

УДК 550.834: 622.12

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ОПИСАНИЯ ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАРУШЕНИЙ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ СЕЙСМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

**Анциферов А. В., Глухов А. А., Трофимов В. В.,
Педченко М. А.**

(УкрНИИМИ НАНУ, г. Донецк, Украина)

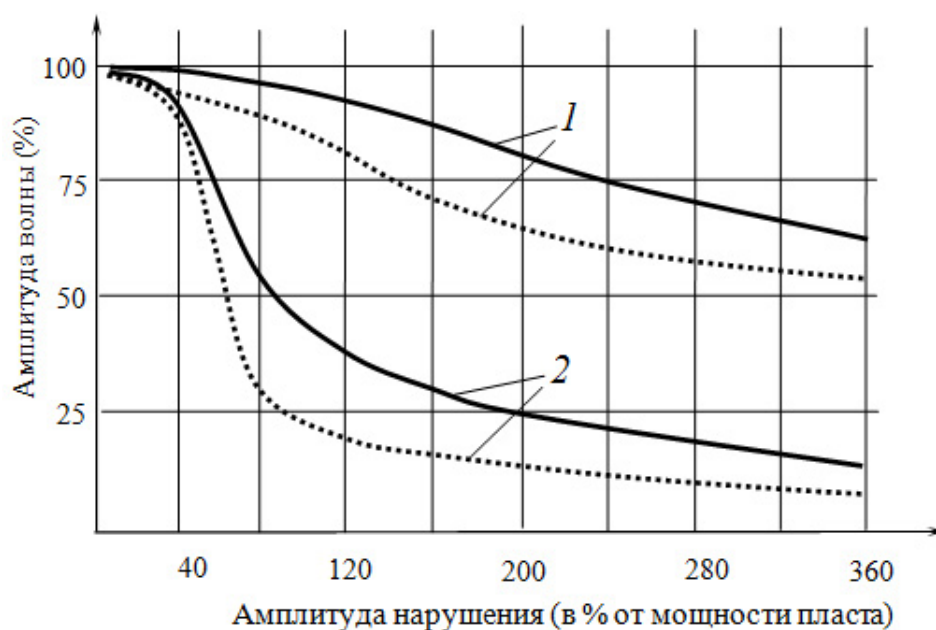
Предметом аналізу в роботі є можливість кількісної оцінки параметрів тектонічних порушень вугільних пластів сейсмічним методом. Описані закономірності зміни інформативних параметрів сейсмічних хвильових полів при наявності аномалій.

The subject under review is capability of quantitative evaluation of coal seam fault characteristics by seismic technique. Regularities in the change of information-bearing parameters of seismic wave fields in the presence of anomalies are described.

Осложнение горно-геологических условий с увеличением глубины разработки месторождений, применение комплексной механизации выемки пластов, необходимость повышения безопасности горных работ требует увеличения надежности сейсмоакустического прогноза структуры и состояния горного массива. В условиях Донбасса особое значение имеет своевременное обнаружение тектонических нарушений. Шахтная сейсморазведка позволяет с высокой (более 75 – 80 %) надежностью оконтурить зону аномалии. В то же время, методы количественной оценки параметров аномалии не отвечают современным требованиям. В рамках решения данной проблемы в статье представлены результаты теоретического анализа зависимостей информативных характеристик сейсмических волновых полей от параметров разрывных тектонических нарушений.

В ходе исследований был проведен анализ влияния параметров тектонических нарушений на амплитудно-частотные характеристики сейсмоакустических волновых пакетов. Базовым был выбран интервал петрофизического разреза Донбасса, который вмещает угли марки «Ж», типичный для отрабатываемых в данное время шахтных полей (например, ш. «Красноармейская-Западная № 1», ш. «Краснолиманская», ш. им. А. Ф. Засядько и др.). Были использованы хорошо зарекомендовавшие себя на практике конечно-разностные методы математического моделирования сейсмических волновых полей [1].

По результатам расчетов на более чем 50 моделях были получены усредненные зависимости амплитуд волновых пакетов волн PV и SV от амплитуды нарушения (см. рис. 1), которые показывают, что наиболее сильно реагируют на наличие нарушения боковые волны сдвига. Боковые волны сжатия, которые имеют низкую частоту, реагируют значительно слабее.



Сплошной линией обозначены графики для боковой волны сжатия, точечной линией – боковой волны сдвига для вмещающих пород, представленных песчаниками (1), аргиллитами или алевролитами (2)

Рис. 1. Зависимость амплитуд волновых пакетов волн PV и SV от амплитуды нарушения

Волновые пакеты тем сильнее изменяют амплитуду при прохождении нарушения, чем слабее акустические границы между углем и породой. В целом результаты не противоречат тем, что были получены в [2, 3].

На рисунке 2 представлены усредненные зависимости амплитуд волн SH от амплитуды дизъюнктива, рассчитанные, как и в предыдущем случае, методом наименьших квадратов. Анализируя графики нужно принимать во внимание, что согласно результатам практических наблюдений [4, 5] для волн SH характерно наличие только одного волнового пакета, начало которого составляют боковые волны, а хвостовую часть – каналовые. Для волн SH характерна достаточно сильная зависимость амплитуды колебаний от амплитуды нарушения. Поэтому при даже незначительном нарушении волновода наблюдается значительное падение амплитуды.

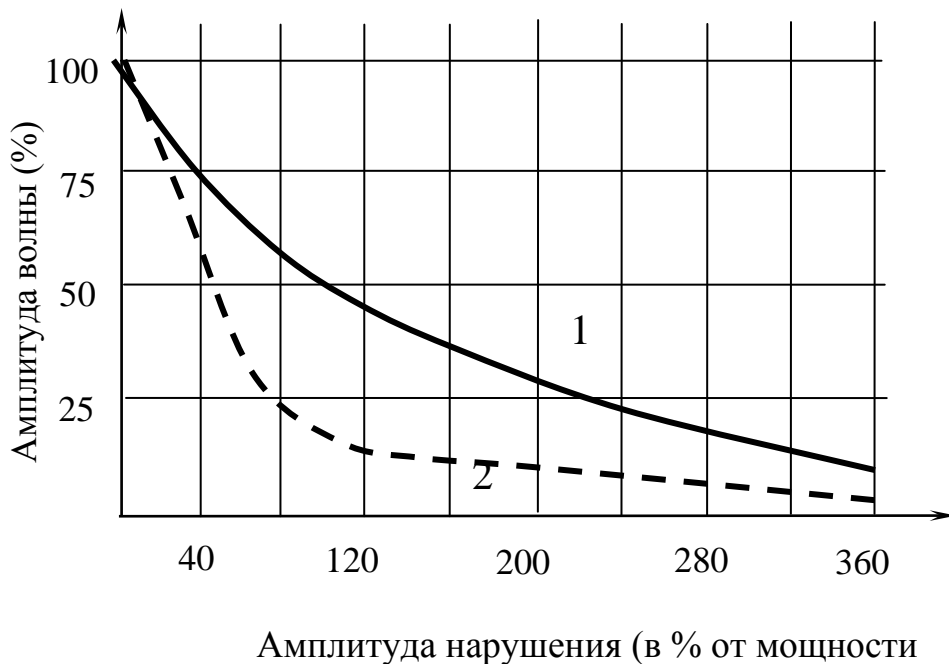
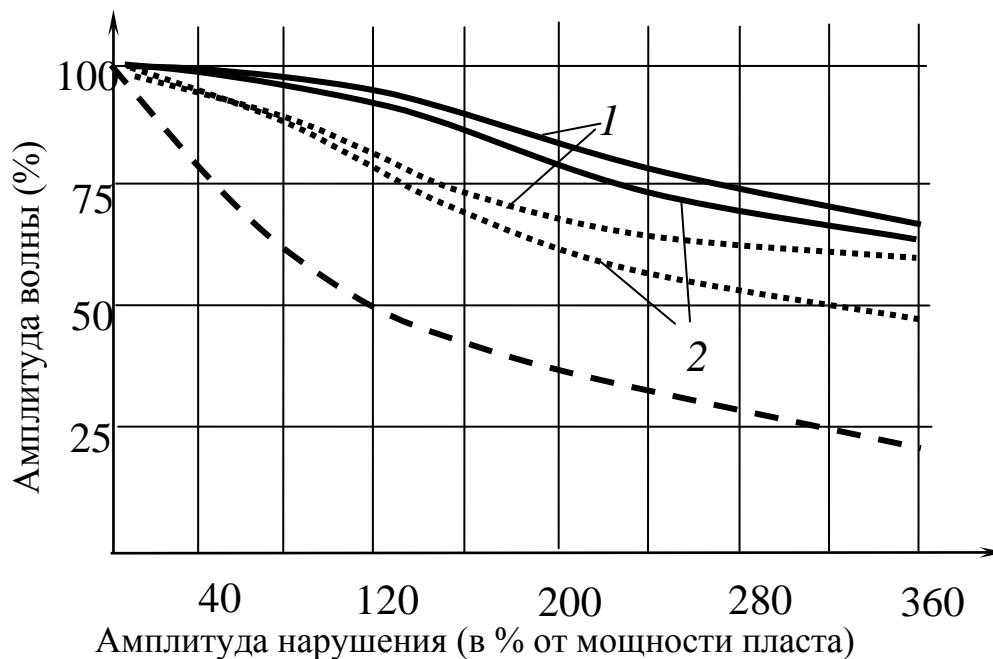


Рис. 2. Зависимость амплитуд волн SH от амплитуды нарушения для вмещающих пород, представленных песчаниками (1), аргиллитами или алевролитами (2)

На рисунке 3 представлены рассчитанные зависимости амплитуд информативных пакетов волн PV и SV от амплитуды нарушения для разных вмещающих пород для случая, когда вол-

новое поле формируется волноводом сложного строения, состоящего из угольного пласта (мощностью 1 м) и аргиллита (2 м). Сравнивая результаты расчетов, приведенных на рисунке 2 и рисунке 3, можно говорить о том, что степень изменения амплитуд боковых волн для волноводов простого и сложного строения отличается всего на 10-15 %. В то же время, для волновода сложного строения характерно резкое уменьшение амплитуды пакета каналовой волны, образованных данным волноводом, при амплитуде нарушения больше половины его мощности.



Сплошной линией обозначенные графики для боковой волны сжатия, точечной линией – боковой волны сдвига, пунктиром – для каналовой волны для вмещающих пород, представленных песчаниками (1), аргиллитами или алевролитами (2)

Рис. 3. Зависимость амплитуд волновых пакетов поляризацій PV и SV от амплитуды нарушения

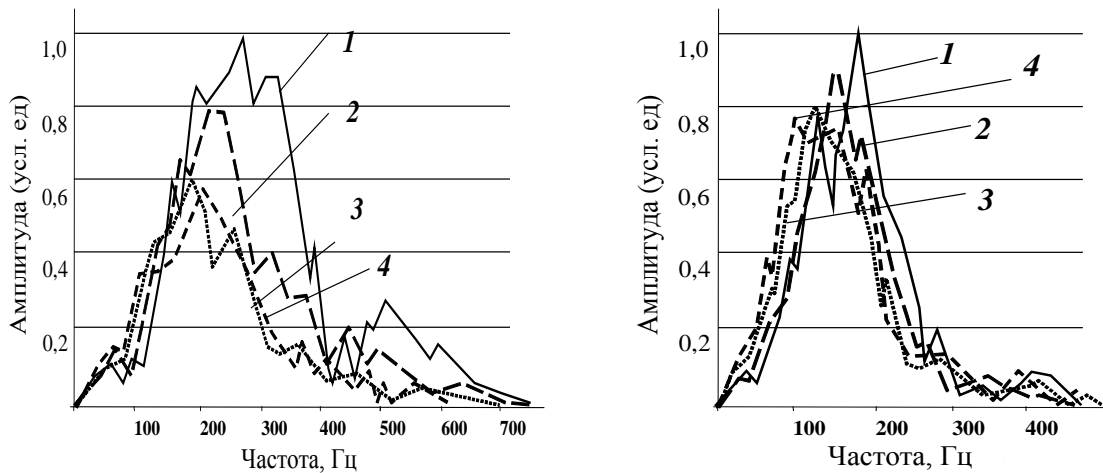
Анализируя влияние параметров области разуплотнения угля и пород в зоне влияния дизъюнктива на характеристики сейсмоакустического поля, особое внимание следует обратить на отличие зависимостей для нарушений типа сброс и надвиг. Для

надвига по сравнению со сбросом характерна на 25 % более сильная зависимость амплитуд волновых пакетов от амплитуды дизъюнктива и на 40 – 50 % более слабая зависимость частотных характеристик.

Зависимость частотной характеристики также связана с асимметричным характером изменения упругих параметров среды в зоне нарушения. Со стороны висящего крыла для надвига характерно наличие зоны уплотнения пород, для которой, согласно [4, 5], коэффициент поглощения колебаний (особенно в области высоких частот) значительно ниже, чем для зоны повышенной трещиноватости. В то же время, между висящим и лежащим крыльями надвига располагается чрезвычайно резкая (рис. 4) акустическая граница, которая приводит к дополнительному падению амплитуды проходящей волны.

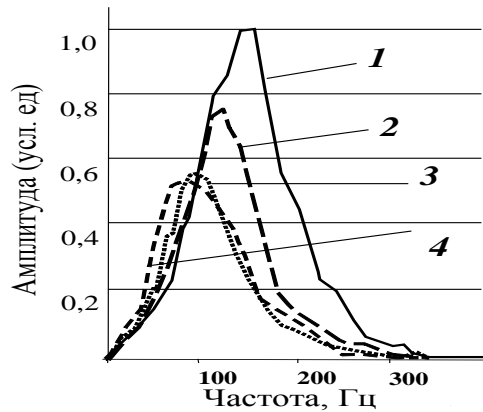
Рассмотрим более детально влияние сближенного пласта на характеристики волнового поля при различной амплитуде нарушения. С этой целью использовалась модель, приведенная на рисунке 5.

Основная часть колебательной энергии волнового поля распространяется в алевролите, который залегает в подошве отрабатываемого угольного пласта, образуя со сближенным волноводом сложного строения. Вследствие этого, сравнивая результаты расчетов с полученными для волновода простого строения, можно наблюдать существенное отличие зависимостей амплитуд боковых волн сжатия и сдвига от амплитуды нарушения (рис. 6). Так, в случае волновода сложной структуры для боковых волн сжатия трудно обнаружить какие-либо закономерности, при этом уменьшение их амплитуды лежит в диапазоне от 25 до 55 % (в сравнении с ненарушенным пластом) на всем диапазоне изменения амплитуд нарушения. Более информативно с точки зрения анализа изменение амплитуды боковых волн сдвига, для которых характерно резкое уменьшение амплитуды пакета каналовых волн при амплитуде нарушения больше половины мощности волновода. В случае если крыло нарушения со стороны источника расположено выше (см. рис. 5), чем за нарушением, падение амплитуды боковых волн сдвига на 10 – 20 % меньше противоположной ситуации.



а)

б)



в)

- 1 – спектр, полученный для модели без аномалии;
- 2 – ширина зоны – 30 м, изменение упругих характеристик – 25 %;
- 3 – ширина зоны – 30 м, изменение упругих характеристик – 50 %;
- 4 – ширина зоны – 60 м, изменение упругих характеристик – 25 %

Рис. 4. Зависимость амплитудно-частотного спектра волн поляризаций *SV* (а), *PV* (б) и *SH* (в) от параметров зоны влияния дизъюнктива (пласт мощностью 1,0 м с углом марки Ж, залегающим в алевролите; степень изменения характеристик породы составляет 50 % от степени изменения характеристик угля)

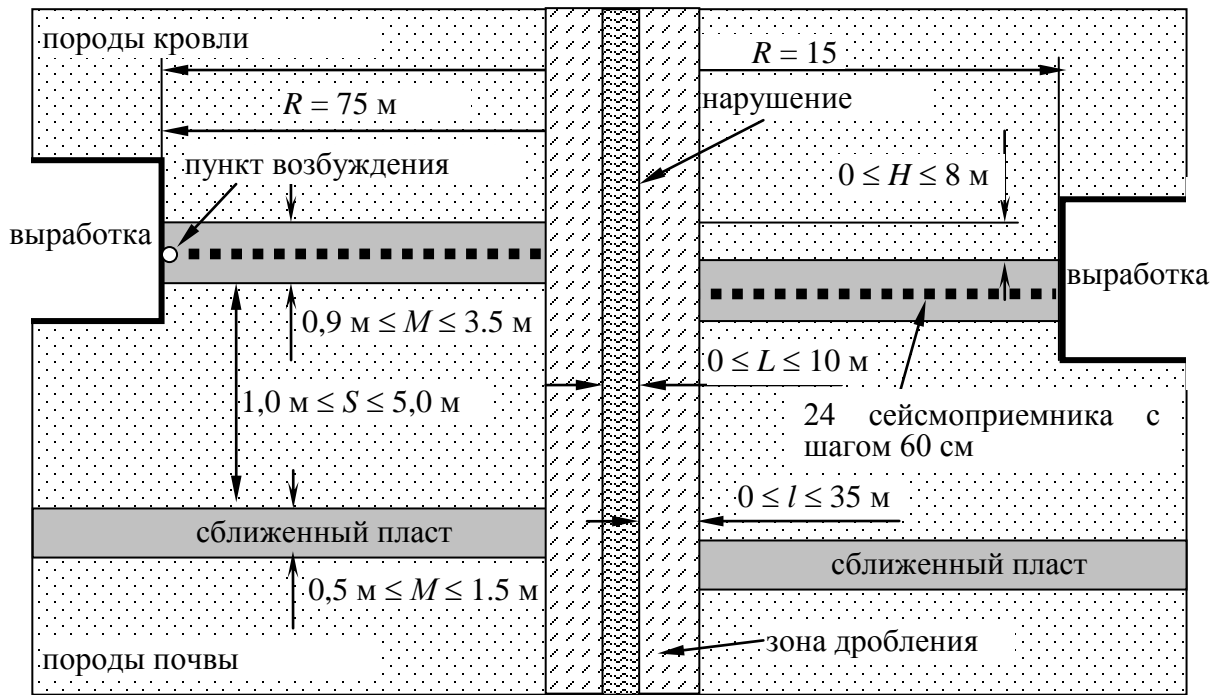
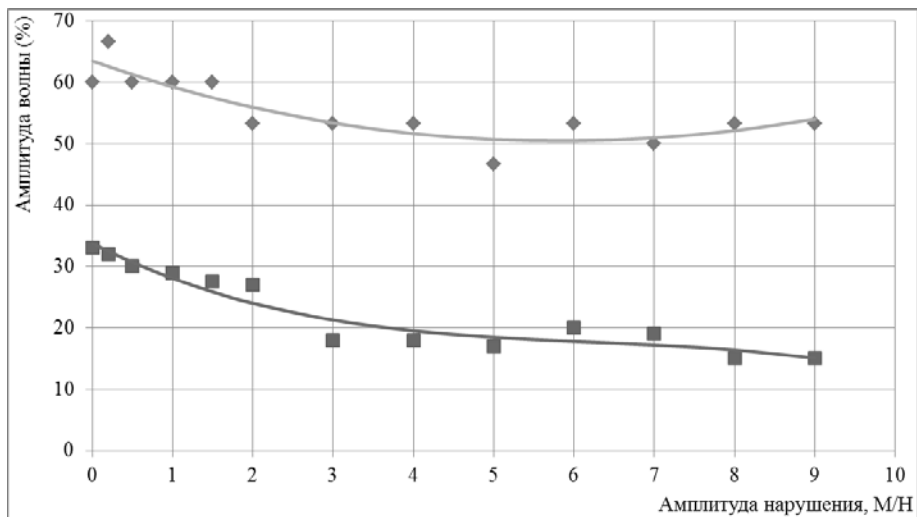
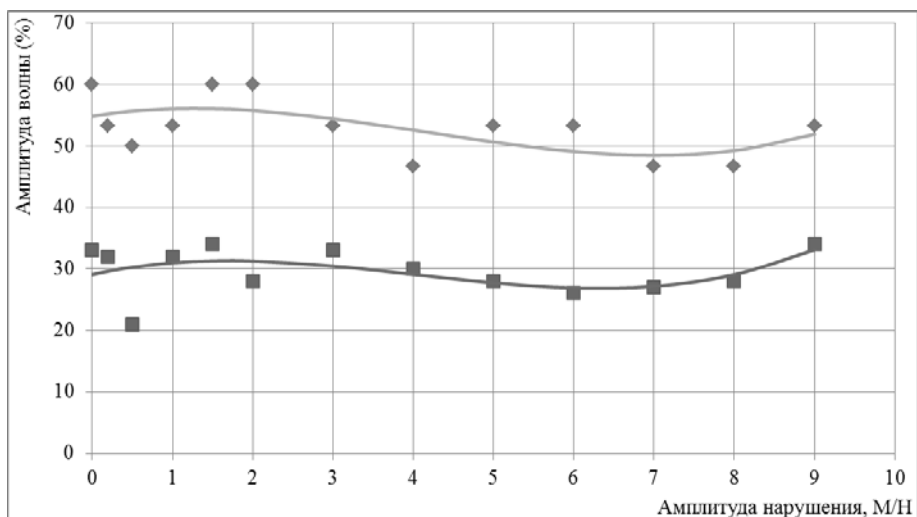


Рис. 5. Модель, используемая при проведении численных расчетов для исследования влияния сближенных угольных пластов на амплитудно-частотные характеристики волнового поля, проходящего через дизъюнктив

Данная закономерность требует более детального рассмотрения. Как было отмечено выше, основная колебательная энергия «канализуется» волноводом сложного строения, образованным сближенными угольными пластами и прослойкой алевролита между ними. Нижележащие пласты алевролита и аргиллита вместе со сближенным угольным пластом также образуют вторичные волноводы сложного строения. Постепенное увеличение амплитуды нарушения приводит к тому, что часть волновых пакетов, испытывая изменения в зоне дробления, переходит из второстепенных волноводов в угольный пласт и близлежащие породы (с учетом модели на рисунке 5 – источник сигнала расположен слева), и, интерферируя с другими волновыми пакетами, продолжает распространяться по волноводу сложного строения.



а)



б)

Типы волновых пакетов:

- ◆ — боковые волны сжатия;
- — боковые волны сдвига.

Рис. 6. Зависимость амплитуд волновых пакетов боковых волн сжатия и сдвига от амплитуды нарушения для модели, которая содержит волновод сложной структуры: а) источник сигнал расположен с левой стороны модели; б) источник сигнал расположен с правой стороны модели

В результате чего, например, амплитуда боковых волн сдвига при нарушении 9 м такая же, как при отсутствии смещения в нарушении (в отличие от аналогичной ситуации при положении

источника с правой стороны модели). Таким образом, с учетом геологоразведочных данных теоретически возможно определить не только амплитуду нарушения, но и направление смещения вдоль нарушения.

Основное наблюдаемое изменение в частотных спектрах информативных волновых пакетов – появление низкочастотного пика с частотой 30 – 50 Гц, отсутствующего в обобщенном спектре сигнала для модели без аномалии (рис. 7).

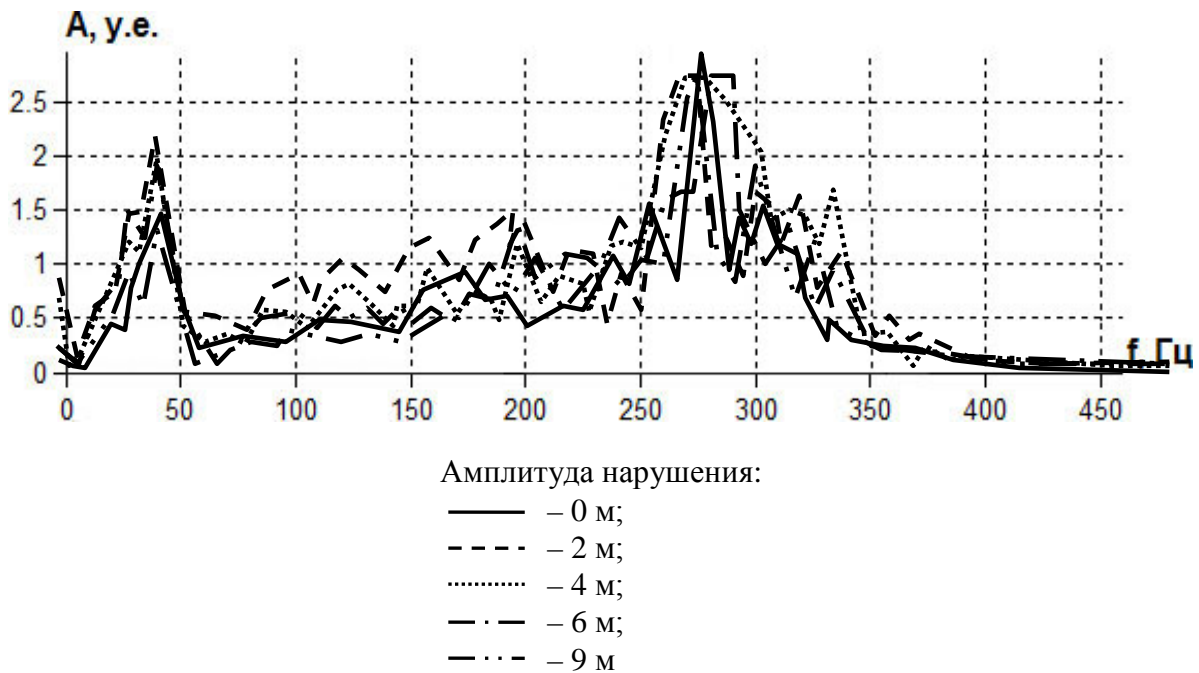


Рис. 7. Характерные частотные спектры волнового поля, полученные для разных значений амплитуды нарушения при моделировании волновода сложного строения

Перейдем к рассмотрению вопроса о влиянии на характеристики сейсмических полей параметров зоны разуплотнения.

Анализ влияния ширины зоны трещиноватости на амплитуду проходящего сигнала показывает, что падение амплитуды боковых волн всех типов для нарушения типа сброс в среднем не превышает 3 – 5 % на каждые 5 метров пути по аномалии (рис. 8). Для каналовой волны, образованной волноводом сложного строения эта величина может достигать 10 – 15 %. Самое большое па-

дение амплитуды отмечается при прохождении начального участка зоны трещиноватости (от 5 до 10 м).

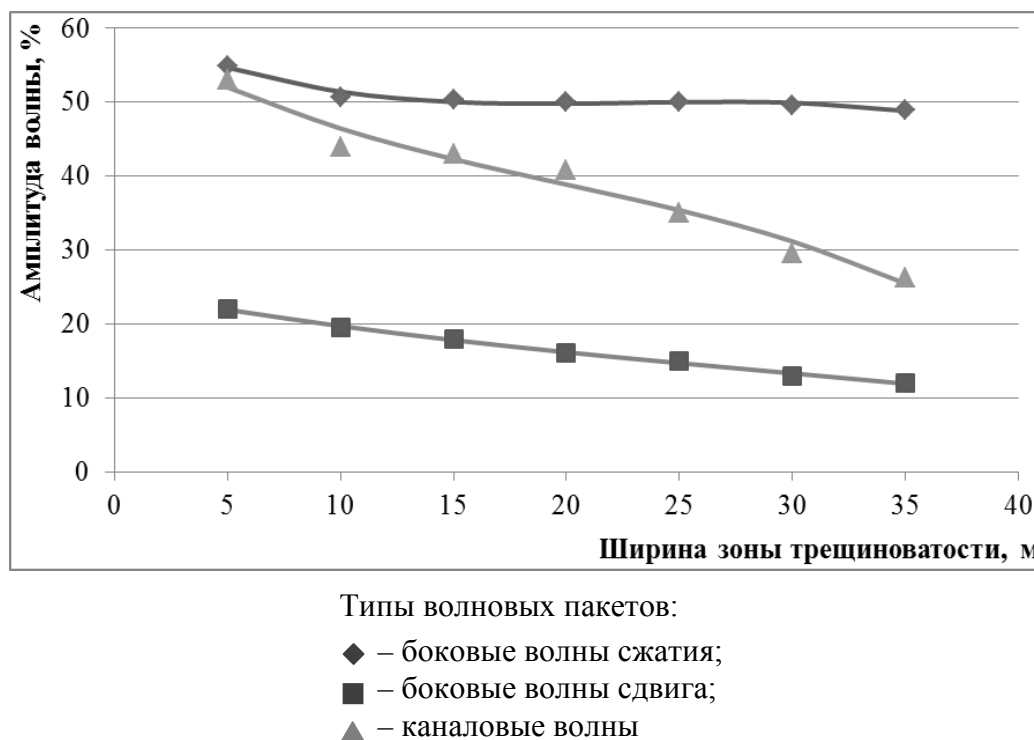


Рис. 8. Зависимость амплитуд волновых пакетов различной природы от ширины зоны влияния тектонического нарушения типа сброс

Полезную информацию дает анализ усредненных частотных спектров при изменении ширины зоны трещиноватости (рис. 9). Сравнение частотных спектров показывает, что в высокочастотной части происходит сдвиг локальных максимумов на 10 – 20 Гц в сторону низких частот. Для низкочастотной части эта величина немного меньше и не превышает 5 Гц. Колебание с частотой до 50 Гц преодолевают нарушение практически без изменения амплитуды. Особенно четко это заметно для диапазона частот от 25 до 50 Гц.

При прохождении сейсмических колебаний через нарушение типа сброс, в силу симметрии изменений упругих характеристик среды в зоне аномалии, не было разницы, с которой стороны поступает сигнал. При прохождении сейсмических колебаний че-

рез асимметрическое в акустическом плане нарушение типа надвиг такой фактор имеет существенное значение.

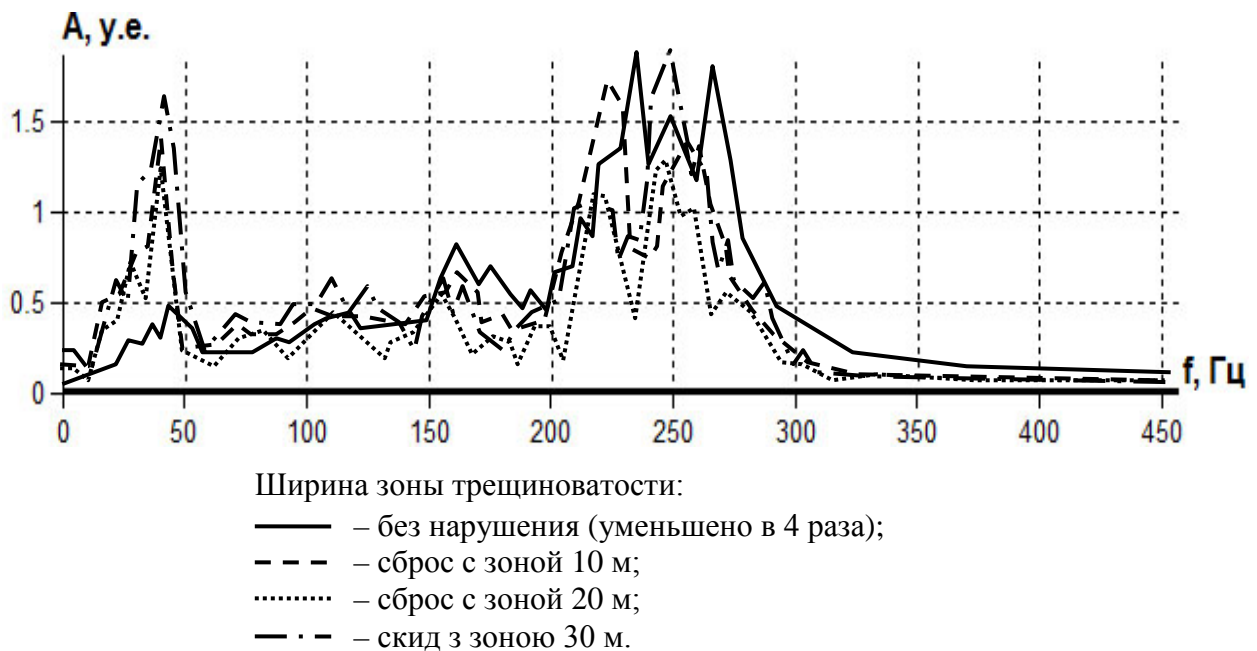


Рис. 9. Изменение амплитудно-частотного спектра с увеличением ширины зоны трещиноватости для нарушения типа сброс

Как показали результаты моделирования для надвига кроме изменения амплитудных характеристик, меняется структура сигнала. Это проявляется в удлинении волновых пакетов любой природы при увеличении степени изменения параметров и, иногда, в разделении пакетов разной природы. Количественно аспект удлинения пакетов тяжело описать, поскольку он существенно зависит от параметров угля, пород и характера их изменения в зоне нарушения. Разделение пакетов различной природы происходит за счет разной степени замедления волновых пакетов в зоне трещиноватости.

Амплитуда боковых волн сжатия зависят от плотности и скоростных характеристик среды в зоне аномалии в большей степени, чем амплитуда боковых волн сдвига и каналовых волн. Увеличение плотности и скоростных характеристик вмещающих пород на 10 % (угля на 20 % соответственно) вызывает увеличе-

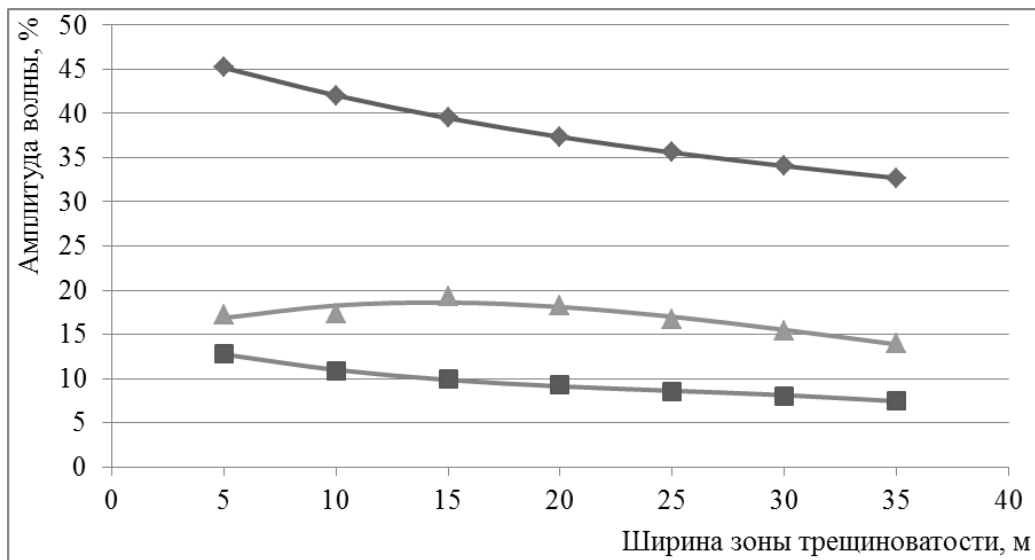
ние амплитуды боковых волн сжатия на 7 – 9 %. Для боковых волн сдвига эта величина не превышает 5 %.

При прохождении сейсмических колебаний через асимметричное в акустическом плане нарушение типа надвиг колебания, которые распространяются со стороны висящего крыла, встречают зону трещиноватости пород и угля с намного более резкой акустической границей (за счет высокой акустической жесткости пород в зоне влияния нарушения). Колебания, распространяющиеся со стороны лежащего крыла, встречают зону сниженной акустической жесткости. Но непосредственно за ней располагается висящее крыло надвига с аномально высокой акустической жесткостью, которая также создает чрезвычайно резкую акустическую границу. Это в значительной мере влияет на процессы преломления и отражение волн в зоне влияния сместителя тектонического нарушения. С учетом изменения геометрических характеристик нормального залегания угольных пластов и вмещающих пород данный процесс становится тяжело описываемый.

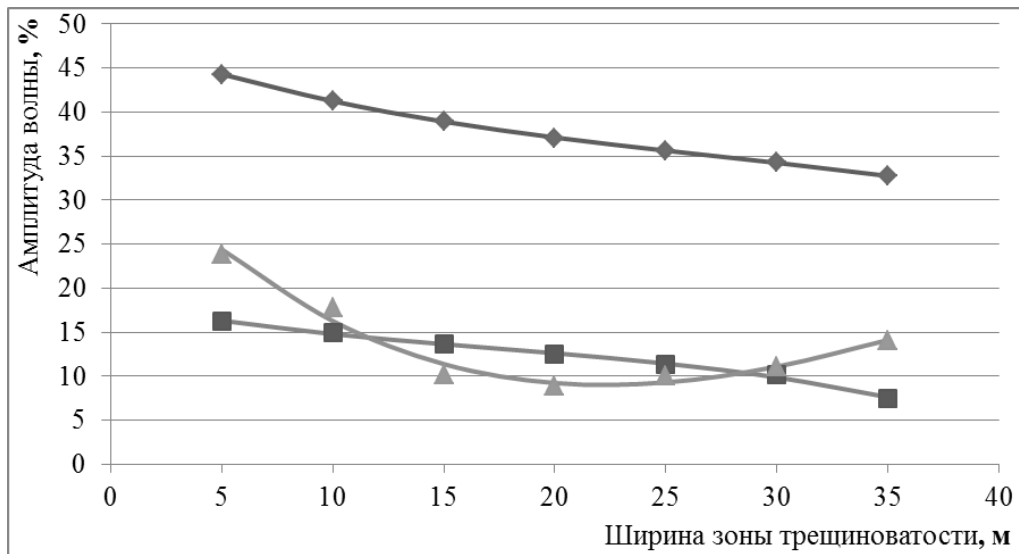
Сложный характер зависимости большей мерой проявляется для амплитуды каналовой волны. Например, до 10 % изменения параметров среды амплитуда каналовой волны практически остается постоянной независимо от положения источника. При изменениях больше 15 %, если источник расположен со стороны лежащего крыла, отмечается постепенное увеличение амплитуды каналовой волны на 1 – 3 % на каждые 5 % уменьшения плотности и скоростей вмещающих пород. Если источник расположен со стороны висящего крыла, наблюдается противоположная ситуация с сохранением зависимости. Следует заметить, что при больших амплитудах нарушения в большинстве случаев выделить каналовую волну не представляется возможным.

На рисунке 10 представлена зависимость амплитуд волн от ширины зоны влияния надвига для значения изменения плотности и скорости распространения волн в зоне аномалии на 35 % для угля и 20 % – для вмещающих пород. Увеличение ширины зоны влияния надвига на каждые 10 м приводит к уменьшению амплитуд боковых волн сдвига не более чем на 5 %. Боковая волна сжатия, при этом уменьшает свою амплитуду не более чем на 3 %. Изменение амплитуд каналовой волны, как и для зависимо-

сти от степени изменения упругих параметров среды, имеет сложный характер.



а)



б)

Тип волновых пакетов:

- ◆ – боковые волны сжатия;
- – боковые волны сдвига;
- ▲ – каналовые волны.

Положение источника:

- а) со стороны лежачего крыла;
- б) со стороны висячего крыла

Рис. 10. Зависимость амплитуд волновых пакетов различной природы от ширины зоны влияния надвига

Сравнение характера зависимости проходящих волн от характеристик зон влияния тектонических нарушений типа сброс и надвиг для случая сближенных угольных пластов показывает интересную особенность: для надвига амплитуды волн в два и более раз сильнее зависят от степени изменения характеристик среды, чем амплитуды волн, которые преодолевают сброс.

При рассмотрении зависимости частотных характеристик волновых пакетов для нарушения типа надвиг независимо от положения источника относительно зоны влияния наблюдается существенное изменение спектральной характеристики волнового поля. Для случая положения источника со стороны лежащего крыла наблюдается сдвиг локального максимума низкочастотных колебаний (с частотой от 10 до 50 Гц) в область высоких частот на 10 Гц. В случае положения источника со стороны висящего крыла только при ширине зоны влияния сброса более 20 м прослеживается расширение спектров высокочастотных (с частотой от 200 до 300 Гц) максимумов в область низких частот на 10 – 15 Гц.

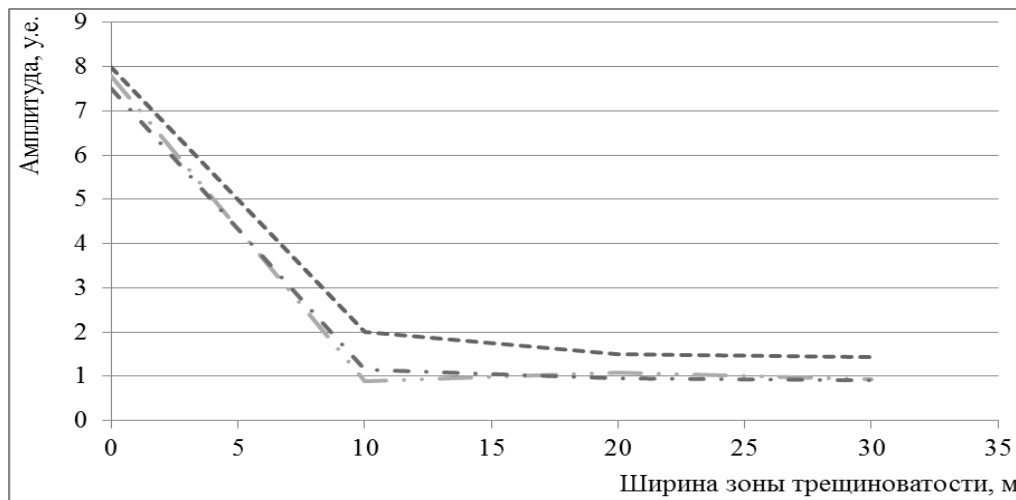
Результаты расчетов показывают, что для всех моделей характерно значительное ослабление колебаний с частотой от 100 до 450 Гц (рис. 11). Независимо от типа нарушения зона трещиноватости выполняет роль фильтра низких частот. Причем наибольшее ослабление высокочастотной составляющей сигнала наблюдается при изменении ширины зоны трещиноватости от 1 до 10 м.

Тектонические нарушения, как правило, сопровождаются зоной концентрации горного давления, приводящей к дополнительному изменению физико-механических свойств углевмещающей толщи [4, 5]. При этом:

- рост горного давления приводит к уменьшению коэффициента затухания сейсмических колебаний;

- поскольку уголь имеет более высокую пластичность и трещинную пористость в сравнении с вмещающими породами, при увеличении горного давления эффективные модули упругости угля увеличиваются в 1,5 - 2 раза быстрее, чем аналогичные параметры пород;

– при росте горного давления скорости продольных волн растут в 2 - 4 раза быстрее, чем скорости поперечных.



Тип нарушения:

- - - – сброс;
- · - – надвиг: источник со стороны лежачего крыла;
- · · - – надвиг: источник со стороны висячего крыла

Рис. 11. Зависимость амплитуд высокочастотных волновых пакетов различной природы от ширины зоны влияния тектонического нарушения

Моделирование влияния зон повышенного горного давления на параметры полного волнового поля проводилось по следующей схеме. Предполагалось, что горное давление меняется в интервале $\pm H$ % от базового значения γH . Упругие константы в угле растут соответственно росту скоростей распространения волн согласно соотношениям:

$$\lambda = \rho(V_p^2 - 2V_s^2), \mu = \rho V_s^2.$$

Если для определения упругих констант необходимо проведение специальных экспериментальных исследований, то скорости распространения волн сдвига V_s и волн сжатия V_p можно непосредственно определить при выполнении сейсмического прогноза по времени первых вступлений соответствующих волновых пакетов.

При проведении численных экспериментов предполагалось, что горное давление, закономерность изменения которого описывает параметр $G = \Delta\mu/\mu_0 \times 100$ (%), приложено на интервале длиной L .

На рис. 12 приведены изменения значений амплитуд боковых волн сжатия (а) и сдвига (б), рассчитанных для параметра G в диапазоне от 1 % до 26 %, а также параметра L в диапазоне от 10 % до 90 % протяженности исследуемого участка. Значения брались для сейсмоприемника, настолько удаленного, чтобы все волновые пакеты наблюдались отдельно.

Наличие зоны ПГД в большей мере влияет на боковые волны сжатия. Малые изменения давления (от 1 % до 10 %) оказывает незначительное влияние на амплитуду боковых волн сжатия. Но уже на участке 11 % - 26 % отмечается её резкое снижение. В отличие от волн сжатия, снижение амплитуд боковых волн сдвига происходит равномерно для всех значений G .

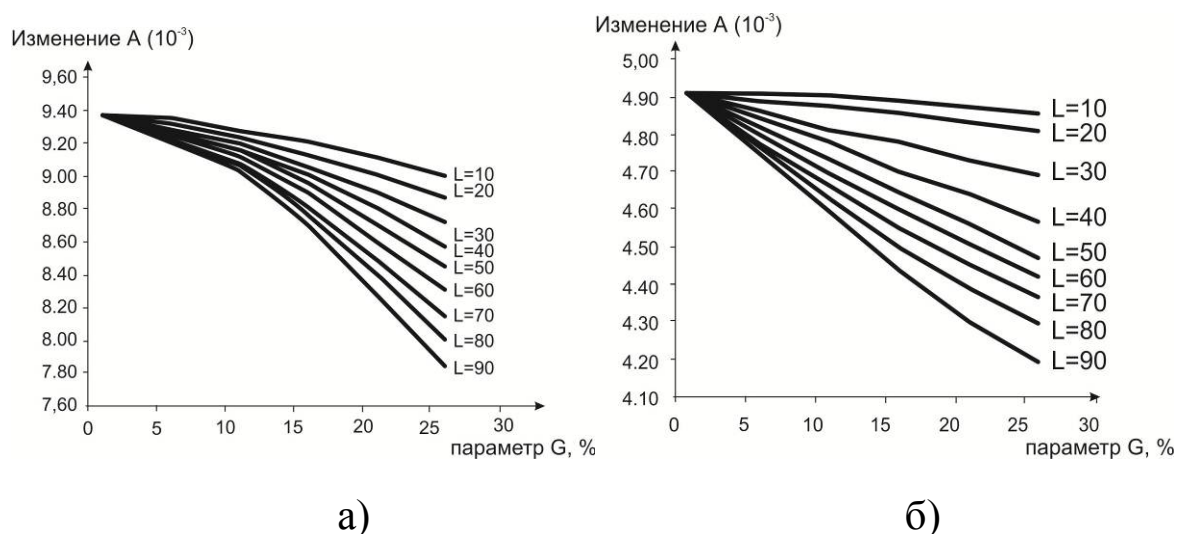
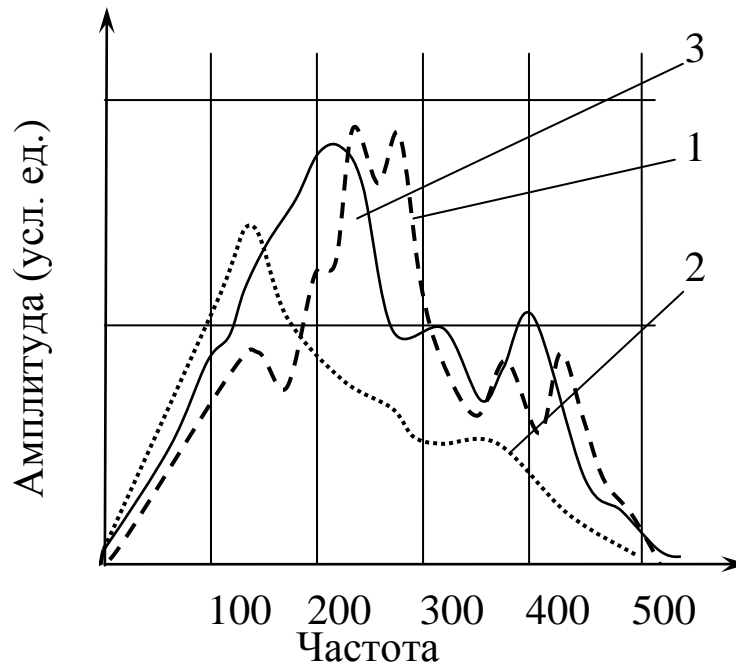


Рис. 12. Зависимость амплитуд боковых волн сжатия и сдвига от параметров зоны ПГД

При распространении колебаний по области трещиноватости, как и в случае распространения колебаний по области ПГД, наблюдается изменение спектральной характеристики сигнала.

На рисунке 13 показаны характерные усредненные частотные спектры боковых волн сжатия, проходящие зоны аномалий разных типов со степенью изменения плотности и скоростных характеристик в угле равной 20 %. Для сравнения также представлен спектр для модели без нарушения. В случае модели ПГД, спектр сигнала отличается значительным участием высоких частот, тогда как в случае зоны трещиноватости высокочастотная составляющая окажется подавленной.



- 1) зона ПГД шириной 60 м и степенью изменения плотностных и скоростных характеристик среды на 20 % от не нарушенной;
- 2) зона трещиноватости шириной 60 м и степенью изменения плотностных и скоростных характеристик среды на 20 % от ненарушенной;
- 3) без нарушения.

Рис. 13. Усредненные частотные спектры теоретических сейсмограмм для моделей

Расчеты показывают, что на подавляющем большинстве моделей смещение максимумов частотного спектра боковых волн на 20 – 25 Гц в низкочастотную область свидетельствует о возмож-

ном присутствии зоны уплотненных пород, тогда как такое же изменение максимумов частотного спектра боковых волн в высокочастотную область свидетельствует о зоне ПГД.

Анализ характеристик волновых полей в зонах тектонических нарушений проводился в рамках выполнения научно-исследовательской работы «Разработка методологии сейсмического прогноза нарушенности угольных пластов с учетом напряженно-деформированного состояния и свойств горного массива». Результаты анализа проверялись в ходе натуральных сейсмических наблюдений на горнодобывающих предприятиях Украины: шахта им. А. Ф. Засядько, шахта «Должанская-Капитальная», шахта «Днепровская» ВАТ Павлоградуголь, шахта «Красноармейская-Западная № 1». В целом результаты теоретического анализа не противоречат проводимым ранее по данной тематике исследованиям [4, 5], также были подтверждены и дополнены известные системы критериев.

СПИСОК ССЫЛОК

1. Вербицкий Т. З., Починайко Р. С., Стародуб Ю. П., Федорин А. С. / Математическое моделирование в сейсморазведке – К.: Наук. думка, 1985. 276 с., ил.
2. Глухов А. А., Анциферов А. В. Сейсмические волновые поля, регистрируемые на угольных пластах Донбасса при решении задач шахтной сейсморазведки // Зб. наук. праць Національного гірничого університету. – Днепропетровск: НГУ, 2005. – № 23. – С. 120 – 128.
3. Глухов А. А. Физико-математические модели углевмещающей толщи и нарушений угольных пластов // Вісті Донецького гірничого інституту. – Дніпропетровськ: НГУ, 2004. – № 1. – С. 13 – 17.
4. Анциферов А. В. Теория и практика шахтной сейсморазведки. – Донецк: ООО “Алан”, 2002. – 312 с.
5. Азаров Н. Я., Яковлев Д. В. Сейсмоакустический метод прогноза горно-геологических условий эксплуатации угольных месторождений. – М.: Недра, 1988. – 199 с.