

УДК 550.834: 622.12

О ЗАКОНОМЕРНОСТЯХ ИЗМЕНЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛНОВЫХ ПОЛЕЙ В ЗОНАХ ПОДТОПЛЕНИЯ ПОДРАБАТЫВАЕМЫХ ТЕРРИТОРИЙ ДОНБАССА

Майборода А.А., Глухов А.А., Тиркель М.Г., Туманов В.В.
(УкрНИМИ НАНУ, г. Донецк, Украина)

Наведено встановлені закономірності зміни сейсмічних хвильових полів в зонах підтоплення підроблюваних територій Донбасу. Показано, що застосування математичного моделювання підвищує ефективність використання сейсмозвідки для прогнозу і контролю процесів підтоплення.

The established laws of change of seismic wave fields in zones of flooding of earned additionally territories of Donbass are resulted. It is shown that application of mathematical simulation improves efficiency of seismic works to predict and monitor the process of underflooding.

С развитием техногенно-геологической системы, образовавшейся в Донецком бассейне в результате многолетних широкомасштабных угледобывающих работ, связаны такие негативные процессы и явления, как сдвигение горных пород и деформации земной поверхности, образование провалов, изменение гидрогеологических условий, подтопление (затопление) подрабатываемых территорий [1]. Как было отмечено в решении НТС Минэкобезопасности Украины еще от 24.04.97 г., решение проблем, связанных с подтоплением территорий в результате эксплуатации и закрытия шахт – важнейшая задача в комплексе природоохранных мероприятий, без реализации которых возможны негативные экологические

последствия, по своим масштабам сопоставимые с Чернобыльской катастрофой.

Подтопление территорий в ходе ведения горных работ может быть вызвано оседаниями земной поверхности под влиянием очистных работ, подъемом уровня подземных вод вследствие сброса шахтных вод, а также их накоплением в прудах-накопителях, застройкой промплощадок шахт и складированием пород в отвалах.

Другая причина подтопления и затопления территорий связана с закрытием шахт. В результате так называемой «мокрой» консервации ликвидируемых шахт происходит затопление горного пространства с водонасыщением зоны обрушения и прилегающей зоны деформаций и, как следствие - гидрогеомиграция шахтных вод и соленых вод глубоких горизонтов к поверхности [3].

Таким образом, прогноз подтопления территорий по площади и во времени как при эксплуатации, так и при закрытии шахт является актуальной задачей. При её решении весьма существенную роль играют геофизические исследования, направленные на определение и прослеживание уровня грунтовых вод (УГВ), литологическое расчленение, определение мощности и строения верхней части разреза, а также уточнение путей миграции подземных вод на поверхность (прежде всего, по зонам повышенной трещиноватости массива горных пород). В частности, методы полевой сейсморазведки, позволяют определять и прослеживать УГВ в рыхлых отложениях, изучать строение и состояние массива горных пород, в том числе его техногенные изменения.

Основной физической предпосылкой возможности определения УГВ в рыхлых отложениях сейсмическим методом, является наличие скоростной дифференциации между влажными, но не водонасыщенными и полностью водонасыщенными грунтами [4,5]. Наличие такой дифференциации теоретически обосновано и подтверждено лабораторными исследованиями и полевыми сейсмическими наблюдениями. К настоящему времени можно считать установленными следующие особенности [4]:

- в рыхлых несвязанных и обломочных грунтах различие скоростей распространения продольных волн в зоне аэрации и ниже уровня грунтовых вод весьма весомо, причем изменение скорости происходит скачком, что является причиной образования на этой границе интенсивной преломленной волны, обладающей четко выраженными кинематическими и динамическими особенностями, позволяющими уверенно отличать ее от других волн с близкими скоростями;

- важной особенностью преломленной волны является возможность прослеживания ее в области как первых, так и последующих вступлений, что позволяет получать достаточно протяженные годографы;

- затухание преломленной волны тем больше, чем ближе к поверхности расположено зеркало грунтовых вод и зависит от мощности водонасыщенного слоя (чем меньше его мощность, тем быстрее затухает в нем преломленная волна);

- интенсивность и другие характеристики волны зависят от типа водоносных отложений (чем более глиниста порода, тем слабее и менее четко выражена волна).

Несмотря на накопленный опыт определения УГВ сейсмическим методом, целенаправленных теоретических и натурных исследований с целью разработки эффективных методик изучения и прогноза подтопления подработанных территорий практически не проводилось. Опыт анализа сейсмических полей показывает, что исследования целесообразно базировать на сейсмогеологическом и физико-математическом моделировании процесса формирования и изменения сейсмических полей в зонах подтопления.

Сейсмогеологическое моделирование имеет целью установление типовых параметров геологической среды в исследуемых условиях, включая упругие характеристики массива горных пород и их изменение под влиянием геологических и техногенных процессов. При проведении исследований в качестве исходных данных были использованы усредненные значения упругих характеристик горных пород угленосных формаций с учетом эпигенетической зональности (см. табл. 1.3 в [6]). Для расчетов взяты средние для стадии катагенеза

включающей угли марки Г значения. Они взяты для терригенных отложений (песчаники, алевролиты, аргиллиты) при гипотетическом допуске равномерного распределения их литотипов по всей угленосной толще. Угли и известняки ввиду их незначительного распределения в исследуемом глубинном диапазоне угленосной толщи (порядка 1%) не учитываются. Основная задача моделирования - установление критериев определения УГВ.

Разработанные сейсмогеологические модели подтопления территорий развития техногенно-геологической системы можно подразделить на два типа:

- модели для зоны влияния действующих шахт;
- модели для зоны влияния закрывающихся шахт.

На рис. 1 показана обобщающая сейсмогеологическая модель первого типа. Она описывает типичный случай подтопления в результате оседания земной поверхности под влиянием очистных работ.

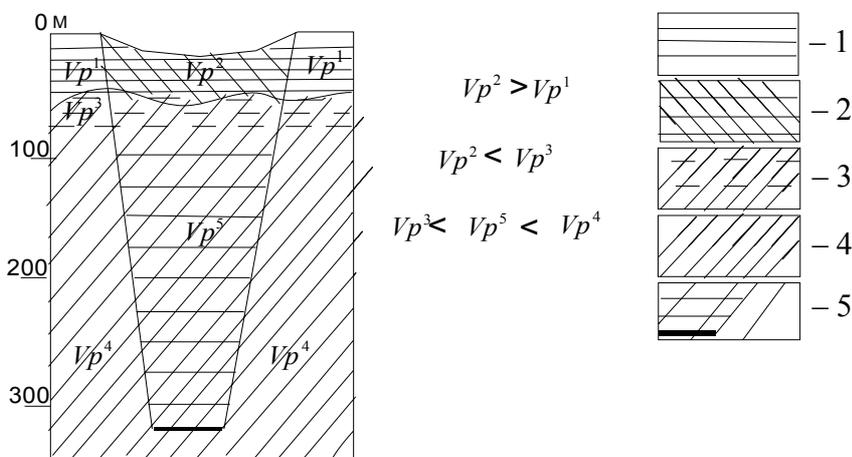


Рис. 1. Сейсмогеологическая модель подтопления (затопления) территорий в зоне влияния действующей шахты: 1 - покровные отложения, ЗМС; 2 – зона подтопления в покровных отложениях; 3 – ЗПС выветрелого карбона; 4 – непроработанная угленосная толща; 5 – отработываемый пласт и депрессионная воронка

Поскольку эффективность сейсморазведки зависит от типа водоносных отложений (если в грунтах с малой примесью глинистых частиц зеркало грунтовых вод является сильной преломляющей границей, то чем более глиниста порода, тем менее четко выражена волна), предлагается к рассмотрению один из наиболее типичных вариантов. В результате подтопления $V_p^2 > V_p^1$ на величину до 20% за счет повышения уровня грунтовых вод и общего увлажнения массива покровных отложений. Т.е. если в зоне малых скоростей (ЗМС) $V_p^1 = 350 - 1600$ м/с (в зависимости от литологии и водонасыщенности покровных образований), то в этой зоне на площади влияния горных работ V_p^2 составит порядка 400 – 1900 м/с.

Предполагается, что в маломощной (до 30м) зоне пониженных скоростей (ЗПС) ($V_p^3 = 1600 - 2400$ м/с) особых изменений не произойдет, поскольку на участках влияния подработки она попадет в зону депрессионной воронки. В целом, в массиве углевмещающих пород, попадающем в зону влияния горных работ и, соответственно, развития (за счет откачек воды) депрессионной воронки, скорость продольных волн будет меньше в сравнении с массивом пород, находящемся за пределами влияния подработки в естественно увлажненном состоянии ($V_p^5 < V_p^4$). Для углевмещающей толщи, включающей угли марки Г, $V_p^4 = 3330$ м/с, а V_p^5 составляет около 2600 м/с (что меньше V_p^4 на 20%).

На рис. 2 показана обобщающая сейсмогеологическая модель подтопления в зоне влияния закрывающихся шахт. Предпосылки построения этой модели аналогичны предыдущей (см. рис. 1). Однако отличия заключаются в том, что $V_p^2 \geq V_p^1$, поскольку здесь подтопления может и не быть (зависит от рельефа местности), $V_p^5 \leq V_p^4$, т.к. в результате «мокрой» консервации шахты в результате остановки откачки воды прекращается воздействие депрессионной воронки и подработанный массив постепенно увлажняется, приближаясь к естественному состоянию неподработанной толщи горных пород. Значения скоростей продольных волн аналогичны тем, которые используются в показанной на рис. 1 сейсмогеологической модели.

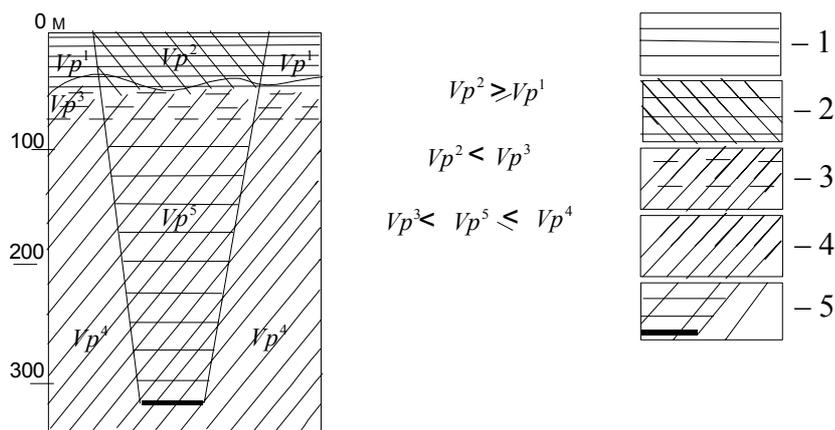


Рис. 2. Сейсмогеологическая модель подтопления (затопления) территорий в зоне влияния закрывающейся шахты: 1 - покровные отложения, ЗМС; 2 – зона подтопления в покровных отложениях; 3 – ЗПС выветрелого карбона; 4 – неподработанная угленосная толща; 5 – отработываемый пласт и депрессионная воронка

На рис. 3 представлена модель зоны водопроницающей трещиноватости массива горных пород, имеющей важнейшее значение вне зависимости от причин подтопления. Так, например, в зоне действующей шахты в подработываемой каменноугольной толще массива горных пород, попадающих под влияние депрессионной воронки, и относительного осушения, скорости продольных волн будут меньше ориентировочно на 20%. Для толщи с углями марки Г $V_p^3 = 3330$ м/с, а $V_p^4 = 2600$ м/с.

Что касается непосредственно зоны водопроницающих трещин, то в ее пределах $V_p^5 = 3900$ м/с (что больше V_p^3 на 20%), т.е. выполняется соотношение $V_p^4 < V_p^3 < V_p^5$.

Физико-математическое моделирование используется для установления закономерностей формирования волновых полей и разработки систем прогнозных критериев. На базе обобщенных сейсмогеологических моделей (см. рис. 1 - 3) разработаны физико-математические модели и проведено математическое моделирование сейсмических волновых полей в зонах подтопления подработанных территорий. Они базируются на идеологии применения идеально упругой модели Гука, в которой

для учета пористости и трещиноватости горных пород предложено вместо коэффициентов Ламе использовать «эффективные» модули упругости. Структуры моделей изображены на рис. 4 и рис. 5.

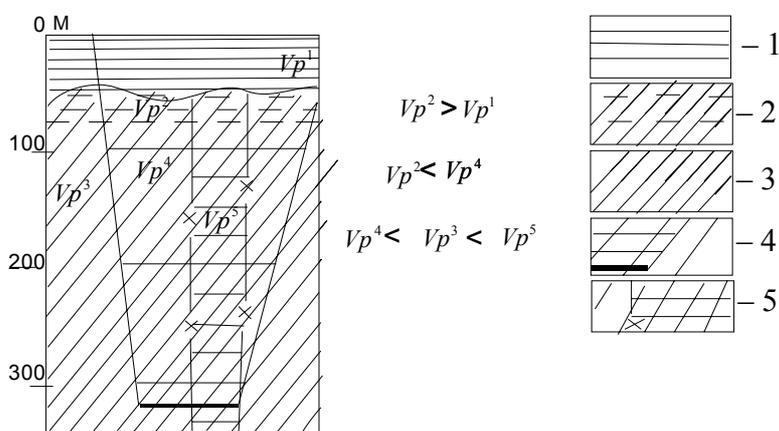


Рис. 3. Сейсмологическая модель зоны водопрводящих трещин в пределах влияния действующей шахты: 1 - покровные отложения, ЗМС; 2 – ЗПС выветрелого карбона; 3 – неподработанная угленосная толща; 4 – зона влияния отрабатываемого пласта; 5 – зона водопрводящих трещин

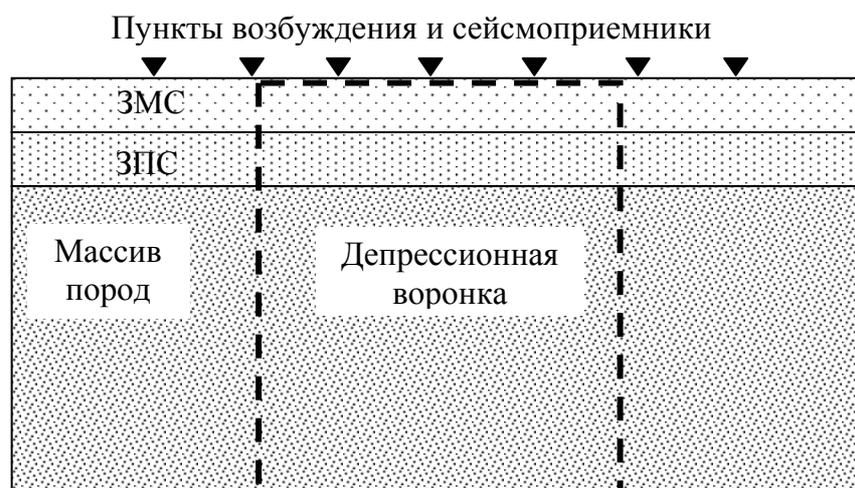


Рис. 4. Структура моделей в зонах подтопления территорий при отработке угольных пластов

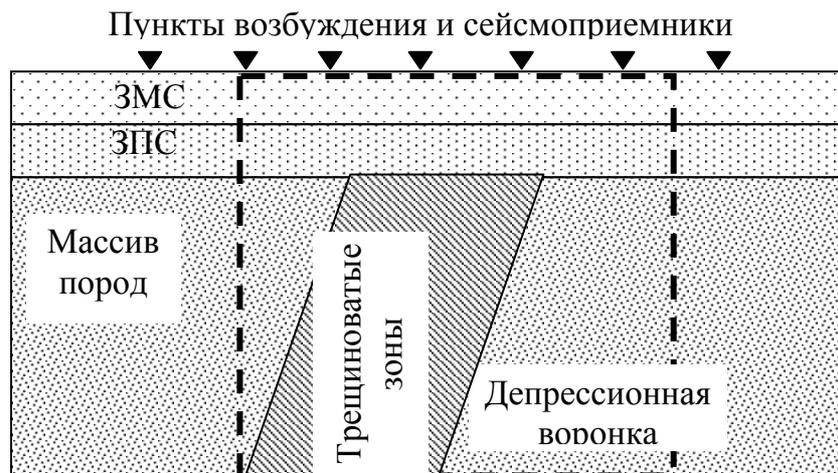


Рис. 5. Модель зоны повышенной трещиноватости пород, выходящих под покровные отложения

Модели учитывают различные типы водоносных отложений. Описываются как грунты с малой примесью глинистых частиц, для которых уровень грунтовых вод является сильной преломляющей границей, так и более глинистые породы.

В качестве базовой модели используется вариант, где в результате подтопления за счет повышения уровня грунтовых вод и общего увлажнения, массива покровных отложений скорости распространения продольных волн в породах ЗМС внутри депрессионной воронки повышены на 20%. В то же время на 25-40% увеличен коэффициент поглощения поперечных волн. Например, значения скорости распространения продольных волн в ЗМС в зависимости от литологии и водонасыщенности покровных образований варьировались от 350, до 1600 м/с. Мощность ЗМС в модели составляет порядка 50 м.

Мощность ЗПС в модели составляет порядка 30 м. Значения скорости распространения продольных волн в ЗПС варьировались от 1600 до 2400 м/с, что соответствует типовым скоростям распространения сейсмических волн в выветрелых породах карбона. Скорость продольных волн, в части массива, попадающей в зону влияния горных работ, снижена на 10-20%. Предполагается, что в пределах депрессионной воронки за счет откачки воды будет снижаться водонасыщенность пород в

сравнении с массивом пород, находящемся в естественно увлажненном состоянии за пределами влияния подработки.

Для описания пород вне депрессионной воронки использовались усредненные значения, соответствующие толщам, включающим угли марки Г. Значения скорости распространения продольных волн V_p составляют 3330 м/с, поперечных V_s – 1800 м/с. Средняя плотность ρ пород составляет 2640 кг/м³. В депрессионной воронке значения скорости распространения продольных волн V_p составляют 2600 м/с, поперечных V_s - 1500 м/с. Средняя плотность ρ пород составляет 2400 кг/м³. Для разновидностей моделей, соответствующих зоне влияния закрывающихся шахт, возможен случай, когда характеристики пород в зоне депрессионной воронки аналогичны тем, которые наблюдались вне зоны.

Модели путей миграции подземных вод на поверхность представляют собой модель зоны повышенной трещиноватости пород, выходящих под покровные отложения, которая располагается в пределах депрессионной воронки. Эта зона рассматривается как область водопроводящих трещин, которые отличаются повышенной обводненностью (см. рис. 5). Мощности и характеристики пород ЗМС и ЗПС аналогичны предыдущим моделям. В породах внутри депрессионной воронки скорости продольных волн снижены на 20%. В пределах зоны водопроводящих трещин скорость продольных волн составляет 3900 м/с (повышена на 20%). Следует отметить, что при математическом моделировании волновых полей исследованию зон водопроводящей трещиноватости массива горных пород уделено особое внимание как одному из важнейших факторов подтопления подрабатываемых территорий.

Рассмотрим результаты моделирования. Вычисления проводились в несколько этапов. Сначала производился расчет волнового поля, возбуждаемого отдельным источником сейсмических колебаний. На наборах теоретических сейсмограмм выделялись информативные волновые пакеты, для которых рассчитывались амплитудные, частотные и скоростные характеристики. Данные параметры также рассчитывались для сейсмических лучей, которые распространяются как по, так и вне

зоны влияния аномалии. На рис.6 представлены рассчитанные для момента времени $t = 0,175$ мс картины распределения X , Z и U компонент смещений частиц массива горных пород в плоскости профиля наблюдений.

Используемая модель характеризуется обводненной зоной, протяженностью около 150 м. Верхние слои модели образуют, как и в предыдущих случаях, подобие акустического волновода. Наличие обводненной зоны изменяет свойства волновода. В частности, резкое повышение скорости продольных волн в аномалии приводит к ослаблению резкости акустической границы с каменноугольными породами и появлению дополнительных акустических границ в зонах ЗМС и ЗПС между обводненной и необводненной зонами. Изменение параметров пород на этих границах моделировалось как скачкообразным, так и плавным (на протяжении 20-40 м) способом.

На рис.6 представлены рассчитанные для момента времени $t = 0,175$ мс картины распределения X , Z и U компонент смещений частиц массива горных пород в плоскости профиля наблюдений.

В пределах ЗМС и ЗПС интерференционную картину формирует как совокупность волн, многократно отраженных от дневной поверхности и верхней границы каменноугольных пород, так и волн, отраженных от границ аномальной зоны. Наблюдаются группы многократно отраженных волн, преломившихся в каменноугольные породы, и волн, распространяющихся вдоль границы раздела сред.

На рис. 7 представлен набор теоретических сейсмограмм, образованный источником, расположенным на дневной поверхности сбоку от зоны подтопления, на расстоянии 50 м от ее границы.

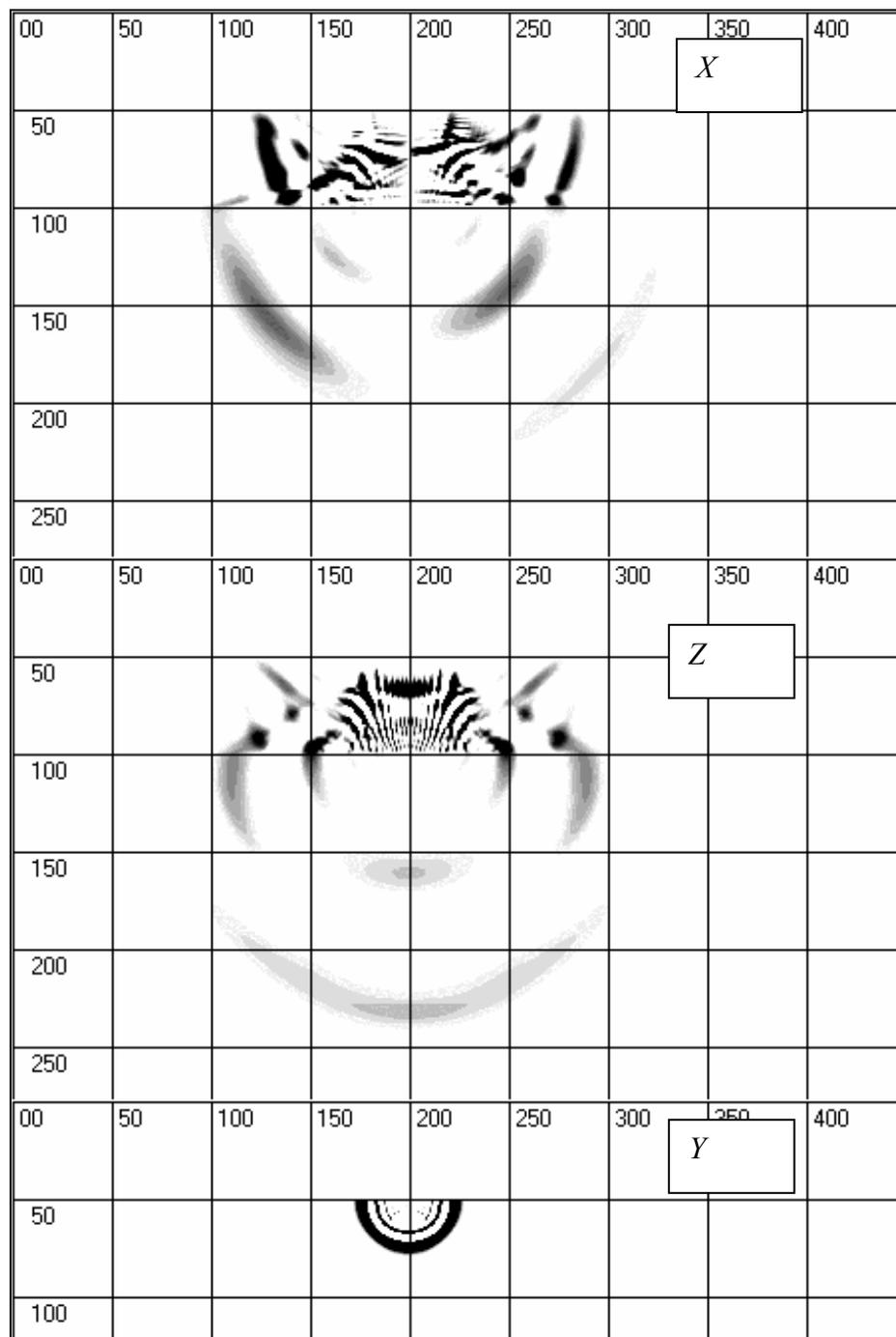


Рис. 6. Рассчитанные для момента времени $t = 0,175$ мс картины распределения X , Z и Y компонент смещений частиц массива горных пород в плоскости профиля наблюдений

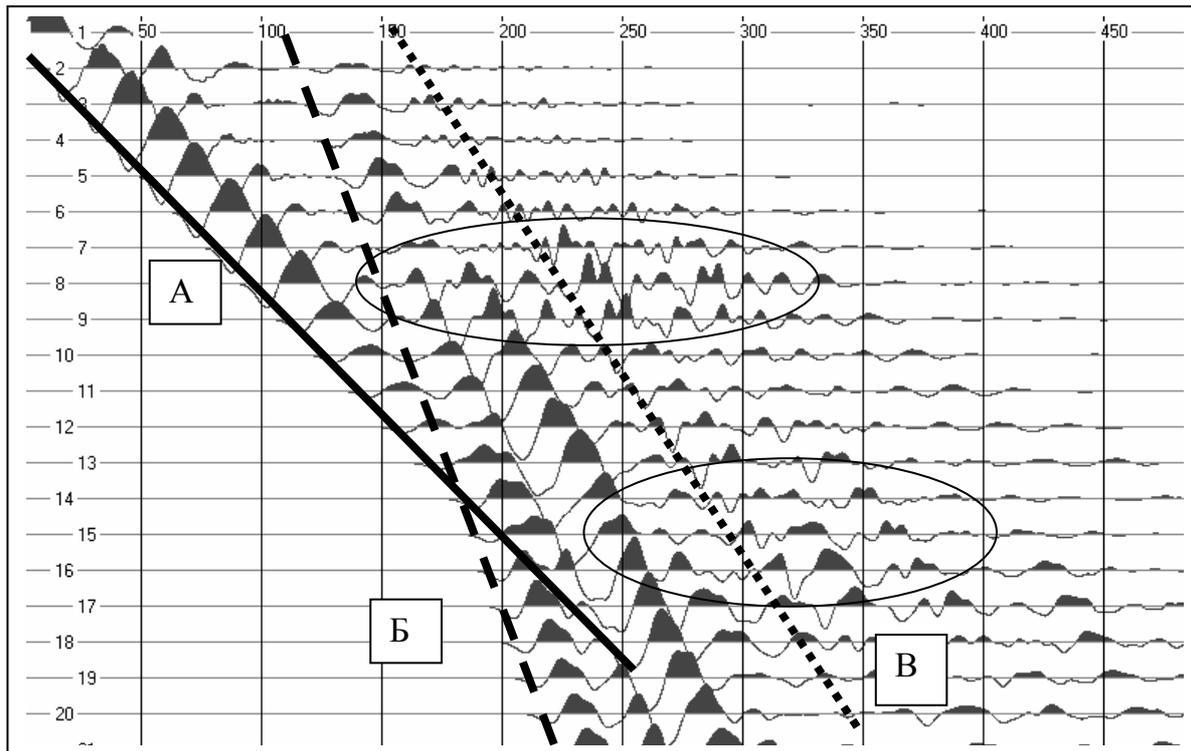


Рис. 7. Набор теоретических сейсмограмм, образованный источником, расположенным на дневной поверхности сбоку от зоны подтопления, на расстоянии 50 м от её границы

На сейсмограммах четко проявляются следующие типы волн:

- прямые волны (обозначены А), распространяющиеся по ЗМС и ЗПС от источника к сейсмоприемникам;
- волны, отраженные от границы раздела с каменноугольными породами (Б);
- головные волны, распространяющиеся вдоль границы раздела с каменноугольными породами (В).

На сейсмограммах также выделены зоны диффузионного рассеяния сейсмических колебаний (они обведены эллипсами) на границах аномальной области.

Анализ приведенного набора сейсмограмм показывает, что наличие аномалии привело к изменению структуры волнового поля. Резкое снижение амплитуд прямых волн на участке аномалии, изменение наклона фронта волны, отраженной от

границы с каменноугольными породами, диффузионные зоны – всё это свидетельствует о влиянии аномалии.

На рис. 8 представлены теоретические сейсмические разрезы ОГТ, полученные на отраженных волнах с максимумом частотной характеристики, расположенном на частоте 50 Гц, а на рис. 9 – подобные разрезы, полученные с использованием частоты 150 Гц.

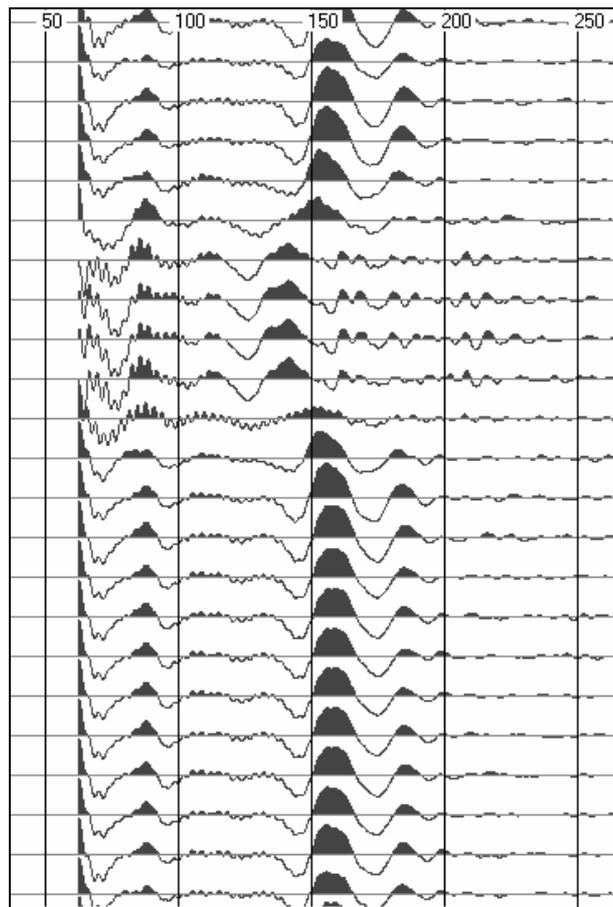


Рис. 8. Теоретические сейсмические разрезы ОГТ, полученные на отраженных волнах с максимумом частотной характеристики, расположенном на частоте 50 Гц

Мы можем видеть, что появление аномальной зоны в обоих случаях приводит к существенному ускорению распространения сейсмических колебаний, что приводит к возможности её выявления.

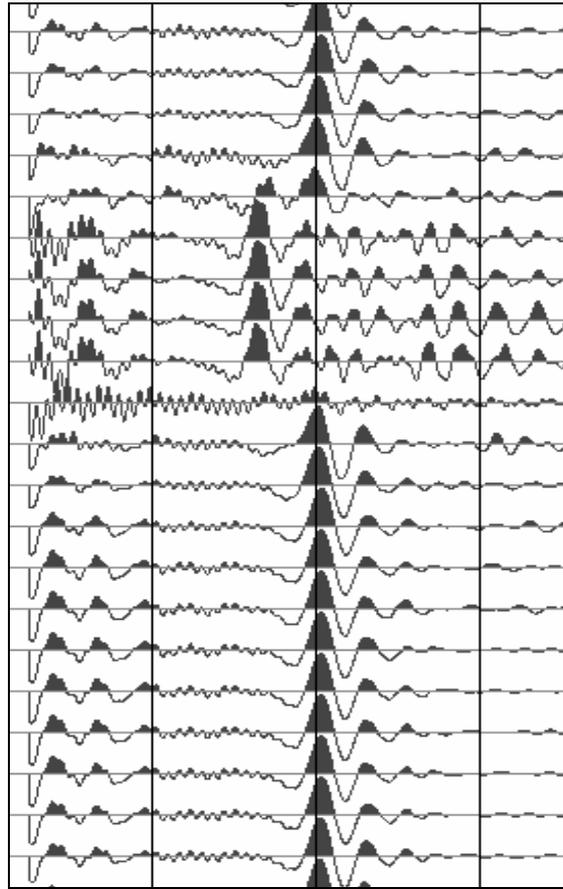


Рис. 9. Теоретические сейсмические разрезы ОГТ, полученные на отраженных волнах с максимумом частотной характеристики, расположенном на частоте 150 Гц

Очевидно, что повышение частоты не приводит к увеличению разрешающей способности метода при использовании скорости распространения сейсмических волн как информативного параметра. На рис. 10 и 11 приведены частотные характеристики отраженных продольных волн, полученные для различных параметров обводненной зоны, при использовании источников с максимумом частотной характеристики 50 и 150 Гц, соответственно.

Анализ частотных характеристик говорит о том, что наличие аномалии влияет на частоту отраженных волн. С увеличением степени отклонения характеристик среды в зоне аномалии от фоновых значений характерная частота смещается в высокочастотную область.

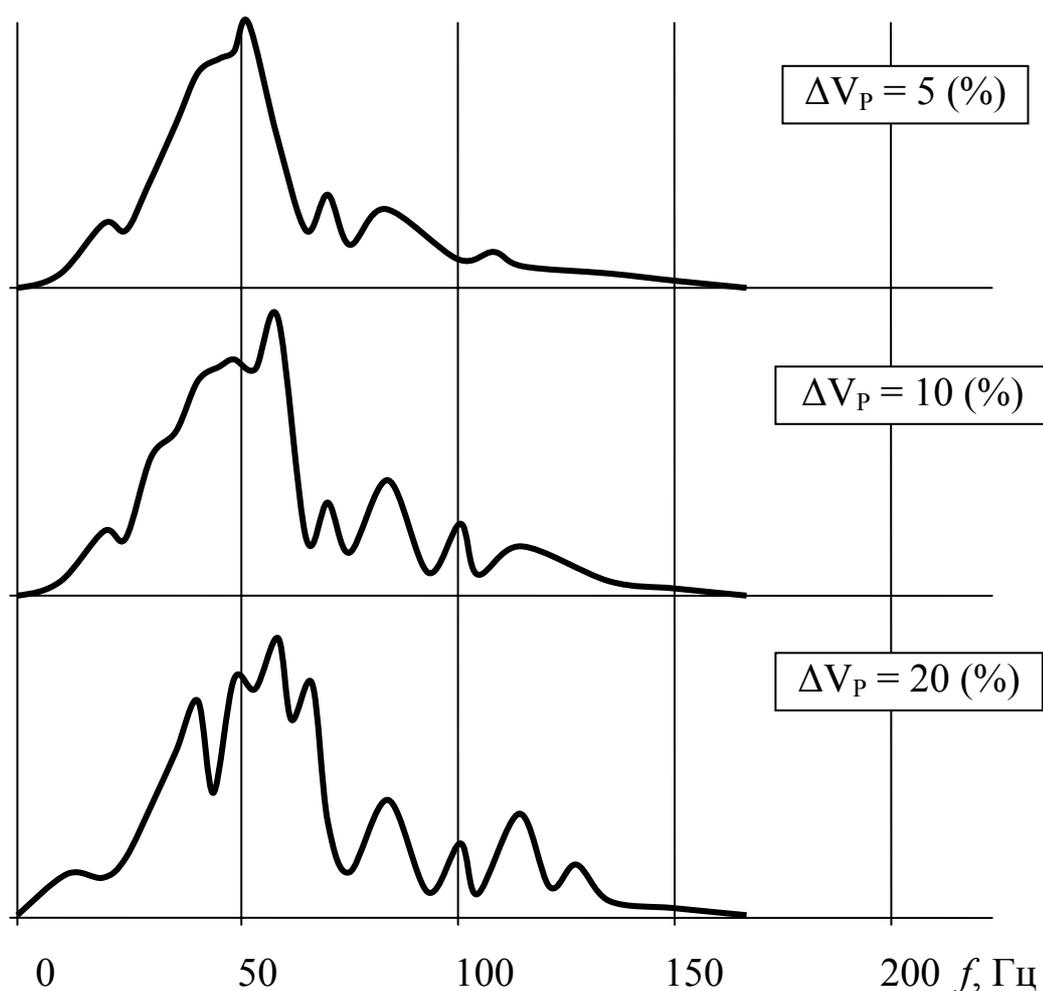


Рис. 10. Частотные характеристики отраженных продольных волн, полученные для различных параметров обводненной зоны, при использовании источников с максимумом частотной характеристики на частоте 50 Гц

При моделировании обводненных зон, предполагалось, что коэффициент поглощения колебаний пропорционален частоте. Однако в данном случае данный фактор не в столь значительной степени влияет на структуру и характеристики волнового поля. Согласно результатам расчета, наиболее информативный частотный диапазон лежит в пределах 100-200 Гц.

Расчеты показали, что наличие зоны разуплотнения в обводненной зоне (см. рис. 5) не приводит к существенным дополнительным отклонениям характеристик волновых полей.

Изменение характеристик, как правило, не превышает 5-10%, что далеко не всегда может быть выявлено при обработке. К тому же, фактор обводненности уменьшает степень изменения амплитуды отраженного сигнала, чем затрудняет обработку данного параметра, являющегося, наиболее информативным, например, при выявлении тектонических нарушений, выходящих под покровные отложения.

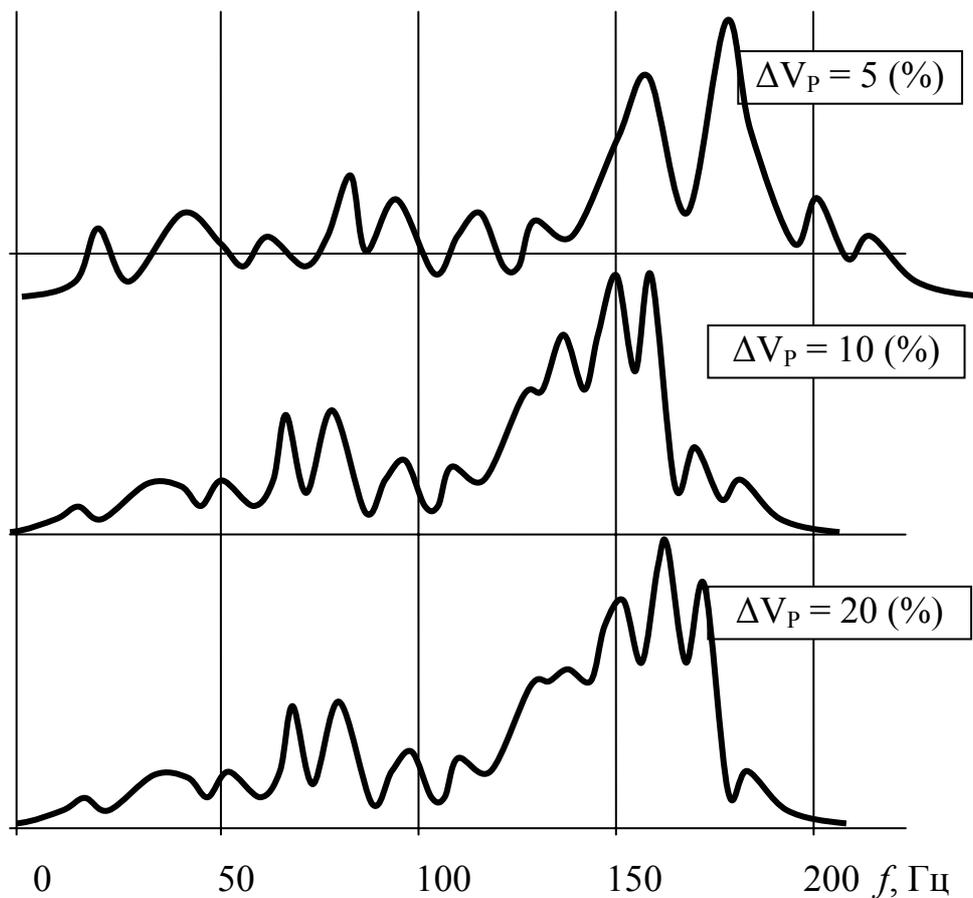


Рис. 11. Частотные характеристики отраженных продольных волн, полученные для различных параметров обводненной зоны, при использовании источников с максимумом частотной характеристики на частоте 150 Гц

Таким образом, на базе сейсмогеологических моделей участков подтопления в зонах действующих и закрывающихся

шахт были разработаны физико-математические модели процесса распространения сейсмических колебаний.

В результате исследований было установлено, что зоны подтопления вызывают изменения структуры волнового поля. О наличии аномалии свидетельствуют: скачкообразное снижение амплитуд прямых волн; изменение наклона фронта волны, отраженной от границы с каменноугольными породами; наличие диффузионных зон на наборах сейсмограмм. Появление аномальной зоны приводит к существенному ускорению распространения сейсмических колебаний, что приводит к возможности её выявления. С увеличением степени отклонения характеристик среды в зоне аномалии от фоновых значений характерная частота смещается в высокочастотную область.

Однако расчеты показали, что наличие зоны разуплотнения в обводненной зоне не приводит к существенным дополнительным отклонениям характеристик волновых полей. Изменение характеристик, как правило, не превышает 5-10%, что далеко не всегда может быть выявлено при обработке. К тому же, фактор обводнённости уменьшает степень изменения амплитуды отраженного сигнала, чем затрудняет обработку данного информативного параметра.

Проведенные исследования, на наш взгляд, существенно дополняют теоретическое обоснование применения сейсморазведочных методов для определения УГВ. Установленные закономерности подтверждены данными практических исследований на полях действующей шахты «Днепровская» ОАО «Павлоградуголь» и закрывающихся шахт в Стахановском регионе (шахта им. Ильича). Математическое моделирование рекомендуется проводить для каждого конкретного участка перед постановкой сейсморазведочных исследований. Это позволит повысить достоверность сейсморазведочных прогнозов и эффективность контроля (путем мониторинга) над процессами подтопления территорий действующих и закрывающихся шахт в пределах техногенно-геологической системы Донбасса.

СПИСОК ССЫЛОК

1. Анциферов А.В., Тиркель М.Г., Майборода А.А. Проблемы экономического развития и экобезопасности угледобывающих регионов и основные направления научных исследований для их решения: Сб. научн. докл. на Международной научной конференции, посвященной 75-летию УкрНИИМИ НАНУ. - Донецк: Технологический центр, 2004. - Т.1. - С. 157-161.
2. Артеменко П.Г., Шиптенко А.В., Майборода А.А. Прогноз подтопления подрабатываемых территорий действующих и ликвидируемых угольных шахт // Уголь Украины. – 2004. - № 9. – С. 39-41.
3. Основные направления комплексных исследований для оценки экологического состояния окружающей среды при закрытии шахт / Анциферов А.В., Тиркель М.Г., Шнеер В.Р., Майборода А.А., Шиптенко А.В. // Уголь Украины. – 2004. - № 9. - С. 7-9.
4. Никитин В.Н. Основы инженерной сейсмологии. - М.: Изд-во МГУ, 1981. - 176 с.
5. Левшин А.Л. Определение уровня грунтовых вод сейсмическими методами. - М.: Изв. АН СССР, сер. геофиз., 1961. - № 9.
6. Анциферов А.В. Теория и практика шахтной сейсморазведки. - Донецк: ООО “Алан”, 2002. - 312 с.