

УДК 550.834: 622.12

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВОЛНОВЫХ ПОЛЕЙ С ПЛИКАТИВНЫМИ НАРУШЕНИЯМИ

**Анциферов А. В.**

(УкрНИИМИ НАНУ, г. Донецк, Украина)

*Наведені результати детального аналізу впливу плікативних порушень вугільних пластів на амплітудно-частотні характеристики реєстрованих в умовах Донбасу інформативних хвильових пакетів.*

*We present results of the detailed analysis of the impact of plication dislocations of coal seams on amplitude-frequency characteristics of informative wave trains recorded in conditions of the Donets Coal Basin.*

Пликативные тектонические нарушения, не выявляемые эксплуатационной разведкой и устанавливаемые преимущественно подготовительными выработками - очень мелкие (по классификациям пликативов) складки и флексуры длиной менее 100 м, амплитудой в метры, реже первые десятки метров и радиусом кривизны пласта в сечениях: вдоль забоя лавы  $R < 10$  м, перпендикулярно забою  $R < 100$  м [1, 3].

Основными факторами, осложняющими ведение горных работ в зонах развития пликативов являются: изменения углов падения угольных пластов, превышающие допустимые для проходческих комбайнов и выемочных комплексов; зоны повышенной трещиноватости углей и вмещающих пород в замковых частях складок, ухудшающие условия поддержания горных выработок и обуславливающие повышенную обводненность или газоносность [2].

Кроме того, в зонах развития микроскладчатости снижается производительность труда (нагрузка на очистной забой уменьшается в среднем в 2,5 раза), ухудшается качество угля.

Разрешающая способность сейсморазведки при изучении и прогнозе пликативных нарушений должна соответствовать их параметрам, приведенным выше. Поэтому вопрос влияния пликативных нарушений угольных пластов на амплитудно-частотные характеристики регистрируемых в условиях Донбасса информативных волновых пакетов является достаточно актуальным.

Рассмотрим разрез складки плоскостью, перпендикулярной плоскости залегания пласта (см. рис. 1). В плоскости сечения можно выделить несколько геометрических параметров, определяющих её степень влияния на характеристики волнового поля.

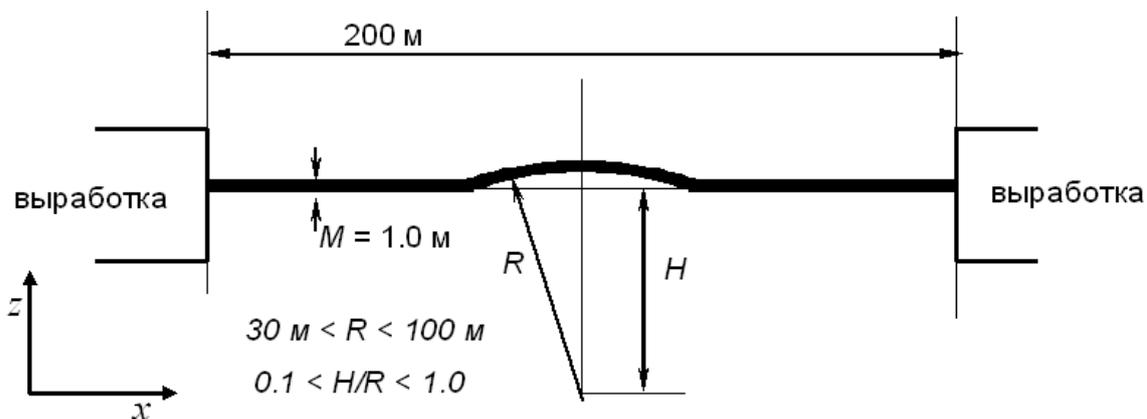


Рис. 1. Упрощенная модель, используемая при проведении расчетов характеристик волнового поля в зоне мульд

Радиус кривизны складки  $R$  является характеристикой, определяющей «степень искривления» угленосной толщи. При этом складки с одним и тем же радиусом кривизны могут образовывать различные изгибы волновода. Отношение  $H/R$  (где  $H$  представляет собой расстояние от центра «окружности» складки до пласта) задает угол  $\alpha$  изгиба волновода на границе со складкой. Чем больше отношение  $H/R$ , тем больше угол встречи с мульдой и тем в большей степени складка будет изменять характеристики волнового поля.

Для оценки зависимости характеристик сейсмических полей от параметров мульды был использован ряд моделей. Обрабатываемый угольный пласт имеет мощность 1,0 м. Сверху и снизу залегают одинаковые породы (песчаник, аргиллит либо алевролит). Физические свойства угля и пород соответствуют средней и поздней стадиям катагенеза, что соответствует маркам угля Д, Г, Ж, К, и ОС. Пласт оконтурен выработками, расстояние между которыми равно 200 м. Строго между ними расположена мульда, параметры которой варьируются. Радиус кривизны изменяется в пределах от 30 до 100 м, расстояние центра окружности варьируется таким образом, чтобы соотношение  $H/R$  изменялось в пределах от 0,1 до 1,0. При  $H/R = 1$  модель соответствует ненарушенному пласту.

Всего было рассчитано около 60 моделей. При проведении расчетов время выбиралось таким образом, чтобы все информативные волновые пакеты достигли противоположной от точки возбуждения сигнала выработки. На рис. 2 представлены последовательные стадии распространения  $P$  и  $SV$  волн в плоскости, перпендикулярной плоскости залегания угольного пласта. Каждый из них был получен наложением картин распределений амплитуд колебаний частиц среды вдоль направлений  $X$  и  $Z$  в определенный момент времени.

На рис. 2 отчетливо видны основные составные части колебательного процесса. Первую группу волн порождает продольная волна (на рисунках она обозначена цифрой 1), распространяющаяся со скоростью продольных волн во вмещающей породе. Её характерная длина волны равна 15 - 20 м. Взаимодействуя с угольным пластом она образует:

- информативную боковую волну сжатия, распространяющуюся вдоль границы раздела сред со скоростью распространения продольных волн в породе;

- систему многократно отраженных от границ пласта интерференционных продольных и поперечных волн (4), распространяющихся в пласте и в непосредственной близости от его границ (на схеме она окружена пунктирным овалом);

- обменные волны сдвига (2), образованные падающими от центра пласта на его границы продольными волнами из системы

(4) и распространяющиеся во вмещающих породах прямолинейным фронтом (на рисунках они показаны пунктиром).

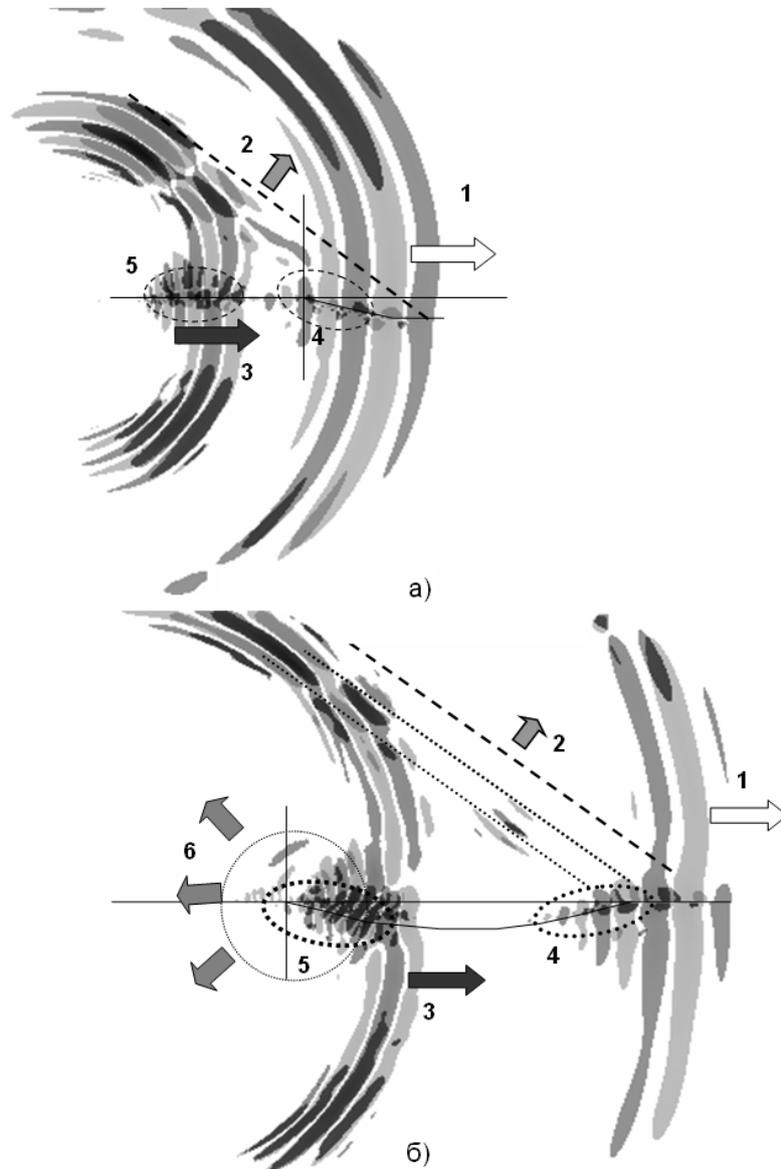


Рис. 2. Картины распространения сейсмоакустических колебаний в плоскости, перпендикулярной плоскости залегания угольного пласта при наличии мульды: а)  $t = 30$  мс; б)  $t = 50$  мс

Вторую группу волн порождает поперечная волна (обозначена цифрой 3). Её длина волны составляет 10 – 15 м. Взаимодействуя с угольным пластом она образует:

- информативную боковую волну сдвига, распространяющуюся вдоль границы раздела сред со скоростью распространения поперечных волн в породе;

- систему многократно отраженных от границ пласта интерференционных волн (5), распространяющихся подобно системе (4) в пласте и в непосредственной близости от его границ (характерная длина волны изменяется от 10 – 15 м в головной части, до 5 – 10 м в хвостовой части);

- обменные волны сжатия, образованные системой волн (5) и «догоняющие» во вмещающих породах фронты поперечных волн (3).

Рис. 2 а соответствует моменту, когда все информативные волновые пакеты уже сформировались, а фронт продольных волн достиг мульды. На рис. 2б он достиг её противоположного края. Наличие аномалии привело только к очень слабому нарушению симметрии фронта продольных волн. В то же время система многократно отраженных волн (4) и порождаемые ею обменные волны отреагировали в большей мере. Более низкочастотная часть колебаний (длина волны 10 – 15 м) «теряет» пласт в метях изгиба мульды и распространяется в прежнем направлении. Высокочастотная часть колебаний «теряет» пласт в значительно меньшей степени.

Вторая группа волн в момент времени соответствующий изображенной на рис. 2 б картине достигла мульды. Фронт поперечной волны к тому времени частично потерял сплошность за счет интерференции с догоняющими его фронтами продольных обменных волн. Процесс пересечения мульды системой многократно отраженных волн (5) сопровождается несколькими интересными особенностями.

Во-первых, наблюдается поворот фронта интерференционных волн в сторону изгиба. Во-вторых, происходит рассеяние волн аномалией. На рис. 2б хорошо заметны отраженные колебания (6) с длиной волны не более 5 м. Частота более 300 Гц. В последующие моменты времени рассеяние колебательной энергии прослеживается еще в большей мере. Оно происходит во все стороны от пласта. Характерная длина рассеянных волн составляет не более 10 м.

Проведенные вычисления показали, что процесс рассеяния колебательной энергии на границах складки тем значительнее, чем меньше величина  $H/R$  (больше угол  $\alpha$ ). В самой складке рассеяние тем сильнее, чем меньше радиус мульды. Эти результаты находятся в строгом соответствии с положениями физики о данном процессе. Низкочастотные части волновых пакетов (которые распространяются не только по пласту, но и в прилегающих областях почвы и кровли), должны в большей мере «терять пласт» на криволинейных участках чем «внутрипластовые» высокочастотные. Вследствие этого следует ожидать незначительного смещения пиков частотных характеристик прошедших по мульде волновых пакетов в высокочастотную область.

На рис. 3 представлены последовательные стадии распространения  $SH$  волн в плоскости, перпендикулярной плоскости залегания угольного пласта через каждые 10 мс, начиная с момента 30 мс от начала возбуждения колебаний.



Рис. 3. Последовательные стадии распространения  $SH$  волн в плоскости, перпендикулярной плоскости залегания угольного пласта через каждые 10 мс, начиная с момента 30 мс от начала возбуждения колебаний

В отличие от картин распространения  $P$  и  $SV$  волн, они очень просты и их интерпретация не составляет труда. 90 % колебательной энергии концентрируется внутри пласта. От момента достижения границ мульды и до момента её покидания волновой пакет образует отраженную волну, распространяющуюся в сторону источника колебаний. Рассеянные за пределы пласта волны имеют столь малую амплитуду, что практически не заметны.

В монографии [3] были приведены примеры сейсмограмм МСП, полученных для разных соотношений  $H/R$  (0,8; 0,75; 0,66), а также соответствующие спектральные характеристики. Было показано, что при наличии складки практически не наблюдается изменения структуры регистрируемого сигнала. Частотные характеристики сигнала слегка изменяются сужением частотного спектра  $Z$  и  $Y$  компонент волнового поля. На моделях складок, когда  $H/R < 0,7$  для  $X$  компоненты колебаний было получено расщепление спектра на высокочастотную (около 300 Гц) и сравнительно низкочастотную (около 200 Гц) составляющие. Отмечена тенденция падения амплитуды сигнала при уменьшении значения соотношения  $H/R$ . В наибольшей мере реагирует  $X$  компонента колебаний. При  $H/R = 0,8$  амплитуда уменьшается на 15-25 %, а при  $H/R = 0,66$  - на 40-50 %. Степень реагирования  $Y$  компоненты колебаний несколько слабее. При  $H/R = 0,8$  амплитуда уменьшается на 10-15 %, а при  $H/R = 0,66$  - на 25-30 % [3].

Последующие исследования в целом подтверждают, что наличие мульды не приводит к изменению общей структуры сигнала.

Изменения амплитуд и характерных частот волн  $P$ ,  $SV$  и  $SH$  при наличии мульды представлены на рис. 4 – 5. Представленные результаты не позволяют сопоставить аналитическое выражение характеру зависимости параметров волнового поля от радиуса кривизны складки и от значения  $H/R$ . Однако подтверждаются отмеченные в монографии [3] тенденции.

Во-первых, рассеяние колебательной энергии происходит на границах мульды тем в большей степени, чем меньше угол  $\alpha$ . При равных радиусах кривизны, падение амплитуды волновых пакетов любых типов волн тем больше, чем меньше значение  $H/R$ . Во-вторых, рассеяние колебательной энергии происходит в про-

цессе прохождения колебаний по мульде тем больше, чем меньше радиус мульды. Поэтому, при одинаковых  $\alpha$  падение амплитуды волновых пакетов любых типов волн тем больше, чем меньше значение  $R$ .

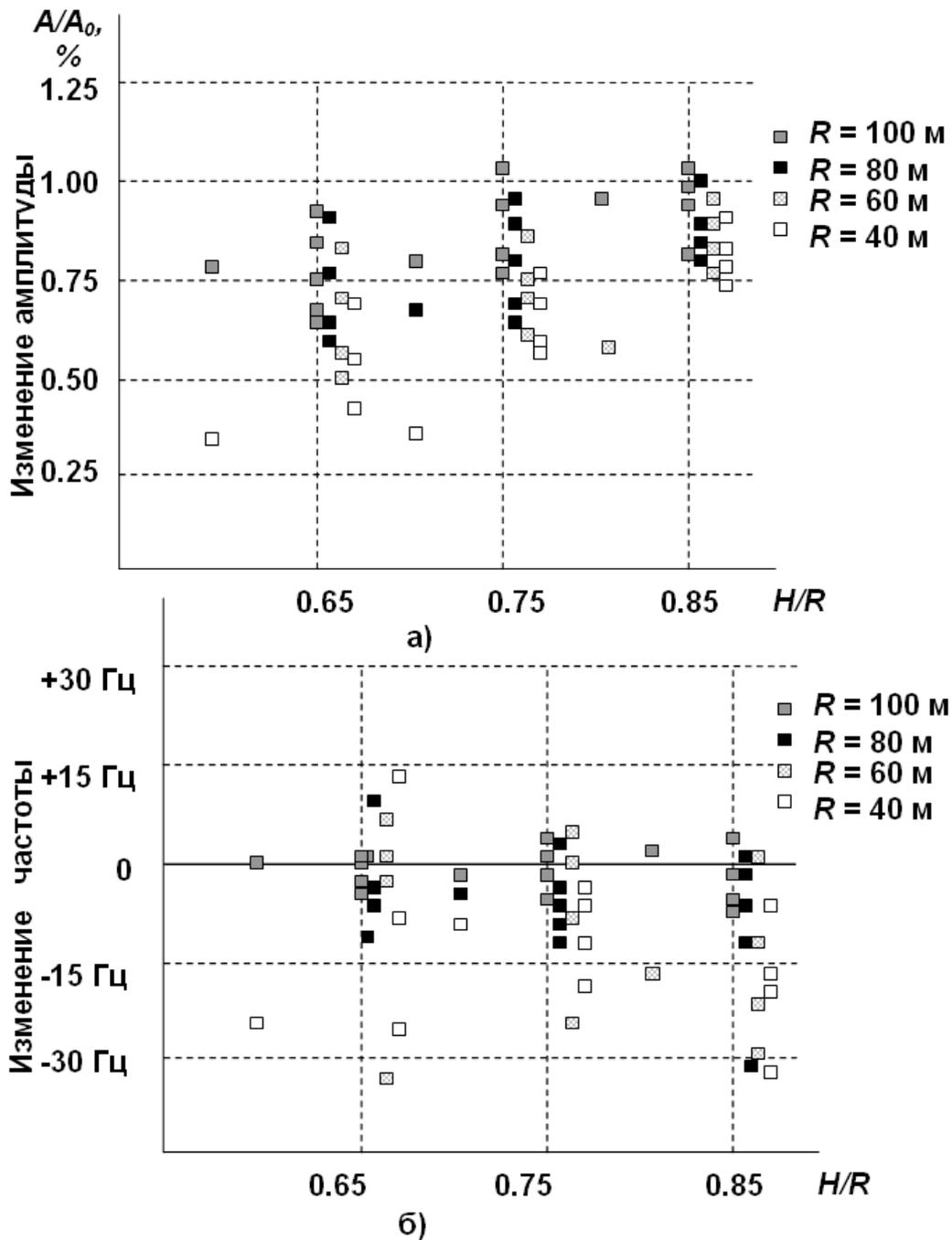
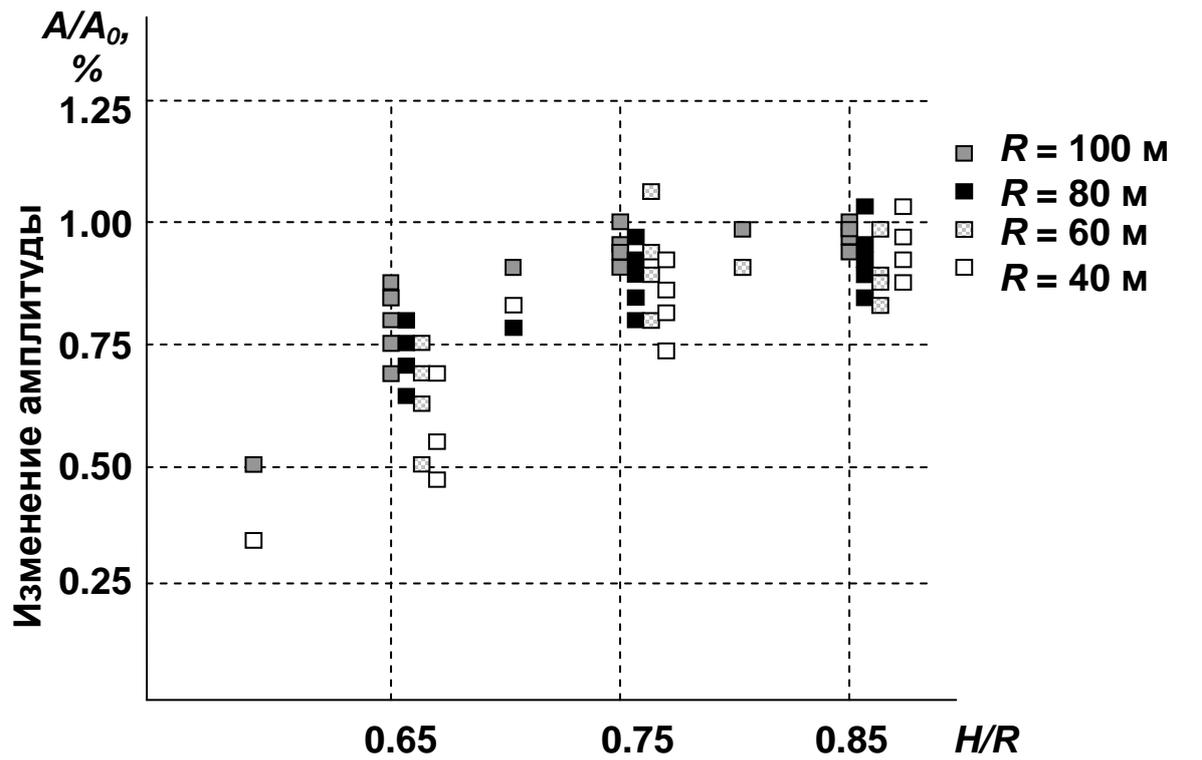
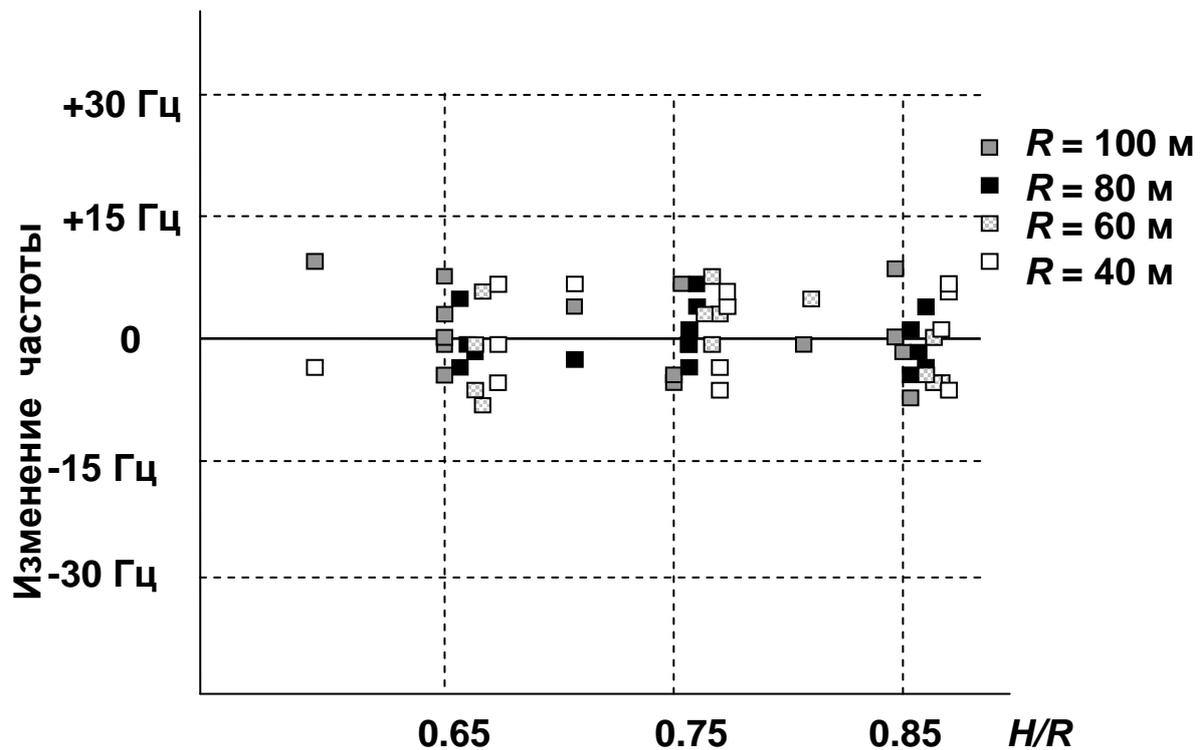


Рис. 4. Изменение амплитуд (а) и характерных частот (б) для  $P$  и  $SV$  волн при наличии мульды

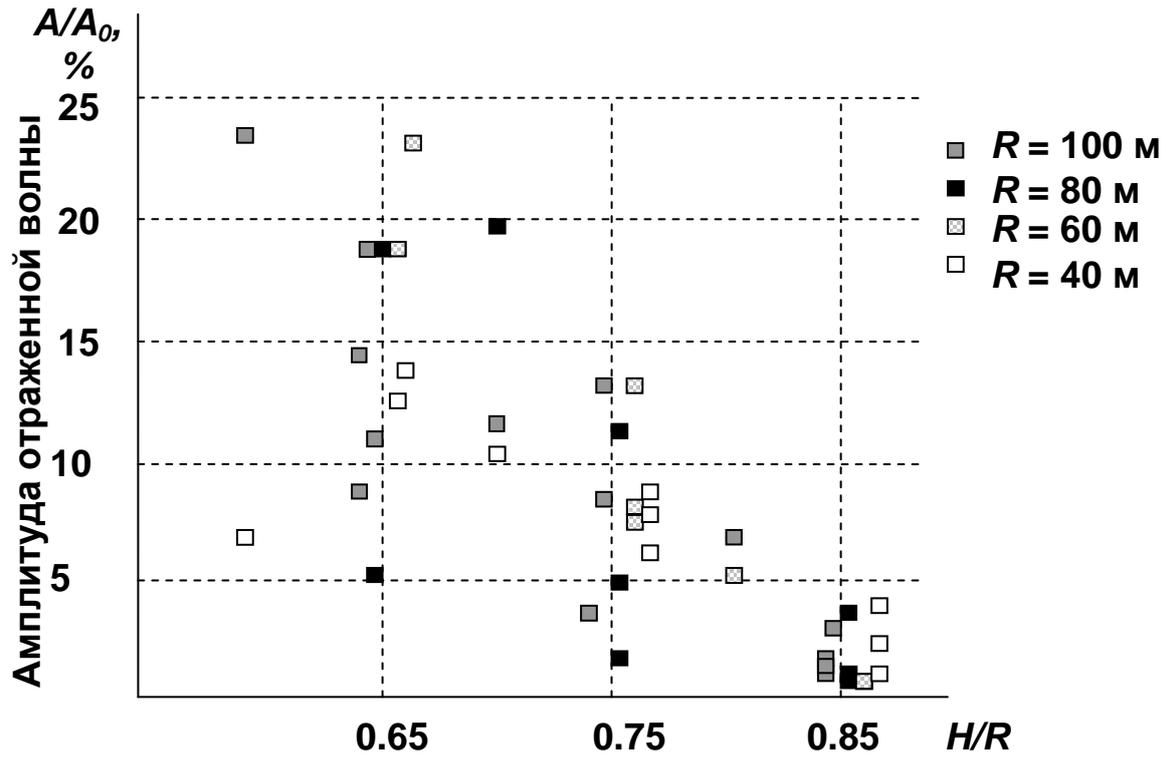


а)

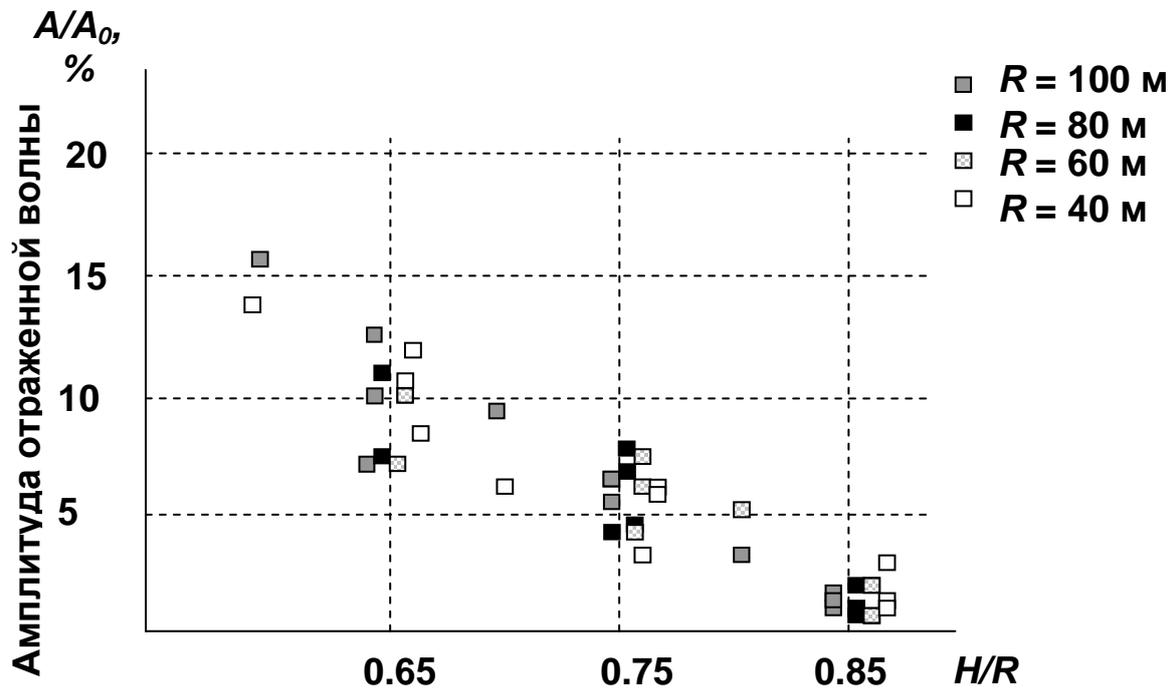


б)

Рис. 5. Изменение амплитуд (а) и характерных частот (б) для SH волн при наличии мутьды



а)



б)

Рис. 6. Зависимость амплитуды отраженной волны от характеристик муьды для SV (а) и SH (б) волн

Что касается изменения АЧХ, то при наличии аномалии характерно смещение максимумов частотного спектра волн  $P$  и  $SV$  в область низких частот. Это смещение, в среднем, тем больше, чем меньше радиус кривизны  $R$ , и меньше соотношение  $H/R$ . Говорить о какой-либо определенной тенденции изменения спектра волн  $SH$  не представляется возможным. Он практически не меняется.

Рассмотрим порождаемую складкой отраженную волну. На рис. 6 приведены распределения амплитуд отраженных  $SV$  и  $SH$  волн для различных значений радиуса мульды и отношения  $H/R$ . В качестве эталона были получены значения соответствующих амплитуд сейсмоотрасс, полученных на модели без аномалии в точках, соответствующих расстоянию 25 м от края мульды. Затем в тех же точках модели с аномалией были выделены отраженные волны и определена их амплитуда. Поскольку выделить отраженную (особенно  $SV$ ) волну не всегда представлялось возможным, брались во внимание только достоверные случаи.

Теоретические расчеты практически не выявили отраженных  $P$  волн с амплитудой 5 % и более, что отлично согласуется с результатами анализа в монографии [3]. Для  $SV$  и  $SH$  волн наблюдается увеличение амплитуды отраженного сигнала при уменьшении значения соотношения  $H/R$ . В наибольшей мере реагируют  $SV$  волны. При  $H/R = 0,85$  амплитуда отраженного сигнала составляет до 5 % от исходной, а при  $H/R = 0,66$  - от 10 до 20 %. Степень реагирования  $SH$  волн колебаний слабее. При  $H/R = 0,85$  амплитуда отраженной части колебаний не превышает 3 % от амплитуды исходного сигнала, а при  $H/R = 0,66$  составляет до 15 %.

Таким образом, обобщая результаты математического моделирования можно сделать вывод о принципиальной возможности выявления складок на основе анализа амплитудных, частотных и скоростных характеристик пересекающих нарушение волн, а также путем регистрации отраженных волн. Складка может быть выявлена методом сеймопросвечивания, если соотношение  $H/R$  не превышает 0,7. При меньших  $H/R$  изменение амплитуды  $P$  и  $SV$  проходящих волн может достигать 25 %, а частоты 10 - 15 Гц, что может быть зарегистрировано современной аппаратурой.

Наиболее информативные боковые волны сдвига. Изменение амплитуды  $SH$  волн также может достигать 20 – 25 %, изменения частоты практически не наблюдается. Уменьшение амплитуды волновых пакетов любых типов волн тем более, чем меньше значение  $H/R$  и меньше радиус мульды. Зависимость частотных характеристик волн от параметров мульды установить на данном этапе исследований не представляется возможным.

Границы складки могут быть оконтурены методом отраженных волн в случае, если соотношение  $H/R$  не превышает 0,7. Наиболее информативные боковые волны сдвига и  $SH$  волны.

### СПИСОК ССЫЛОК

1. Азаров Н. Я., Яковлев Д. В. Сейсмоакустический метод прогноза горно-геологических условий эксплуатации угольных месторождений. - М.: Недра, 1988. – 199 с.
2. 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.
3. Анциферов А. В. Теория и практика шахтной сейсморазведки. - Донецк: ООО “Алан”, 2002. – 312 с.