10733	7.1	1.57	28.64	31.2	1.47	0.1	5.62
34	25.12.2007	23:40	10993	2.0	1.20	7.98	47.6	1.13	0.07	4.69
35	26.12.2007	07:29	10808	4.0	1.40	15.80	38.0	1.31	0.09	5.03
36	26.12.2007	18:42	12193	0.3	0.68	1.30	86.7	0.65	0.03	3.03
37	26.12.2007	22:06	10760	1.2	1.06	4.89	56.0	0.95	0.11	4.17
38	26.12.2007	22:32	10597	0.9	0.94	3.28	63.8	0.86	0.08	3.76
39	27.12.2007	03:20	10705	2.2	1.25	9.54	44.9	1.13	0.12	4.81
40	27.12.2007	03:26	10944	1.2	1.14	6.39	51.2	0.97	0.17	4.09
41	27.12.2007	03:36	10726	2.8	1.31	11.74	41.9	1.2	0.11	4.61
42	27.12.2007	04:24	10753	1.2	1.04	4.55	57.3	0.96	0.08	4.22

Методика обработки и анализа данных

Величина сейсмического момента может быть рассчитана по результатам измерений параметров низкочастотной области спектра сейсмических колебаний следующим образом [Аки, Ричардс, 1983]:

$$M_0 = \Psi^2 \Phi 4\pi \rho C_s^3 R \Omega_0, \quad (1)$$

где Ψ – коэффициент, учитывающий направленность излучения; Φ – коэффициент, определяемый углом выхода луча на свободную поверхность; ρ – плотность; C_s – скорость поперечных волн; R – расстояние от источника до точки наблюдения; Ω_0 – амплитуда «полки» в низкочастотной части спектра смещения, которая оценивается при помощи аппроксимации зарегистрированного спектра одним из модельных.

Предварительная обработка данных заключалась в выделении сейсмограмм ГДЯ на фоне микросейсмического шума и переходе от горизонтальных компонент к радиальной скорости по алгоритму поворота осей на направление максимальной скорости. Далее производилось интегрирование эпюры радиальной скорости и переход к волне смещения. С помощью быстрого преобразования Фурье вычислялась

спектральная амплитуда сигнала в единицах м·с (м/Гц). Полученные характеристики использовались для определения сейсмического момента и магнитуды исследуемого события [Аки, Ричардс, 1983].

Для аппроксимации низкочастотной части спектра смещения мы использовали модель Дж. Брюна [Madariaga, 2010], которая описывает характеристики сигнала, излучаемого при внезапном высвобождении сдвигового напряжения на круговой поверхности в упругом изотропном пространстве. Для этой модели спектр смещения описывается функцией:

$$\Omega(\omega) = \frac{\Omega_0}{1 + \omega^2 / \omega_0^2}, \quad (2)$$

где $\omega = 2\pi f$ – круговая частота; $\omega_0 = 2\pi f_0$, f_0 – угловая частота спектра излучения. Кроме того, угловая частота излучаемого спектра и величина сейсмического момента связаны для рассматриваемой модели следующим соотношением [Беседина и др., 2013]

$$f_0 = 67,33 \cdot C_s M_0^{-0,33}. \quad (3)$$

По значениям сейсмического момента можно оценить моментную магнитуду [Аки, Ричардс, 1983]:

$$M_w = 2/3(\lg M_0 - 9,1). \quad (4)$$

Построение аппроксимирующего спектра согласно модели производилось при минимуме среднеквадратичных отклонений от исходных данных амплитудного спектра смещения. В нашем случае полагали, что среднее значение коэффициента направленности излучения для поперечных волн $\Psi = 0,63$ [Haskell, 1964], коэффициент, учитывающий угол выхода луча на свободную поверхность, $\Phi = 0,5$, плотность среды $\rho = 2700$ кг/м³, а скорость поперечных волн согласно данным профилирования составила $C_s = 2800$ м/с.

Дополнительно по данным амплитуды радиальной скорости и параметрам среды решалась обратная задача и оценивалась магнитуда сейсмического события согласно модели Дж. Брюна. В этом случае спектр скорости смещения грунта на расстоянии R от источника записывается как

$$\dot{\Omega}(s) = \frac{1}{\Psi^2 \Phi 4\pi \rho C_s^3 R} \frac{M_0 \omega_0^2 s}{(s + \omega_0)^2} \quad (5)$$

а эпюра скорости смещения грунта

$$\dot{\Omega}(t) = \frac{M_0 \omega_0^2}{\Psi^2 \Phi 4\pi \rho C_s^3 R} [1 - \omega_0 t] e^{-\omega_0 t} \text{ при } t > 0. \quad (6)$$

Здесь s – комплексная переменная при преобразовании Лапласа; остальные обозначения, используемые в формулах (5) и (6), введены выше.

Результаты и обсуждение

Обработка 42 ГДЯ (см. табл. 2), зарегистрированных системой SDAS, проводилась по описанной выше методике. На сейсмограммах, зарегистрированных на рас-

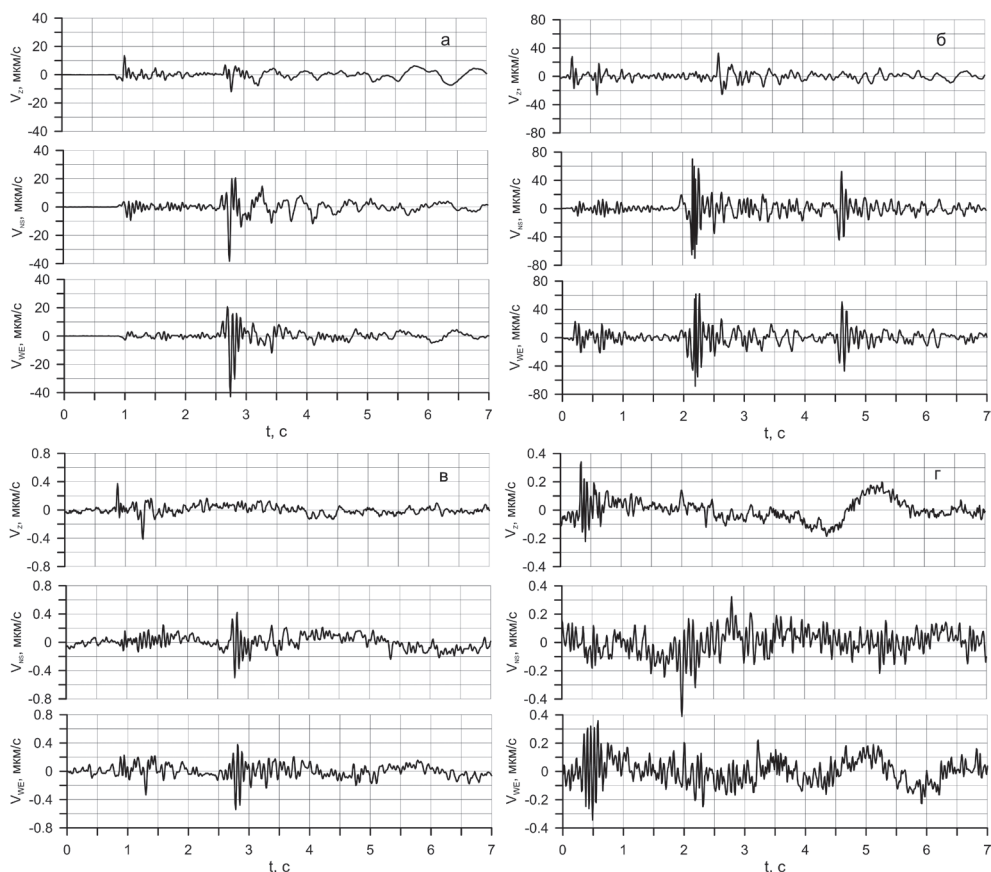


Рис. 1. Сейсмограммы событий №№ 1 (а), 20 (б), 16 (в) и 36 (г) из табл. 2, зарегистрированных системой SDAS

стояниях около 10 км до источника, наблюдается разделение продольных и поперечных объемных волн. Эпюры скорости для событий №№ 1, 20, 16 и 36 из табл. 2 приведены на рис. 1 без предварительной фильтрации. Амплитудные спектры радиальной компоненты семисекундной записи смещения этих событий представлены на рис. 2. События, явившиеся источниками сейсмических сигналов, приведенных на рис. 1, а,б и рис. 2, а,б, имеют магнитуды 1,84 и 1,91 соответственно. На рис. 1, в,г и рис. 2, в,г представлены сигналы от двух событий с одинаковыми магнитудами 0,68. Наличие фильтра в измерительном канале приводит к резкому «обрезанию» сигнала на частотах выше 20 Гц.

Это ограничение не позволяет увидеть спад высокочастотной ветви спектра смещения, которая затухает пропорционально ω^{-2} (что характерно для рассматриваемой модели). По значению «полки» смещения параллельной оси частот (серая линия на рис. 2) определялся сейсмический момент M_0 (1), далее моментная магнитуда M_w (4), а с помощью соотношения (3) рассчитывалась модельная угловая частота спектра f_{Br} (табл. 2). Значения M_{Br} и f_{Br} (табл. 2) находились в виде решения обратной задачи (5, 6) в соответствии с моделью по амплитудному значению скорости V_{max} для среды с затуханием; значение добротности было выбрано постоянным, равным 45.

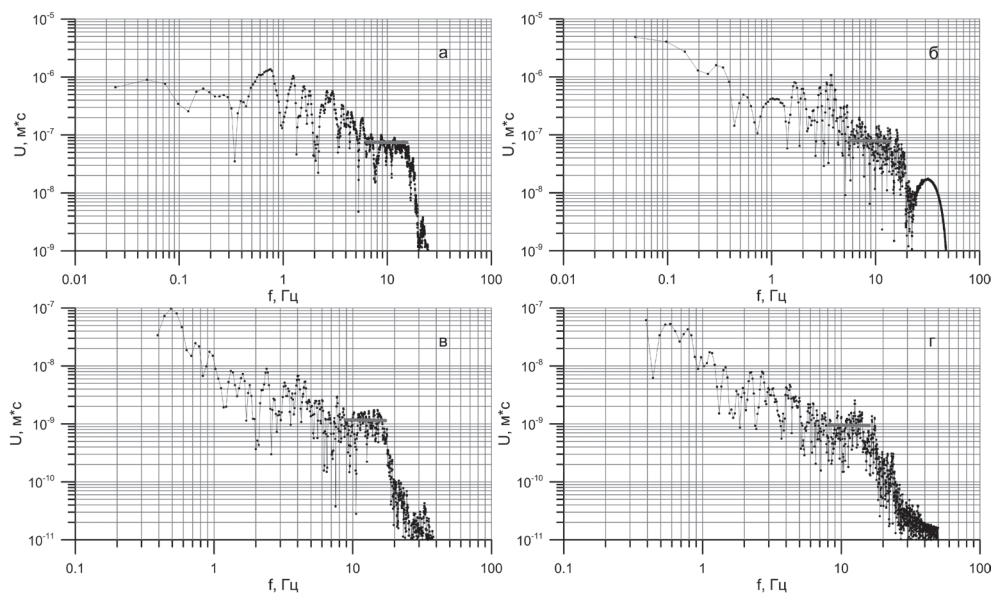


Рис. 2. Амплитудные спектры событий №№ 1 (а), 20 (б), 16 (в) и 36 (г) из табл. 2, зарегистрированных системой SDAS. Серая линия соответствует «полке» смещения

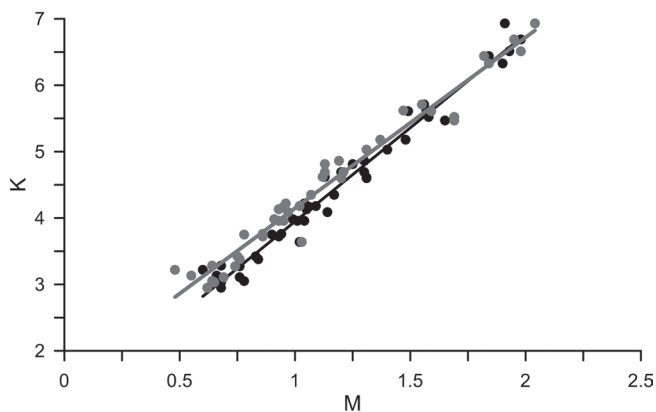


Рис. 3. Зависимость энергетического класса от моментной магнитуды M_w (черные кружки) и магнитуды, рассчитанной по модели Дж. Брюна, M_{Br} при добротности 45 (серые кружки), построенная по данным из табл. 2. Эмпирические зависимости описываются корреляционными функциями $K = 2,82 \cdot M_w + 1,13$ (черная линия) и $K = 2,57 \cdot M_{Br} + 1,58$ (серая линия) с коэффициентом детерминации $R = 0,97$ в обоих случаях

На рис. 3 представлены зависимости энергетического класса от моментной магнитуды M_w и магнитуды, рассчитанной по модели Брюна M_{Br} для среды с добротностью 45, построенные на основе данных из табл. 2. Зависимости хорошо описываются линейными функциями $K = 2,82 \cdot M_w + 1,13$ и $K = 2,57 \cdot M_{Br} + 1,58$ соответственно. Полученные функции, связывающие энергетический класс и магниту-

ду сейсмического события, являются характеристикой среды и могут быть использованы при мониторинге локальной сейсмичности в области расположения шахт г. Воркуты. Отличие в значениях магнитуд M_w и M_{Br} сильнее выражено для более слабых событий. На рис. 4. показано отклонение моментной магнитуды, определенной по спектру смещения, от расчетной магнитуды согласно модели Дж. Брюна по амплитудному значению скорости $V_{\max}$ с учетом добротности среды, равной 45. Разница магнитуд находится в пределах от $-0,2$ до $0,2$ для всех событий из выборки. Подобная точность при определении магнитуд сейсмических событий является допустимой. На основании значений статических и динамических параметров очага для рассматриваемой выборки событий оценена нормализованная сейсмическая энергия E_s/M_0 , величина которой лежит в диапазоне 10^{-7} – 10^{-5} (рис. 5).

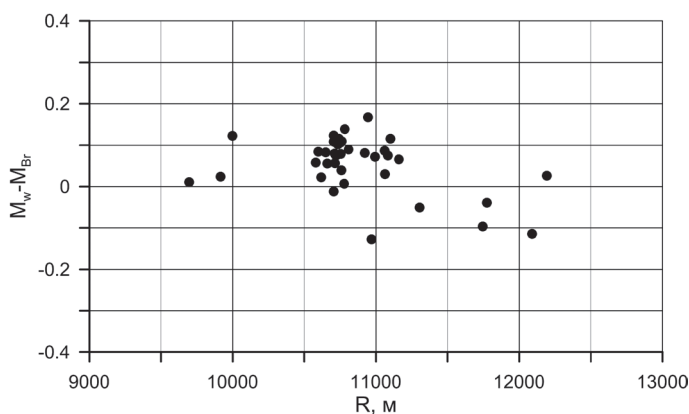


Рис. 4. Разница моментной магнитуды M_w и магнитуды, рассчитанной по модели Дж. Брюна, M_{Br} , при добротности среды 45, построенная по данным из табл. 2, в зависимости от эпицентрального расстояния

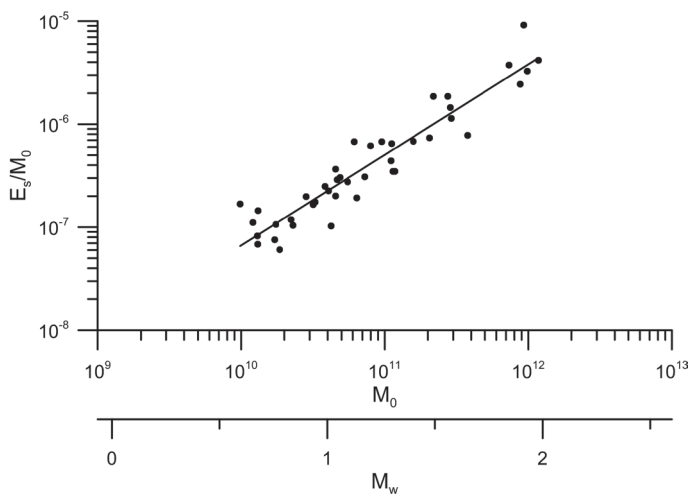


Рис. 5. Зависимость приведенной сейсмической энергии от масштаба события, линия – наилучшее приближение данных зависимостью $E_s/M_0 = 1,08 \cdot M_0^{0,88}$ с коэффициентом детерминации

Согласно [Кочарян, 2012] скорость распространения разрыва будет на порядок ниже скорости поперечных волн, и событие в этом случае можно считать «медленным». При этом масштабный эффект сильно выражен $E_s/M_0 \sim M_0^{0.88}$ (рис. 5). Такие аномальные зависимости от масштаба в литературе не отмечаются, но на месторождении в Канаде (события с магнитудами от $-2,2$ до $-0,4$) [Urbancic, Young, 1993] и при мониторинге наведенной сейсмичности в Китае (магнитуды $0,1-4,2$) [Hua et al., 2013] получены одинаковые сильные зависимости для масштабных соотношений $E_s/M_0 \sim M_0^{0.63}$.

Выводы

Мы рассмотрели результаты мониторинга шахтной сейсмичности с энергетическим классом от 2,95 до 6,93. Для зарегистрированных геодинамических событий произведена оценка статического параметра очага – сейсмического момента, что позволило установить эмпирические корреляционные зависимости между энергетическим классом и магнитудой сейсмических событий. При этом аномально сильно выражен масштабный эффект.

Работа выполнена при поддержке проекта РФФИ (проект № 13-05-00950).

Литература

- Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология: Теория и методы. Т. 1, 2. М.: Мир, 1983.
- Беседина А.Н., Кабыченко Н.В., Кочарян Г.Г. Особенности сейсмического мониторинга слабых динамических событий в массиве горных пород // ФТПРПИ. 2013а. № 5. С. 20–36.
- Кочарян Г.Г. Об излучательной эффективности землетрясений (пример геомеханической интерпретации результатов сейсмологических наблюдений) // Динамические процессы в геосферах: сб. научн. тр. Вып. 3. М.: ГЕОС, 2012.
- Маловичко Д.А. Изучение механизмов сейсмических событий в рудниках Верхнекамского месторождения калийных солей: дисс. канд. физ.-мат. наук: 25.00.10 / Дмитрий Алексеевич Маловичко; Москва, ИФЗ РАН. М.: 2004. 178 с.
- Методы и системы сейсмореформационного мониторинга техногенных землетрясений и горных ударов. Т. 2 / В.Н. Опарин и др.; отв. ред. Н.Н. Мельников. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2010. (Интеграционные проекты СО РАН; вып. 25).
- Baltay A, Prieto G., Beroza G.C. Radiated seismic energy from coda measurements and no scaling in apparent stress with seismic moment // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. B08314.
- Domański B., Gibowicz S. Comparison of source parameters estimated in the frequency and time domains for seismic events at the Rudna copper mine, Poland // Acta Geophys. 2008. V. 56. P. 324–343.
- Haskell N.A. Total energy spectral density of elastic wave radiation from propagating faults // Bull. Seism. Soc. Am. 1964. V. 54. P. 1811–1841.
- Hua W., Chen Z., Zheng S. Source parameters and scaling relations for reservoir induced seismicity in the Longtan reservoir area // Pure and Applied Geophysics 2013. V. 170(5). P. 767–783. <http://dx.doi.org/10.1007/s0002401204597>.
- Ide S., Beroza G. Does apparent stress vary with earthquake size? // Geophys. Res. Lett. 2001. V. 28.

Kanamori H., Hauksson E., Hutton L. K., Jones L.M. Determination of earthquake energy release and M_L using TERRAScope // Bull. Seismol. Soc. Am. 1993. V. 83. P. 330–346.

Madariaga R. Earthquake scaling laws // Extreme Environmental Events: Complexity in Forecasting and Early Warning. Robert A. Meyers ed. Springer. 2010. P. 364–381.

Urbancic T.I., Young R.P. Space-time variations in source parameters of mining-induced seismic events with $M < 0$ // Bull. Seismol. Soc. Am. 1993. V. 83. P. 378–397.