

А.Ф. Булат, академик НАН Украины,
С.Ю. Макеев, канд. техн. наук,
А.Н. Каргаполов, вед. инж. (ИГТМ НАН Украины)
И.А. Ефремов, канд. техн. наук, П.Г. Ставицкий, горный инженер
(АП «Шахта им. А.Ф. Засядько»)

Б.М. Деглин, канд. техн. наук (ООО «Звукоуправляющая аппаратура»)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ МАССИВА МНОГОКАНАЛЬНОЙ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ

Приведено результати виконаних на шахті ім. О.Ф. Засядька експериментальних досліджень по реєстрації і локації сейсмічних явищ, що виникають при відробітку східного крила ухильного поля вугільного пласта m_3

EXPERIMENTAL RESEARCHES OF ROCK ARRAY STATE BY MULTICHANNEL SEISMIC ACOUSTIC SYSTEM

The results of the experimental researches executed on a mine A.F. Zaszadko on registration and location of the seismic phenomena which arise up at working off the east wing of the slope field coal layer m_3 are demonstrated

Работы на больших глубинах чрезвычайно осложнены отсутствием достаточных знаний о структуре и свойствах горных пород, которые часто насыщены газом, тектонически нарушены и находятся в условиях высоких сжимающих напряжений. Особую угрозу представляют динамические и газодинамические проявления горного давления.

Для прогнозирования этих опасных динамических явлений необходимо применение эффективных методов оценки и контроля геомеханического состояния массива горных пород.

Использование сейсмоакустических колебаний в качестве источника информации о напряженно-деформированном состоянии (НДС) породного массива в окрестности горной выработки и его структурной неоднородности является, в настоящее время, наиболее перспективным направлением при неразрушающих исследованиях. Акустическая эмиссия (АЭ) сопровождает образование локальных разрывов в массиве горных пород в процессе перераспределения напряжений в массиве, затронутом добычей полезного ископаемого.

Горные работы нарушают равновесие напряжений в массиве, а акустическая эмиссия является спутником пластических деформаций в окрестности горной выработки и сопровождает процессы перераспределения напряжений в массиве горных пород. Возникающие в структурно неоднородном породном массиве акустические колебания содержат информацию об очаге события АЭ, а также о состоянии и свойствах среды распространения. Эти сигналы могут быть использованы для оценки опасности газодинамических явлений.

Отклик породы на изменение состояния горного массива проявляется в импульсах различной частоты и энергии, исходящих из зарождающихся очагов будущих разномасштабных дефектов. Задачи исследований состоят в достоверной регистрации и правильной интерпретации полученных сигналов. Поэтому

требования к качеству и надежности результатов геофизических исследований возрастают с каждым годом.

Из арсенала методов горной геофизики для условий разработки угольных пластов на больших глубинах в сложных горно-геологических условиях наибольшее практическое распространение получили следующие методы прогноза и контроля:

- метод по параметрам акустического сигнала с применением аппаратуры передачи сейсмического сигнала (АПСС);

- метод вызванной акустической эмиссии аппаратурой ЗУА.

Эти методы признаны нормативными [1, 2] и применяются на шахтах Украины. Но прогнозирование в сложных горно-геологических условиях с помощью данных методов не всегда удовлетворяет современным требованиям.

Дальнейшее их развитие и совершенствование возможно на основе привлечения новых идей и решений, базирующихся на учете особенностей распространения волн в реальных средах. При регистрации и анализе волн эмиссионного происхождения должна накапливаться информация о деформационных процессах, происходящих в пласте, которая позволяла бы объективно оценивать сложное напряженное состояние угольно-породной среды. Благодаря этой информации появляется возможность правильно и своевременно реагировать на любую экстренную ситуацию.

Точность прогнозирования удароопасных ситуаций в угольных шахтах при непрерывном контроле сейсмоакустической активности может быть значительно повышена, если, будет произведен не только количественный учет сигналов в обрабатываемом угольном пласте за единицу времени, но также определены координаты и энергия источников зарегистрированных сигналов.

В последние годы на шахте им. А.Ф. Засядько сейсмоакустическую информацию получали с помощью звукоулавливающей аппаратуры «ЗУА-98» [3], предназначенной для наблюдений акустической эмиссии в пределах очистного забоя двумя каналами регистрации. Эта аппаратура разработана таким образом, что большая часть информации поступает в пределах слышимых человеком звуковых частот. Но акустические волны звукового диапазона испытывают в угленосной толще значительное поглощение и рассеяние, поэтому радиус действия датчиков аппаратуры «ЗУА-98» составляет не более 100-150 метров для условий Донбасса. Для того чтобы охватить пространство, сравнимое по размерам с величиной шахтного поля, необходима система с большим количеством датчиков, позволяющая определять координаты очагов событий АЭ.

Эта задача может быть решена на основе внедрения многоканального сейсмоакустического метода контроля изменения напряженного состояния углепородного массива, основанного на комплексном анализе колебаний, генерируемых массивом или горным оборудованием [4].

С конца 2008 г. на шахте введена в действие сейсмоакустическая система, разработанная польской компанией EMAG [5], включающая в себя датчики вибрации массива (геофоны), размещенные в горных выработках, каналы передачи сигналов и наземные регистрирующие модули. Данная система предна-

значена для регистрации микросейсмических явлений и определения их энергии и координат эпицентра. Рабочий диапазон частот составляет от нескольких герц до 150 Гц, что обеспечивает регистрацию сейсмических явлений и возможность контроля поведения массива горных пород в пределах шахтного поля. Датчики расставлены в плоскости пласта m3 таким образом, чтобы контролировать массив горных пород в зонах выработок 18 восточной лавы, 18 конвейерного штрека, восточной уклонной лавы и др. Данная расстановка позволила охватить представительными наблюдениями шахтное поле общей площадью около 10 км². На участке установки датчиков пласт m3 залегает на глубине 1000-1400 м, угол падения 7-100 [6].

Сейсмоакустическая система настроена таким образом, что все датчики работают в режиме ожидания геодинамического явления. Типичная картина сейсмического события, записанная 7 датчиками, приведена на рис. 1. Его начало и окончание отмечены на каждой сейсмограмме вертикальными линиями. В заголовке окна визуализации приведено время события, синхронизированное с часами GPS. Номера датчиков отражены в правой части окна напротив каждого из графиков.

Для дальнейшего повышения точности определения координат требуется установка дополнительных датчиков выше и ниже пласта m3. Но так как работы на смежных пластах временно приостановлены, выполнить это условие невозможно. Продолжение подключения новых датчиков возобновится по мере развития горных работ с тем, чтобы по возможности шире охватить участки, на которых планируется вести добычу угля.

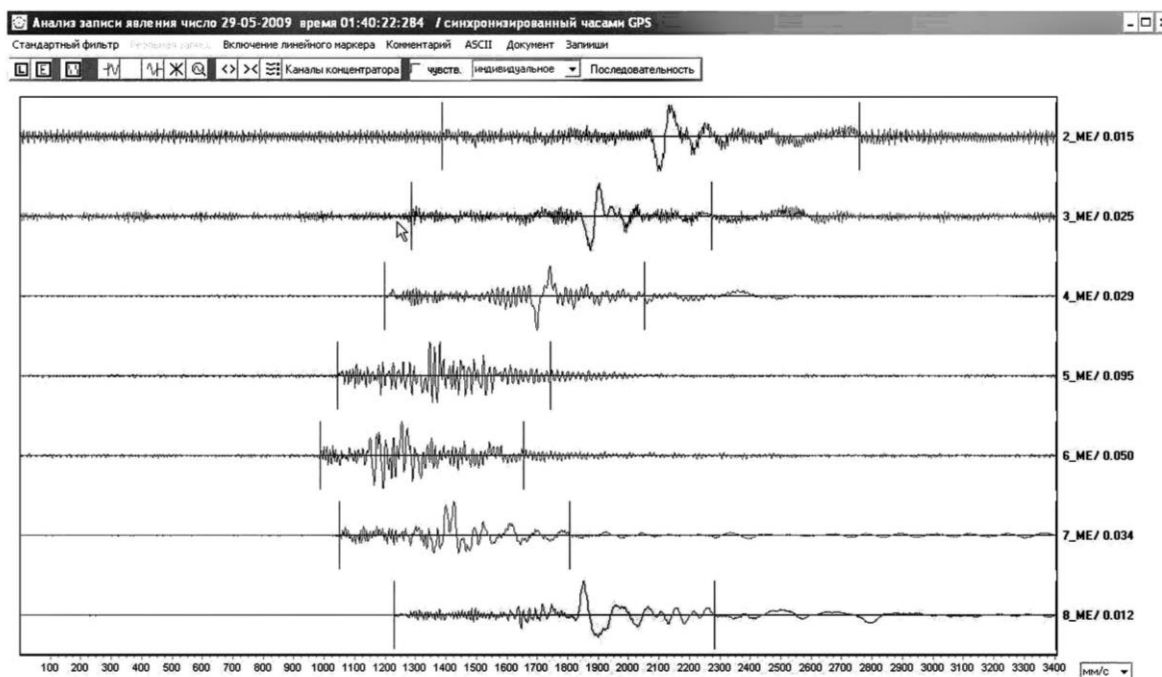


Рис.1 – Типичная картина сейсмического события, зарегистрированная на шахте им. А.Ф. Засядько 29.05.2009 г. в 01:40:22:284

Действующей системой мониторинга регулярно фиксируются небольшие локальные сейсмические события. Записи событий, как правило, содержат пакеты продольных (P) волн и более интенсивные пакеты поперечных (S) волн. Частотный диапазон зарегистрированных сигналов составляет от 10 до 130 Гц.

Обработка сейсмических записей включает определение положений очагов, оценку выделившейся сейсмической энергии, а также идентификацию типа явления (технологический взрыв, естественное событие).

Операторами выполняется расчет координат эпицентра и энергии явления. Для определения местонахождения очагов сотрясений используются следующие методы:

- стандартный метод – по разности времени первых вступлений волны P или других сейсмических волн на разные измерительные пункты;
- метод окружностей;
- метод, базирующийся на временной разнице приходов на данный пункт приема двух разных типов волн (чаще P-S).

Анализ использования операторами каждого из методов показал, что когда событие регистрируется тремя датчиками, используется метод окружностей (65% от общего числа), когда имеются сейсмограммы с четырех и более датчиков – применяют стандартный метод (35 %) и практически не используется третий метод ввиду его сложности.

Расчет энергии чаще всего выполняется интегральным методом.

Ввиду того, что по техническим причинам конфигурация системы сейсмомониторинга на шахте близка к планарной (сейсмоприемники установлены в плоскости пласта m_3), непосредственная оценка вертикальной координаты очагов явлений по временам прихода фаз объемных волн затруднена. В связи со значительной неоднородностью подработанной угленосной толщи звукопроводящие свойства на путях распространения сейсмических волн могут сильно отличаться. Это приводит к ошибкам определения проекций координат очагов событий, уменьшить которые возможно только с помощью дополнительных датчиков. В настоящее время приходится решать вопрос о размещении датчиков в породах окружающих пластов.

В среднем в течение месяца на шахте регистрируется 300-400 явлений с относительно небольшими сейсмическими энергиями от 70 до 200 тысяч условных единиц. На основе полученных результатов наблюдений составляется база данных, которая в дальнейшем будет использована для изучения сейсмического режима шахты, выделения активных зон и динамики их развития.

В таблице 1 приведен список наиболее значительных событий, расположенных по мере уменьшения энергии, зарегистрированных системой с апреля по ноябрь 2009 года. Выполненный анализ мест расположения зарегистрированных системой сейсмических событий показывает, что в основном самые значительные из них располагаются позади движущейся 18 восточной лавы и в районе восточной уклонной лавы (рис. 2). Это говорит о том, что происходит расслоение и проседание кровли, в результате которого и излучаются сейсмоаку-

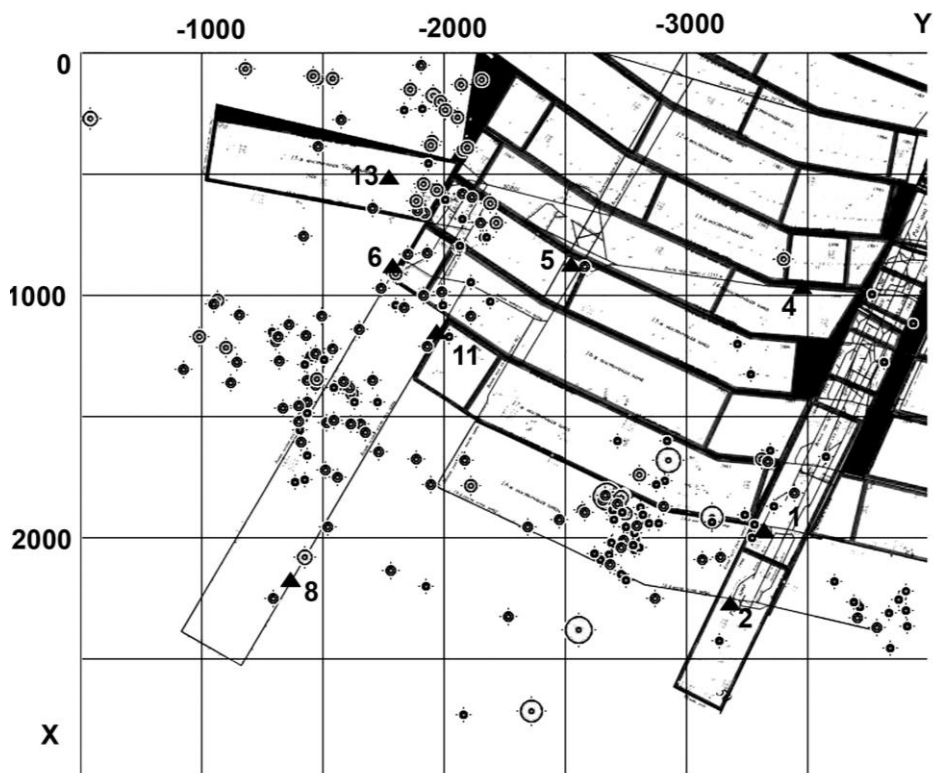
стические импульсы. Диаметр кружка на рисунке свидетельствует о величине относительной энергии события.

Таблица 1 – Список значительных сейсмических событий, зарегистрированных на шахте А.Ф. Засядько с 17.04.2009 г.

Время регистрации	Смена	Выработка	Координаты явления			Относительная энергия
			X	Y	Z	
21.04.09 13:36	1	12	1834	-2733	-1112	302011,51
15.09.09 6:27	1	12	1761	-3476	-1112	286616,71
06.05.09 8:28	1	12	1838	-2730	-1112	281159,02
31.07.09 19:57	2	16	200	-1741	-1038	220782,11
08.09.09 3:53	3	13	2265	-3935	-1127	220396,08
22.10.09 20:04	2	16	85	-2343	-1057	213425,28
08.09.09 7:04	1	13	2300	-3970	-1127	186437,74
13.11.09 6:21	1	16	296	-1981	-1180	184649,81
21.11.09 17:24	2	16	11	-2176	-941	162531,96
07.10.09 6:02	1	16	815	-857	-1005	158319,18
30.07.09 6:57	1	16	536	-1710	-1038	132805,96
22.08.09 3:26	3	16	651	-1957	-358	129713,53
18.11.09 6:03	1	16	327	-2027	-1050	115057,88
14.08.09 16:19	2	19	2077	-1145	-1144	110316,78
27.05.09 15:36	2	16	178	-1953	-1030	105471,44
31.08.09 15:29	2	16	121	-1938	-1038	98757,73
22.07.09 17:27	2	18	838	-2152	-358	97700,31
08.09.09 5:37	3	21	2073	-3506	-1112	91943,86
12.11.09 1:47	3	16	253	-2251	-1082	91651,66
21.10.09 20:30	2	16	57	-2252	-1907	83490,06
16.10.09 18:55	2	12	1926	-3003	-1112	79395,10
06.06.09 3:29	3	16	71	-1182	-1038	77535,80
15.09.09 20:30	2	12	2230	2856	-1078	71930,23
25.05.09 18:43	2	9	918	-1803	-1030	71107,53
08.07.09 18:42	2	16	226	-1969	-1038	69833,65
18.07.09 4:10	3	16	182	-1989	-1038	69046,25
19.11.09 19:56	2	16	424	-2142	-589	67473,49
19.10.09 21:27	2	16	12	-1980	-1005	65618,61
13.10.09 4:03	3	22	300	-2069	-1005	65437,59
20.10.09 22:42	3	16	351	-2138	-1005	62228,43
31.10.09 16:19	2	16	135	-1874	-358	62083,49
14.11.09 0:04	3	23	349	-2213	-1084	60512,57
30.09.09 18:19	2	16	165	-2652	-1057	59627,35
10.06.09 18:54	2	19	1023	-1066	-1617	59179,92
04.08.09 5:24	3	16	57	-1623	-358	58464,03
06.11.09 20:56	2	16	97	-2129	-358	58415,71
15.09.09 2:13	3	16	223	-2180	-1038	56379,07
13.09.09 7:04	1	6	595	-2136	-358	54890,24
11.09.09 18:05	2	16	242	-2456	-1038	52103,65

В целом расположение центров сейсмических событий имеет определенную упорядоченность в пространстве и во времени. Обобщенный анализ циклов

горных работ и сейсмичности показал наличие их тесной взаимосвязи. При оценке влияния горных работ на сейсмоакустическую активность установлено, что в пределах разрабатываемых участков шахтного поля происходит до 70 % всех событий, а на зонах, прилегающих к горным работам до 200 м – 20 % событий. Остальные можно отнести к различным динамическим процессам, происходящим в массиве.



▲ – месторасположение и номера сейсмометров

Рис.2 – Картина расположения эпицентров сейсмических событий, зарегистрированных на шахте им. А.Ф. Засядько

Коэффициент преобразования энергии колебаний массива в электрический сигнал для каждого датчика необходимо уточнять на месте установки. Только при этом условии можно полагаться на достоверность результатов расчета энергии микросейсмического события. Польские специалисты решают эту задачу, используя национальную сеть сеймостанций, датчики которой тарифованы по правилам международной сети сейсмических станций.

Поскольку такой возможности в АП «Шахта им. А.Ф. Засядько» нет, с целью тестирования сейсмоакустической системы была выполнена тарифовка датчиков путем измерения энергии взрывов. Ближайшие к зоне установленных датчиков плановые взрывные работы проводились в восточном полевом конвейерном и вентиляционном штреках 15 восточной «бис» лавы.

Целью проводимых тарифовок являлось уточнение усредненных скоростей распространения сейсмоакустических волн в горном массиве в районе установ-

ки сейсмометров и соизмерение энергии взрыва с энергией, рассчитываемой по программе Agamis.

Применяли шпуровые заряды от 0,6 до 0,9 кг аммонита П-5 общим весом от 33 до 100 кг. Взрывание заряда производилось не одновременно, а с замедлением для каждой группы шпуров от 20 до 25 мкс. При этом осуществлялся уверенный прием сигнала тремя - четырьмя датчиками.

По известным координатам очагов взрывания и временам первых вступлений фронта акустической волны на датчики рассчитывались усредненные скорости упругих волн в массиве.

В результате расчетов было установлено изменение скорости распространения упругой волны в зависимости от расстояния до источника. Так, значение скорости увеличивается с удалением сейсмоприемника от источника возбуждения колебаний. Годограф скоростей представлен в табл. 2.

Таблица 2 – Годограф скоростей распространения упругой волны в массиве

Расстояние от источника до сейсмографа	Скорость
до 50 м	3,1-3,5 км/с
50-100 м	3,5-3,8 км/с
100-300 м	3,8-4,0 км/с
300-500 м	4,0-4,2 км/с
500-1000 м	4,2-4,5 км/с

Это позволило внести коррективы в расчеты определения координат эпицентров сейсмических событий. В результате корректировки уточненные эпицентры очагов взрывания расположились практически на одной прямой. Некоторые смещения вызваны погрешностями измерений, которые планируется скорректировать при получении большего количества статистических данных.

При вычислении энергии взрывания было принято в расчет то, что в энергию колебаний массива преобразуется приблизительно 5-10 % химической энергии заряда [7]. Расчет сейсмической энергии проводился на основании величины максимальных амплитуд колебаний упругих волн [8].

Замедления при взрывании не позволили получить достоверного результата расчета энергии, так как удельная энергия всего заряда была рассредоточена на несколько микровзрывов во временном интервале до 200 мкс. Для более точной тарировки датчиков требуется выполнить взрывание заряда без замедления, что в настоящий момент по технологическим условиям шахты невозможно.

Кроме локации сейсмических событий многоканальная система включает в себя комплект устройств, предназначенный для оценки опасности по горным ударам. Задачей системы является преобразование с помощью измерительных зондов скорости механических колебаний горного массива в электрический сигнал, затем, после усиления и фильтрации, аналоговая передача этих сигналов на поверхность в шахтную геофизическую станцию посредством кабельной сети связи и приемных схем поверхностной станции. В поверхностной части системы происходит цифровая обработка сигналов и их компьютерная интерпретация (рис.3).

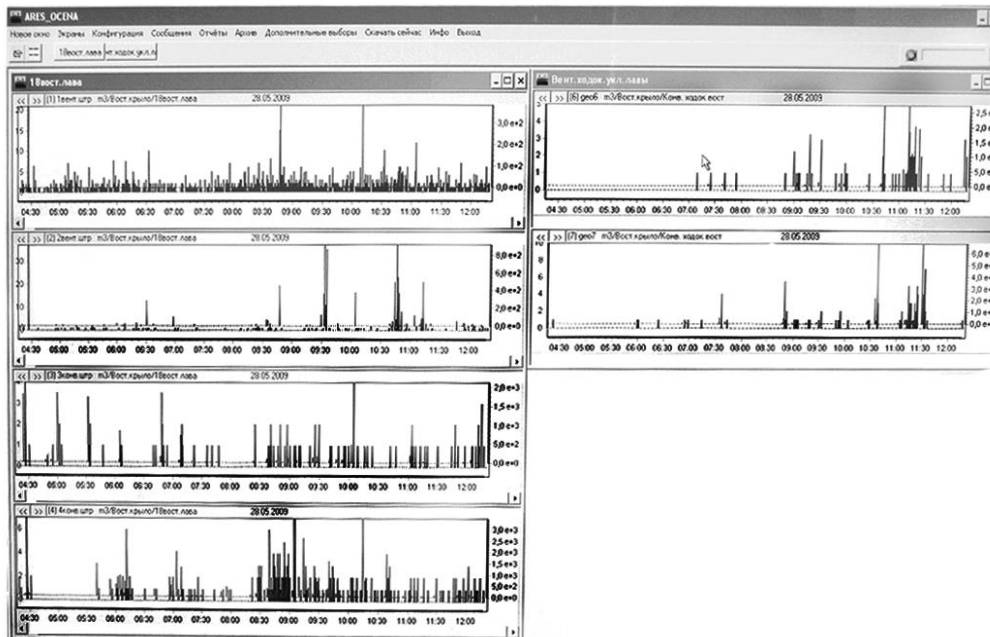


Рис.3 – Визуализация сейсмоакустических наблюдений оценки опасности по горным ударам

На рисунке 3 изображены временные ряды активности акустической эмиссии и распределения условной энергии сейсмоакустических явлений. В результате анализа данных статистическими методами с использованием функции риска, осуществляется поиск аномальных значений параметров АЭ и предупреждение о критических (опасных) состояниях массива.

Таким образом, в пределах поля шахты им. А.Ф. Засядько проведены предварительные экспериментальные исследования по определению изменения напряженно-деформированного состояния углеродного массива с применением многоканальной сейсмоакустической системы, позволяющей повысить достоверность контроля и прогноза динамических явлений в горных выработках за счет локации эпицентров сейсмических событий с определением их относительной энергии и оценки опасности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила ведення гірничих робіт на пластах, схильних до газодинамічних явищ: Стандарт Мінвуглепрому України СОУ 10.1.00174088-011-2005. – К.: Мінвуглепром України, 2005. – 225 с.
2. Правила безопасности в угольных шахтах: НПАОП 10.0-1.01-05: Утверждены приказом Государственного комитета Украины по надзору за охраной труда от 16.11.2004 № 257. – Киев, 2005. – 197 с.
3. Деглин Б.М. Звукоулавливающая аппаратура нового поколения ЗУА-98-06 / Б.М. Деглин, А.А. Мелконян // Горн. инф.-анал. бюл. – 2008. – № 10. – С. 260-262.
4. Булат А.Ф. Перспективы использования многоканального сейсмоакустического метода для контроля состояния углеродного массива / А.Ф. Булат, С.Ю. Макеев, В.Л. Приходченко // Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках: Матер. XVII Межд. науч. школы. – Симферополь: Таврич. нац. ун-т. – 2007. – С. 57-60.
5. Документация установки и обслуживания устройств системы ARAMIS M/E. – ЕМАО, г. Катовице, 2005.
6. Геологический отчет о доразведке и переоценке запасов каменного угля поля шахты имени А.Ф. Засядько ПО «Донецкуголь». – Донецк, 1988. – Т.1. – 249 с.
7. Ловля С.А. Взрывное дело (взрывные работы в разведочной геофизике) / С.А. Ловля, Б.Л. Каплан, В.В. Майоров, И.К. Купалов-Ярополк. – М.: Недра, 1966. – 208 с.
8. Коган С.Я. Сейсмическая энергия и методы ее определения. – М.: Наука, 1975. – 152с.