

## ОБОБЩЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЛНОВЫХ ПОЛЕЙ, ФОРМИРУЕМЫХ НА УГОЛЬНЫХ ПЛАСТАХ УКРАИНЫ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКОГО МЕТОДА ПРОГНОЗА УСЛОВИЙ ЗАЛЕГАНИЯ УГЛЯ

к.т.н. Анциферов А.В. (УкрНИМИ НАН Украины)

*Повнота даних про вугільний пласт – один з найбільш важливих факторів, які впливають на ефективність процесу видобутку вугілля підземним способом та знижують як екологічні показники, так і безпеку проведення гірничих робіт. Застосування розроблених в УкрНДМІ методик моделювання поля сейсмоакустичних коливань дозволило на основі кінцево-різнісних методів математичного моделювання провести комплексний аналіз структури шельфового поля та параметрів основних пакетів коливань і отримати узагальнені характеристики сейсмоакустичних сигналів для основних умов залягання вугілля на території України.*

## GENERALIZED CHARACTERISTICS OF WAVE FIELDS ARISING AT UKRAINIAN COAL SEAMS DURING ACOUSTIC MEASUREMENTS OF COAL OCCURRENCE CONDITIONS

Anziferov A.V.

*Coal seam data completeness is one of the most important factors affecting on the efficiency of underground coal mining and determining both economic indexes and safety of mining operations. Acoustical wave field simulation techniques developed in the Ukrainian Mine Survey Research Institute have been applied for complex analysis of wave field structure and primary wave packet parameters based on mathematical simulative finite-difference methods [1,2] that enabled to derive generalized characteristics of acoustic signals for typical coal occurrence conditions in the territory of Ukraine.*

Для начала ограничимся простейшей моделью условий залегания угольного пласта. Она типична для условий Донбасса. Угольный пласт (марка угля «Ж») мощностью 1.5 метра залегает в песчанике. Модель отличается чрезвычайно резкими акустическими границами угля с породами ( $\frac{V_{\text{угля}}}{V_{\text{породы}}} \approx 0.41$ ;  $\frac{V_{\text{р угля}}}{V_{\text{р породы}}} \approx 0.46$ ), что создает условия для каналирования энергии.

Колебания  $Y$  компоненты волнового поля распространяются единым цугом со скоростью первого вступления 2200м/с (см. рис.1), что строго соответствует скорости распространения сдвиговых волн в песчанике. Основная энергия колебательного процесса практически не выходит за

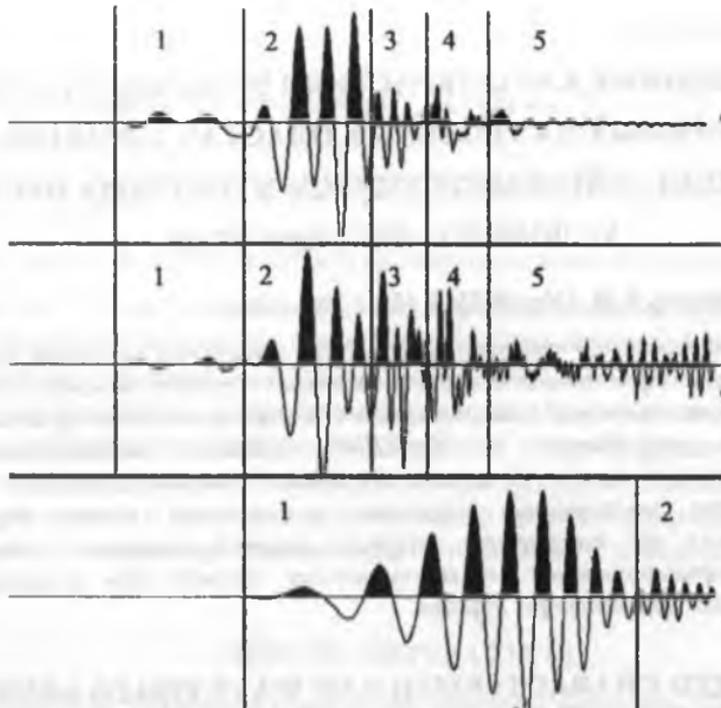


Рис. 1. Структура X, Z и Y компонент сейсмоакустического сигнала для рассматриваемой модели угля марки «Ж».

пределы угольного пласта (отношение амплитуд колебаний в пласте и в породе вблизи границы раздела  $\frac{A_{г \text{ угля}}}{A_{г \text{ породы}}} \approx 9$ ). С увеличением расстояния

до пункта приема наблюдается постепенное смещение максимума частотной характеристики наиболее значимой по амплитуде части сигнала (боковая волна) в низкочастотную область. При этом хвостовая высокочастотная (380–470 Гц) часть цуга при удалении от источника колебаний постепенно выделяется в отдельный пакет со скоростным диапазоном от 1100 м/с до 950 м/с. Хотя эти значения выше, чем скорость поперечных волн в угле (900 м/с), но тем не менее мы можем смело рассматривать эту часть волнового поля как интерференционную каналовую волну, поскольку она практически полностью сосредоточена в пласте ( $\frac{A_{в \text{ угле}}}{A_{в \text{ породе}}} \approx 20$ ) и имеет сходную частотную характеристику.

Колебания для каналовой волны в фазе Эйри ( $V_{\text{Эйри}} \approx 810 \text{ м/с}$ ;  $\omega \approx 550 - 600 \text{ Гц}$ .) на теоретических сейсмограммах Y компоненты наблюдаются достаточно слабо только для самых удаленных от источника сейсмориемников. В целом, можно сделать общий вывод о доминировании в общей структуре теоретического сигнала

интерференционных колебаний, вызванных боковыми волнами (что соответствует результатам практических наблюдений в данных условиях).

X и Z компоненты волнового поля распространяются согласовано, но имеют принципиально разный характер распределения колебательной энергии в угленосной толще. Колебания X компоненты волнового поля подобно Y компоненте, концентрируют большую долю своей энергии в пласте ( $\frac{A_{\text{в угле}}}{A_{\text{в породе}}} \approx 8$ ), хотя общая картина процесса имеет принципиальные

отличия. Распределение энергии у Z компоненты существенно разное для каждого слагающего ее волнового пакета. Существенное отличие от распространения Y компоненты в том, для X и Z компонент мы имеем дело с пакетами как сдвиговых волн, так и волн сжатия. Они имеют разную форму и разную скорость распространения, что играет немаловажную роль в их идентификации. Во-первых, фронт волн сжатия, образующих в угле первый волновой пакет - боковую волну со скоростью первого вступления ( $V_p = 3900$  м/с). Он, как и следует из положений теории в песчанике имеет сферическую форму. Для данной модели амплитуда соответствующих колебаний мала и для X компоненты не превышает 10% от максимальной амплитуды сигнала (5% для Z компоненты). Это объясняется направленностью излучения источника. Частота волн сжатия не превышает 70-80 Гц.

Как видно из сейсмограмм, колебания сдвига и колебания, ими порожденные, доминируют в сигналах как X так и Z компонент. Они формируют все остальные волновые пакеты (начиная со второго). Рассмотрим их подробнее.

Для X компоненты второй пакет распространяется со скоростью волн сдвига в песчанике. Его частота составляет около 250 Гц. Очевидно, это обычная боковая волна. Третий пакет - высокочастотный, с частотой колебаний 200-450 Гц. Он постепенно проявляется в процессе распространения сигнала и имеет диапазон скоростей 1850-1650 м/с и отделим от колебаний второго пакета только средствами обработки сигнала. Его скоростные показатели позволяют сделать допущение, что в формировании колебаний существенную роль играют волны сжатия в угле ( $V_s = 1800$  м/с). Четвертый пакет располагается в диапазоне скоростей от 1650 до 1450 м/с. Он имеет широкий частотный диапазон от 300 до 600 Гц, но сравнительно малую амплитуду. Замыкают сейсмограмму высокочастотные колебания с широким спектром (380-640 Гц, с максимумом на 550 Гц), не образующие визуально отдельно наблюдаемых волновых пакетов.

Для Z компоненты картина несколько отлична от описанной, хотя первые четыре волновых пакета подобны соответствующим пакетам для X компоненты. Первый пакет, получаемый как результат трансформации боковых волн сжатия в сдвиговые на границе раздела сред достаточно слаб. Он едва наблюдается, имея при этом практически те же скоростные и

частотные характеристики, что и боковые волны сдвига у  $X$  компоненты. Процессы обмена энергией между  $Z$  и  $X$  компонентами колебаний приводят к некоторому ускорению движения максимумов огибающих пакетов боковых сдвиговых волн относительно соответствующих им пакетов  $Y$  компоненты на величину порядка 50 м/с. Это отвечает результатам экспериментальных наблюдений. Для  $Z$  компоненты наблюдается некоторое перераспределение энергии колебаний между вторым и третьим волновыми пакетами. Частотная характеристика обоих этих пакетов для  $Z$  компоненты несколько иная, чем для  $X$ . Второй пакет имеет частоты колебаний порядка 200-350 Гц, а третий — 250-450 Гц. Четвертый пакет подобен тому, который наблюдается для  $X$  компоненты. Кроме того, на сейсмограммах  $Z$  компоненты волнового поля присутствует высокочастотный пакет (пятый) со скоростным диапазоном от 1250 м/с до 750 м/с и с частотным диапазоном 400-650 Гц (максимум частотной характеристики расположен на 580 Гц). Мы с уверенностью можем рассматривать эти колебания как часть каналовой волны. Из положений теории известно, что фаза Эйри каналовой волны для пласта заданной конфигурации лежит в диапазоне 550-650 Гц, с пиком в районе 600 Гц. Пакеты, полученные в результате моделирования несколько смещены в низкочастотную область. Хотя, как отмечалось выше, механизм моделирования частотного диапазона существенно отличается от реально имеющего место в природе, на практике в условиях Донбасса достаточно редко регистрируются «классические» пакеты каналовых волн, соответствующих данной фазе. Это наблюдается, как правило, на более мощных (2 метра и более) угольных пластах.

Очевидно, что для любых компонент волнового поля все пакеты кроме первых двух можно рассматривать как составляющие структуру каналовой волны. Строго говоря, их нужно рассматривать как результат интерференции разных типов волн. Особенности распределения амплитуд и энергий позволяют сделать следующие выводы: формирование пакетов идет преимущественно за счет боковых волн сдвига, которые попадая в пласт и резонируя резко повышают свою амплитуду, «выделяют» определенный диапазон частот и в результате интерференции в пласте видоизменяются, принимая черты характерные для каналовых волн. В то же время, они интерферируют с низкочастотными составляющими каналовых волн, распространяющимися в пласте со скоростями превышающими скорость сдвиговых волн в угле.

На основе проведенных расчетов можно сделать ряд выводов, обобщающих итоги моделирования для угля марки «Ж»:

- физико – механические параметры угля и вмещающих пород, соответствующих данной степени метаморфизма таковы, что создаются предпосылки для каналирования колебательной энергии и формирования соответствующих волновых пакетов;

- регистрируемый сейсмоакустический сигнал для X и Z компонент состоит из боковых волн сжатия и сдвига, причем, обратное происходит в результате резонанса на угольном пласте («головная волна») и каналовых волн;
- частотные характеристики пакетов волн сжатия и волн сдвига принципиально разные. Волны сжатия образуют пакеты с частотой до 100Гц, тогда как волны сдвига – до 300;
- регистрируемый сейсмоакустический сигнал для Y компонент состоит из боковых волн сдвига, пакетов, и каналовых волн;
- амплитуда сигнала пропорциональна резкости акустических границ между углем и породами; волны Лява имеют сравнительно большую амплитуду, чем любая из компонент волн Релея;
- степень делимости пакетов по времени вступления определяется скоростными показателями пород и угля;
- доминирующие в регистрируемом сигнале для волновые пакеты формируются, во-первых, боковыми волнами сдвига (для всех компонент), а во-вторых, боковыми волнами сжатия (для X и Z);
- с уменьшением резкости акустических границ относительный вклад боковых волн сдвига в сигнале уменьшается, в то время как вклад боковых волн сжатия увеличивается;
- амплитуда боковых волн в большей мере зависит от резкости акустических границ, чем амплитуды «головных» и каналовых волн, поэтому при ее ослаблении возрастает относительный вклад «головных» и каналовых волн.

Итак, по данной модели, соответствующей типичным условиям залегания угля марки «Ж» для Донбасса, в целом можно предположить, что хотя резкость акустических границ пласта и его мощность таковы, что создаются предпосылки для формирования каналовой волны, в сигнале доминируют боковые волны (в данном случае – волны сдвига) и волны, вторичные от таковых. Каналовая волна для угля марки «Ж» для данных условий практически не формируется.

Насколько эти предположения верны для иных условий, можно определить, проведя по такой же схеме исследования для углей всех марок, рассматривая в качестве вмещающих наиболее типичные породы (песчаник, алевролит, аргиллит). Поскольку для марок «К», «ОС» и «Т» физико механические параметры, на которых базируется метод моделирования, отличаются менее чем на 5%, то для таких углей в расчетах можно ограничиться только маркой «К».

Результаты исследований обобщены в таблицах 4.1 – 4.3., описывающих амплитудные и частотные характеристики основных волновых пакетов, формирующих сигнал.

Анализ таблицы наиболее типичных значений резкости акустических границ (См. Таблицу 4) позволяет сделать некоторые предварительные заключения. Во-первых, практически для любой породы

Таблица 1. Зависимость структуры сейсмического сигнала от параметров угля и вмещающих пород

Марка угля	Вмещающие породы	Амплитуда пакетов X компоненты (в % от максимальной)				Амплитуда пакетов Y компоненты (в % от максимальной)				Амплитуда пакетов Z компоненты (в % от максимальной)			
		Бок.Сж.	Бок.сдв.	"Гол".	Кан.	Бок.Сж.	Бок.сдв.	"Гол".	Кан.	Бок.Сж.	Бок.сдв.	"Гол".	Кан.
Б	Песчаник	100	20	Не набл.	5		100	Не набл.	20	25	100	Не набл.	60
	Алевролит	100	30	Не набл.	5		100	Не набл.	20	20	100	Не набл.	60
	Аргиллит	100	50	Не набл.	5		100	Не набл.	20	15	100	Не набл.	60
Д	Песчаник	100	30	Не набл.	менее 5		100	25	10	25	100	30	30
	Алевролит	100	30	Не набл.	менее 5		100	25	10	25	100	50	50
	Аргиллит	100	30	Не набл.	менее 5		100	25	10	25	100	50	50
Г,Ж	Песчаник	10	100	30	менее 5		100	Не набл.	20	5	100	80	20
	Алевролит	15	100	40	менее 5		100	Не набл.	20	5-10	100	100	25
	Аргиллит	75	100	50	менее 5		100	Не набл.	20	10	80	100	30
К,ОС,Т	Песчаник	5	100	30	менее 5		100	Не набл.	20	менее 1	100	60	20
	Алевролит	10-15	100	50	менее 5		100	Не набл.	20	1-3	75	100	25
	Аргиллит	50-60	75	100	менее 5		100	Не набл.	20	5	30	100	30
А	Песчаник	40	100	100	10		100	25	10	5	100	25	30
	Алевролит	100	80	40	менее 5		100	25	10	10	100	50	50
	Аргиллит	100	50	Не набл.	менее 5		100	25	10	10	100	50	50

Прим. Заливкой отмечены случаи, когда волновые пакеты визуально не делимы.

Таблица 2. Зависимость частот пакетов X и Z компонент сейсмического сигнала от параметров угля и вмещающих пород.

Марка угля	Вмещающие породы	Расположение максимума частотной характеристики пакетов X компоненты				Расположение максимума частотной характеристики пакетов Z компоненты			
		Бок.Сж.	Бок.сдв.	“Гол”.	Кан.	Бок.Сж.	Бок.сдв	“Гол”.	Кан.
Б	Песчаник	45	190	Не набл.	550	70	200	Не набл.	580
	Алевролит	45	200	Не набл	550	60	200	Не набл.	580
	Аргиллит	45	190	Не набл	550	65	200	Не набл.	580
Д	Песчаник	50	200	Не набл	550	70	210	300	530,715
	Алевролит	50	200	Не набл	550	70	200	300	510
	Аргиллит	50	200	Не набл	550	65	210	300	510
Г,Ж	Песчаник	70	150	260	490	65	200	310	500
	Алевролит	70	150	250	500	65	200	300	500
	Аргиллит	60	150	250	500	100	220	300	500
К,ОС,Т	Песчаник	60	140	240	490	90	210	300	500
	Алевролит	60	140	290	500	90	200	300	500
	Аргиллит	50	130	340	480	50	190	320	460
А	Песчаник	80	210	320	540,720	65	180	280	560,750
	Алевролит	70	210	300	650	65	190	270	720
	Аргиллит	65	180	Не набл	550	65	210	300	550

Прим. Значения приведены для максимумов частотной характеристики каждого из пакетов.

Таблица 3. Зависимость частот пакетов Y компоненты сейсмического сигнала от параметров угля и вмещающих пород.

Марка угля	Вмещающие породы	Расположение максимума частотной характеристики пакетов Y компоненты		
		Бок.сдв	"Гол".	Кан.
Б	Песчаник	220	Не набл.	480
	Алевролит	225	Не набл.	490
	Аргиллит	230	Не набл.	490
Д	Песчаник	175	360	480
	Алевролит	175	340	490
	Аргиллит	175	350	490
Г,Ж	Песчаник	110	Не набл.	440
	Алевролит	110	Не набл.	450
	Аргиллит	110	Не набл.	450
К,ОС,Т	Песчаник	115	Не набл.	470
	Алевролит	115	Не набл.	460
	Аргиллит	115	Не набл.	470
А	Песчаник	175	340	500
	Алевролит	175	345	500
	Аргиллит	175	340	500

Таблица 4. Показатели резкости акустических границ уголь-порода для типичных условий залегания угля.

Марка/породы	$V_{p \text{ угля}} / V_{p \text{ породы}}$			$V_{s \text{ угля}} / V_{s \text{ породы}}$		
	песчаник	алевролит	аргиллит	песчаник	алевролит	аргиллит
Б	0.75	0.68	0.63	0.67	0.67	0.67
Д	0.76	0.76	0.76	0.65	0.69	0.79
Г	0.56	0.61	0.65	0.48	0.56	0.67
Ж	0.49	0.54	0.59	0.41	0.47	0.56
К	0.43	0.50	0.55	0.38	0.45	0.53
ОС	0.43	0.50	0.55	0.38	0.45	0.53
Т	0.48	0.56	0.61	0.42	0.50	0.59
А	0.50	0.67	0.72	0.43	0.62	0.72

отношение  $V_{s \text{ угля}} / V_{s \text{ породы}}$  меньше чем отношение  $V_{p \text{ угля}} / V_{p \text{ породы}}$ . Разница в

этих отношениях может даже достигать 10%. Это означает, что условия для каналирования волн сжатия выполняются для большинства случаев гораздо хуже, чем для волн сдвига. И основу соответствующих волновых пакетов должны составлять в большей мере волны SV и SH поляризации. Конечно, для волн Релея на границе раздела сред будет иметь место взаимная трансформация разных типов колебаний. Следовательно, составляющие каналируемый волновой пакет волны сдвига будут

неизбежно порождать волны сжатия, и наоборот. Но отношение амплитуд вторичных волн к амплитудам первичных будет равно коэффициентам  $V_{s \rightarrow p}$  и  $V_{p \rightarrow s}$  (соответствующие коэффициенты отражения, учитывающие трансформацию волн). Для углей марки «Б» и «Д» показатели резкости акустических границ достаточно слабы. Это может существенно затруднять применение сейсмоакустического метода для анализа условий залегания соответствующих угольных пластов. Наилучшие условия для применения сейсмоакустического метода формируются для углей марок «Ж», «К», «ОС», «Т».

Проведя анализ представленных материалов можно заметить ряд особенностей, характерных для подавляющего большинства рассмотренных условий залегания угля.

Для Y компоненты сигналы имеют достаточно простую конфигурацию. Первый пакет сравнительно низкочастотный, образуемый боковыми волнами сдвига. Он всегда доминирует. Его частота существенно зависит от соотношения  $V_{s \text{ угля}} / V_{s \text{ породы}}$ . Чем резче акустическая граница, тем меньшую частоту имеет данный пакет. Полученные значения частоты колеблются от 110 Гц (на углях марок «Г» и «Ж») до 220-230 Гц (на углях марки «Б»). Второй пакет образует чаще всего каналовая волна с частотой практически не зависящей от параметров угля и пород (470-500 Гц).

Для X компонент пакет боковых волн сжатия имеет достаточно низкую частоту (от 45 до 80 Гц). При этом практически не прослеживается четкой зависимости частотной характеристики от параметров угля и среды. Пакет сдвиговых волн более высокочастотный. Его частота таким же образом, как и для соответствующего пакета для Y компоненты зависит от соотношения  $V_{s \text{ угля}} / V_{s \text{ породы}}$ . Полученные значения частоты колеблются от 130-140 Гц (на углях марок от «Г» до «Т») до 190-210 Гц (на углях марок «Б» и «А»). Головная волна наблюдается только для углей от марки «Ж», вплоть до «А». Ее частоты лежат в диапазоне 240 до 340 Гц, причем прослеживается тенденция увеличения частоты при понижении резкости акустических границ для волн сдвига. Каналовая волна имеет величину 5% и меньше от амплитуды сигнала. Ее частоты лежат в диапазоне от 480-500 (для углей марок «Г»-«Т») до 550-600 (для остальных)

Для Z компонент пакет боковых волн сжатия имеет несколько более высокую частоту, чем для X (от 60 до 100 Гц), увеличивая свою роль в сигнале при уменьшении резкости акустических границ. При этом также не прослеживается какой-либо определенной зависимости частотных характеристик от параметров угля и пород. Пакеты боковых волн сдвига имеют достаточно сходные частотные характеристики для всего рассмотренного диапазона условий залегания (180-210 Гц). В целом можно

говорить о смещении частотного диапазона Z компоненты данных типов волн в высокочастотную область относительно X компоненты. Такая же тенденция наблюдается и для «головных» пакетов, чьи доминирующие частоты составляют 300-320Гц. Амплитуда каналовых волн составляет от 20% до 60% от амплитуды сигнала при частоте 550-580Гц. При этом наблюдается зависимость: при уменьшении резкости акустических границ (для волн сдвига) относительная амплитуда каналовых волн и их частота увеличиваются.

Рассмотрим подробнее специфические черты формирования сейсмоакустических сигналов в углях различной степени метаморфизма. Нетрудно убедиться, что структура волнового поля для углей марки «К» («ОС», «Т») практически не отличается от той, которая была исследована для углей марок «Г» и «Ж». Все особенности формирования волновых пакетов, наблюдаемые в углях марки «Ж» практически полностью повторяются для марки «К» («ОС», «Т»). Отличие прослеживается только в сравнительно больших частотах пакетов «головных» и каналовых волн. Но на практике заметного отличия в параметрах ожидать не следует, поскольку большие частоты будут больше подвержены затуханию и, в результате, наблюдаемые реальные пакеты для этих марок угля должны иметь сходные характеристики.

Угли марки «Б» характеризуются самыми слабыми акустическими границами как для волн сдвига, так и для волн сжатия. Соответственно, амплитуды волновых пакетов, в формировании которых основную роль имеет механизм каналирования энергии, чрезвычайно малы. Каналовые волны формируют очень четкие волновые пакеты с амплитудой около 5% от амплитуды сигнала для X компоненты и целых 60%- для Z. Резонанса волн сдвига и создания пакетов с промежуточными частотами (300-400Гц) практически не наблюдается. Для X компоненты доминируют боковые волны сжатия.

Сигналы, формируемые на углях марки «Д» подобны по своей структуре характерным для марки «Б». Отличие состоит в более слабых проявлениях каналовых волн. Их амплитуда для X компоненты составляет меньше 5% амплитуды сигнала, а для Z – около 50% (алевролит, аргиллит).

Самый интересный факт в том, что хотя угли марки «А» стоят на противоположном краю таблицы метаморфизма, структура сигналов подобна тем, что формируются на углях марок «Б» и «Д». Для алевролитов и аргиллитов наблюдается доминирование в X компонентах сигнала волн сжатия. Каналовые волны также очень слабы. Их характеристики в точности повторяют те, которые соответствуют углям марки «Д».

Представленные результаты чрезвычайно важны при анализе волновых полей, регистрируемых сейсмоакустическими методами при исследовании условий залегания угля на шахтах Украины.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Азаров Н.Я., Яковлев Д.В. Сейсмоакустический метод прогноза горно-геологических условий эксплуатации угольных месторождений. – М.: Недра, 1988.
2. Анциферов А.В., Захаров В.Н., Глухов А.А. Комплект программ моделирования процесса распространения сейсмических волн в угленосной толще // Каталог прогр.средств/ГосФАП,М.1991, №50910000379.