

УДК 550.834:622.12

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ УГЛЕПОРОДНЫХ МАССИВОВ ПРИ ПРОГНОЗЕ ЗОН ВЕРОЯТНОГО СКОПЛЕНИЯ МЕТАНА

Глухов А. А., Компанец А. И., Трофимов В. В.  
(УкрНИИМИ НАНУ, г. Донецк, Украина)

*На основі застосування методів математичного моделювання показана перспективність використання сейсмічного методу з метою визначення будови куполоподібних структур, що є потенційними колекторами природного газу.*

*Using methods of mathematical modeling we show the prospects for employing seismic method to delineate the dome-like structures that are prospective natural gas reservoirs.*

Одним из наиболее важных резервов энергоресурсов, которые в настоящее время не используются в промышленных масштабах, является метан угленосных формаций, прежде всего, Донецкого бассейна, где его запасы составляют (по разным подсчетам) от 12,0 до 25,0 трлн м<sup>3</sup> на глубинах до 3,0 км [1]. Почти все шахтные поля Донбасса, кроме восточных антрацитовых районов, характеризуются высоким содержанием метана в угле – от 8,0 до 35,0 м<sup>3</sup>/т сухой беззольной массы. Кроме того, в Донецком бассейне в составе угленосной толщи широко развитые коллекторские горизонты и компактные структурно-тектонические формы, в которых аккумулировались миграционные углеводные потоки.

Несмотря на объективно высокий уровень естественной газонасыщенности угольных пластов, в Донецком бассейне существуют трудности с локализацией залежей метана как для решения про-

блем предварительной дегазации выемочных участков, так и промышленной добычи горючих газов. Существующие в данное время подходы к поиску перспективных газоносных площадей в основном базируются на общей тенденции увеличения газоносности по мере роста глубины и степени метаморфизма. При этом методика поисков нетрадиционных структур, благоприятных для скопления углеводородов, не разработана.

Поэтому в работе на основе применения математического моделирования показана возможность использования сейсмоакустического метода для разведки параметров куполообразных структур, которые являются перспективными коллекторами метана. Расчеты были проведены на моделях реальной среды, соответствующей участку блока № 3 шахты «Западно-Донбасская». Особенностью участка является куполообразная структура, разрез которой схематически изображен на рисунке 1. Характерной особенностью, которая должна быть учтена в модели, являются пласты песчаника. Верхний из них, мощностью 5 – 10 м залегает на глубине около 390 м на всем протяжении участка. Нижний, мощностью около 20 м залегает только в одном из крыльев куполообразной структуры на глубинах около 420 м. На рисунке 1 эти слои песчаника схематически выделены цветом. Остальная толща пород представлена переслаиванием алевролитов и аргиллитов. В модели это переслаивание описывается однородной породой с усредненными параметрами. В верхней части среды расположены наносы.

Методика расчетов базировалась на идеологии применения идеально упругой модели Гука, в которой среда описывается объемной плотностью  $\rho$  и двумя модулями упругости для объемных и сдвиговых деформаций (коэффициентами Ламе). Через них выражаются три сейсмических параметра: плотность  $\rho$ , скорости распространения продольных  $V_p$  и поперечных  $V_s$  волн. Упругая модель достаточно полно отражает неоднородности строения среды и позволяет получить все используемые в практической сейморазведке типы волн. При решении задачи было сделано допущение, что компоненты вектора перемещения частиц среды в процессе распространения сейсмических волн зависят только от времени, от величины проекции расстояния между сейсмоприем-

ником и источником на плоскость напластования, и от величины проекции этого расстояния на перпендикуляр к плоскости напластования. В связи с этим можно перейти к плоской задаче, решение которой методом конечных разностей достаточно полно описано в специальной литературе и не требует дополнительного рассмотрения [1 – 6]. В качестве модельной использовалась двухмерная однородная, прямоугольная решетка, цепочки узлов которой ориентированы вдоль осей  $x$  и декартовой системы координат. Ось  $z$  направлена вертикально вниз, а ось  $x$  – по направлению вдоль моделируемого профиля сейсмических наблюдений. Каждому из узлов решетки был поставлен в соответствие участок исследуемой куполовидной структуры на участке блока № 3 шахты «Западно-Донбасская» (см. рис. 2) с соответствующими физико-механическими параметрами.

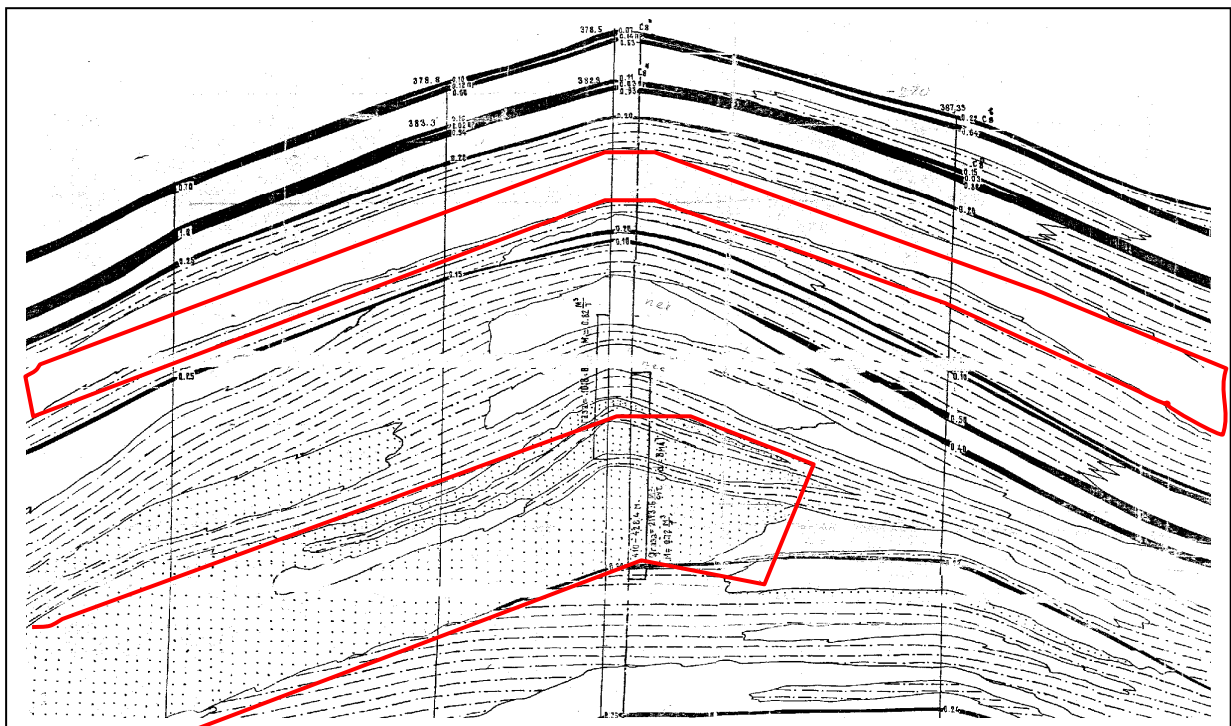


Рис. 1. Фрагмент геологического разреза куполовидной структуры, которая положена в основу физико-математической модели

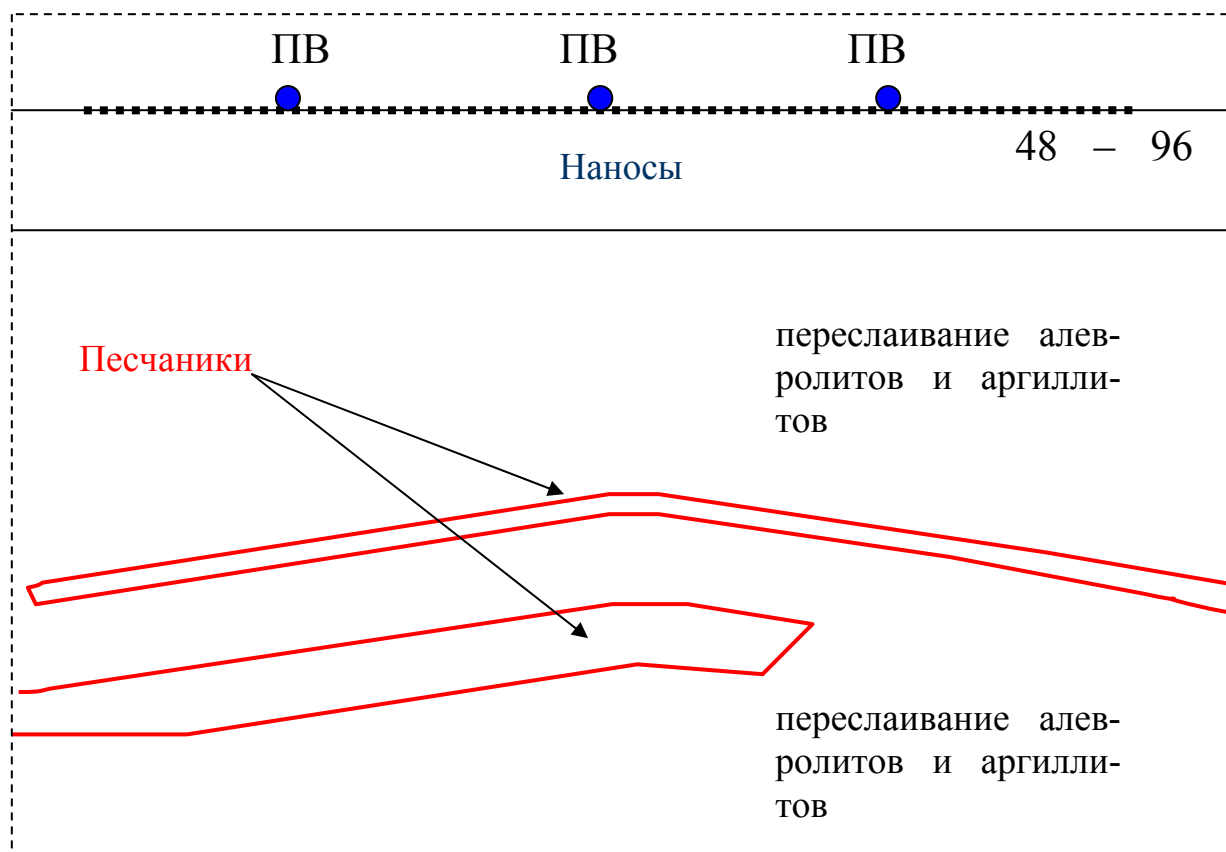


Рис. 2. Структура базовой модели

При проведении расчетов ставились следующие цели:

- обосновать возможность детектирования границ расположения мощных слоев песчаника, расположенных на глубине около 420 м;
- изучить сравнительную информативность различных типов колебаний;
- выбрать наиболее информативный диапазон частот.

Поэтому при проведении расчетов моделировались ударные источники, для которых направление удара совпадало с вертикальной осью (ось  $Z$ ), а также с перпендикуляром к плоскости разведывательного профиля (ось  $Y$ ). Систему наблюдений составляют 48 сейсмоприемников, располагающихся с шагом 20 м. В точках расположения сейсмоприемников фиксируются смещения в направлениях всех трех осей координат.

Особое внимание было уделено моделированию частотного диапазона источников колебаний. Были использованы три типа

источника, функции смещения частиц среды и частотные характеристики для которых изображены на рисунке 3. Максимумы частотных характеристик располагаются на частотах 75, 105 и 140 Гц.

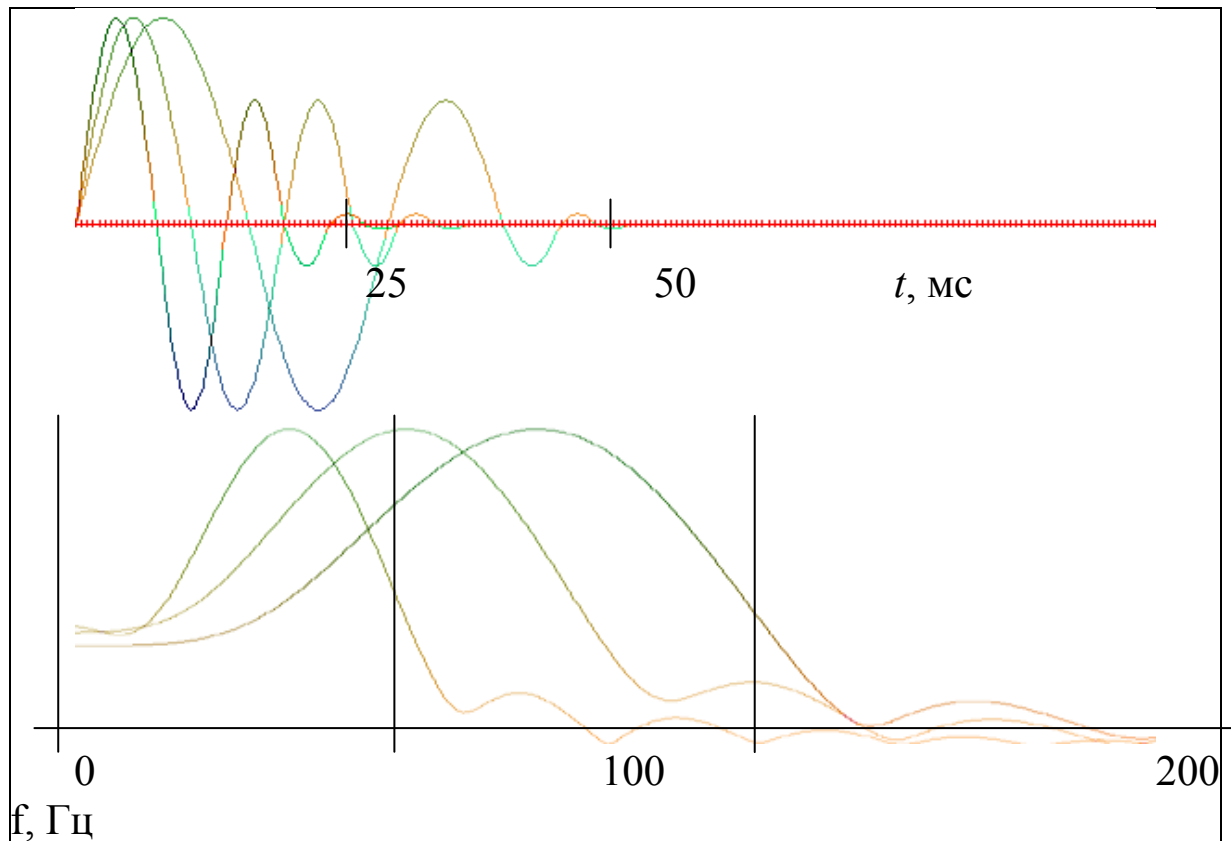


Рис. 3. Функции смещения частиц среды и частотные характеристики источников, используемых при проведении расчетов

Конечно-разностное представление математической модели сейсмоакустического поля упругих колебаний позволяет задавать функцию источника в произвольном узле или группе узлов модели. Для моделирования ударного источника при использовании МКР необходимо в соответствующем узле решетки задать функции  $u(t)$ ,  $v(t)$  и  $w(t)$  описывающие  $x$ ,  $y$  и  $z$  компоненты смещения, соответственно. Для моделирования возбуждения волн по оси  $Y$  необходимо задать дискретный набор значений  $v_{m,n}^p$ . В общем случае соотношение между  $u_{m,n}^p$  и  $w_{m,n}^p$  для каждого из моментов времени задаст направление смещения частиц среды в плоскости

хз. Поляризацию колебаний в реальности очень сложно описать. Если предположить, что все  $u_{m,n}^p$  во время действия источника равны нулю, то такая постановка задачи будет соответствовать удару тампером строго по вертикали.

Моделирование проходило в три этапа.

На первом рассчитывались теоретические сейсмограммы при расположении источника колебаний непосредственно над центром куполообразной структуры, а также на расстоянии 300 м по обе стороны от этой точки. Вычисления проводились при использовании функции источника с максимумом частотного спектра на частоте 75 Гц. При этом были исследованы последовательные картины волнового поля, формируемого в углевмещающей толще.

На втором этапе были построены теоретические сейсмические разрезы на основе использования всех типов источника (75, 105 и 140 Гц) для каждой из компонент волнового поля.

На третьем этапе на основе использования наиболее информативной из компонент ( $Z$  компонента) для каждого из типов источника были построены томографические картины распределения амплитуд волнового поля.

Рассмотрим последовательно результаты вышеперечисленных этапов.

На рисунках 4 – 6 представлены последовательные картины распространения волнового поля в моменты времени (75, 150, 200 и 250 мс). Показаны  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  компоненты соответственно. Источник сейсмических волн расположен строго над центром куполообразной структуры. В момент времени 75 мс волновое поле пересекло границу наносов. Волновые фронты для всех компонент волнового поля имеют строго сферический характер. В последующий момент времени (150 мс) волновые фронты пересекли верхний слой песчаника. Продольные волны достигли нижнего песчаника. Симметрия волнового поля пока не нарушилась. При распространении колебаний через песчаник наблюдается смещение фазы.

Представляет интерес тот факт, что при этом отраженная волна для  $Z$  и  $X$  колебаний сравнительно слаба. Её амплитуда не превышает 25 – 30 % от амплитуды падающей волны. К тому же,

распространяющийся за фронтом продольных волн фронт поперечных волн смазывает волновую картину. Представляют интерес волны, отраженные от границы наносов, достигшие свободной границы и отразившиеся от нее интенсивной волной. Эти волны в реальности не будут столь интенсивны ввиду существенного поглощения в верхних слоях пород.

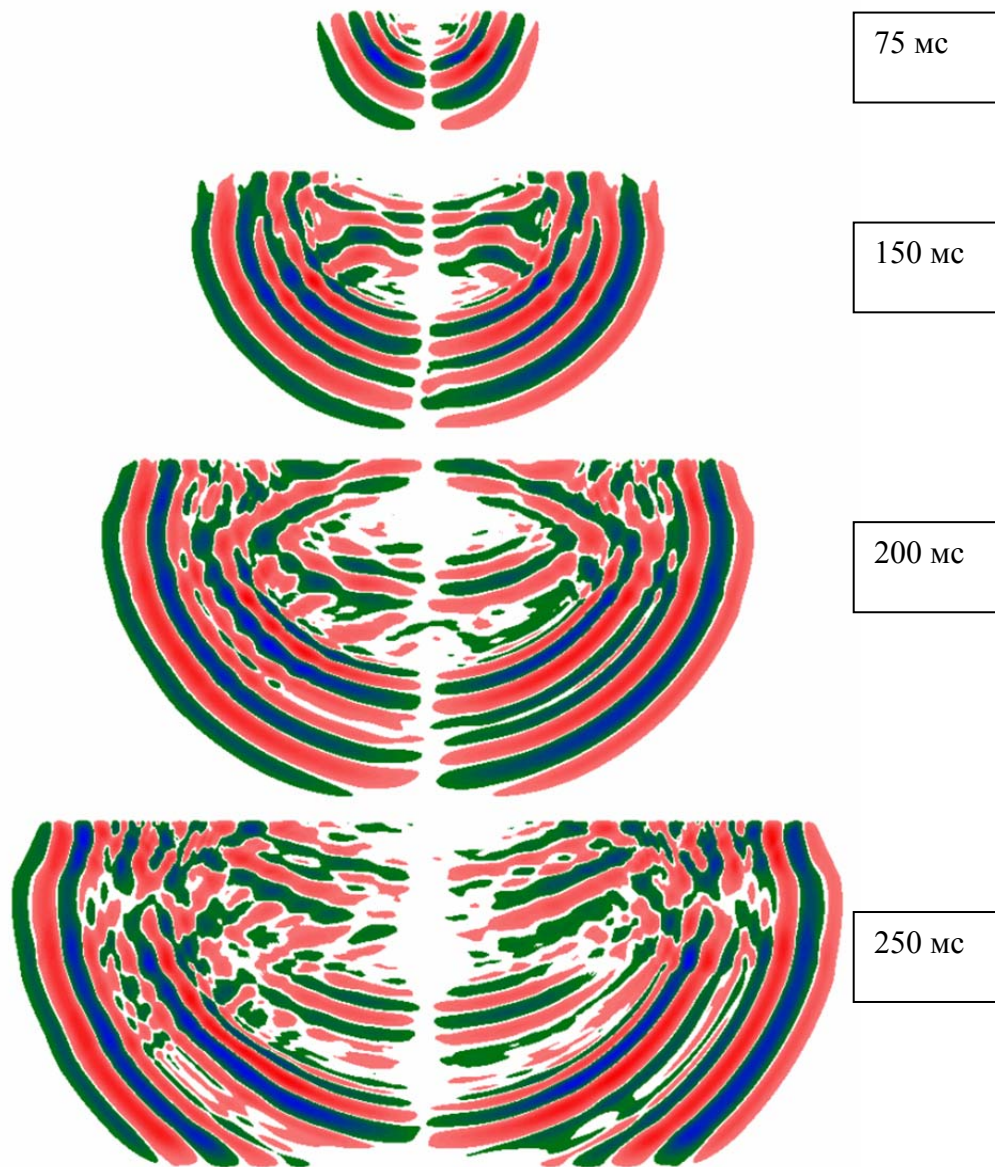


Рис. 4. Последовательные картины распространения волнового поля X компонента колебаний

Для Y компоненты волнового поля картина существенно иная. Она отличается своей четкостью и наглядностью. На гра-



нице верхнего песчаника образуется интенсивная (до 50 % от амплитуды падающей волны) отраженная волна, которую отчетливо видно. Вторичные волны, отраженные от дневной поверхности также присутствуют, причем достаточно интенсивны. По линиям сдвига и потери фаз отчетливо прослеживаются границы наносов, а также верхний слой песчаника.

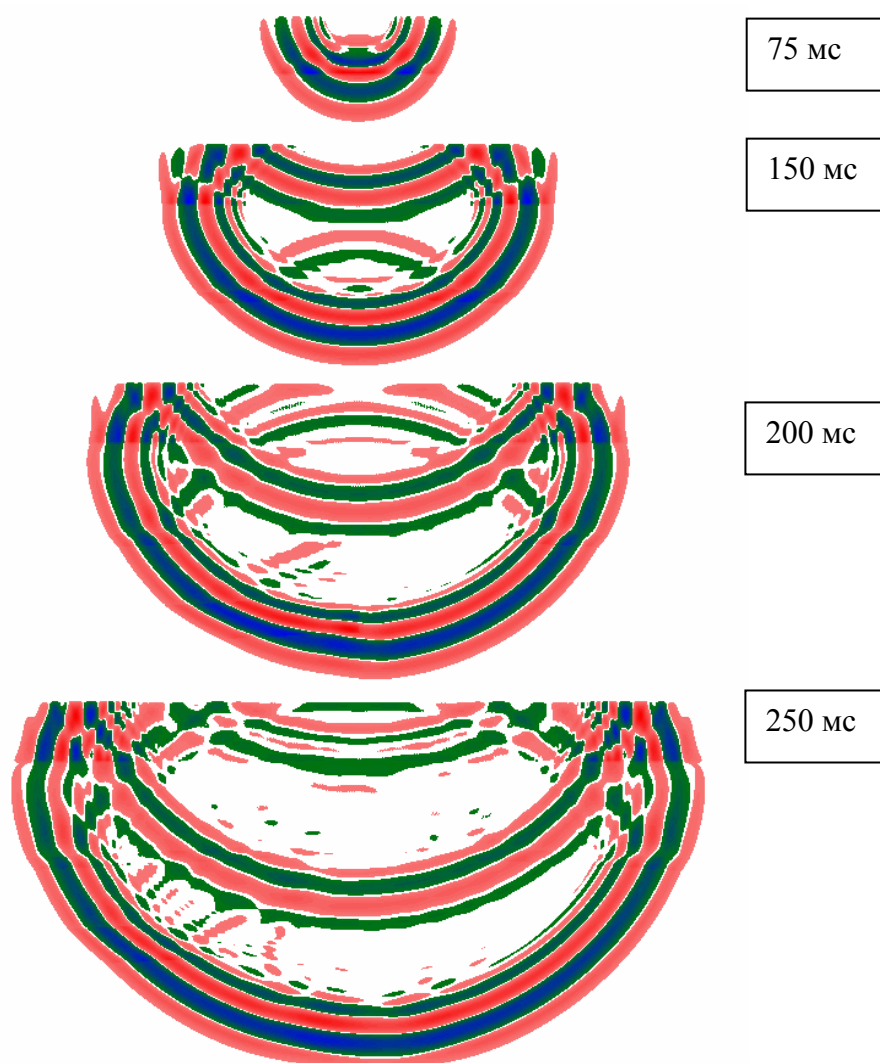


Рис. 5. Последовательные картины распространения волнового поля Y компонента колебаний

В момент времени 200 мс волновые фронты уже пересекли нижний слой песчаника. Волновое поле существенно изменилось. Для всех компонент волнового поля в той части модели, где присутствует нижний слой песчаника, наблюдается интенсивная от-



раженная волна. Её амплитуда составляет до 30 % от амплитуды падающей волны. Интерес представляет тот факт, что при распространении колебаний через мощный песчаник практически не наблюдается смещение фазы. Волны, отраженные от свободной границы также приближаются к данным глубинам. На  $Z$  и  $X$  компонентах волнового поля видны и волны, которые на своем пути дважды отразились от свободной границы. Их фронт накладывается на общую картину колебаний в верхней части модели, что приводит к потере фаз информативных фронтов волн, отраженных от песчаников.

Картина в момент времени 250 мс существенно не отличается от предыдущей. Информативные волны, отраженные от слоя нижнего песчаника, сформировались и ушли в направлении поверхности, где могут быть зарегистрированы сейсмоприемниками.

Таким образом, последовательные картины распространения сейсмических колебаний в рассматриваемой модели говорят о том, что наличие мощных слоев песчаника с одной из сторон куполообразной структуры приводит к формированию информативной отраженной волны, амплитуда которой достаточна для её надежной идентификации и последующего анализа. При этом, на наш взгляд, наиболее информативным является возбуждение сейсмических колебаний в направлении, перпендикулярном разведочному профилю ( $Y$  компонента). Далее по информативности следует способ возбуждения колебаний в вертикальном направлении.

В дополнение к этому рассмотрим наборы теоретических сейсмограмм, полученных для 48 сейсмоприемников при расположении источников колебаний непосредственно над центром куполообразной структуры, а также на расстоянии 300 м по обе стороны от этой точки. Они изображены на рисунках 7 – 9.

На теоретических сейсмограммах  $X$  и  $Z$  компонент представлены следующие типы волн:

– прямые волны, распространяющиеся от источника к сейсмоприемникам вдоль свободной границы (если для  $Z$  компоненты колебаний основную роль играют продольные волны, то для  $X$  компоненты четко наблюдается и поперечная волна);

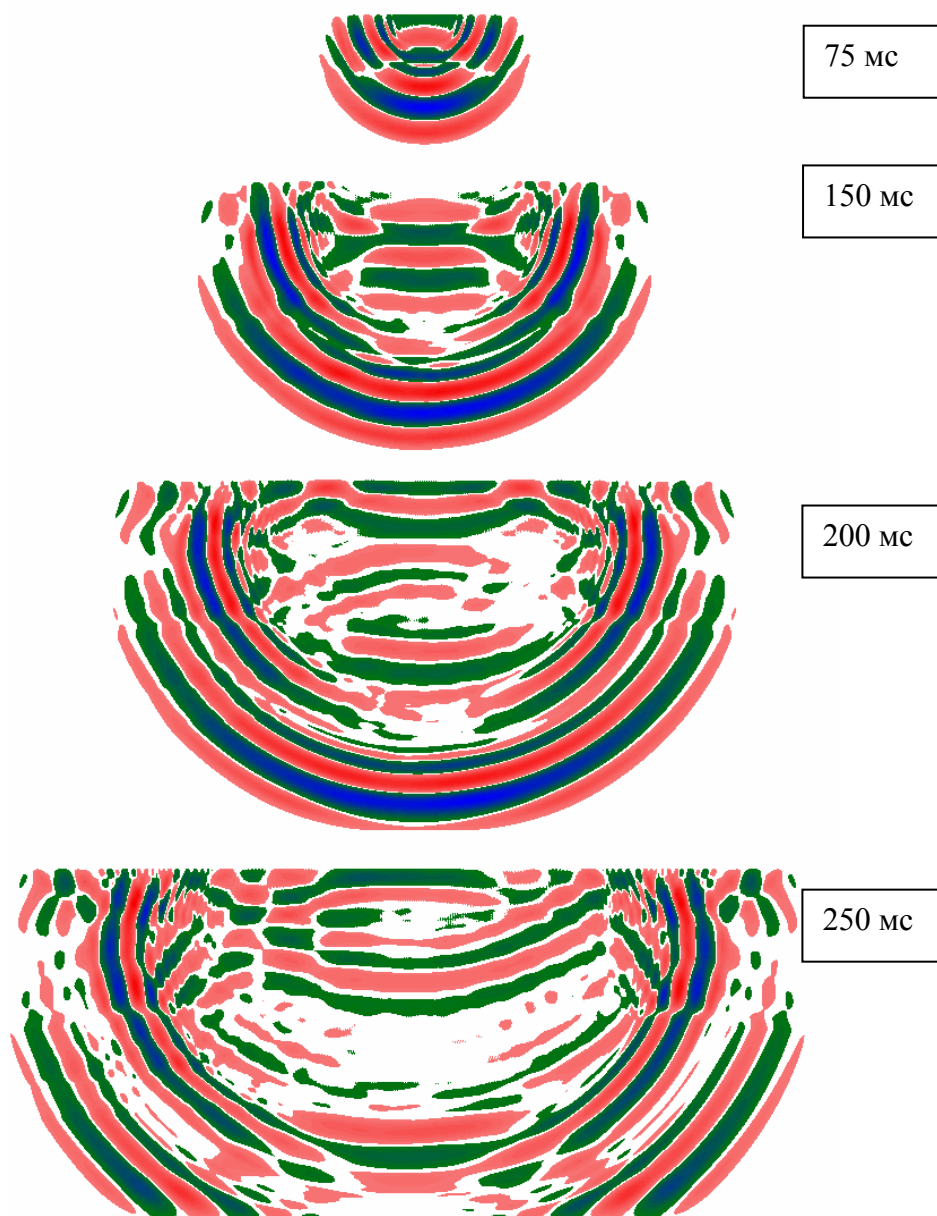


Рис. 6. Последовательные картины распространения волнового поля  $Z$  компонента колебаний

– интенсивные волны, сформированные на границе наносов (на обоих компонентах представлены как продольные, так и поперечные волны; причем для сейсмоприемников, расположенных в непосредственной близости от пункта возбуждения, первые приходят приблизительно через 60 – 65 мс, а вторые – через 150 – 160 мс);

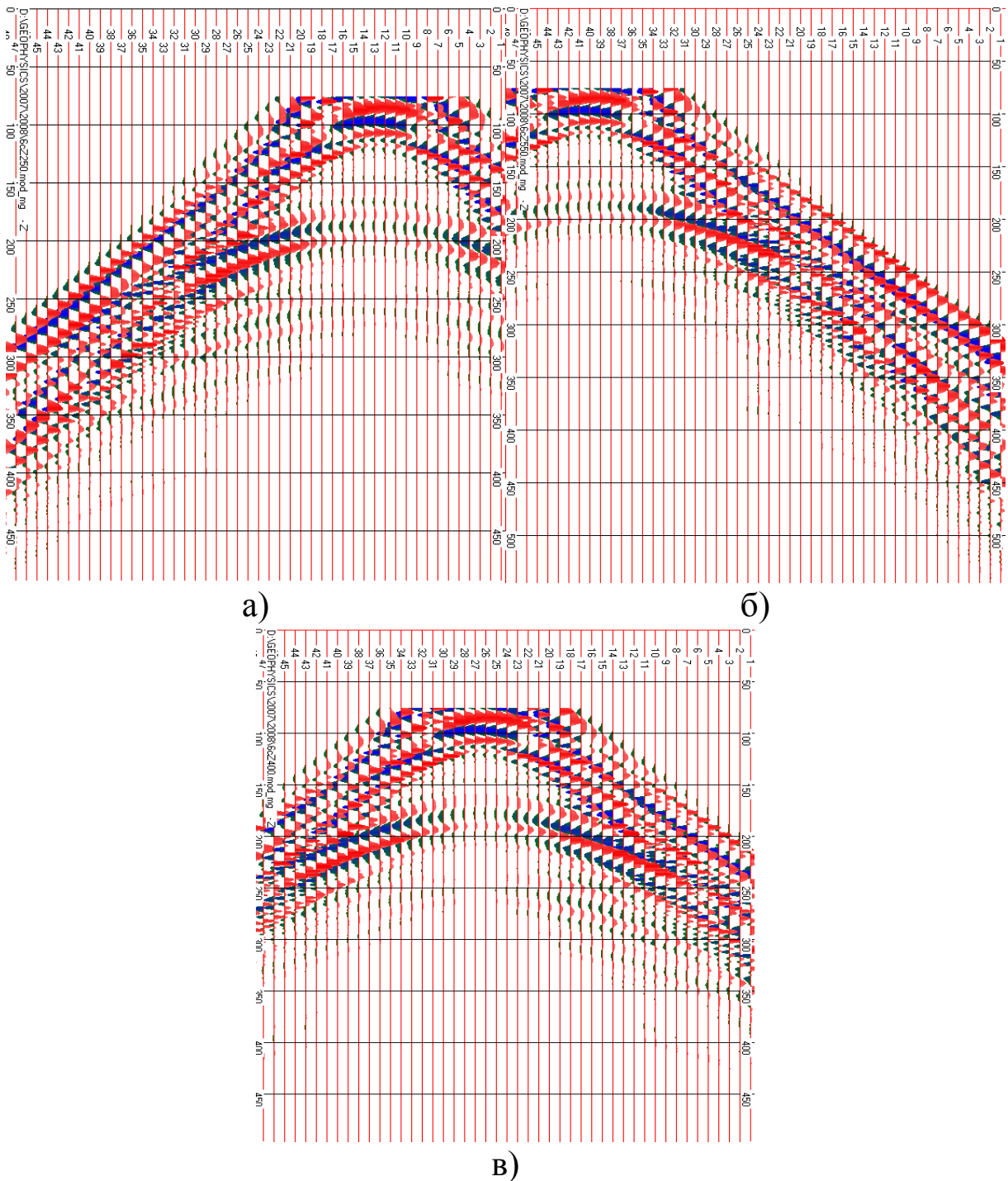


Рис. 7. Наборы теоретических сейсмограмм  $Z$  компоненты волнового поля при расположении источника колебаний в 300 м от центра куполовидной структуры над участком, где есть мощный слой песчаника (а); в 300 м от центра куполовидной структуры над участком, где такового нет (б); по центру структуры (в)

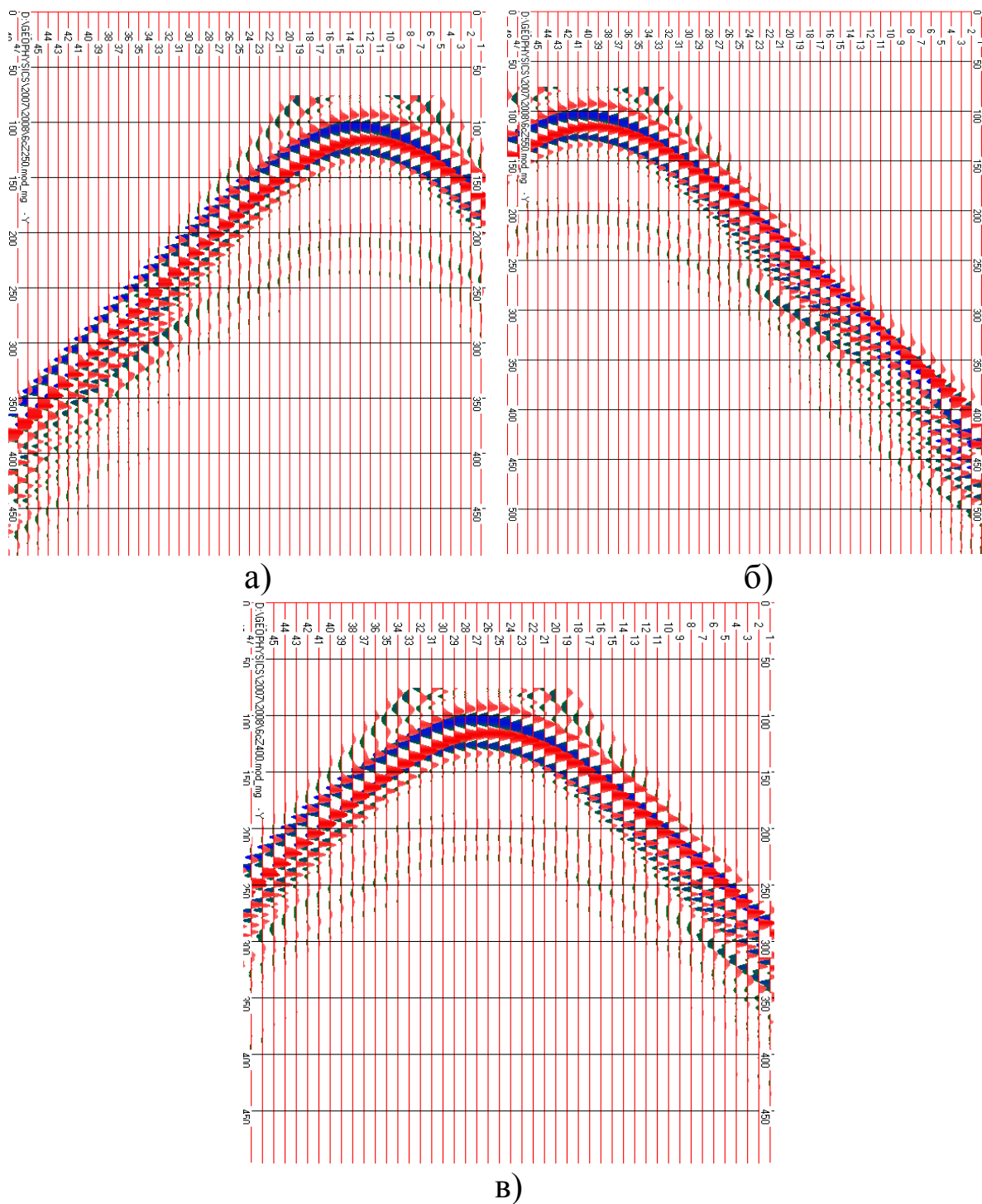


Рис. 8. Наборы теоретических сейсмограмм Y компоненты волнового поля при расположении источника колебаний в 300 м от центра куполовидной структуры над участком, где есть мощный слой песчаника (а); в 300 м от центра куполовидной структуры над участком, где такового нет (б); по центру структуры (в)

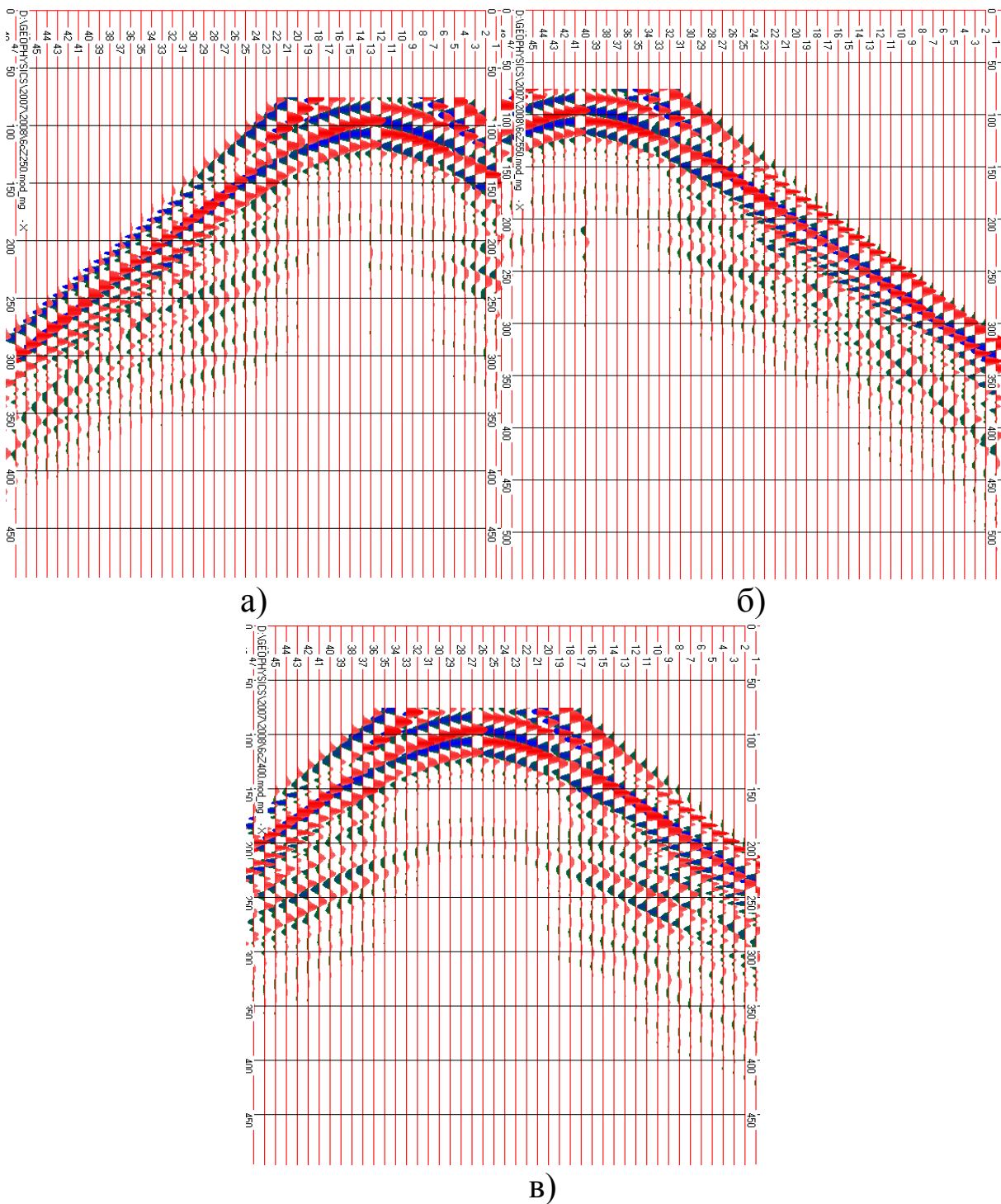


Рис. 9. Наборы теоретических сейсмограмм X компоненты волнового поля при расположении источника колебаний в 300 м от центра куполовидной структуры над участком, где есть мощный слой песчаника (а); в 300 м от центра куполовидной структуры над участком, где такового нет (б); по центру структуры (в)

– слабые продольные волны, отраженные от верхнего слоя песчаника, достигающие сейсмоприемников, расположенных в непосредственной близости от пункта возбуждения через 200 – 250 мс (сравнительно более четко они проявляются на сейсмограммах  $Z$  компоненты колебаний);

– продольные волны, отраженные от нижнего песчаника достигающие сейсмоприемников, расположенных в непосредственной близости от пункта возбуждения приблизительно через 250 – 300 мс (они также больше проявляются на сейсмограммах  $Z$  компоненты колебаний).

На теоретических сейсмограммах  $Y$  компоненты представлены следующие типы волн:

– прямые волны, распространяющиеся от источника к сейсмоприемникам вдоль свободной границы;

– волны, отраженные от границы наносов;

– волны, отраженные от верхнего слоя песчаника.

Представляет интерес тот факт, что волны, отраженные от нижнего песчаника практически не заметны. Они имеют очень слабую амплитуду.

Таким образом, анализ теоретических сейсмограмм позволяет оценить сравнительную информативность волн различных типов и выделить временные диапазоны их наблюдения. Судя по результатам анализа теоретических сейсмограмм, наиболее информативна  $Z$  компонента волнового поля.

Методика проведения расчетов позволяет во временной области промоделировать теоретические сейсмические разрезы. Для этого моделируется возбуждение сейсмических колебаний непрерывной цепочкой из 96 источников, располагающихся на расстоянии 10 м друг от друга. При этом в центральной части модели на определенном расстоянии от этой цепочки формируется единый линейный фронт, представляющий собой, по сути, плоскую волну, распространяющуюся от поверхности вглубь пород. На краях цепочки такая волна не формируется, однако эта область и не рассматривается. Как показывает опыт использования такого подхода, в средней части модели располагается информативная часть шириной около 500 м (центральные 40 – 60 сейсмоприемников).



На рисунках 10 – 11 представленны рассчитанные во временной области теоретические сейсмические разрезы для  $Z$ ,  $Y$  и  $X$  компонент волнового поля соответственно. Для каждой из компонент представлены разрезы, полученные для источников с различной частотной характеристикой.

Представленные сейсмические разрезы отражают часть толщи горных пород, начиная с глубин 350 – 370 м и более. Независимо от компоненты, на разрезах четко различим верхний слой песчаника, с характерным изгибом в центре модели. Соответствующие отражения прослеживаются на временных сейсмических разрезах  $X$  и  $Z$  компонент на 180 – 200 мс, а на временных сейсмических разрезах  $Y$  компоненты на 230 – 250 мс. Нижние, мощные слои песчаника различимы на сейсмических разрезах  $Z$  (220 – 270 мс) и  $Y$  (300 – 350 мс) компонент, и практически не различимы на сейсмических разрезах  $X$  компоненты.

Анализ теоретических сейсмических разрезов показывает существенно различную информативность компонент волнового поля, а также, что заслуживает особого внимания, нелинейную зависимость разрешающей способности сейсмоакустического прогноза от частоты колебаний источника.

Например, для  $Z$  компоненты колебаний при использовании источников с максимумами на частоте 75 и 105 Гц нижний слой песчаника просматривается достаточно четко, причем с ростом частоты информативной волны от 50 до 100 Гц разрешающая способность метода возрастает. Однако при последующем увеличении частоты информативность прогноза падает. При использовании источника с максимумом на частоте 140 Гц нижний слой песчаника просматривается очень слабо.

Для  $Y$  компоненты картина подобна. При несущей частоте 75 Гц отражений от исследуемого песчаника практически не наблюдается, в равной степени, как и при 140 Гц. Только при использовании источника с характерной частотой 105 Гц информативная волна присутствует с амплитудой, достаточной для анализа.

Для  $X$  компоненты даже при использовании источника с характерной частотой 105 Гц информативная волна не обладает устойчивостью.

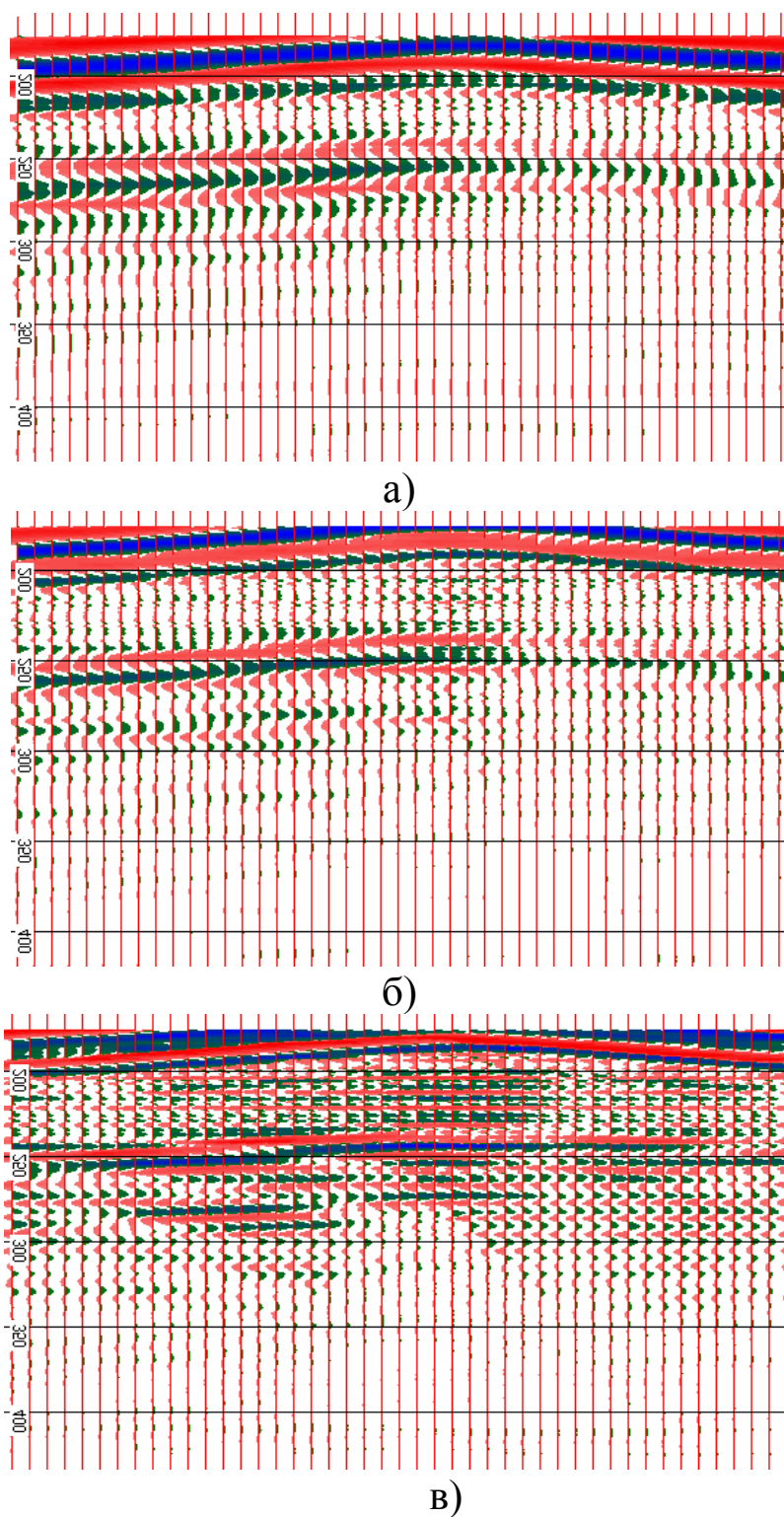


Рис. 10. Теоретические сейсмические разрезы для Z компоненты волнового поля для источников с максимумом частотной характеристики на частотах 75 (а), 105 (б) и 140 (в) Гц

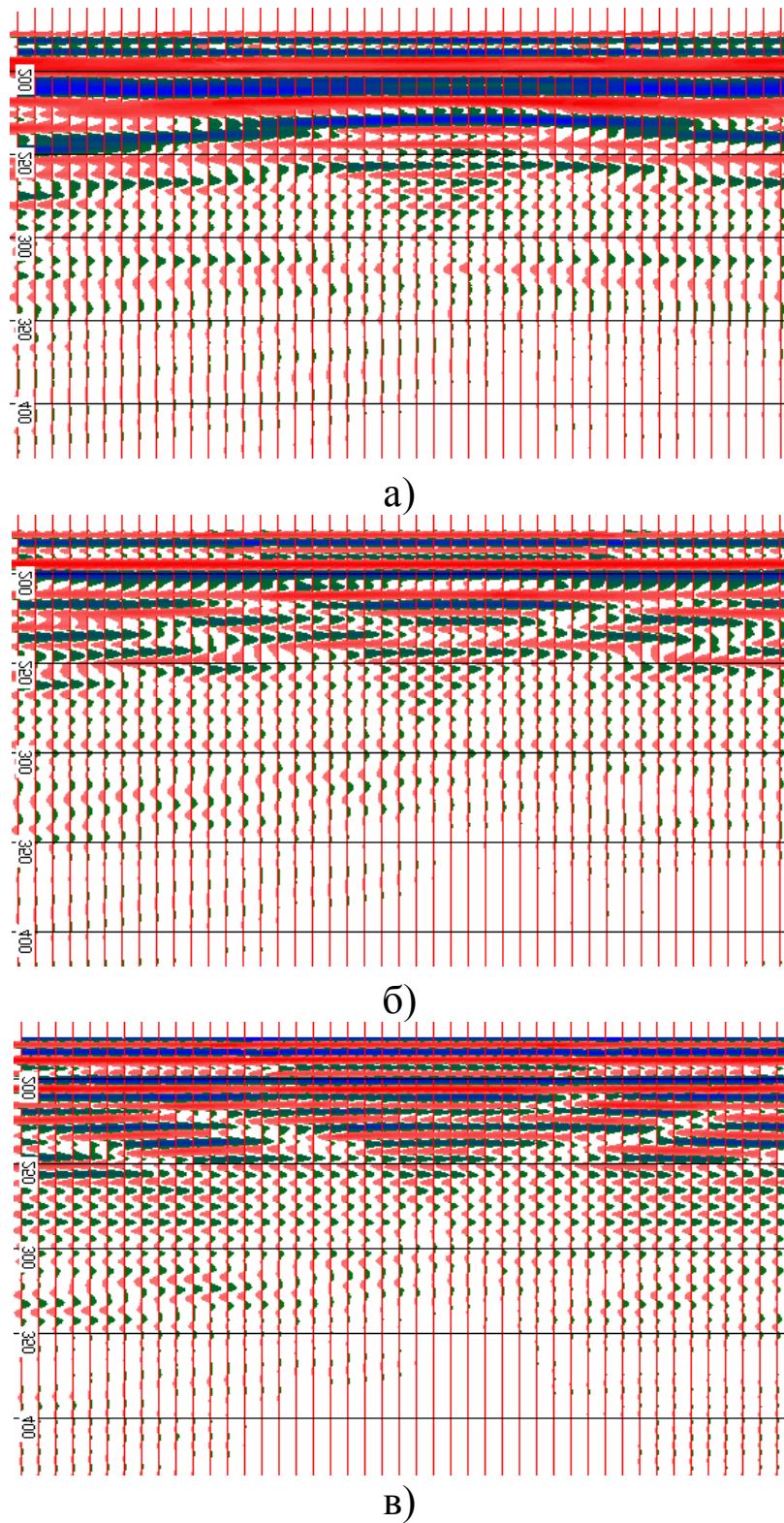


Рис. 11. Теоретические сейсмические разрезы для Y компоненты волнового поля для источников с максимумом частотной характеристики на частотах 75 (а), 105 (б) и 140 (в) Гц

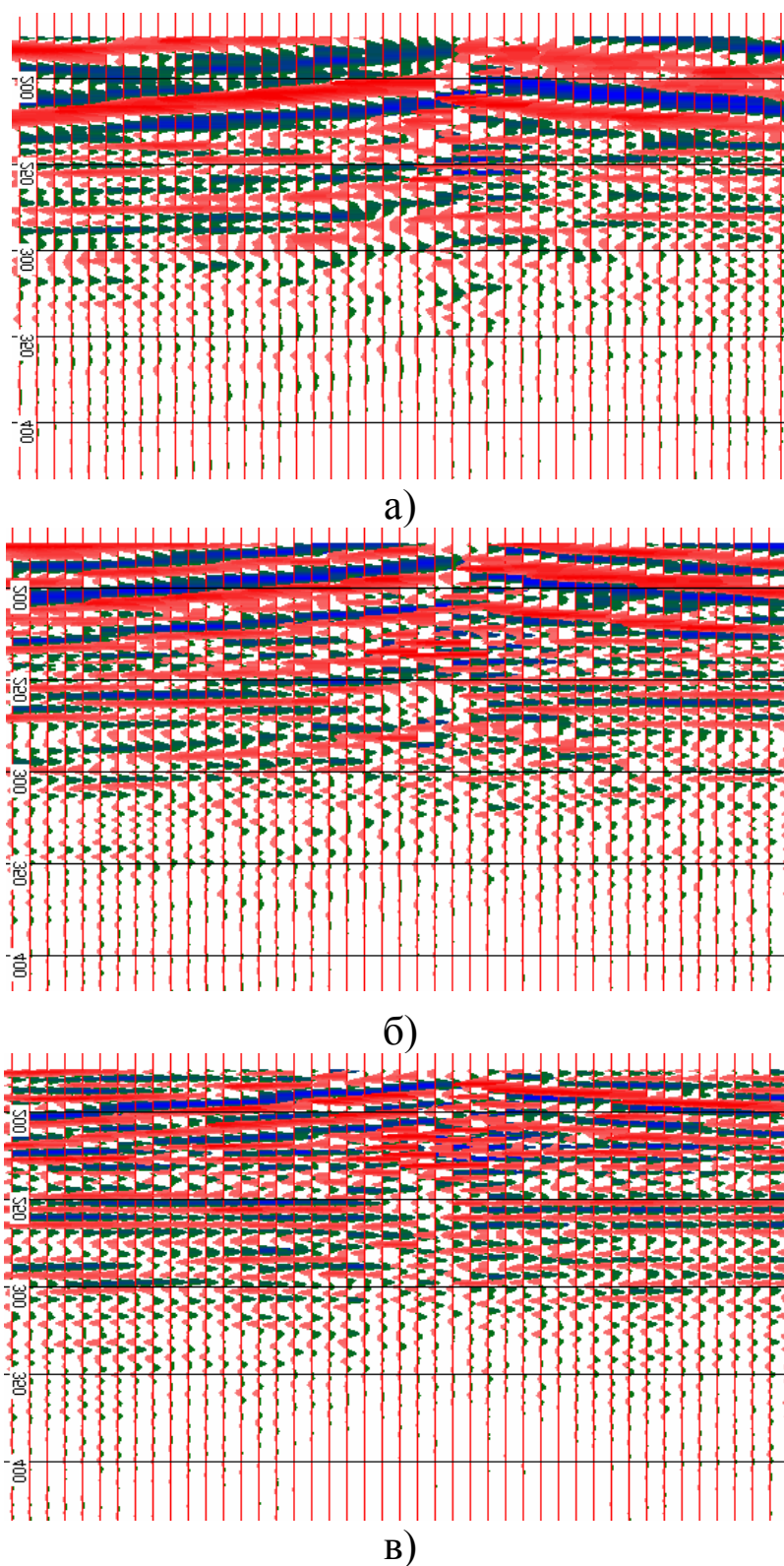


Рис. 12. Теоретические сейсмические разрезы для X компоненты волнового поля для источников с максимумом частотной характеристики на частотах 75 (а), 105 (б) и 140 (в) Гц

Таким образом, анализ показывает, что оптимально использование несущей частоты источника с максимумом частотной характеристики на частотах около 100 Гц.

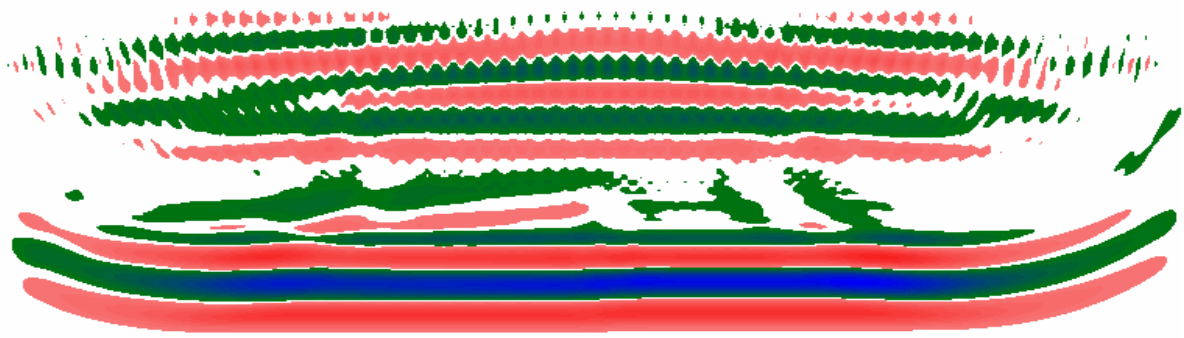
Рассмотрим результаты томографического анализа. На рисунке 13 представлены результаты сейсмической томографии, рассчитанные на основе использования теоретических сейсмограмм всей совокупности компонент волнового поля. В основе использованного подхода лежит идея, заключающаяся в том, что строение углевмещающей толщи может быть описано путем обработки волновых пакетов, отраженных от залегающей ниже резкой акустической границы. В данном случае в качестве отражающей границы принята нижняя часть модельной решетки.

Исследуемый участок разбивается на зоны  $e_{ij}$ . В настоящей модели размеры зоны составляли  $10 \times 10$  ячеек решетки. Для каждой из  $e_{ij}$  выбирается совокупность  $K$  сейсмотрасс, лучи которых проходят через данную зону. На основе значений характеристик  $A_k$  (в данном случае это амплитуда информативных волновых пакетов), длин путей лучей от источника до приемника  $R_k$  и длин их путей  $r_{k,ij}$  по  $e_{ij}$  оценивается то значение характеристики  $A_{ij}$ , которое было бы у сейсмотрасс в том случае, если бы вся среда имела бы такие же параметры, как в зоне  $e_{ij}$ . При этом при обработке сейсмотрасс предполагается, что колебания распространяются от пункта возбуждения до отражающей границы, а также от отражающей границы по сейсмоприемников по прямой линии.

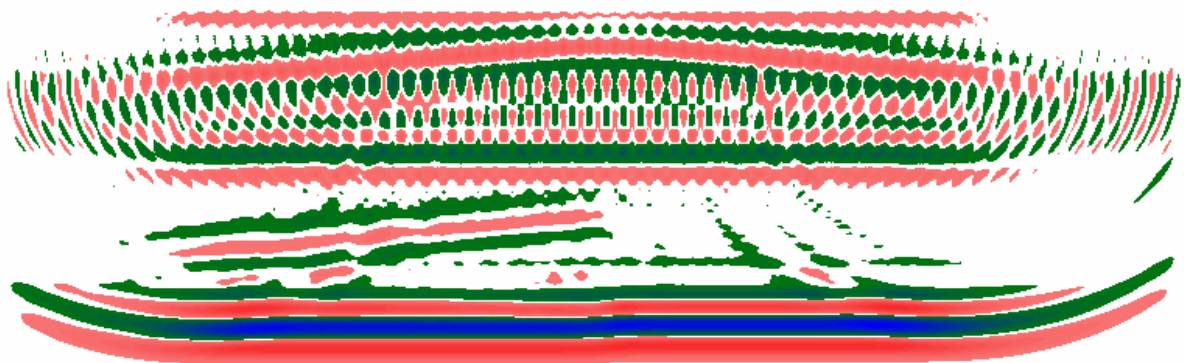
Предпосылками целесообразности применения данного подхода являются следующие положения:

- на сейсмограммах, полученных в результате теоретических расчетов всегда можно точно определить природу волновых пакетов;
- используемые при анализе информативные волновые пакеты разных типов волн можно разделить по временам прихода;
- в рамках методики расчета с необходимой точностью можно вычислить путь, пройденный каждым волновым пакетом.

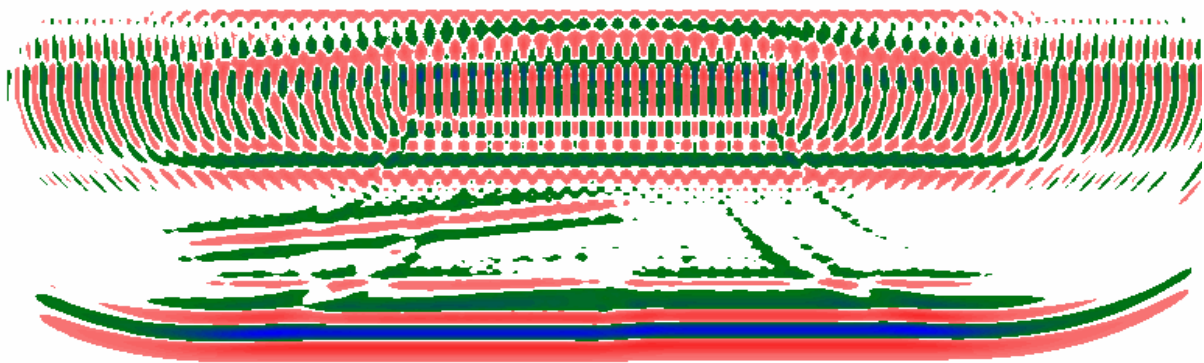




а)



б)



в)

Рис. 13. Результаты сейсмической томографии, рассчитанные на основе использования теоретических сейсмограмм всей совокупности компонент волнового поля. Максимум частотной характеристики на частотах 65 Гц (а), 105 Гц (б), 140 Гц (в)



Кроме этого, следует указать еще на один фактор. В ряде работ [7 – 12] теоретически обоснован тот факт, что сейсмогеологические модели угленосной толщи, характерные для условий Донбасса имеют определенные особенности, которые являются в реальных условиях предпосылками для успешного применения предлагаемого подхода:

– наличие резкой акустической границы на глубинах от 600 м и более, образованной мощными слоями плотного песчаника (значение резкости акустической границы изменяется от наиболее слабого значения 0,95 до наиболее сильного 0,78);

– сравнительная однородность углевмещающей толщи выше данной акустической границы вплоть до зоны малых скоростей (средние значения резкостей акустических границ между отдельными породными пластами ниже зоны малых скоростей 0,93 – 0,97).

В данном случае при проведении вычислений использовался алгоритм, упрощенно сводящийся к нескольким этапам. К обработке принято 864 сейсмотрассы (3 источника, 3 компоненты по 96 сейсмоприемников). На 774 из них была выделена волна, образованная колебаниями, отраженными от нижней границы модели. 90 сейсмотрасс, проходящих по краевым областям (по 30 для каждой компоненты) не учитывалось. Для каждого из сейсмотрасс, по априори известному расположению источника и приемника было вычислено расстояние  $R_m$ , которое проходят соответствующие колебания и получено значение амплитуды  $A_m$ . Затем среднее значение амплитуды было определено по формуле [8, 9]:

$$\bar{A} = \frac{\sum_{m=1}^M A_m R_m}{\sum_{m=1}^M R_m}.$$

Как уже описано выше, участок модели был разбит на прямоугольные зоны  $e_{ij}$ , где  $i$  и  $j$  их номера по осям  $X$  и  $Z$  соответственно, размерами  $10 \times 10$  ячеек. Для каждой зоны из совокупности отобранных 774 сейсмотрасс автоматически выбираются  $K$

проходящих через нее. На основе значений их амплитуд ( $A_k$ ) и длин их путей  $r_{k,ij}$  по  $e_{ij}$  оценивается то значение амплитуды ( $A_{ij}$ ), которое было бы у сейсмотрасс в том случае, если бы вся среда имела бы такие же параметры, как в зоне. Используется формула:

$$A_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^K A_k r_{k,ij}}{\sum_{k=1}^K r_{k,ij}}.$$

Выводимые на представленном выше рисунке (рис. 13) в качестве результата относительные отклонения характеристик от фонового значения были вычислены по формуле:

$$\Delta A_{ij} = \left( \frac{A_{ij} - \bar{A}}{\bar{A}} \right) \times 100.$$

Использованные в соотношениях значения  $R_m$  и  $r_{k,ij}$  вычисляются с необходимой точностью, из предположения прямолинейности лучей на участках от источников до отражающей границы и от неё до сейсмоприемников, поскольку имеется исчерпывающая априорная информация о распределении в модели скоростных характеристик пород.

Анализ полученных томограмм показывает, что использование томографии на отраженных волнах позволяет определить структуру массива горных пород в данных рассматриваемых условиях практически во всем исследуемом частотном диапазоне. Однако, поскольку предлагаемый томографический подход в данных условиях основывался на практически идеальной для рассмотрения информационной волне (отражение от границ модели), он нуждается в дальнейшем изучении.

Таким образом, в результате исследований были проведены расчеты процесса распространения сейсмических колебаний на моделях реальной среды, соответствующей участку блока № 3 шахты «Западно-Донбасская». При этом были рассчитаны теоретические сейсмограммы при расположении источника колебаний непосредственно над центром куполообразной структуры, а также на расстоянии 300 м по обе стороны от этой точки. Вычисле-

ния проводились при использовании функции источника с максимумом частотного спектра на частоте 75 Гц. Расчеты показали, что наличие мощных слоев песчаника с одной из сторон куполообразной структуры приводит к формированию информативной отраженной волны, амплитуда которой достаточна для её надежной идентификации и последующего анализа. Наиболее целесообразным является возбуждение сейсмических колебаний в направлении, перпендикулярном разведочному профилю (Y компонента) либо возбуждения колебаний в вертикальном направлении. По результатам анализа теоретических сейсмограмм, наиболее информативна Z компонента волнового поля.

### СПИСОК ССЫЛОК

1. Глухов А. А. Автоматизация расчета поля сейсмических колебаний в угленосной толще при решении задач шахтной сейсморазведки / Наукові праці Національного технічного університету. — Донецьк : ДонНТУ, 2006. — Вип. 106. — С. 131—139.
2. Калиткин Н. Н. Численные методы. — М. : Наука, 1978. — 512 с.
3. Самарский А. А. Теория разностных схем. — М. : Наука, 1983. — 616 с.
4. Пилипенко В. Н. Численный метод полей времен для построения сейсмических границ // Обратные кинематические задачи взрывной сейсмологии. — М. : Наука, 1979. — С. 118—181.
5. Анциферов А. В. Конечно-разностный подход моделирования сейсмических колебаний в угленосной толще // Геотехническая механика. — Днепропетровск : ИГТМ, 2002. — Вып. 35. — С. 108—116.
6. Глухов А. А. О программном комплексе моделирования сейсмических колебаний в угленосной толще / Наукові праці Національного технічного університету. — Донецьк : ДонНТУ, 2005. — Вип. 88. — С. 106—113.
7. Тиркель М. Г., Глухов А. А. Томография на отраженных волнах при сейсмическом прогнозе строения горного массива //

- Зб. наук. праць «Проблеми гірського тиску». — Донецьк : ДонНТУ, 2004. — № 12. — С. 14—25.
8. Тиркель М. Г. О границах применения наземной сейсморазведки для прогноза аномалий залегания угольных пластов на основе анализа волн, отраженных от нижезалегających горизонтов // Зб. наукових праць “Проблеми гірського тиску”. — Донецьк : ДонНТУ, 2005. — № 13. — С. 102—120.
  9. Тиркель М. Г. Новый вариант томографии при сейсмическом прогнозе строения горного массива // Тезисы Междунар. научно-практ. конф. «Инженерная геофизика-2005». — Геленджик : ГНЦ «Южморгеология», 2005. — С. 227—237.
  10. Тиркель М. Г., Глухов А. А. Теоретическое обоснование нового способа описания аномалий при сейсмическом прогнозе строения горного массива // Зб. наукових праць “Проблеми гірського тиску”. — Донецьк : ДонНТУ, 2004. — № 11. — С. 29—41.
  11. Анциферов А. В., Тиркель М. Г., Анциферов В. А. Использование сейсмической разведки для картирования тектонической нарушенности угольных пластов // Проблеми гірського тиску. — Донецьк : ДонДТУ, 2001. — № 5. — С. 42—47.
  12. Многоволновые сейсмические исследования угольных месторождений Донбасса / Хохлов М. Т., Харитонов О. М., Трифонов П. Г., Козельский И. Т., Байсарович М. Н. // Отв. ред. В. Б. Сологуб. — К. : Наукова думка, 1990. — 132 с.