

УДК 550.834: 622.12

## ПРОГНОЗ ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАРУШЕНИЙ СБЛИЖЕННЫХ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ СЕЙСМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

**Трофимов В. В.**

*(УкрНИМИ НАНУ, г. Донецк, Украина)*

*У роботі наведені результати досліджень по розробці критеріїв сейсмічного прогнозу структури порушень гірського масиву зі зближеними вугільними пластами й розглянута методика їх застосування.*

*The results of the studies related to development of seismic data-based prediction of rock mass fault structure with superimposed coal seams are given and methods of their employment are described.*

Одними из основных факторов, осложняющих ведение горных работ, являются тектонические нарушения, существенно влияющие на технологию и процесс отработки угольных пластов и уменьшающие эффективность и безопасность труда. Существует ряд способов выявления и определения параметров тектонических нарушений [1]. Одним из наиболее актуальных и развитых на данный момент остается сейсмоакустический метод с соответствующими критериями определения параметров нарушений. В подавляющем большинстве работ по данному направлению угольный пласт рассматривается как волновод [2 – 5]. В нескольких работах уделено внимание волноводу сложного строения, образованного угольным пластом и аргиллитом, а также сближенными угольными пластами [6]. Тем не менее, существующие подходы проведения сейсмоакустических экспериментов и интерпретации их результатов не учитывают влияние сближенного угольного пласта на регистрируемые сейсмоакустические сигнала-

лы, что в некоторых случаях приводит к недостоверным результатам.

Анализ распространённости такого явления как «сближенность» угольных пластов для Донбасского региона показал [7], что 41 % пластов рабочей мощности имеют сближенный пласт с соблюдением условий образования волновода сложного строения. Распределение данного явления по регионам неоднородное. Так для Западного Донбасса этот показатель составляет 60 %, Центрального района – 42 %, остальной части 31 %. Кроме того, до 70 % угольных пластов расщепляются на два и более отдельных слоя [7], что при соблюдении определенных условий можно рассматривать как образование волновода сложного строения.

Соответственно совершенствование и развитие сейсмического метода исследования горного массива, который бы учитывал эти факты – достаточно актуальная задача. Для её решения в первую очередь были разработаны сейсмогеологические модели типичных горно-геологических условий залегания сближенных угольных пластов с учетом распределения физических параметров среды в зонах влияния геологических нарушений. Полученные модели служат информационной базой в процессе моделирования.

При разработке физико-математической модели, описывающей процессы распространения сейсмоакустических волновых пакетов и взаимодействия с тектоническими нарушениями, использованы уравнения (1) О. К. Кондратьева [8].

Эти уравнения (названные в работе О. К. Кондратьева «оптимальными») могут быть легко решены численными методами. Но коэффициенты уравнений на практике являются тяжело определяемыми величинами. Тем не менее, используя конечно-разностную схему приведения уравнений и ограничившись трехслойной моделью, при рассмотрении коэффициентов смещений в соответствующих узлах расчетной решетки возможно использование эффективных модулей упругости [9], вычисляемых с помощью соотношений (2).

$$\left\{ \begin{aligned} \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \eta \frac{\partial u}{\partial t} &= (2\mu + \lambda) \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + (\mu + \lambda) \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial z} + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \\ &\quad (2\mu' + \lambda') \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} + (\mu' + \lambda') \frac{\partial^3 w}{\partial x \partial z \partial t} + \mu' \frac{\partial^3 u}{\partial z^2 \partial t}; \\ \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \eta \frac{\partial w}{\partial t} &= (2\mu + \lambda) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + (\mu + \lambda) \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial z} + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} + \\ &\quad (2\mu' + \lambda') \frac{\partial^3 w}{\partial x^2 \partial t} + (\mu' + \lambda') \frac{\partial^3 u}{\partial x \partial z \partial t} + \mu' \frac{\partial^3 w}{\partial z^2 \partial t}; \\ \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + \eta \frac{\partial v}{\partial t} &= \mu \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + \mu' \frac{\partial^3 v}{\partial x^2 \partial t} + \mu' \frac{\partial^3 v}{\partial z^2 \partial t}. \end{aligned} \right. \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность породы;

$u$ ,  $v$  и  $w$  – компоненты смещений по  $x$ ,  $y$  и  $z$  соответственно;

$\lambda$  и  $\mu$  – коэффициенты Ламе;

$\lambda'$ ,  $\mu'$  – реологические параметры среды, которые характеризуют процессы диссипации упругой энергии;

$\eta$  – коэффициент, который учитывает вязкость среды.

$$\lambda_{i,j \text{ эф}} = \lambda_{i,j} + \frac{\lambda'_{i,j}}{\tau}, \quad \mu_{i,j \text{ эф}} = \mu_{i,j} + \frac{\mu'_{i,j}}{\tau}. \quad (2)$$

Это позволяет избежать трудоемких и приблизительных оценок параметров  $\lambda'$ ,  $\mu'$ . Интегральное изменение модулей упругости среды в зонах влияния аномалий более исследовано ее реологических свойств [10]. Для определения эффективных значений упругих постоянных можно использовать надежно апробированные результаты эмпирических исследований.

Таким образом, предлагаемый подход основывается на общем использовании модификации метода Кондратьева и метода эффективных модулей упругости для математического описания сейсмических колебаний в углепородном массиве. Метод позволяет избежать трудоемких приближенных вычислений реологических свойств среды и использовать эмпирические оценки зна-

чений модулей упругости в зонах влияния геологических нарушений.

Рассмотренный подход лег в основу программного обеспечения, при разработке которого применены принципы многопоточной обработки данных. Анализ быстродействия реализованных алгоритмов показал высокую эффективность использованных принципов и оптимизаций вычислений, а сравнение расчетных сейсмограмм с реально наблюдаемыми на практике свидетельствует о достоверности получаемых результатов.

Сейсмогеологические модели и программное обеспечение послужили основой проведенных исследований влияния сближенного угольного пласта на информативные характеристики сейсмических волновых полей. Полученные зависимости амплитудных и частотных характеристик волновых пакетов от размеров зоны влияния аномалии и от степени изменения плотности и скоростных характеристик угля в зоне трещиноватости с учетом типа нарушения детально рассмотрены в работе [11]. Основные же результаты заключаются в следующем. Наибольшую информацию о строении и параметрах горного массива со сближенными угольными пластами несут волновые пакеты следующей природы:

- боковые волны сдвига со скоростью поперечных волн во вмещающих породах и частотой от 50 до 350 Гц;
- боковые волны сжатия, распространяющиеся со скоростью продольных волн во вмещающих породах в частотном диапазоне 30 – 300 Гц;
- каналовые волны, образованные волноводом сложного строения, с частотой 50 – 450 Гц и скоростью в диапазоне между скоростями распространения волн сдвига в угле и породном прослое.

Для массива со сближенными угольными пластами теоретически показана возможность определения не только амплитуды нарушения, но и направления смещения вдоль сместителя. Наиболее информативны в данном случае амплитудные характеристики боковых волн сдвига. Так смещение в одну из сторон относительно сместителя может приводить к 10 – 20 % различию в

сравнении с противоположным вариантом при остальных равных условиях.

В ходе анализа влияния зоны разуплотнения угля и пород на параметры регистрируемых акустических полей установлено, что для сброса характерно увеличение значения времен первых вступлений и времен прихода максимумов амплитуд пропорционально увеличению ширины зоны трещиноватости. Для нарушения типа надвиг аналогичной зависимости выявить не удастся.

Для надвига характерно в два и более раз сильная зависимость амплитуды боковых волн от степени изменения характеристик среды, чем амплитуды волн преодолевающих сброс. Для каналовой волны эта закономерность имеет противоположный характер, несмотря на 15 – 30 % меньшую потерю энергии при прохождении через аномалию.

Независимо от типа нарушения наблюдается значительное увеличение на общем фоне низкочастотных колебаний, в наибольшей степени для частот от 25 до 50 Гц. Смещение высокочастотных максимумов (с частотой от 200 до 300 Гц) частотного спектра боковых волн на величину 5 – 20 Гц в низкочастотную область свидетельствует о наличии сброса либо о наличии надвига (при этом ближе к источнику расположено висячее крыло). Смещение низкочастотных максимумов (частота от 10 до 100 Гц) в низкочастотную область на 5 – 7 Гц служит признаком наличия сброса, в высокочастотную область на 10 – 15 Гц – надвига с источником со стороны висячего крыла.

Приведенные закономерности непосредственно используются в методе оценки типа и параметров тектонических нарушений в условиях сближенных пластов Донбасса. Его обобщенная схема представлена на рисунке 1 и включает пять основных этапов.

1. Проведение анализа априорной геологической, геофизической и иной информации об угольном пласте в зоне наблюдения, о подсеченных горными работами нарушениях по пласту, над и под ним. Кроме этого, на смежных участках пласта либо на других пластах над или под исследуемым, включая сближенные, могли проводиться какие-либо прогнозные эксперименты, результаты которых могут быть непосредственно использованы.

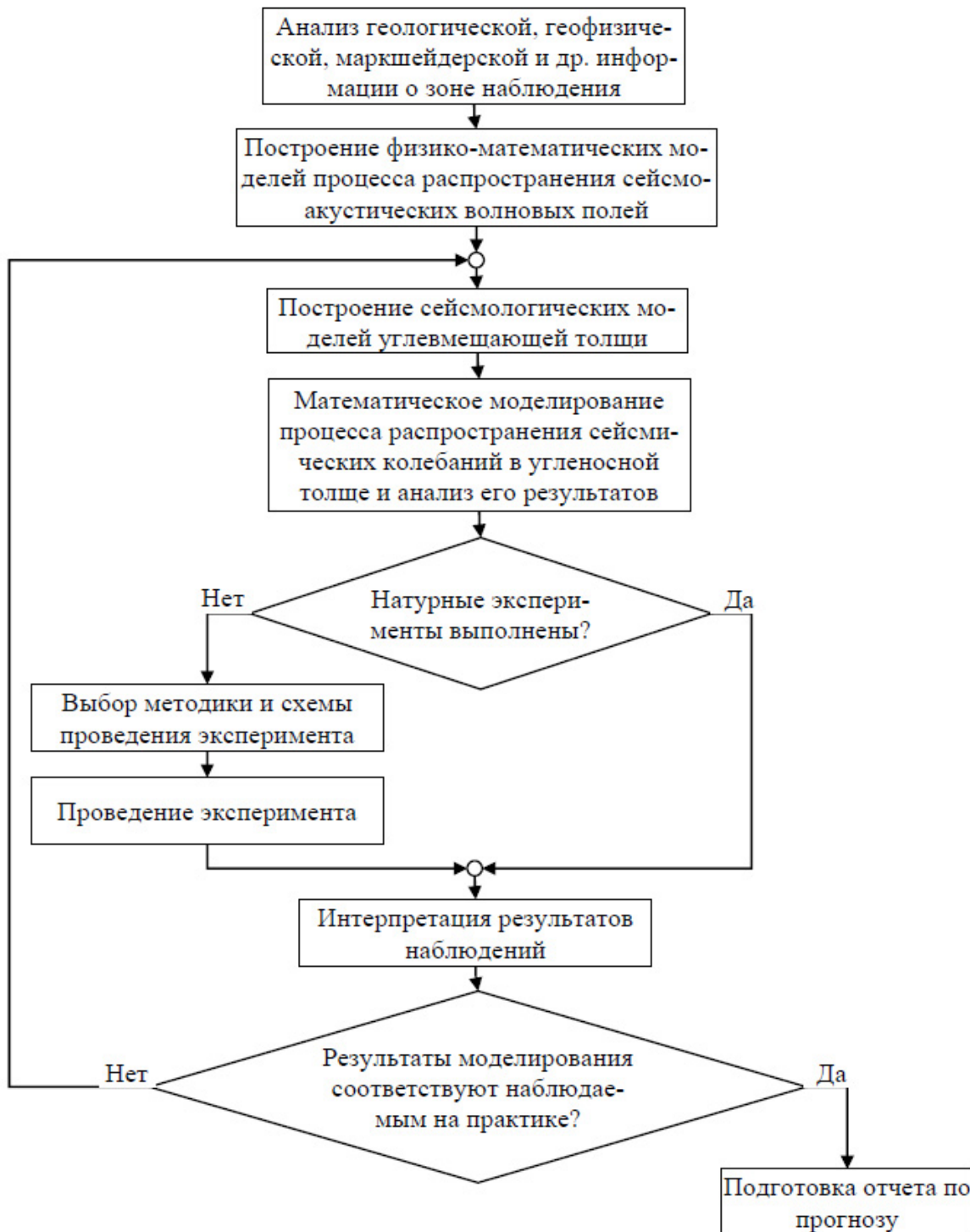


Рис. 1. Обобщенная схема интеграции методов математического моделирования в технологические процессы проведения сейсмических наблюдений

В ходе этапа должны быть собраны и проанализированы следующие характеристики участка наблюдений:

– данные о строении угольного пласта, включающие информацию о количестве и мощностях пачек угля и породных прослоев;

– геометрические показатели пород почвы и кровли (на расстоянии до 15-20 м от пласта), информация о сближенных угольных пластах, включающая данные об их мощностях и гипсометрии;

– стадия эпигенеза углевмещающей толщи, значения упругих характеристик пласта (угольных пачек и породных прослоев) и пород, показатели, характеризующие пористость и трещиноватость углепородного массива (если данных об упругих характеристиках нет, следует принять в качестве исходных показатели, усредненные для марки угля на участке наблюдений);

– информация о геологических нарушениях, расположение которых известно по результатам бурения, а также подсеченных при проходке выработок;

– для разрывных тектонических нарушений: тип нарушения, амплитуда, ширина зоны влияния, степень изменения упругих характеристик угля и пород в зоне влияния (в случае, если данные о ширине зоны и о степени изменения упругих характеристик угля и пород отсутствуют, то берутся средние показатели с учетом стадии эпигенеза: от 20-30 м и до 35-50 % – для углей начальных стадий метаморфизма, до 5-10 м и 10-20 % – для углей поздних стадий метаморфизма; при этом оба показателя для вмещающих пород составляют 50 % от показателей в угле);

– расположение выработок и возможность размещения сейсмоакустического оборудования;

– доступность пласта либо вмещающих пород для размещения источников колебаний и сейсмоприемников.

2. Предварительный анализ процесса распространения сейсмоакустических колебаний по ненарушенному угольному пласту и по пласту с нарушением. Основу этапа составляет создание физико-математической модели углевмещающей толщи, адаптированной к методу математического моделирования. При этом моделируются предполагаемые характеристики нарушений.

Создаются две физические модели. Одна из них описывает углевмещающую толщу без учета тектонического нарушения,

вторая – с учетом. Первая служит для определения волноводных характеристик угольного пласта, вторая – для определения влияния нарушения на параметры волнового поля.

В первую очередь строится геометрическая модель среды, представляющая собой разбивку участка наблюдений на отдельные области. Исходной информацией для построения геометрической модели служат координаты пластопересечений по скважинам и данные по результатам проходческих работ, включая в первую очередь планы горных работ.

Далее создаются физические модели. Этот процесс сводится к тому, что каждая из областей геометрической модели наделяется атрибутивной информацией о физико-механических характеристиках среды. Исходной информацией служат данные о параметрах угольных пластов и вмещающих пород.

После этого производится расчет всех компонент сейсмических волновых полей с использованием разработанного программного обеспечения.

3. Выбор схемы наблюдений и условий эксперимента для оптимальной регистрации наиболее информативных волновых пакетов. При этом используются выводы и рекомендации, полученные в процессе выполнения первых двух этапов.

В ходе этапа необходимо получить следующую информацию:

– структуру и характеристики сейсмограмм, соответствующих модели угленосной толщи без нарушения (включая количество волновых пакетов их природу, скорости первого вступления, скорости распространения максимума амплитуды, амплитудные характеристики, частотные характеристики) с учетом и без учета затухания колебаний в угленосной толще;

– структуры и характеристики сейсмограмм, соответствующих моделям угленосной толщи с нарушениями при вариации размеров зоны влияния и степени изменения упругих характеристик угля и пород;

– информативные волновые пакеты (при этом в качестве отправной точки анализа следует использовать характерные для сближенных угольных пластов Донбасса параметры);



– оценка скоростных окон и частотных диапазонов для оптимальной регистрации.

4. Практическое выполнение натуральных экспериментов на участке шахтного поля в соответствии с выбранной схемой наблюдений и оптимальными условиями возбуждения и регистрации сейсмоакустических колебаний.

5. Обработка и последующая интерпретация результатов натуральных исследований. Интерпретация ведется на основе проведенного ранее анализа априорной геологической, геофизической и иной информации. Кроме этого, интерпретация может потребовать повторного выполнения этапа математического моделирования для выяснения либо уточнения природы регистрируемых волновых пакетов или подробного анализа каких-либо особенностей регистрируемых сигналов. Окончательным результатом данного этапа является прогноз типа и параметров нарушения угольного пласта в зоне проведения экспериментов.

Обработку следует проводить в два этапа. На первом этапе следует провести обработку сейсмограмм, полученных на открытом канале. Цель этапа – получить эталонные значения амплитудных, скоростных и частотных характеристик волновых пакетов различной природы. На втором этапе следует провести обработку сейсмограмм, полученных на участках, где присутствуют нарушения, с целью получения значений отклонений амплитудных, скоростных и частотных характеристик волновых пакетов различной природы от значений, полученных на открытом канале, сравнить их с прогнозными критериями и дать предварительное заключение о типе и параметрах нарушения.

Анализируются скоростные, частотные и амплитудные характеристики волновых пакетов, реагирующие на нарушение в наибольшей степени. На основе полученных экспериментально значений скоростей распространения сейсмических волн разной природы необходимо уточнить ранее используемые физические модели среды и провести перерасчет структур и амплитудно-частотных характеристик с учетом затухания колебаний в угленосной толще с нарушением и без. Сравнительный анализ результатов перерасчета и результатов натуральных наблюдений выполняется для детализации типа и параметров нарушения. На ос-

новании результатов сравнительного анализа дается окончательный вывод о типе и параметрах нарушения.

Рассмотренный метод адаптирован к условиям Донбасса и в отличие от существующих при интерпретации результатов сейсмических экспериментов учитывает изменения информативных характеристик регистрируемых волновых пакетов, вносимых сближенным угольным пластом, на основании предложенных критериев прогноза нарушений.

Разработанные критерии и метод были апробированы на четырёх шахтах Донбасса. Основные условия проведения сейсмоакустических исследований и их результаты обобщены в таблице 1. Рассмотренные примеры охватывают ряд случаев обработки сейсмоакустических данных, полученных в условиях волновода сложного строения, образованного сближенными угольными пластами. Скоростные характеристики указывается для максимума огибающей волнового пакета. При высокой степени техногенных помех применена фильтрация сигнала.

Основанный на методах математического моделирования подход, благодаря дополнительно извлекаемой информации о технологических параметрах нарушения, позволяет повысить качество интерпретации сейсмоакустической информации. Основной полезный эффект применения разработанного метода достигается за счет исключения затрат на бурение разведочных скважин, выработки рациональных путей отработки угольных пластов, исключения затрат по ремонту механизированного комплекса в случае изменения программы проведения очистных работ на участках пласта в результате внезапной встречи тектонических нарушений. И в первую очередь, заблаговременный прогноз повышает безопасность ведения горных работ.

Таким образом, в работе приведены результаты решения научно-прикладной проблемы определения параметров малоамплитудных дизъюнктивных нарушений углепородного массива со сближенными угольными пластами как волноводами сложного строения на основе установления закономерностей влияния его характеристик на динамические и кинематические параметры сейсмоакустических волновых полей, что позволяет повысить надежность прогноза состояния и параметров горного массива.

Таблица 1

Примеры экспериментов по прогнозу нарушений  
 сближенных угольных пластов Донбасса

Шахта	Пласт, марка	Цель исследования	Вмещающие породы	Информативные волновые пакеты			Результат
				тип	скорость (м/с)	частота (Гц)	
1	2	3	4	5	6	7	8
ш. им. А. Ф. Засядько	l <sub>1</sub> Ж	выявление аномальных зон в плоскости лавы	кровля – песчаник – аргиллит, угольный пласт стоит двух пачек, разделенных слоев аргиллита	боковая волна сжатия	3600-3900	40-180	Обнаружены зоны трещиноватости. Прогноз подтвердился горными работами.
				боковая волна сдвига	1700-1900	60-280	
				канальная волна	1350	250-550	
ш. «Красноармейская-Западная № 1»	d <sub>4</sub> Ж	Поиск и трассировка малоамплитудной тектонической нарушениями	Кровля пласта – песчаник, непосредственная кровля – алевролит – алевролит, угольный пласт и пачка углелистого сланца образуют волновод сложного строения	боковая волна сжатия	3700	55-250	Выявлено 2 зоны тектонических нарушений, 1 зона мелкоамплитудной тектонической нарушениями, 1 зона смены литологии пласта Результаты подтверждены проходческими работами.
				боковая волна сдвига	2400	60-250	
				канальная волна	1600	100-300	

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8
ш. «Моспинская»	$h_4$ Т	определение местоположения простирания тектонических нарушений	кровля – алевролит; выше залегают угольный пласт $h^1_4$ ; почва – песчаник	боковая волна сжатия	3750-3900	110-155	Определено положение тектонического нарушения. Прогноз полностью подтвердился горными работами
				боковая волна сдвига	2200-2400	160-250	
				канальная волна	1300-1500	180-350	
ш. «Днепровская» ВАТ «Павлоградуголь»	$c_{10}^6$ Ж	прогноз местоположения и картирование малоамплитудной тектонической нарушения пласти	кровля – песчаник; непосредственная кровля – алевролит 1-3 м; почва – песчаник; в почве пласта залегают смежный пласт, обладающая мощностью пластов и алевролита между ними – 5,2 м	боковая волна сжатия	3600	55-210	Выделено две аномальные зоны: в I-ой зоне тектонические нарушения с амплитудой сдвига превышающей мощность пласта; во II-ой зоне возможна тектоническая нарушения с амплитудой менее мощности пласта либо зона повышенной трещиноватости. Результаты исследований были подтверждены горными работами
				боковая волна сдвига	2200	60-250	
				канальная волна	1500	50-250	

## СПИСОК ССЫЛОК

1. Анциферов А. В. Прогноз горно-геологических условий отработки угольных пластов методами шахтной геофизики. – Киев: УкрГГРИ, 2003. – 48 с.
2. Азаров Н. Я., Гильберштейн П. Г., Фрейнкман М. Г. Использование метода межскважинного сейсмоакустического просвечивания для прогнозирования строения угольного пласта // Технология и техника очистных и осушительных работ на перспективных месторождениях Подмосковского бассейна. – Тула: ИГД им. А. А. Скочинского. – 1978. – Вып. 20. – С. 82 – 88.
3. Анциферов А. В., Исаков В. Ф., Кривега В. И., Шулицкий Г. В. Исследование слоистой структуры угленосной толщи в условиях Подмосковского бассейна по данным сейсмоакустической разведки // Совершенствование технологии и технических средств ведения горных работ в Подмосковном бассейне. – Тула: ПНИУИ. – 1983. – С. 24 – 30.
4. Вартанов А. З., Данилов В. Н. Об особенностях затухания каналовых волн Лява в криволинейных акустических волноводах в массиве // Интенсификация и контроль горного производства физико-химическими методами. – М.: МГИ. – 1985. – С. 29.
5. Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология. Теория и методы: Пер. с англ. – М.: Мир, 1983. – Т. 2. – 360 с.
6. Глухов А. А. Теорія і практика сейсмоакустичного аналізу параметрів диз'юнктивів при відробці вугільних пластів Донбасу: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.15.11 / Национальный горный университет. – Днепропетровск, 2007. – 32 с.
7. Геология месторождений угля и горючих сланцев СССР: В 12 т. / Госгеолтехиздат. – М., 1963. – Т. 1: Угольные бассейны и месторождения юга европейской части СССР. – 1210 с.
8. Кондратьев О. К. Сейсмические волны в поглощающих средах. – М.: Недра, 1986. – 176 с.
9. Анциферов А. В., Глухов А. А., Педченко М. А., Трофимов В. В. Модифицированный метод математического моделирования процесса распространения колебаний в углеведе-

- щающей толще // Наукові праці УкрНДМІ НАН України. – Донецьк, УкрНДМІ НАН України, 2008. – № 3. – С. 153 – 160.
10. Захаров В. Н. Сейсмоакустическое прогнозирование и контроль состояния и свойств горных пород при разработке угольных месторождений. М.: ФГУП ННЦ ГП – ИГД им. А. А. Скочинского, 2002. – 172 с.
11. Анциферов А. В., Глухов А. А., Трофимов В. В., Педченко М. А. Оценка возможности описания тектонических нарушений угольных пластов сейсмическим методом // Наукові праці УкрНДМІ НАН України. – Донецьк, УкрНДМІ НАН України, 2012. – № 10. – С. 309 – 326.