

ОСОБЕННОСТИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ОТРАЖЕННЫХ ВОЛН ПОПЕРЕЧНОГО ТИПА ПРИ НАБЛЮДЕНИЯХ ВО ВНУТРЕННИХ ТОЧКАХ СРЕДЫ

А.Г. Ярославцев

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: На результатах полноволнового моделирования для геологических моделей разной сложности показаны особенности распространения волн разных типов при проведении сейсморазведочных наблюдений в шахте. Установлено, что при изучении верхнего целевого полупространства на поперечных волнах в регистрируемых сейсмических сигналах могут содержаться отражения, приходящие из нецелевой области изучаемого породного массива. Вероятность некорректной интерпретации отраженных поперечных волн будет зависеть как от объективной модели геологической среды, так и от субъективного выбора точки возбуждения колебания на контуре выработки.

Ключевые слова: шахтная сейсморазведка, характеристики направленности, продольные волны, поперечные волны, горные выработки, полноволновое моделирование.

Шахтные сейсморазведочные исследования, прочно вошедшие в практику дистанционного контроля породного массива на соляных рудниках [1-5], традиционно базируются на использовании ударных источников колебаний, одновременно генерирующих упругие колебания продольного и поперечного типов. Характеристики направленности источников для разных областей пространства, окружающего выработку, будут напрямую зависеть от точки приложения силы на ее контуре [6-9]. Также влияние на величину и направление максимума энергии волн разных типов будет оказывать отношение их скоростей (V_s/V_p), величина коэффициента Пуассона и слоистость изучаемого разреза. Примеры теоретических характеристик направленности для тонкослоистой модели среды приведены на рис. 1. В связи с этим возникает проблема корректного определения направления прихода отраженной составляющей волнового поля, регистрируемого во внутренних точках геологической среды (шахты, тоннели). И оптимальным решением для этих целей представляется использование современных программ полноволнового математического моделирования, таких как Tesseral Engineering (<http://www.tesseral-geo.com>), позволяющих задавать для расчетов сейсмогеологические модели практически любой сложности.

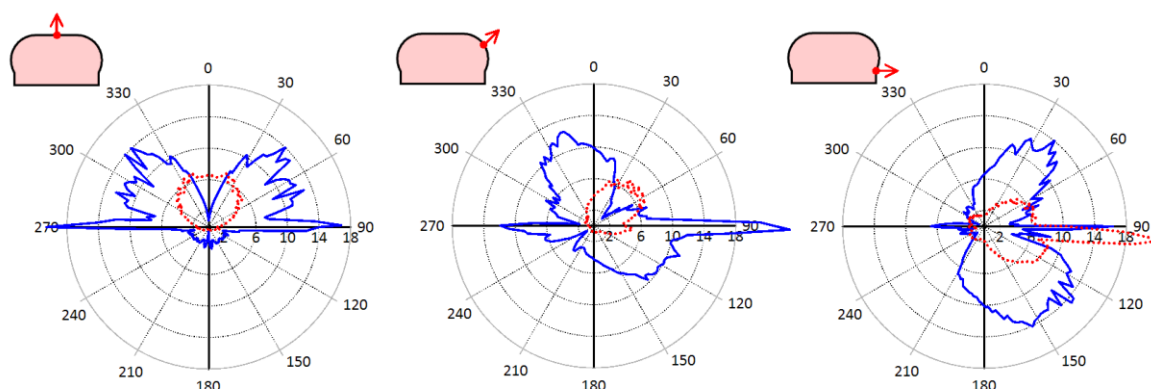


Рис. 1. Теоретические характеристики направленности ударных источников колебаний в тонкослоистом соляном разрезе для разных точек приложения силы на контуре выработки:

а) вертикальный удар в кровлю, б) удар в свод под углом 45°, в) горизонтальный удар в стенку
(красный пунктир – Р-волны, синяя линия – S-волны)

Рассмотрим результаты расчета теоретических волновых полей для упрощенных моделей среды и наиболее распространенных в практике шахтной сейсморазведки схем наблюдений (рис. 2): схема ZZ – вертикальный удар в кровлю выработки, прием на почве выработки датчиками с вертикальной осью чувствительности, схема YY – горизонтальный удар в стенку выработки, прием на стенке геофонами с горизонтальной осью чувствительности.

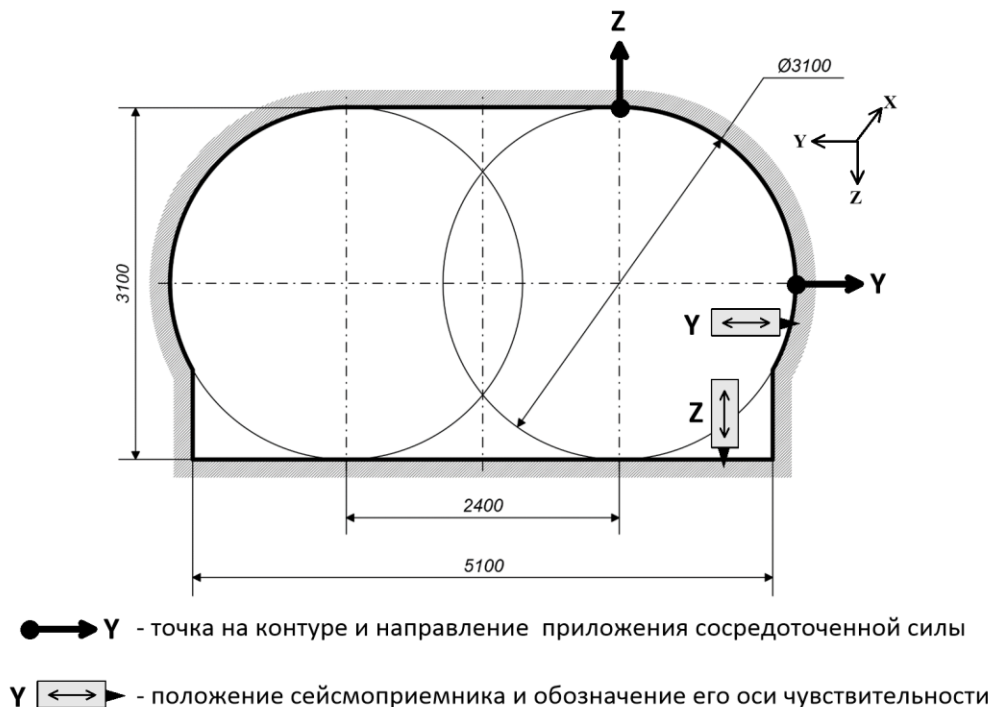


Рис. 2. Геометрия сечения выработки, проходимой комбайном Урал-20Р и типовые схемы сейсморазведочных наблюдений (ZZ и YY)

Для обоих направлений возбуждения колебаний выбран импульс с преобладающей частотой 1000 Гц. Минимальный размер ячейки расчета составлял 0.1 м при шаге дискретизации 100 мкс. В каждом случае для наглядности результатов имитировалась установка сразу нескольких датчиков в одной точке на контуре выработки.

Целевым отражающим объектом в представленных моделях (рис. 3) является граница раздела двух пластов с разными упругими свойствами, расположенная строго сверху над выработкой на удалении около 40 м (1). Модель 2 осложнена резким падением отражающей границы слева от целевого направления поиска отражений. В модель 3 добавлен тонкий низкоскоростной пласт, расположенный непосредственно на уровне выработки.

По результатам моделирования (рис. 4) можно сделать следующие выводы. При наблюдениях по схеме ZZ (рис. 3а, б, в) во всех синтезированных волновых полях уверенно прослеживается отраженная Р-волна, сформированная непосредственно над выработкой, т.е. в целевом направлении изучения разреза. Остальные отражения волн обоих типов значительно уступают по интенсивности. В результирующих сейсмических сигналах, полученных по схеме YY (рис. 3г, д, е), при усложнении модели кроме целевого отражения поперечной волны S_1 появляются конкурирующие отражения продольной P_1 и поперечной волн S_2 от уступа границы слева от выработки. При появлении тонкого пласта (волновода) отражения Р-волн исчезают, т.к. вся их энергия канализируется в строго горизонтальном направлении.

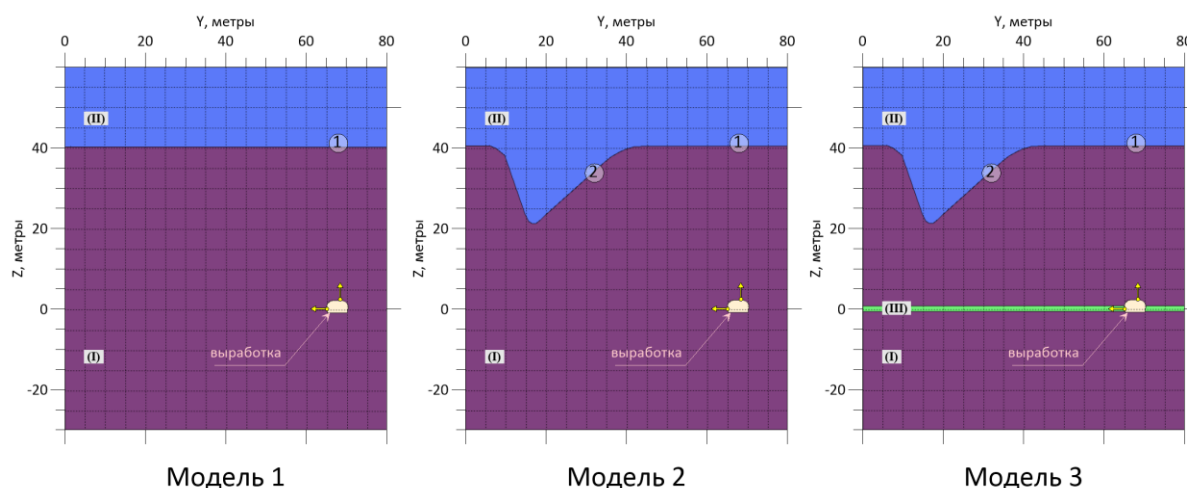


Рис. 3. Модели среды использованные в расчетах

(I – $V_p=4600$ м/с, $V_s=2500$ м/с; II – $V_p=3500$ м/с, $V_s=2000$ м/с; III – $V_p=2500$ м/с, $V_s=1700$ м/с; 1 – целевая область формирования отражений; 2 – конкурирующая (нецелевая) область формирования отражений)

Это позволяет предположить, что в реальных условиях тонкослоистого разреза волновые поля могут быть осложнены ложными отражениями, сформированными не в целевой плоскости наблюдений. Причем если отражения разных типов довольно просто разделять и подавлять на стадии цифровой обработки за счет разницы их кинематики, то нецелевые однотипные отражения, зарегистрированные в едином временном пространстве с полезными волнами, на стадии обработки отбраковать не получится.

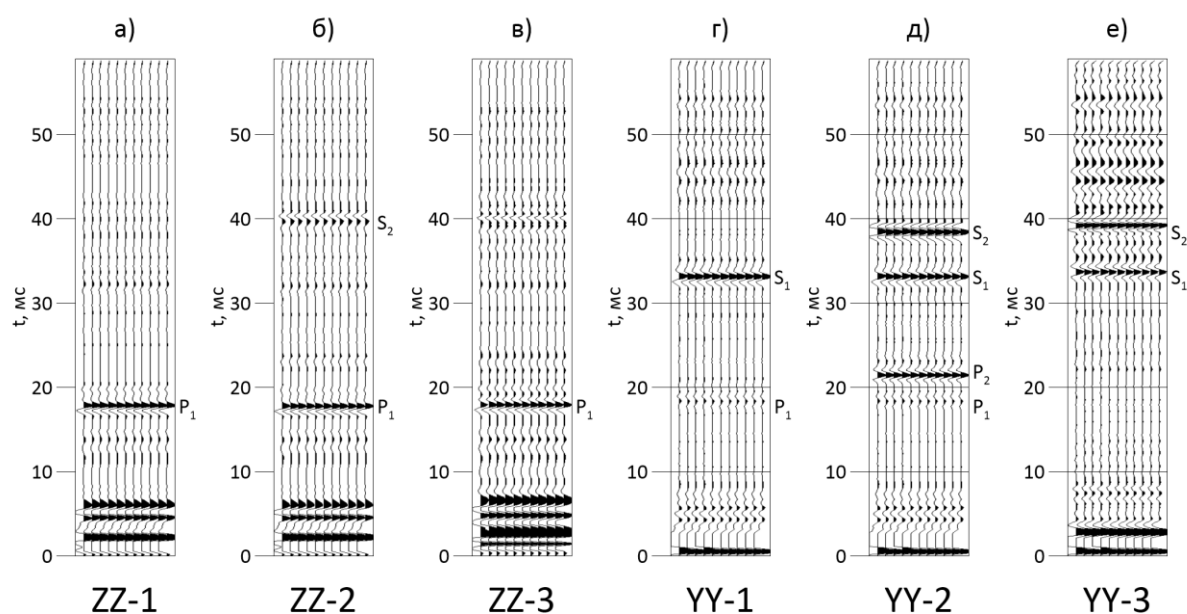


Рис. 4. Результирующие волновые поля для соответствующих схем наблюдений (ZZ, YY) и моделей среды (1,2,3). P_1 , P_2 , S_1 , S_2 – тип отраженной волны и индекс отражателя

Рассмотрим более близкие к реальности тонкослоистые модели, характерные для соляной толщи, сформированные по данным акустического каротажа (рис. 5). Модели 2 и 3 осложнены условной складкой, сформированной на разных удалениях от выработки и, соответственно, от целевой плоскости изучения разреза. Как и в упрощенных моделях целевым является получение отражений в направлении, ортогональном кровле выработки, характеризующем структуру ВЗТ непосредственно над выработкой.

Для параллельно-слоистой модели без внесения искажающих факторов в результирующем волновом поле, рассчитанном для схемы наблюдений УУ (рис. 5а), наблюдается классическая интерференционная картина с повышением амплитудного уровня отражений в более контрастной по упругим параметрам части геологической среды (кровля соляной толщи). При добавлении в модель складки и по мере ее приближении к выработке волновое поле осложняется дополнительными отражениями S-волн, приходящими из нецелевой области пространства. Причем эти отражения находятся в наиболее значимом для анализа временном интервале, непосредственно характеризующем водозащитную толщу. Также за счет интерференции происходит ослабление отражений в районе кровли соляной толщи.

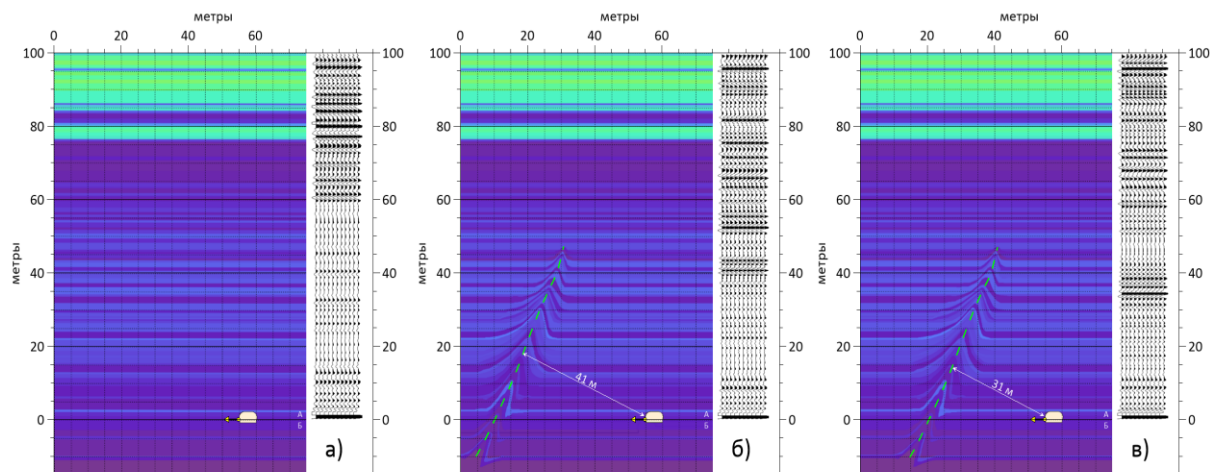


Рис. 5. Тонкослоистые модели соляной толщи и синтетические волновые поля, полученные по схеме наблюдений УУ

Таким образом, представленные материалы позволяют утверждать, что в реальных условиях соляных рудников форма характеристик направленности S-волн будет изменяться от объекта к объекту за счет ряда объективных факторов: углов наклона границ, размеров и геометрии выработки, местоположения пунктов возбуждения по высоте стенки выработки, параметров зоны влияния выработки, наличия вблизи выработки тонких низкоскоростных слоев.

В определенных физико-геологических условиях принципиальные изменения в результирующих волновых полях поперечных волн возможны даже за счет субъективного фактора: выбора той или иной стенки для проведения наблюдений по схеме УУ. Наличие зон складчатости в окрестностях выработки на удалении в первые десятки метров от целевой изучаемой плоскости может оказывать значительное влияние на суммарную интерференционную картину сейсмического разреза и, как следствие, приводить к некорректным структурным построениям и интерпретационным выводам.

В отличие от поперечных волн, направление распространения упругих волн продольного типа характеризуется определенной избирательностью и согласуется с направлением излучения. При наблюдениях по схеме ZZ влияние всех вышеуказанных факторов на направленность Р-волн минимально. Именно поэтому они рекомендованы [7, 10] как основной носитель информации при изучении водозащитной толщи на Верхнекамском месторождении солей.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания (рег. номер 122012000401-7).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Gendzwill D.J., Brehm R. High-resolution seismic reflections in a potash mine // *Geophysics*. – 1993. – V. 58, № 5. – P. 741-748. – DOI: 10.1190/1.1443459.
2. Бабкин, А.И., Санфиров, И.А. Практические примеры решения горнотехнических задач методами шахтной сейсмоакустики // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. – 2011 – № 4. – С.152-159.
3. Вагин В.Б. Шахтные сейсмические методы изучения строения массивов соляных пород. – Минск: БелНИЦ «Экология», 2010. – 186 с.: ил.
4. Санфиров И.А., Бабкин А.И., Ярославцев А.Г. Комплексные методические решения в шахтной сейсмоакустике // *Геофизика*. – 2014. – № 5. – С. 10-15.
5. Санфиров И.А. Рудничные задачи сейсморазведки МОГТ / ГИ УрО РАН. – Екатеринбург, 1996. – 168 с.
6. Санфиров И.А., Ярославцев А.Г., Бабкин А.И. Изучение особенностей формирования поля отраженных волн при наблюдениях в горных выработках соляных рудников на основе полноволнового моделирования // *Геофизика*. – 2021. – № 5. – С. 4-11.
7. Санфиров И.А., Бабкин А.И., Ярославцев А.Г. О перспективах изучения поперечных волн в горных выработках соляных рудников // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. – 2020. – № 7. – С. 45-63. – DOI: 10.25018/0236-1493-2020-7-0-45-63.
8. Ярославцев А.Г., Тарантин М.В. Исследование характеристик направленности точечных источников колебаний с помощью полноволнового моделирования // *Горное эхо*. – 2023. – № 2 (91). – С. 76-81. – DOI: 10.7242/echo.2023.2.14.
9. Ярославцев А.Г., Тарантин М.В., Жикин А.А. Учет направленности источников сейсмических колебаний при решении горно-геологических задач // *Горный журнал*. – 2023 – № 11. – С. 37-42. – DOI: 10.17580/gzh.2023.11.06.
10. Инструкция по шахтной сейсморазведке (применительно к условиям Верхнекамского месторождения калийных солей) / утв. ГИ УрО РАН, ПАО «Уралкалий». – Пермь, 2021. – 44 с.