

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКИ НА РЕЗУЛЬТАТЫ РЕГИСТРАЦИИ ОТРАЖЕННЫХ ВОЛН ПРОДОЛЬНОГО ТИПА С ПОМОЩЬЮ ПОЛНОВОЛНОВОГО СЕЙСМОМОДЕЛИРОВАНИЯ

А.Г. Ярославцев

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация. На результатах полноволнового моделирования рассмотрены особенности регистрации продольных волн в горной выработке. Даны оценки максимально допустимого расстояния расположения сейсмоприемников от борта выработок. Установлено, что при возбуждении продольных волн в верхнее полупространство выработка оказывает экранирующий эффект для нецелевых волн, распространяющихся в нижнее полупространство. Сформулированы технологические рекомендации по проведению шахтных сейсморазведочных работ.

Ключевые слова: шахтные геофизические исследования, рудная геофизика, сейсморазведка, сейсмо моделирование, продольны волны, горные выработки.

Введение

Основной объём шахтных сейсмических исследований на Верхнекамском месторождении солей (ВКМС) проводится с целью изучения состояния перекрывающей выработанное пространство водозащитной толщи. От её целостности зависит защита рудника от затопления. Применяемые полевые методики при этом должны обеспечивать устойчивую регистрацию пришедших сверху отражённых волн и, что не менее важно, технологичность проведения полевых сейсморазведочных работ. Общие представления о распространении волн и методические подходы при проведении шахтной сейсморазведки в соляных рудниках отражены в работах [1, 2, 5, 8] и закреплены в действующей на рудниках ВКМС Инструкции [6].

В реалиях непрерывного горного производства требованиям технологичности (оперативность, простота, мобильность, независимость от шахтного технологического оборудования) на сегодняшний день соответствуют системы сейсморазведочных наблюдений, при которых установка геофонов производится либо в почву, либо в стенку выработки. Крепление геофонов в кровлю выработок не выдерживают требования технологичности и объективно может применяться только в качестве единичных экспериментов. В тоже время возбуждение колебаний ударным источником в любую точку на профиле выработки (в том числе в кровлю) не представляет сложности.

Опыт предыдущих исследований показывает [7, 10], что наиболее устойчивыми носителями информации о строении породного массива являются отраженные продольные волны, однако при их возбуждении и регистрации во внутренних точках среды следует принимать во внимание не только литолого-физическую дифференциацию массива, вмещающего выработку, но и влияние самой выработки на регистрируемое волновое поле [3, 4, 11]. Т.к. поперечные размеры выработки (3 x 5 м) сравнимы с длиной генерируемых Р-волн (5-7 м), то выработка будет являться контрастной неоднородностью и влиять как на характеристики направленности источников колебаний, так и на формирование сигнала в разных точках расположения приемников колебаний.

Проведённые ранее полевые эксперименты на Р-волнах с позиции качества сейсмической записи указывают на преимущество установки геофонов в почву выработки. Установка вертикальных сейсмоприёмников на борту приводит к появлению на сейсмической записи паразитных сигналов, существенно снижающих качество получаемых данных. Это связано с появлением дополнительного резонатора – углового крепления.

Методика

Оценить соответствие регистрируемых на почве выработки сигналов с «чистым», распространяющимся в «нетронутым» массиве, предлагается средствами полноволнового математического моделирования.

Расчет теоретических волновых полей базируется на конечно-разностных (полноволновых) вычислениях и реализован в программе Tesserat Engineering (<http://www.tesserat-geo.com>).

Выбраны следующие основные параметры моделирования: режим расчета – 2D Elastic; источник возбуждения – вертикальный диполь; частота генерируемого импульса – 700 Гц; шаг дискретизации 100 мкс; размер вычислительной решетки – 0,2 м, регистрация Z-компоненты.

В расчет взята упрощенная двухслойная геологическая модель соляного массива (рис. 1). При этом отдельно имитировалось два случая: контрастная отражающая граница на 50 м выше точки возбуждения колебаний (а) и на 50 м ниже (б).

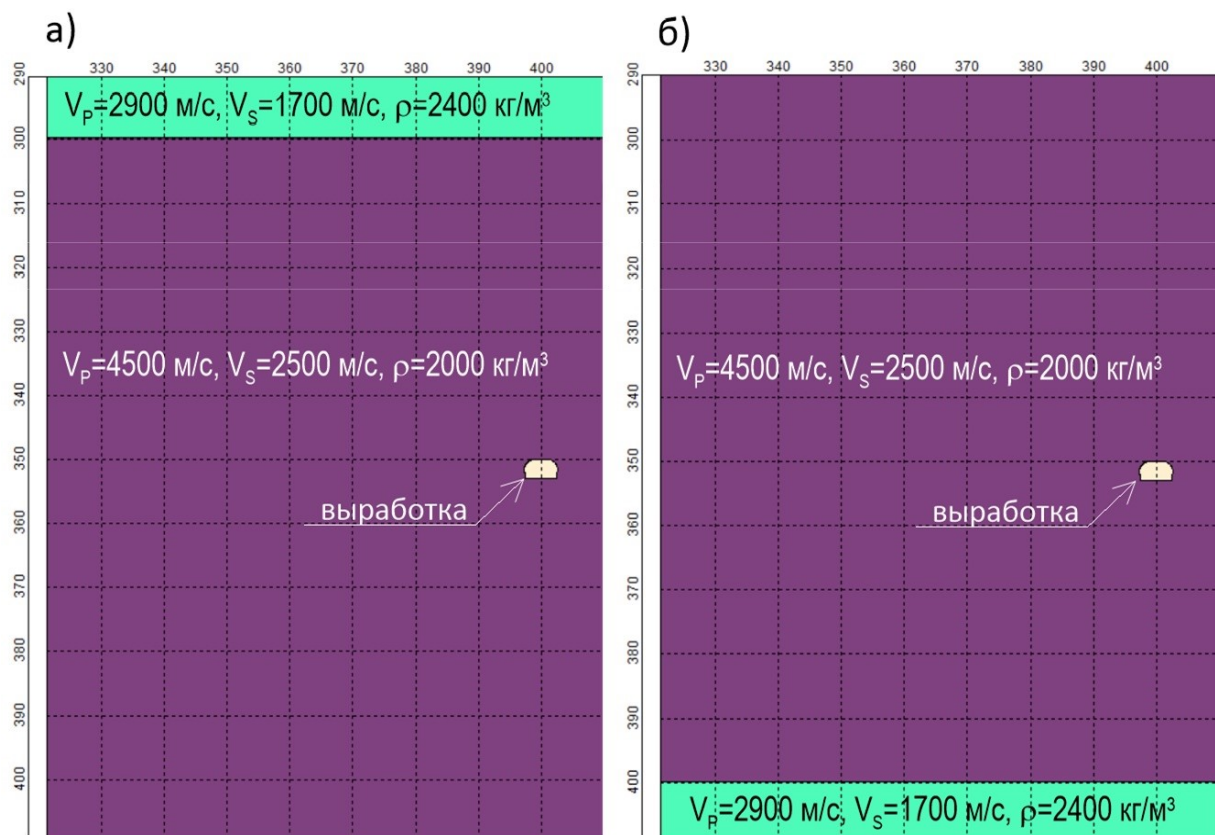


Рис. 1. Физико-геологические модели взятые в расчет

Пункты возбуждения располагались с шагом 0.2 м на границе однородного изотропного пространства (каменная соль) и полигона (воздух), по размерам и форме близкого к поперечному сечению горной выработки, пройденной комбайном «Урал-20Р». Такая постановка (рис. 2), позволяет моделировать распространение волн в плоскости ZY, т.е. фактически поперек реального профиля наблюдений.

Для возможности дальнейшего сравнения линии приема колебаний продолжены за пределы контура выработки, как при регистрации на почве (рис. 2а), так и на уровне кровли выработки (рис. 2б). Все расчеты выполнены для наиболее часто используемого на практике варианта положения пункта возбуждения (ударный источник типа сосредоточенной силы).

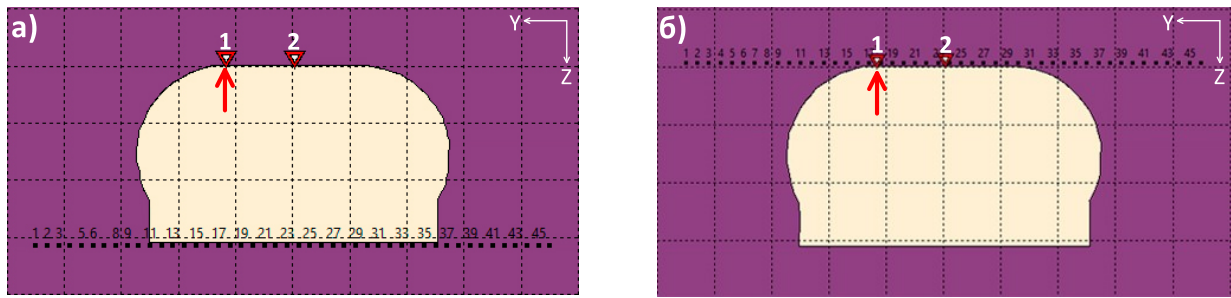


Рис. 2. Расположение приемников сейсмических сигналов относительно профиля выработки. Стрелочкой показана точка и направление возбуждения колебаний

Результаты

На рис. 3 приведены результаты моделирования волновых полей для четырех вариантов относительного положения отражающей границы и пунктов приема колебаний (Z-компонента): а) отражающая граница сверху выработки, сейсмоприемники на уровне подошвы; б) отражающая граница сверху выработки, сейсмоприемники на уровне кровли; в) отражающая граница снизу выработки, сейсмоприемники на уровне подошвы; г) отражающая граница снизу выработки, сейсмоприемники на уровне кровли. Стрелочками показано положение точки вступления отраженной волны на целевых сейсмоприемниках.

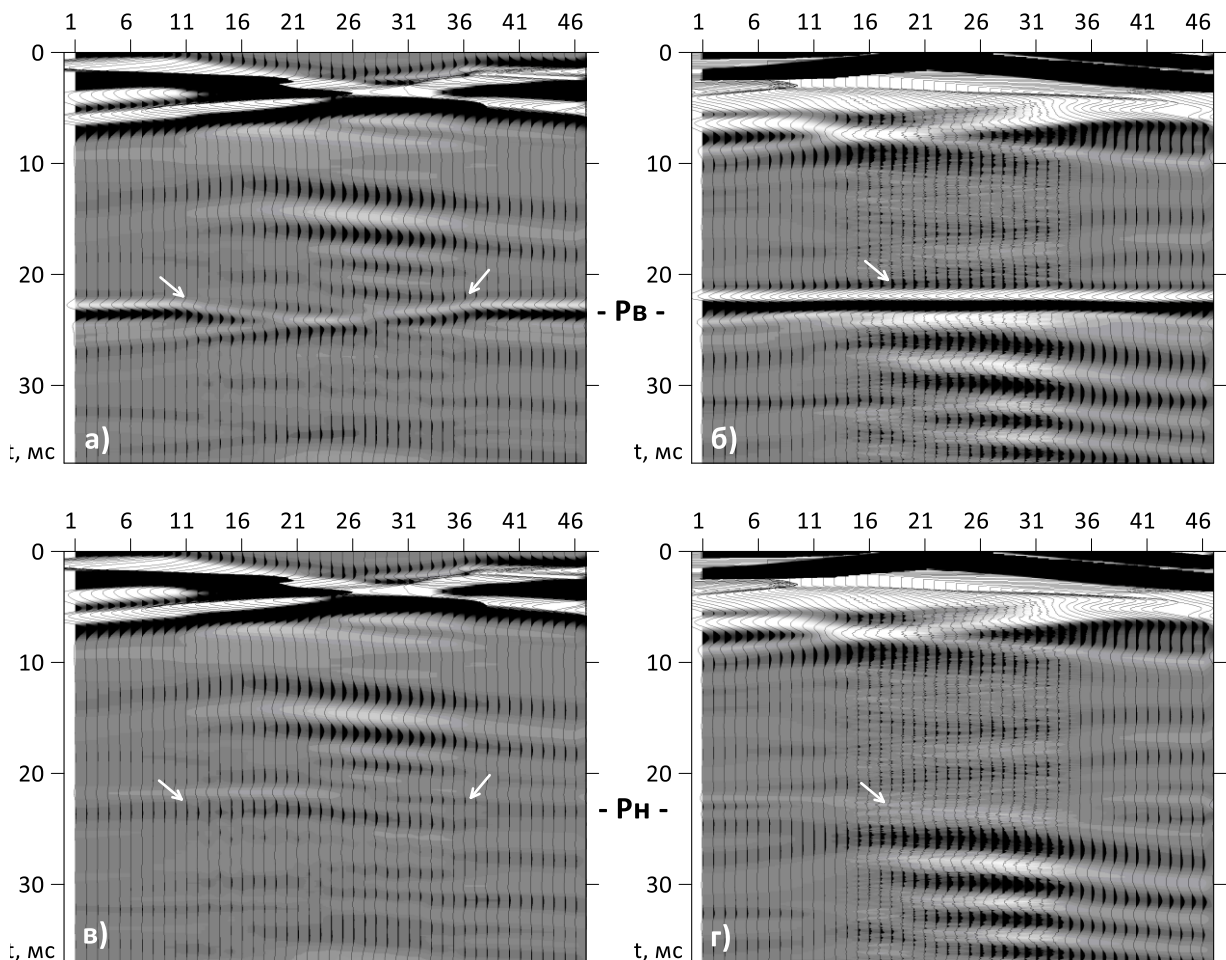


Рис. 3. Теоретические сейсмограммы для различного расположения приемников на контуре одиночной выработки (пояснения в тексте)

При расположении геофонов на почве выработки сопоставимый по форме и амплитудному уровню отраженный сигнал не существенно отличается от «чистых» (регистрируемых вне выработки) отражений только на 2-3 ближайших к борту выработки каналах 11-13, 34-36 (рис. 2а). Максимально отдаленный из них и определяет допустимое на практике расстояние от борта при установке геофонов – 40 см. На большем расстоянии существует вероятность интерференции с дифрагированными волнами от уступов выработки, которые прослеживаются ниже отражающего горизонта в центре расстановки.

Динамические оценки показали превышение в 2 раза амплитуды «чистых» сигналов относительно зарегистрированных на почве возле бортов выработки. Амплитуда отраженных сигналов получаемых на кровле выработки (рис. 2б) превышает сигнал на почве в 5 и более раз.

Из рис. 2в и 2г видно, что при возбуждении колебаний в кровлю отражения от границы расположенной ниже выработки практически не имеют динамической выразительности. Их амплитудный уровень сравним или ниже уровня помех, образующихся на контуре выработки. Также стоит отметить, что при расположении приемников на почве выработки (рис. 2в) отражение снизу менее выразительно для каналов 34-36, чем для каналов 11-13.

Еще один вариант моделирования выполнен для случая, когда в разрезе присутствуют две параллельные выработки (рис. 3), а отражающая граница расположена сверху. В практике разнесение пунктов возбуждения и приема в разные выработки (непродольное профилирование) позволяет значительно снизить уровень волн-помех, образующихся на контуре выработки.

Наличие двух выработок, очевидно, осложняет волновое поле интенсивными переотражениями S-волн, распространяющимися в горизонтальном направлении. Но это неизбежно в реальных шахтных условиях и требует нахождения специальных подходов при цифровой обработке [12]. Из полученных синтетических сейсмограмм видно, что при использовании непродольного варианта профилирования (рис. 3б) также можно получать кондиционный отраженный сигнал на приемниках, максимально близко расположенных к бортам выработки. В тоже время в волновом поле появляется достаточно интенсивная обменная волна (PS), которая будет осложнять обработку данных на практике. При стандартном варианте профилирования обменная волна практически отсутствует.

Выводы

Результаты моделирования подтверждают установленные на практике методические аспекты проведения шахтной сейсморазведки, а также позволяют сформулировать ряд новых рекомендаций.

При изучении верхнего полупространства на продольных волнах технологически оправданным является производство работ с возбуждением колебаний ударными источниками в кровлю выработки и приемом их на почве выработки в непосредственной близости от борта. Максимальное удаление пункта приема от стенки выработки не должно превышать 40-50 см.

При соответствующих поперечных размерах выработок в шахтах ВКМС и длине генерируемых волн в достаточной степени обеспечивается экранирующий эффект от выработки, при котором продольные волны из нижнего полупространства имеют крайне низкую интенсивность.

Наиболее оптимальным вариантом отработки профиля является тот, при котором пункты возбуждения и приема колебаний разнесены к разным стенкам. Разнесение пунктов возбуждения и приема в разные выработки рекомендуется выполнять только при технологической невозможности проведения продольного профилирования в пределах одной выработки.

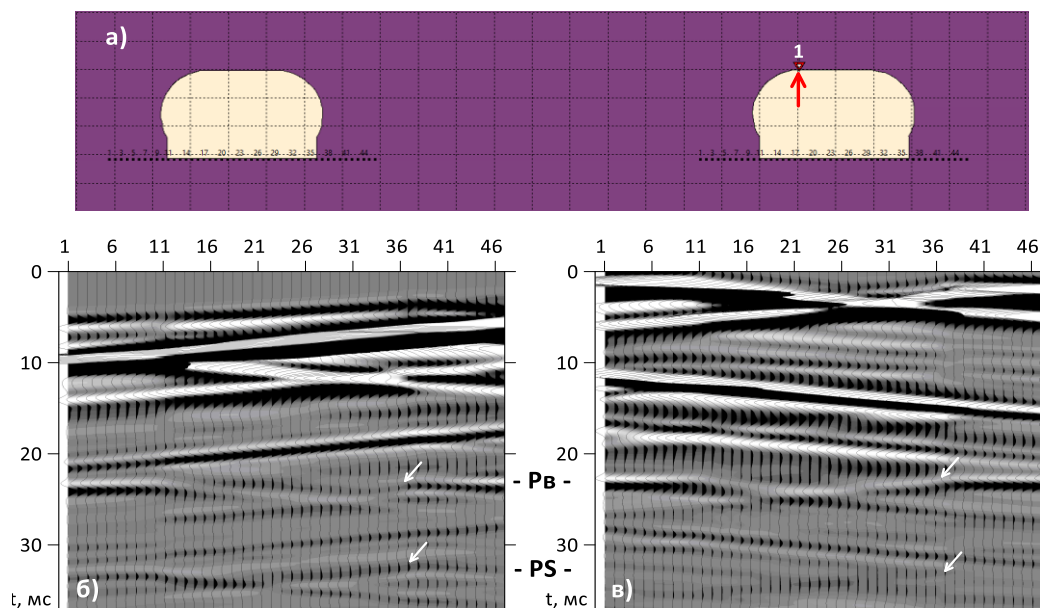


Рис. 4. Теоретические сейсмограммы для различного расположения приемников на контуре двух параллельных выработок

Работа выполнена при поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 20-45-596030.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бабкин А.И. Шахтная сейсмоакустика по методике многократных перекрытий (на примере Верхнекамского месторождения калийных солей): автореф. дис. ... канд. техн. наук: 25.00.16: защищена 21.11.01 / Бабкин Андрей Иванович. – Пермь, 2001. – 20 с.
2. Бабкин А.И. Пространственные интерференционные системы сейсмоакустических наблюдений в условиях горных выработок калийных рудников // Горн. информ.-аналит. бюл. – 2010. – № 1. – С. 261-267.
3. Бабкин А.И. Изучение закономерностей формирования и распространения объёмных сейсмических волн в породном массиве по данным трехкомпонентной записи в горных выработках // Горное эхо. – 2020. – № 4 (81). – С. 57-63. – DOI: 10.7242/echo.2020.4.12.
4. Бабкин А.И. Экспериментальное определение фактической направленности источника упругих колебаний типа сосредоточенной силы // Горное эхо. 2021. № 3(84). С.39-44. DOI: 10.7242/echo.2021.3.8.
5. Вагин В.Б. Шахтные сейсмические методы изучения строения массивов соляных пород. – Минск: БелНИЦ «Экология», 2010. – 186 с.: ил.
6. Инструкция по шахтной сейсморазведке (применительно к условиям Верхнекамского месторождения калийных солей): утв. ГИ УрО РАН, ПАО "Уралкалий" / ГИ УрО РАН; Санфиоров И.А., Бабкин А.И. – Пермь, 2021. – 44 с.
7. Санфиоров И.А., Бабкин А.И. Сейсморазведка МОВ в горных выработках соляных рудников // Геофизика. – 2006. – № 3. – С. 23-26.
8. Санфиоров И.А., Бабкин А.И. Методические особенности шахтных сейсмоакустических исследований на Верхнекамском калийном месторождении солей // Горн. информ.-аналит. бюл. – 2007. – № 11. – С. 145-154.
9. Санфиоров 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.
10. Санфиоров 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. 4-1.
11. Ярославцев А.Г. Обоснование сейсмогеологической модели выработанного пространства для разнотипных волновых полей // Горное эхо. – 2021. – № 1 (82). – С. 103-108. – DOI: 10.7242/echo.2021.1.19.
12. Ярославцев А.Г., Фаткин К.Б. Шахтные сейсмоакустические исследования при контроле предохранительных целиков в калийных рудниках // Инженерная и рудная геофизика – 2020: 16-я науч.-практ. конф., 14-18 сент. 2020. – Пермь, 2020. – DOI: 10.3997/2214-4609.202051043.