

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

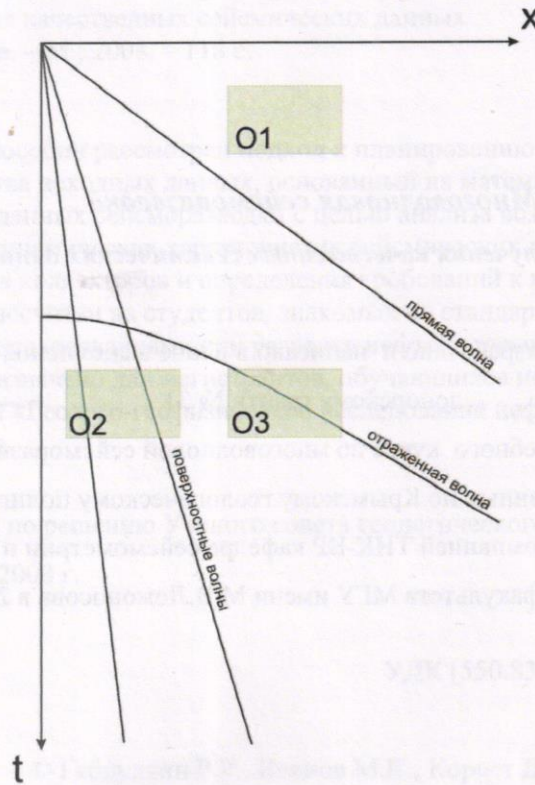
Геологический факультет

Габдуллин Р.Р., Иванов М.К., Корост Д.В., Ошкин А.Н., Певзнер Р.Л.,

Шалаева Н.В.

Многоволновая сейсморазведка

Задача получения качественных сейсмических данных



Москва-2008

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
Геологический факультет
Кафедра сейсмологии и геоакустики

Габдуллин Р.Р., Иванов М.К., Корост Д.В., Ошкин А.Н., Певзнер Р.Л.,
Шалаева Н.В.

Многоволновая сейморазведка

Задача получения качественных сейсмических данных

Учебное пособие разработано и написано в плане выполнения проекта по
донорскому гранту № 31

«Создание учебного курса по многоволновой сейморазведке с
использованием данных по Крымскому геологическому полигону МГУ»,
предоставленного компанией ТНК-ВР кафедре сейсмологии и геоакустики
Геологического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова в 2007 году.

Москва-2008

УДК [550.832:550.8.05](075.8)

ББК26.21

Г 121

Рецензенты:

профессор кафедры сейсмометрии и геоакустики геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, докт. физ.-мат. наук *В.В. Калинин*,
доцент кафедры сейсмометрии и геоакустики геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, канд. геол.-мин. наук *П.Ю. Степанов*

**Габдуллин Р.Р., Иванов М.К., Корост Д. В., Ошкин А.Н., Певзнер Р.Л.,
Шалаева Н.В.**

Г **Многоволновая сейсморазведка**

Задача получения качественных сейсмических данных

Учебное пособие. – М.: 2008. – 118 с.

В учебном пособии рассмотрен подход к планированию полевых работ и контролю качества исходных данных, основанный на математическом моделировании данных сейсморазведки с целью анализа возможности использования динамических характеристик сейсмических данных для изучения свойств коллекторов и определения требований к полевым данным. Учебный курс рассчитан на студентов, знакомых со стандартными сейсмическими исследованиями при разведке нефте-газовых месторождений.

Пособие предназначено для магистрантов, обучающихся по специальности и специализации «Геолого-геофизические исследования нефтяных и газовых месторождений».

Печатается по решению Ученого совета геологического факультета

от 2008 г.

УДК [550.832:550.8.05](075.8)

ББК26.21

© Габдуллин Р.Р., Иванов М.К., Корост Д. В., Ошкин А.Н.,

Певзнер Р.Л., Шалаева Н.В., 2008

Содержание

Введение	5 стр.
Раздел 1. Анализ общей характеристики района работ	6
<u>Контрольные вопросы к разделу 1</u>	22
Раздел 2. Формирование набора моделей для изучения изменения свойств целевого объекта	23
§1. Построение базовой сейсмогеологической модели при помощи акустической инверсии	23
§2. Анализ данных ГИС	26
§3. Результаты акустического моделирования	28
§4. Изучение свойств пород с помощью физических измерений на образцах	31
4.1 Лабораторные акустические измерения на образцах пород с Крымской базы МГУ	31
4.2 Стандартные петрофизические исследования кернового материала или материала образцов	48
§5. Формирование набора сейсмогеологических моделей района Крымской научной базы для расчета синтетических сейсмограмм	61
<u>Контрольные вопросы к разделу 2</u>	67
Раздел 3. Расчет синтетических сейсмограмм для набора моделей	68
§1. Математическое моделирование сейсмических волновых Полей	71
§2. Результаты моделирования для моделей «Полигон» и «Крым»	73
<u>Контрольные вопросы к разделу 3</u>	95
Раздел 4. Формирование требований к получению и качеству исходных данных на основе анализа результатов моделирования	96
§1. Пример оценки качества материала для AVO-анализа	96
§2. Определение основных параметров съемки и планирование съемки	100
§3. Оценка качества сейсмических данных	102
3.1. Подходы к оценке качества сейсмических данных	103
3.2. Оценки динамических характеристик сейсмической записи	107
<u>Контрольные вопросы к разделу 4</u>	115
Заключение	116
Рекомендованная литература	117

Введение.

Возможность решать такие сложные задачи, как прогнозирование свойств коллекторов при помощи сейсморазведки, очевидно, предполагает достаточно высокое качество полевых сейсмических данных. Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

1. Определить, каким критериям должны удовлетворять сейсмические данные, для того, чтобы их можно было использовать для прогнозирования свойств конкретных коллекторов в конкретных сейсмогеологических условиях.
2. Построить такую методику съемки, которая позволит получить данные, удовлетворяющие разработанным критериям.
3. Обеспечить в поле выполнение методики и своевременный контроль качества полевых данных.

В данном учебном пособии рассмотрен подход к планированию полевых работ и контролю качества исходных данных, основанный на математическом моделировании данных сейсморазведки с целью анализа возможности использования динамических характеристик сейсмических данных для изучения свойств коллекторов и определения требований к полевым данным.

Рассматриваются два варианта – один вариант связан с планированием и контролем качества в ситуации, когда на площади будущих исследований уже имеется информация по скважинам, ГИС и т.д., а во втором случае, реальной ситуации Крымской научной базы Геологического факультета МГУ, имеются лишь результаты геологической съемки, разрезы по нескольким скважинам и в качестве аналога ГИС- результаты лабораторных исследований образцов. Тем не менее, оба рассмотренных варианта призваны служить для формирования у обучающихся (студентов, аспирантов, специалистов, проходящих курс повышения квалификации) представлений о решении перечисленных выше задач.

Основными элементами рассматриваемого подхода являются:

1. Анализ общей характеристики района работ.
2. Формирование набора моделей для изучения изменения свойств целевого объекта.
3. Расчет синтетических сейсмограмм для набора моделей.
Сюда могут входить анализ архивных сейсмических материалов, результатов опытно-методических работ для оценки возможных динамических параметров записи и изучения поля помех, а также моделирование помех.
4. Анализ результатов моделирования, формирование требований к качеству исходных данных.
5. Определение основных параметров съемки и планирование съемки
6. Контроль качества данных в поле.

Рассмотрим по разделам каждый этап в отдельности.

Раздел 1. Анализ общей характеристики района работ.

На этом этапе по априорным данным проводится:

1. описание физико-географических условий проведения полевых работ;
2. описание литолого–стратиграфической характеристики разреза, тектонических условий;
3. описание сейсмогеологических условий, ожидаемых условий возбуждения и регистрации данных, рельефа
4. геологическое описание основных перспективных объектов, их петрофизическая характеристика.

Примером анализа общей характеристики района планируемых сейсмических работ являются геологические маршруты, отбор образцов, их лабораторный анализ – как физическая основа для будущего построения сейсмогеологических моделей.

Геологические маршруты, физико-географические условия, характеристика разреза и отбор образцов для лабораторных исследований.

С целью обеспечения учебного курса по сейсмо-геологическому картированию в рамках учебного гранта «ТНК-ВР» и, в частности, решения одной из задач – выбора места для сейсмического профиля в Бахчисарайском районе Крыма был организован и проведен 14 июля 2007 г. геологический маршрут в окрестности поселка Скалистое и города Бахчисарай.

В задачи маршрута входило:

1. Рекогносцировка местности для определения места для сейсмического профиля;
2. Отбор литологических образцов из терминальных слоев верхнемеловых и палеогеновых отложений для проведения в Москве лабораторных исследований коллекторских и сейсмических свойств.

1. Рекогносцировочные работы завершены рекомендацией по позиционированию профиля к востоку от г. Сувлу-Кая над г. Бахчисарай.

2. Отбор образцов

Образцы отбирались в виде ориентированного (кровля, подошва, падение) монолита неправильной геометрии с целью последующего лабораторного выпиливания кубиков размером 10x10x10 см. Образцы отбирались из всех фациальных разновидностей пород терминальных слоев верхнемеловых и палеогеновых отложений. Выбор места для отбора образцов был обусловлен легкой доступностью (возможность подъезда на автомашине повышенной проходимости), соблюдением правил техники безопасности. Образцы отбирались в четырех точках: Скалистое (точка 1 – в заброшенном карьере на южной окраине пос. Скалистое (рис. 1) и, точка 2 – в новом, действующем карьере) и Бахчисарай (большая промоина у Староселья (восточная окраина города, рис. 2) – точка 3 и большая промоина на южном склоне г. Сувлу-Кая – точка 4, рис. 3). Все эти точки расположены в пределах учебного полигона второй крымской геологической практики МГУ, что обуславливает их хорошую геологическую изученность.

Точка 1. Разрез в заброшенном карьере в Скалистом (обр. №1-3).

Обр. 1 (фото 1). Даний. Мшанково-серпуло-криноидный известняк взят в южном борту карьера из кровли 2-ой ступени 40 м ниже кровли.



Фото. 1. Общий вид заброшенного карьера в месте взятия образца №1.

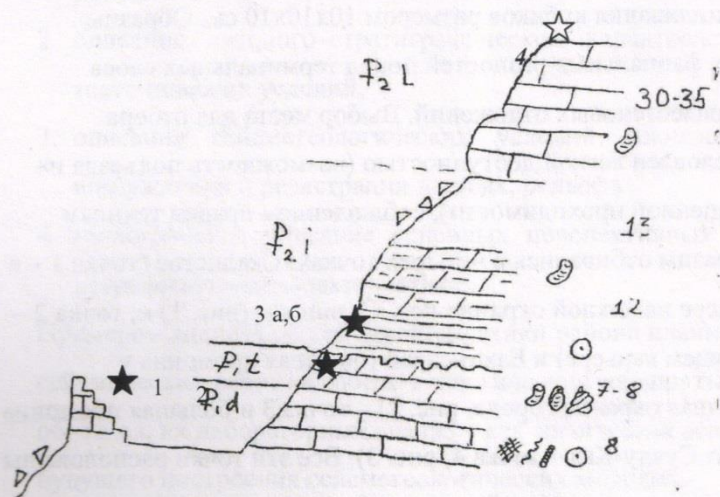


Рис. 1. Разрез в заброшенном карьере в Скалистом (обр. 1-3). Цифрами указана мощность в метрах. Примечание: для образца №4 показано его

стратиграфическое положение в общем разрезе. Место его отбора – новый карьер.

Обр. 2 (фото 2,3). Танет. Мергель с большим количеством макрофауны взят 80 см ниже кровли слоя в северном борту карьера.



Фото. 2. Общий вид заброшенного карьера в месте взятия образца №2.



Фото. 3. Монолит образца № 2. Пунктирная линия внизу показывает падение слоя, наверху – крестом показана кровля, указан номер образца.

Обр. 3 (а, б). Ипр (фото 4). Песчанистая глина с глауконитом взята двумя образцами 15 см выше подошвы.



Фото 4. Образцы №3 а и б (образец и «дублер») на переднем плане.

Точка 2. Действующий карьер.

Обр. 4. Люнет. Нуммулитовый известняк взят в ЮЗ углу нового (действующего) карьера 4 м ниже кровли слоя и 2 м выше полотна дороги на углу карьера. На рисунке 1 показано его стратиграфическое положение в разрезе.



Фото 5. Общий вид работающего карьера в месте взятия образца №4.



Фото 6. Монолит образца №4.

Бахчисарай. Точка 3. Староселье (фото 7.) и точка 4. Сувлу-Кая (фото 8).

Фото 7. Точка 3

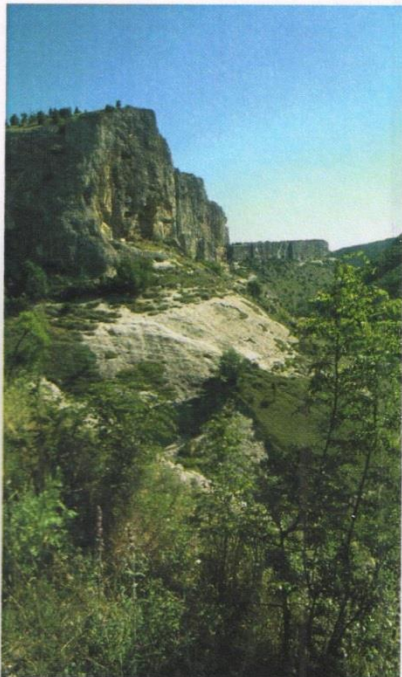
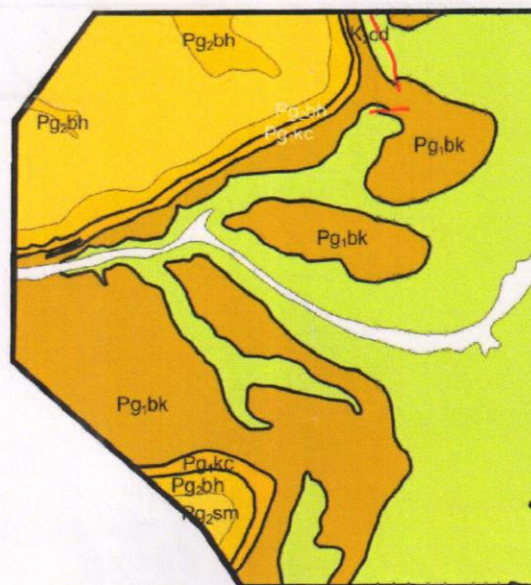


Фото 8. Точка 4.

Рис.2а. . Схема расположения точек 3 и 4.

44.45.06.49 N, 33.54.39.40 E



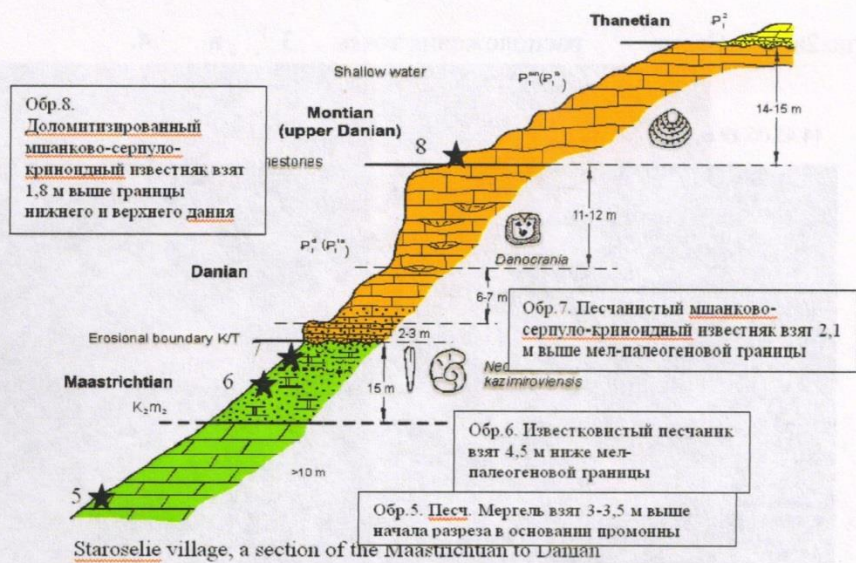
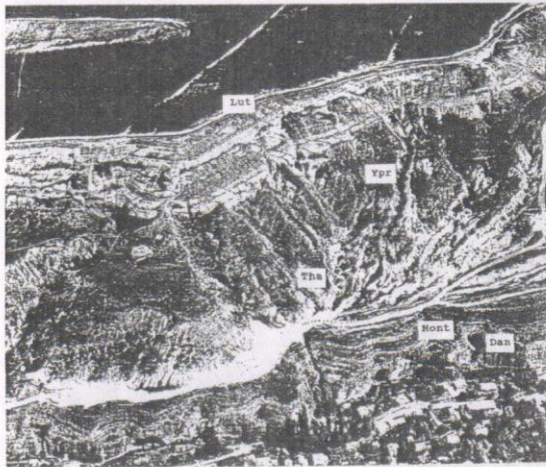
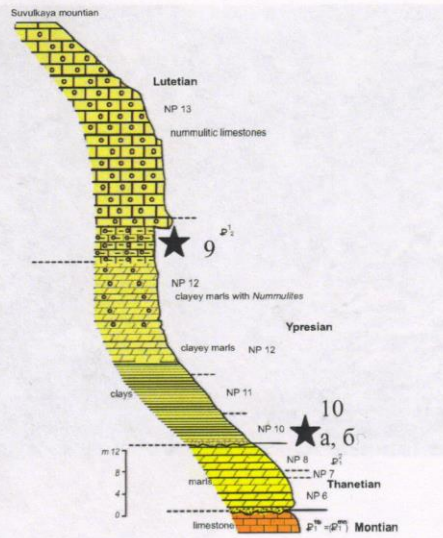


Рис. 26. Разрез верхнемеловых и палеоценовых отложений Староселья (восточная окраина г. Бахчисарай).



Suvlu-Kaya Mt., Paleocene to Eocene section



Suvlu-Kaya Mt.

Обр. 9. Глинистый нуммулитовый известняк лютета (из циклической толщи) взят 1,5 м выше подошвы пачки переслаивания глинистых известняков и мергелей лютета.

Обр.10. Глауконитовая печенистая глина ипра. 10а - взята 0,25 м выше подошвы, 10 б - 0,5 м выше подошвы



Фото 9. Место взятия образца №5.

Обр.6 (фото 10). Известковистый
песчаник взят 4,5 м ниже мел-
палеогеновой
границы.



Фото 10.

Обр.7 (фото11,12). Песчанистый мшанково-серпуло-криноидный известняк
взят 2,1 м выше мел-палеогеновой границы.



Фото11. Уровень места отбора монолита образца №7.



Фото 12. Образец №7.

Обр.8 (фото 13 – 14).

Доломитизированный мшанково-серпуло-криноидный известняк взят 1,8 м выше границы нижнего и верхнего дания



Фото 13. Место отбора образца №8.



Фото 14. Образец №8.

Обр. 9 (фото 15). Глинистый нуммулитовый известняк лютета (из цикличной толщи) взят 1,5 м выше подошвы пачки переслаивания глинистых известняков и мергелей лютета.



Фото 15. Вид на обнажение и место взятия образца №9.

Обр.10 (фото 16,17). Глауконитовая
печанистая глина ипра. 10а - взята 0,25
м выше подошвы, 10 б – 0,5 м выше
подошвы



Фото16. Место отбора образца 10.



Фото17. Образцы №№ 10 а и б.

Образцы отбирались в виде ориентированного (кровля, подошва, падение) монолита неправильной геометрии с целью последующего лабораторного выпиливания кубиков размером 10x10x10 см. Образцы отбирались из всех фациальных разностей пород терминальных слоев верхнемеловых и палеогеновых отложений. Выбор места для отбора образцов был обусловлен легкой доступностью (возможность подъезда на автомашине повышенной проходимости), соблюдением правил техники безопасности. Образцы отбирались в четырех точках: Скалистое (точка 1 – в заброшенном карьере на южной окраине пос. Скалистое и, точка 2 – в новом, действующем карьере) и Бахчисарай (большая промоина у Староселья (восточная окраина города точка 3 и большая промоина на южном склоне г. Сувлу-Кая – точка 4). Все эти точки расположены в пределах учебного полигона второй крымской геологической практики МГУ, что обуславливает их хорошую геологическую изученность.

В итоге были намечены участки, перспективные для прокладки сейсмических профилей, и отобрано 11 монолитов для лабораторных анализов.

Контрольные вопросы к разделу 1.

1. Каковы этапы решения задачи получения качественных данных?
2. Что входит в понятие общей характеристики района работ?
3. Какова роль геологического обследования будущего района работ?
4. В чем состоит задача геологических маршрутов?
5. Какие из перечисленных слоев пород в окрестностях Крымского полигона могут быть или являются коллекторами углеводородов в соответствующих условиях?
6. Какие из перечисленных слоев пород в окрестностях Крымского полигона могут быть или являются покрышками коллекторов углеводородов в соответствующих условиях?
7. Каковы цели отбора образцов пород?

Раздел 2. Формирование набора моделей для изучения изменения свойств целевого объекта.

Полевые работы часто проводятся на таких площадях, где наличие скважинных данных и геологическая изученность разреза оказываются недостаточными для того, чтобы построить базовую сейсмогеологическую модель таким образом, чтобы получаемые с ее использованием синтетические сейсмограммы были похожи на реальные наблюдения. При этом, задачи, связанные с изучением свойств коллекторов, как правило, решаются по данным сейморазведки 3D, т.е. на тех площадях, на которых уже были проведены хоть какие-нибудь сейсмические исследования. Отметим, что для целей построения методики в дальнейшем нам будет необходимо, чтобы свойства целевых объектов отвечали нашим представлениям о них, а покрывающая толща просто должна формировать сейсмическое поле, похожее на наблюдаемое. Поэтому разумным может быть описанный ниже подход к построению базовой модели, построенный на акустической инверсии с последующим формированием моделей целевых горизонтов по методике, сходной с применяемой при AVO-анализе.

§1. Построение базовой сейсмогеологической модели при помощи акустической инверсии.

В качестве изначальных данных для расчета модели скоростей продольных волн может быть использована кривая скоростей суммирования – эффективных скоростей. Ее преимущество заключается в том, что она описывает значениями эффективных скоростей все глубины, доступные при сейсмических исследованиях. Эта кривая является грубым начальным приближением скоростей в среде.

В нашем примере кривая была разбита на блоки и использовалась как первоначальная модель для расчета инверсии по сейсмическому профилю, записанному на площади (Рис. 3).

В результате расчета инверсии был получен разрез импедансов, разрез скоростей продольных волн. Толщина слоев от 6 до 15 мс (Рис.). Затем эта

кривая была разбита на более грубые блоки с минимальными потерями в степени корреляции синтетической трассы и реальной сеймики.

Следующий шаг: по данным акустического каротажа была построена тонкослоистая модель среды для глубин от 2 до 3 км и эта часть была вставлена в модель, полученную при расчете инверсии (Рис. 5).

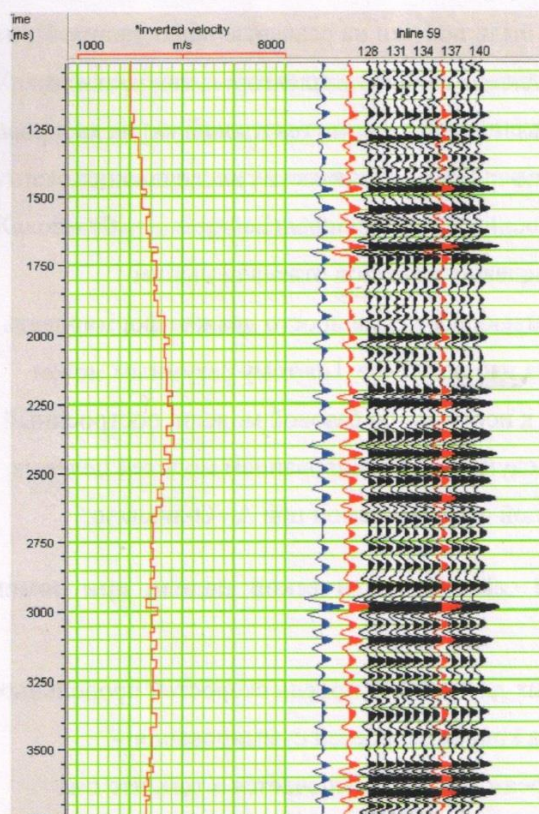


Рис. 3. Начальная модель для инверсии, построенная по кривой эффективных скоростей.

Результат инверсии - модель скоростей продольных волн и точность совпадения синтетической трассы (голубой цвет) и реальной (красный цвет).

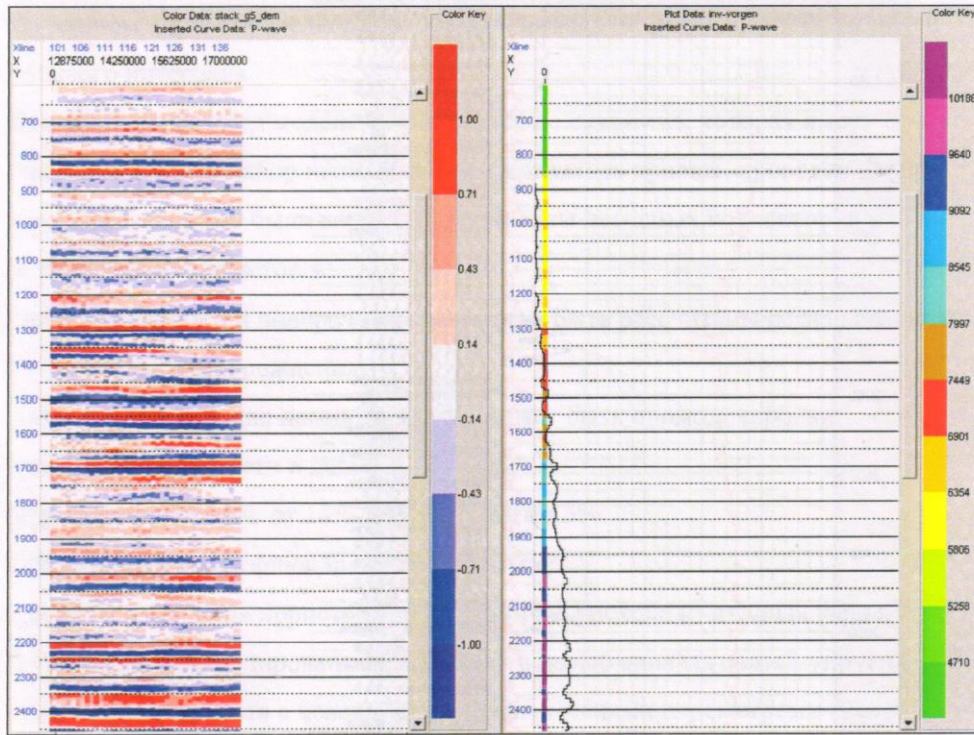


Рис. 4. Слева - сейсмический профиль, по которому рассчитывалась инверсия. Справа - результат инверсии - кривая импедансов.

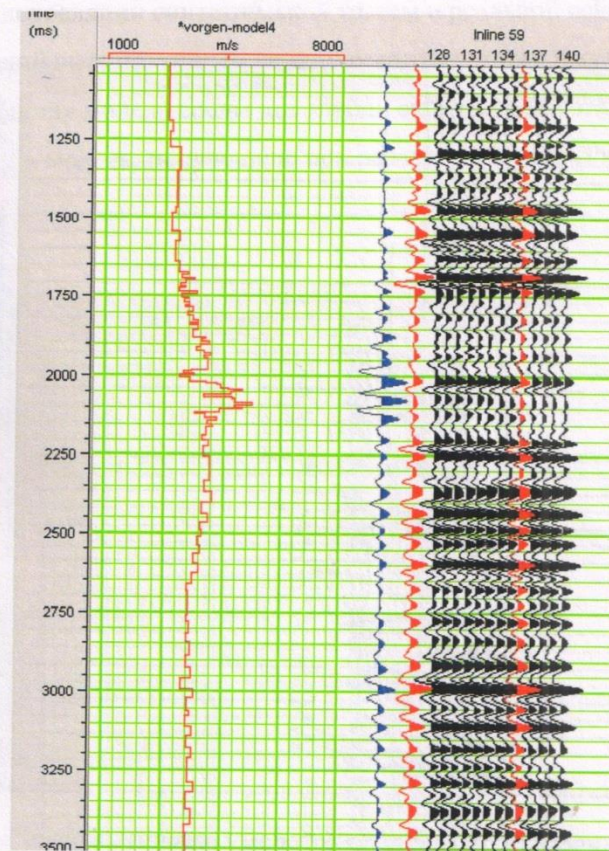


Рис. 5. Окончательный вариант модели среды. Интервал 1700-2200 мс построен по данным АК.

§2. Анализ данных ГИС [4,6,10,11,24-26].

Следующий шаг при построении набора моделей – это анализ данных ГИС с целью получения петрофизических зависимостей и настройки уравнения Гассмана, которое будет использовано для построения набора моделей. Для этого может быть проведена классификация разреза одной или нескольких скважин по группам пород со схожими геофизическими характеристиками. При кластерном анализе по кривым АК, ПС, БК, НК, ГГК-П и т.д. выявляются несколько классов пород. Для каждого класса проводится поиск зависимостей скорости распространения упругих волн и плотности от других параметров

Перебор петрофизических параметров и акустическое моделирование

На данном этапе определяется набор ожидаемых петрофизических моделей целевого интервала.

Как правило, базовая модель формируется по скважине, которая имеет наиболее полный набор необходимых каротажных кривых, проведен отбор керна, по которому были выделены интервалы песчаных коллекторов и определена их пористость.

Значения скоростей поперечных волн могут быть рассчитаны из зависимости V_s от V_p для месторождения.

Затем, например, для целевого пласта может быть промоделировано изменение пористости и свойств флюида:

Перебор пористости от 14% до 20% с шагом 3%.

Перебор плотности флюида $0,7 \text{ г/см}^3$ и 1 г/см^3 .

Пределы изменения пористости были выбраны исходя из анализа керна.

Акустическое моделирование выполнено с целью анализа связей упругих характеристик пласта с целевыми петрофизическими параметрами (пористость, плотность флюида, литология). В результате анализа строится акустическая модель пласта с использованием теоретических расчетов и калибровкой их на реально наблюдаемые значения.

Основным средством для проведения акустического моделирования является уравнение Гассмана. Используя его, мы предполагаем, что породы состоят из пористой изотропной матрицы (сухой породы), заполненной флюидом. При этом матрица предполагается отвечающей модели Био – состоит из зерен, тесно прижатых друг к другу весом вышележащей толщи и скрепленных некоторым количеством цементирующего материала. Поры взаимосвязаны таким образом, что давление флюида всегда постоянно.

Перед тем как использовать уравнение Гассмана, необходимо определить модуль всестороннего сжатия сухой породы (матрицы) и модуль всестороннего сжатия минералов породы (входит в уравнение как константа).

Для получения упругих модулей скелета (вещества, из которого состоит матрица) анализируются зависимости скорости от пористости и плотности от пористости, построенные по скважинным данным. Аппроксимируя эти зависимости линейными и рассчитав уравнение регрессии, можно получить значения скорости и плотности при нулевой пористости, т.е. скорости и плотности в минерале породы. Зависимости были построены только на основе скоростей, плотностей, пористости в коллекторе (в рассмотрении не участвовали глины и «плотняки»).

При использовании уравнения Гассмана существует проблема получения данных об упругих параметрах матрицы породы (сухой породы). В реальной жизни это редко возможно и поэтому возникает нетривиальная задача перехода от упругих модулей минерального вещества к упругим модулям скелета (сухой породы). Нам пришлось решать задачу подбора коэффициентов для эмпирических формул перехода от свойств минерального вещества к свойствам матрицы. Использован следующий критерий подбора: при правильно подобранных коэффициентах подстановка в уравнение Гассмана величин модулей минеральной матрицы, величин независимо определенных пористости и свойств флюида должна приводить к получению упругих свойств флюидонасыщенной породы, возможно наиболее близких к экспериментально наблюдаемым в скважине. Проведенные исследования показали, что результаты расчетов весьма чувствительны к изменениям искомым коэффициентов и при этом практически отсутствуют интервалы эквивалентности. Таким образом, мы полагаем, что необходимые связи между характеристиками матрицы и скелета были установлены достаточно устойчиво и достоверно.

§3. Результаты акустического моделирования

В результате должны быть построены серии акустических моделей (V_p , V_s , RHO) для ожидаемых диапазонов изменения петрофизических свойств с

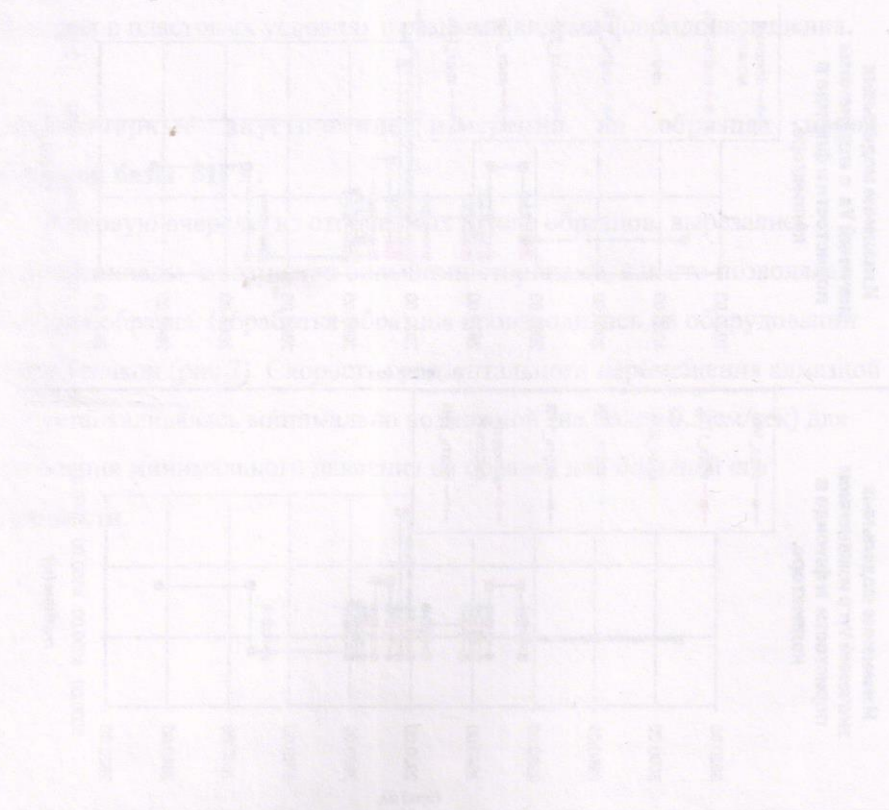
целью передачи их на сейсмогеологическое моделирование. Акустические модели рассчитываются на основе базовой модели следующим образом: меняются свойства только одного исследуемого пласта.

Для этого пласта при помощи кривой коллектор – неколлектор выбираются интервалы для моделирования (перебора петрофизических параметров).

В базовой модели в интервале коллекторов изменяются значения V_p , V_s , плотности на расчетные по уравнению Гассмана (акустические модели).

Также может быть проведено моделирование изменения мощности коллектора.

Примеры акустических моделей для сейсмогеологического моделирования приведены на (рис. 6).



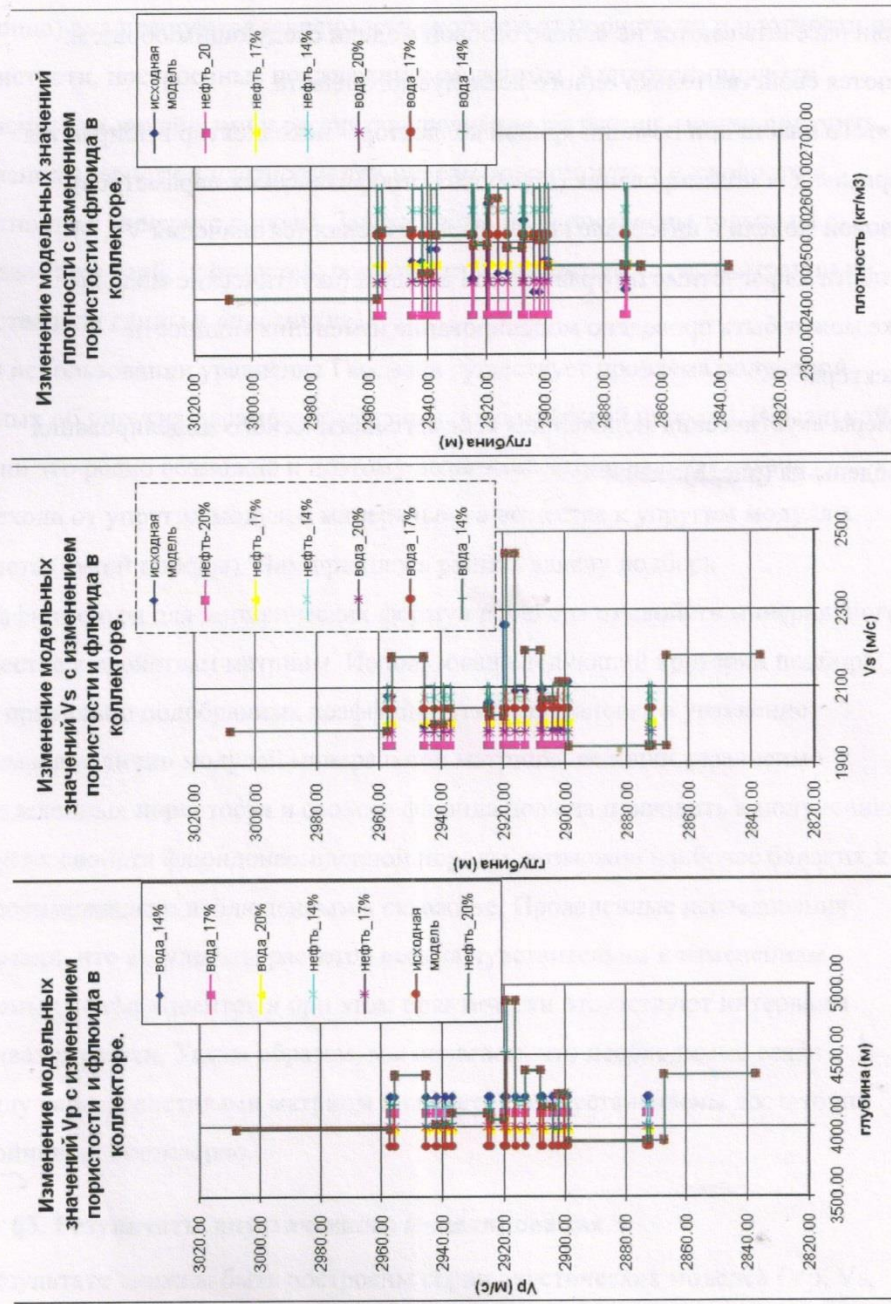


Рис. 6. Акустические модели для сейсмогеологического моделирования.

§4. Изучение свойств пород с помощью физических измерений на образцах.

Измерения различных физических величин на образцах пород изучаемого региона проводятся в «макро» и «микро» вариантах.

Соответственно «макро» - это определения плотности и акустические измерения на относительно низких ультразвуковых частотах в диапазоне 20-100 кГц с использованием монолитов с линейными размерами в первые десятки сантиметров в условиях лаборатории. «Микро» - по результатам ближе всего к результатам ГИС- проведение петрофизических, акустических и электрометрических измерений на относительно небольших образцах – цилиндрах в пластовых условиях с разными видами флюидонасыщения.

Лабораторные акустические измерения на образцах пород с Крымской базы МГУ.

В первую очередь, из отобранных в поле образцов, вырезались параллелепипеды, с возможно большими сторонами, как это позволяла геометрия образца. Обработка образцов производилась на оборудовании фирмы Тенакон (рис 7). Скорость горизонтального перемещения алмазной пилы устанавливалась минимально возможной (не более 0.5 см/сек) для обеспечения минимального давления на образец для большей его сохранности.

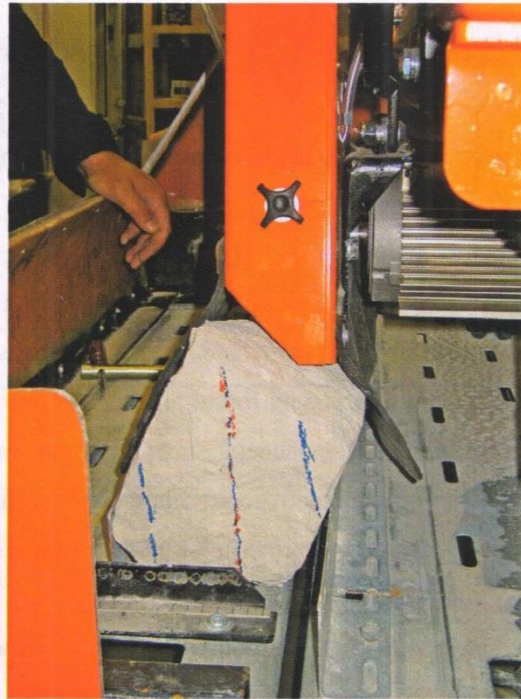


Рис 7. Зажатый в установке для разрезания образец.

Ориентация плоскостей среза соответствовала ориентации слоя в пространстве. Направление Z – от подошвы слоя к его кровле, направление Y по падению слоя, направление X по его простиранию.

Т.к. при распиловке применялась водяная смазка, после процедуры следовала просушка образца.

Исследования проводились с использованием цифрового низкочастотного ультразвукового дефектоскопа УД2Н-ПМ с модифицированным для геофизических измерений программным обеспечением, предоставленным компанией Кропус. Прибор позволяет производить измерения на частотах от 20 кГц до 2.5 МГц, имеет встроенный АЦП с двумя режимами работы: дискретизация на частотах 1 МГц и 5МГц, которые программно интерполируются до 4 и 20 МГц соответственно; имеет

встроенный усилитель с диапазоном регулировки 90 дБ с шагом 0,5, 1, 2 и 6 дБ; и имеет возможность подключения к внешнему компьютеру.

В качестве излучателей и приемников сигнала применялись стандартные ультразвуковые датчики давления типа П111.

Весь цикл лабораторных работ разделялся на две части: измерение распространения скоростей продольных колебаний и измерение распространения скоростей поперечных колебаний.

Для максимального приближения данных, полученных в лаборатории к полевым материалам, применялись датчики с самой низкой центральной частотой – 25 кГц. Для более высокочастотного приближения измерения повторялись на частоте 60 кГц.

Датчики прикладывались к противоположным граням образца, находясь на одной оси, и производилась запись (рис 8). Точность снятия отсчета времени 0,25 мкс, что при минимальном в данных исследованиях времени прихода Р-волны 30 мкс составляет погрешность менее 1%. Точность измерения расстояния между источником и приемником также составляет около 1%

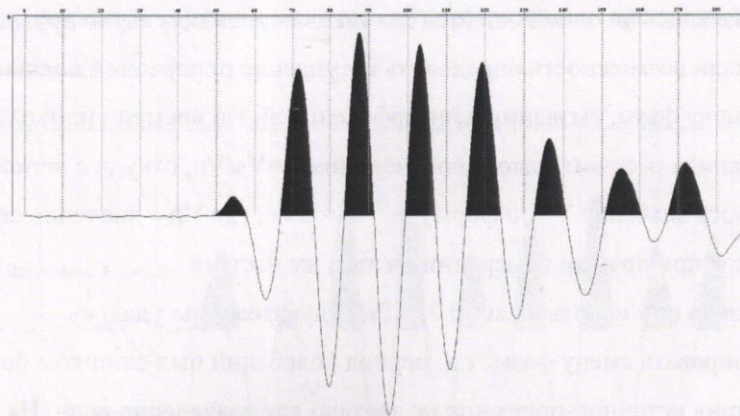


Рис 8. Пример измерения на Р-волнах по методике просвечивания.

Данные по измерениям скоростей V_p на частотах 25 и 60 кГц приведены в таблице 1.

Измерения скоростей поперечных волн проводились по несколько иной методике. Ввиду отсутствия излучателей чисто сдвиговых колебаний, мы воспользовались одним из свойств излучателей поршневого типа. На рис 9 показана диаграмма направленности применяемых в работе датчиков.

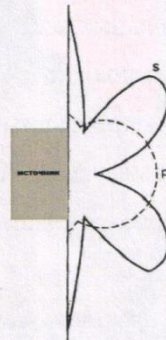


Рис 9. Диаграмма направленности датчика поршневого типа

Как видно из рисунка, в под углом около 45° от оси датчика амплитуда S-волн превышает амплитуду P-волн. Расположив источник и приемник на смежных гранях образца так, чтобы их лепестки диаграммы направленности S-волн оказались на одной оси (оси датчиков перпендикулярно друг другу), мы получали возможность определить вступление поперечной волны, как резкую смену фазы, вызванную интерференцией. По времени прихода P- и S-волн на записи рассчитывалось соотношение $\alpha = V_s/V_p$, откуда с легкостью вычислялось значение V_s по формуле $V_s = \alpha V_p$, где V_p – значение скорости, полученное при прямом измерении на этой же частоте.

Однако при использовании 25 кГц излучателей не удалось зарегистрировать смену фазы, т.к. период колебаний был слишком большим, и расстояния источник-приемник не хватало для разделения волн. На более высокой частоте 60 кГц S-волна уверенно выделялась практически при любых измерениях. Исключение составил образец №3, из-за его малых

размеров была предпринята попытка использовать частоту 100 кГц, однако огромное поглощение не давало возможность произвести измерения S-волн.

На рис 10 показан рабочий момент при измерениях на S-волнах.

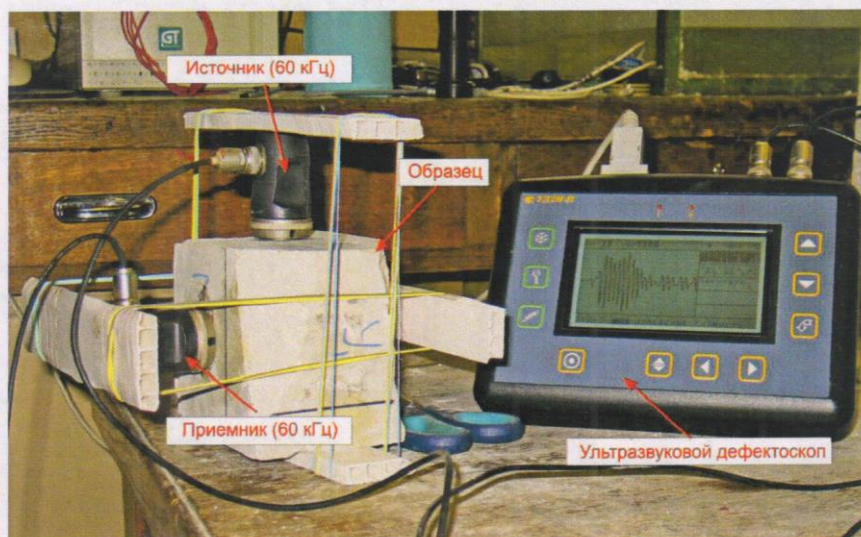


Рис 10. Общий вид установки для измерений V_s

Пример волновой картины, получаемой этим методом, представлен на рис 11.

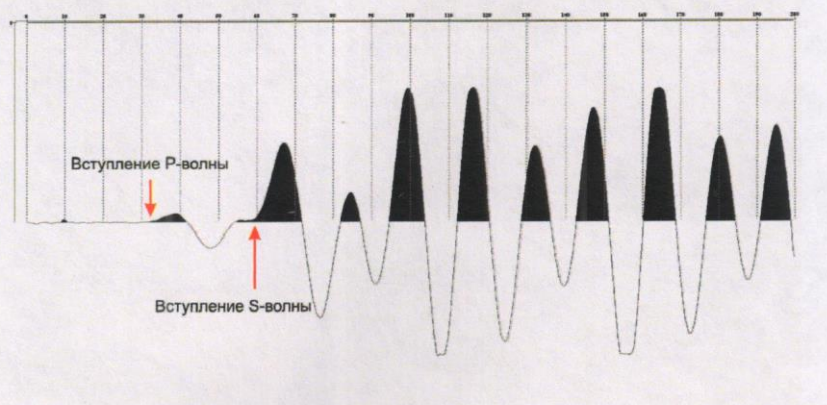


Рис 11. Определение вступления поперечной волны

Измерения V_s были проведены на всех смежных гранях, на которых позволяла геометрия образцов. Результаты представлены в таблице 1.

Ниже приводятся фотографии образцов для более полного представления об их физических свойствах.

Фото 18. Образец №1

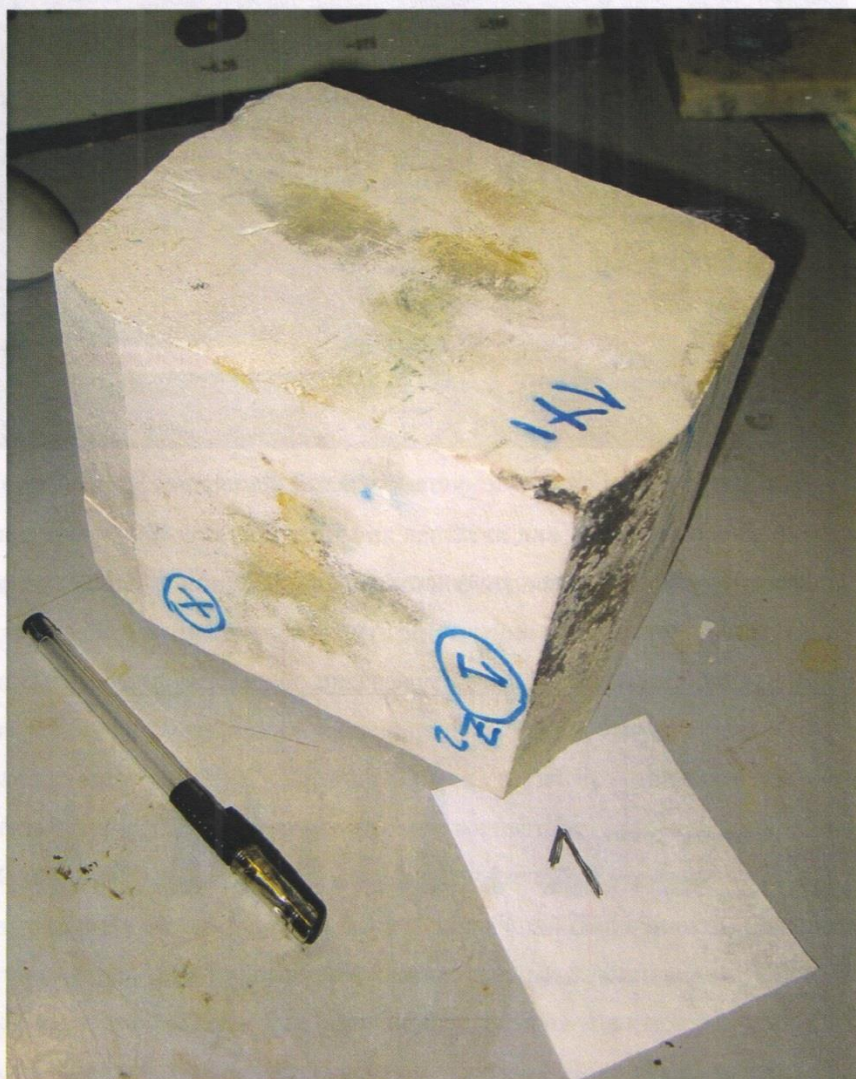


Фото 19. Образец №2

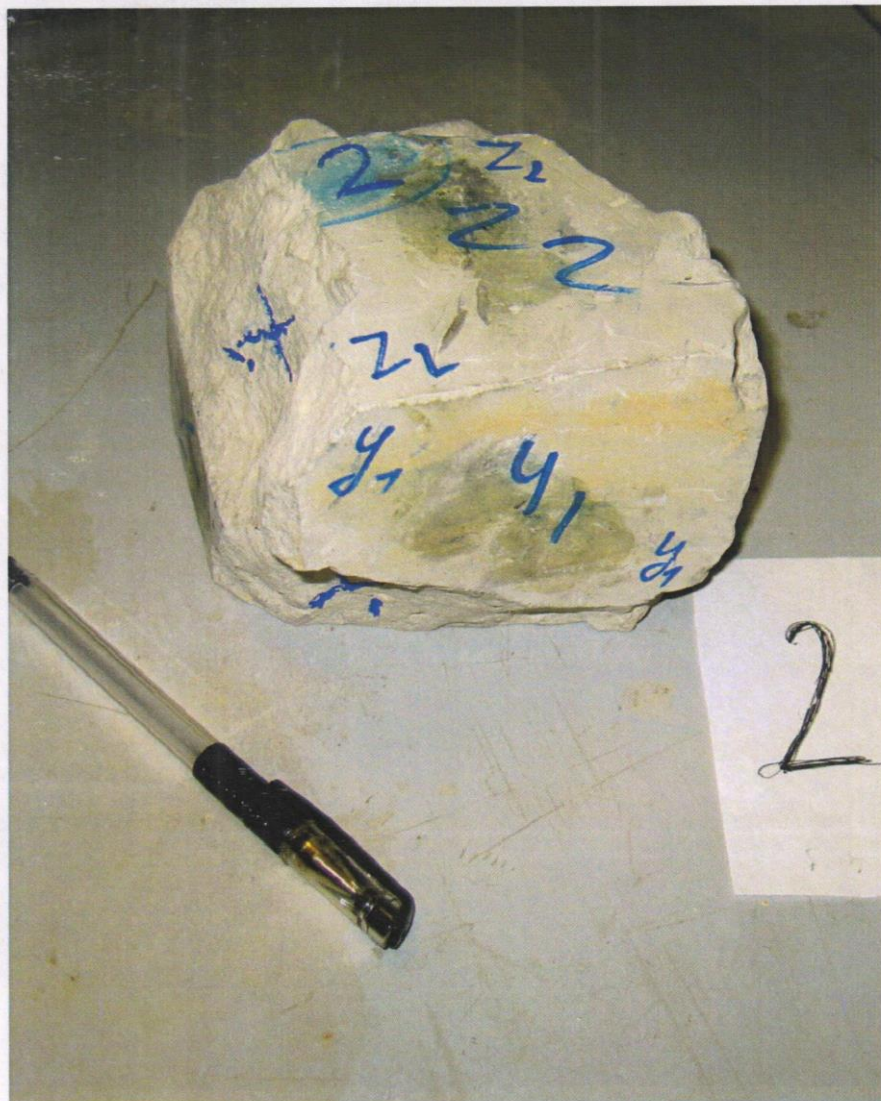


Фото 20. Образец №3

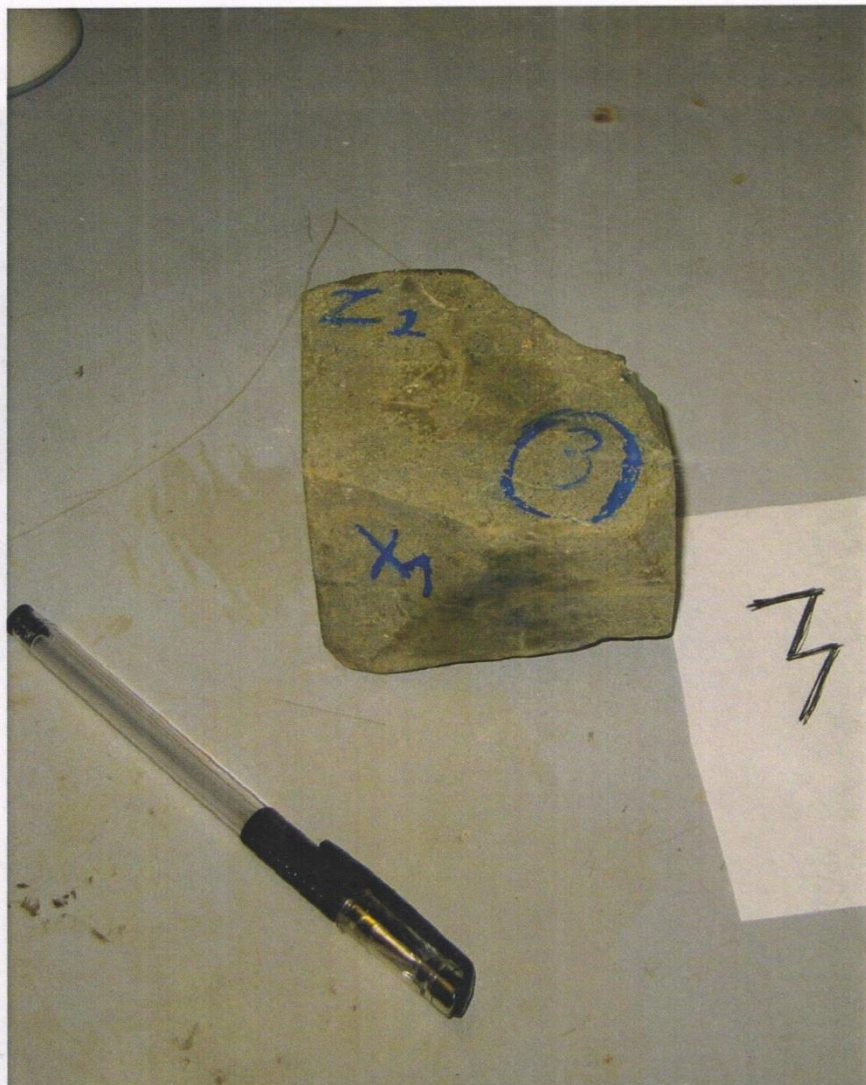


Фото 21. Образец №4

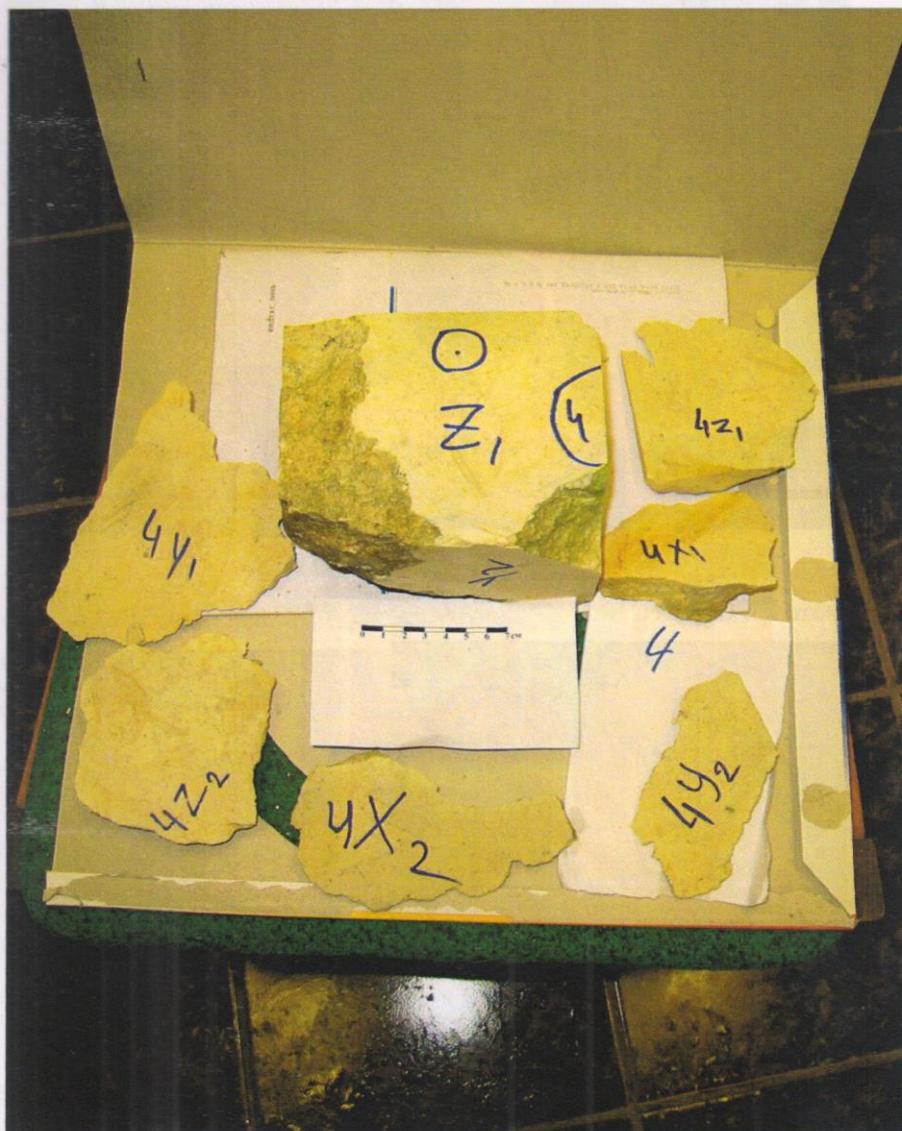


Фото 24. Образец №7



Фото 25. Образец №8

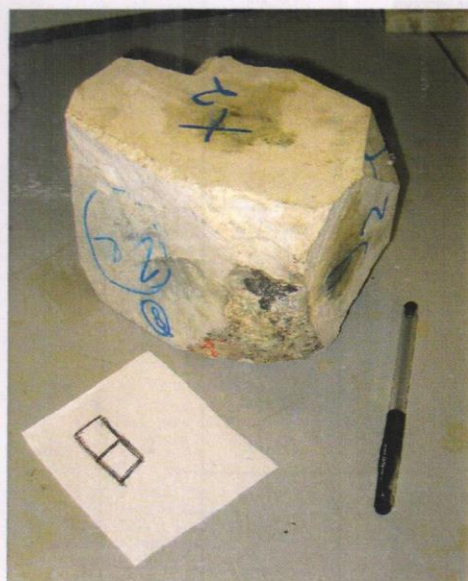


Фото 26. Образец №9

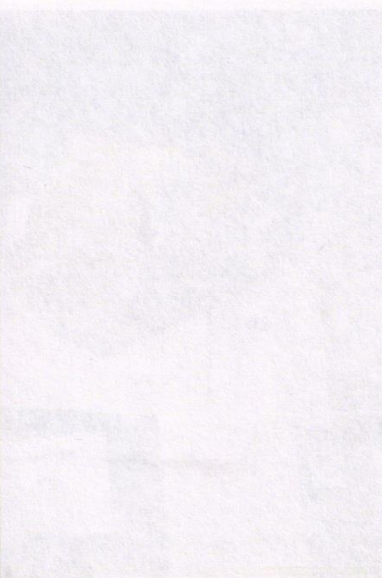
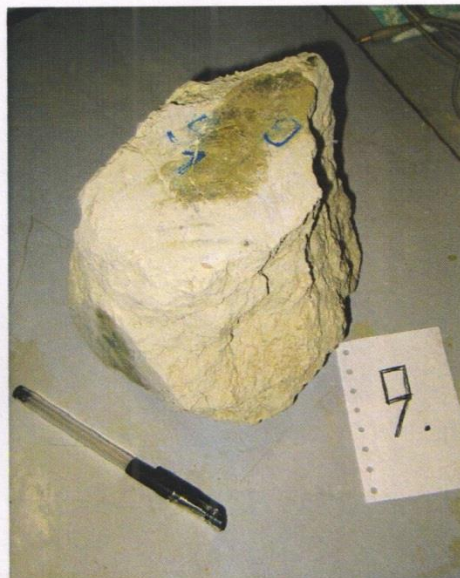


Фото 27. Образец №10

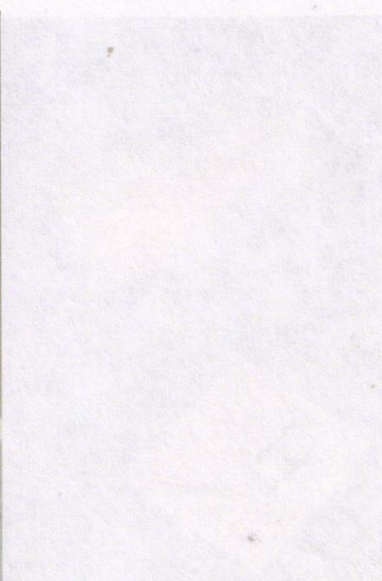
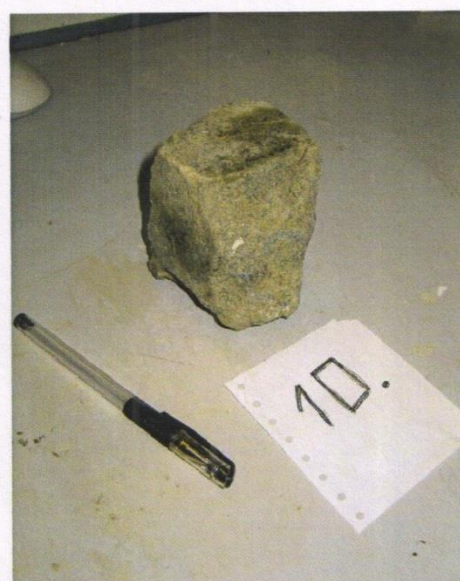


Таблица 1. Результаты лабораторных ультразвуковых исследований

образец	измерение	частота, кГц	Vp, км/сек	Vs, км/сек	Vs/Vp, км/сек
1	x1-x2	25	1,87	—	—
	y1-y2		1,86	—	—
	z1-z2		1,85	—	—
	x1-x2	60	1,96	—	—
	y1-y2		2,16	—	—
	z1-z2		2,19	—	—
	x1-y1	60	—	1,11	0,54
	x1-y2		—	1,12	0,54
	x1-z1		—	1,06	0,51
	x1-z2		—	0,98	0,47
	x2-y1		—	1,09	0,53
	x2-y2		—	1,07	0,52
	x2-z1		—	1,10	0,53
	x2-z2		—	1,09	0,53
	y1-z1		—	1,11	0,51
y1-z2	—		1,20	0,55	
y2-z1	—		1,03	0,48	
y2-z2	—		1,14	0,53	
2	x1-x2	25	2,27	—	—
	y1-y2		1,84	—	—
	z1-z2		2,03	—	—
	x1-x2	60	2,53	—	—
	y1-y2		1,94	—	—
	z1-z2		2,33	—	—
	x1-y2	60	—	1,03	0,46
	x1-z1		—	1,11	0,46
	x2-y1		—	0,98	0,44
	x2-y2		—	1,15	0,52
x2-z1	—		1,27	0,52	

	x2-z2		—	1,33	0,55
	y1-z1		—	0,94	0,44
	y1-z2		—	1,10	0,51
	y2-z1		—	0,95	0,44
3	x1-x2	25	1,68	—	—
	y1-y2		1,79	—	—
	z1-z2		1,51	—	—
	x1-x2	60	1,86	—	—
	y1-y2		1,91	—	—
	z1-z2		1,79	—	—
	x1-x2	100	1,87	—	—
	y1-y2		1,91	—	—
	z1-z2		1,83	—	—
x1-y2	100	—	1,18	0,63	

продолжение Таблицы 1

образец	измерение	частота, кГц	Vp, км/сек	Vs, км/сек	Vs/Vp, км/сек	
4	x1-x2	25	2,31	—	—	
	y1-y2		2,25	—	—	
	z1-z2		2,32	—	—	
	x1-x2	60	2,38	—	—	
	y1-y2		2,40	—	—	
	z1-z2		2,68	—	—	
	x1-y1	60	—	—	1,28	0,53
	x1-y2		—	—	1,25	0,52
	x1-z1		—	—	1,36	0,54
	x1-z2		—	—	1,41	0,55
	x2-y1		—	—	1,20	0,50
	x2-y2		—	—	1,39	0,58
	x2-z1		—	—	1,37	0,54
x2-z2	—		—	1,37	0,54	
y1-z1	—		—	1,25	0,49	
y1-z2	—		—	1,24	0,49	

	y2-z1		—	1,23	0,48
	y2-z2		—	1,28	0,50
5	x1-x2	25	2,06	—	—
	y1-y2		2,08	—	—
	z1-z2		2,09	—	—
	x1-x2	60	2,17	—	—
	y1-y2		2,20	—	—
	z1-z2		2,19	—	—
	x1-y1	60	—	1,22	0,56
	x1-y2		—	1,08	0,49
	x1-z1		—	1,17	0,53
	x1-z2		—	1,07	0,49
	x2-y1		—	1,13	0,51
	x2-y2		—	1,25	0,57
	x2-z1		—	1,16	0,53
	x2-z2		—	1,18	0,54
	y2-z2		—	1,12	0,51
z1-y1	—		1,19	0,54	
z1-y2	—		1,16	0,53	

продолжение Таблицы 1

образец	измерение	частота, кГц	V _p , км/сек	V _s , км/сек	V _s /V _p , км/сек
6	x1-x2	25	2,01	—	—
	y1-y2		2,02	—	—
	z1-z2		1,97	—	—
	x1-x2	60	2,10	—	—
	y1-y2		2,18	—	—
	z1-z2		2,09	—	—
	x1-y1	60	—	1,08	0,51
	x1-z1		—	1,21	0,57

	x1-z2		—	1,14	0,54
	x2-y1		—	1,05	0,50
	x2-y2		—	0,83	0,40
	x2-z1		—	1,11	0,53
	x2-z2		—	0,98	0,47
	y1-z1		—	1,13	0,54
	y1-z2		—	1,03	0,49
	y2-z1		—	0,98	0,46
	x1-x2		1,91	—	—
	y1-y2	25	1,95	—	—
	z1-z2		2,25	—	—
	x1-x2		1,88	—	—
	y1-y2	60	2,00	—	—
	z1-z2		2,53	—	—
7	x1-y1		—	1,10	0,57
	x1-y2		—	1,12	0,58
	x1-z1		—	1,12	0,49
	x1-z2		—	1,01	0,44
	x2-y1		—	0,95	0,49
	x2-y2	60	—	1,01	0,52
	x2-z1		—	1,04	0,46
	x2-z2		—	1,32	0,58
	y1-z1		—	1,09	0,50
	z2-z1		—	1,16	0,53
	y2-z2		—	1,22	0,56

продолжение таблицы 1

образец	измерение	частота, кГц	V_p , км/сек	V_s , км/сек	V_s/V_p , км/сек	
8	x1-x2	25	4,18	—	—	
	y1-y2		4,45	—	—	
	z1-z2		3,32	—	—	
	x1-x2	60	4,50	—	—	
	y1-y2		4,57	—	—	
	z1-z2		3,56	—	—	
	x1-y1	60	—	—	2,24	0,50
	x1-y2		—	—	2,12	0,47
	x1-z1		—	—	1,86	0,46
	x1-z2		—	—	1,71	0,43
	x2-y1		—	—	2,22	0,49
	x2-y2		—	—	2,23	0,50
	x2-z1		—	—	2,04	0,51
	x2-z2		—	—	1,82	0,45
y1-z2	—		—	1,51	0,38	
y2-z2	—		—	1,95	0,49	
9	y1-y2	25	2,25	—	—	
	z1-z2		1,81	—	—	
	y1-y2	60	2,22	—	—	
	z1-z2		2,04	—	—	
	y1-z1	60	—	—	1,15	0,55
	y1-z2		—	—	1,19	0,56
y2-z1	—		—	1,20	0,57	
y2-z2	—		—	1,09	0,52	
10	x1-x2	25	1,33	—	—	
	y1-y2		1,43	—	—	
	x1-x2	60	1,63	—	—	
	y1-y2		1,65	—	—	

Таким образом, в результате определения значений плотности и скоростей продольных и поперечных волн, производится оценка упругих

характеристик тех слоев пород, которые в дальнейшем, со своими значениями глубин кровли и подошвы будут участвовать в построении сейсмогеологической модели. При этом, необходимо помнить о том, что:

- при ультразвуковых измерениях значения скоростей примерно на 10% выше, чем при натуральных измерениях в сейсмическом диапазоне частот за счет дисперсии скоростей в неидеально-упругой среде;
- при ультразвуковых измерениях значения скоростей могут быть выше, чем при натуральных измерениях в сейсмическом диапазоне частот за счет масштабного эффекта, например, трещиноватости массива пород, не захватывающей лабораторный образец.

4.2 Стандартные петрофизические исследования керна или материала образцов.

Механическая обработка керна, поступающего на определение фильтрационно-емкостных свойств, проводится с помощью алмазного режущего и сверлящего инструмента согласно ГОСТу 26450.0-85 «Породы горные. Общие требования к отбору и подготовке проб для определения коллекторских свойств». Для стандартного комплекса петрофизических исследований (определение фильтрационно-емкостных свойств) параллельно плоскости напластования выпиливаются образцы породы цилиндрической формы диаметром и высотой около 30 мм с параллельно отрезанными и пришлифованными торцами.

Для примера, на фото 28 показаны приготовленные цилиндры из образца 1 с учетом его ориентировки в пространстве.

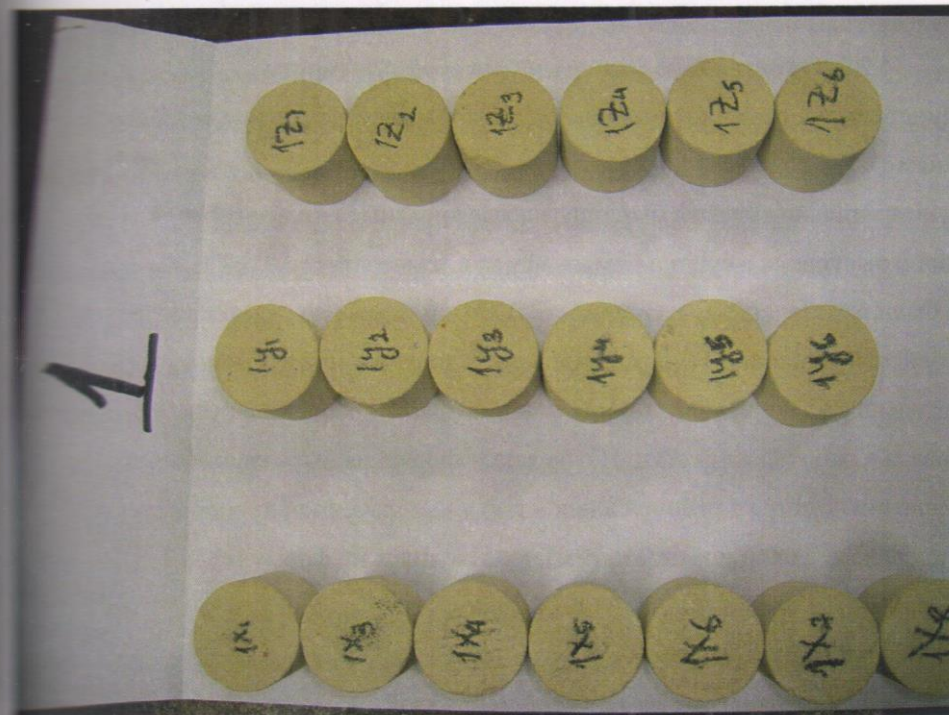


Фото 27. Цилиндры, приготовленные из образца №1.

Обработанные таким образом, образцы очищаются от содержащихся в них углеводов спиртобензольной смесью в соотношении 1:4 в аппаратах Сокслетта методом горячей экстракции.

4.2.1. Определение открытой и эффективной пористости

Открытая пористость (K_p) определяется согласно ГОСТу 26450.1-85 «Породы горные. Метод определения коэффициента открытой пористости жидкостенасыщением», основные положения которого включают требования по использованию аппаратуры, реактивов и материалов, подготовке образцов и жидкостей, условиям проведения опытов.

При определении пористости методом жидкостенасыщения использовались образцы цилиндрической. В качестве насыщающей жидкости использовались модель пластовой воды по NaCl 5 г/л.

4.2.2. Определение минералогической плотности

Минералогическая плотность определяется расчетным путем согласно требованиям ГОСТ 26450.1-85.

Предварительно образцы были проэкстрагированы методом горячей экстракции и высушены в сушильном шкафу при температуре $105 \pm 2^\circ\text{C}$. Образцы были измельчены до размерности 0,2 мм и помещены в пикнометр вместе с рабочей жидкостью (дистиллированная вода) и провакуумированы. Предварительно была определена масса пикнометра, его рабочий объем, масса образца и рабочей жидкости. После вакуумирования было произведено взвешивание пикнометра с рабочей жидкостью и измельченной породой. Расчет минералогической плотности (ρ_m) производился по формуле:

$$\rho_m = (M_{\text{пп}} - M_{\text{п}}) \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot (M_{\text{пж}} - M_{\text{п}}) - (M_0 - M_{\text{пп}})$$

где $M_{\text{п}}$ - масса пустого пикнометра

$M_{\text{пп}}$ - масса пикнометра с измельченной породой

$M_{\text{пж}}$ - масса пикнометра с рабочей жидкостью

M_0 - масса измельченной породы

$\rho_{\text{ж}}$ - плотность рабочей жидкости

4.2.3. Определение карбонатности

Раздельное содержание кальцита и доломита в образцах определяется при помощи Карбонатометра КМ-04.

Принцип работы карбонатометра заключается в следующем.

Измельченный образец горной породы (с размером частиц не более 0,1 мм) массой до 1000 мг помещают в реакционную камеру, плотно скручивают камеру с крышкой и с помощью поршневого дозатора подают в нее разбавленную в соотношении 1:6 соляную кислоту. При впрыске раствора в реакционной камере происходит сжатие воздуха, что приводит к ступенчатому изменению давления (примерно на 0.17 кг/см^2), срабатывает пороговое устройство и включается привод магнитной мешалки.

В процессе перемешивания за счет взаимодействия карбонатных веществ с соляной кислотой происходит выделение двуокиси углерода и увеличение давления в реакционной камере пропорционально количеству образованного газа. Изменение избыточного давления контролируется датчиком избыточного давления и отображается на цифровом индикаторе. Различие в скорости протекания реакции взаимодействия кальцита и доломита с соляной кислотой позволяет по измеренным значениям давления автоматически определить содержание карбонатных веществ в образце. Контроль температуры позволяет ввести в программу обработки данных измерений поправки на изменение давления в реакционной камере, связанные с влиянием температуры.

4.2.4. Определение акустических характеристик

Измерения акустических свойств (скорости распространения продольных и поперечных волн на датчиках частотой 150 МГц) изучаемых образцов горных пород проводились на установке ПУМА-650,

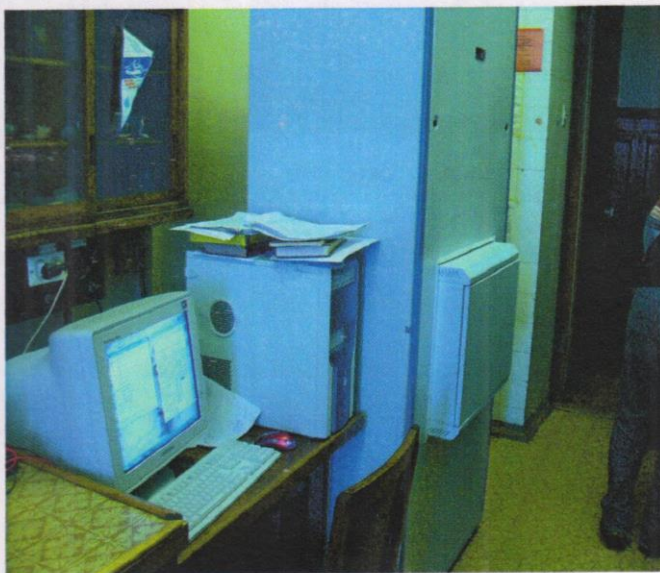


Рис. 12. Общий вид установки ПУМА-650.

предназначенной для исследований в условиях моделирующие пластовые условия в широком диапазоне задаваемых значений давлений (пластовое - до 650 атм, поровое до 30 атм) и температур (до 105° С) (рис.12). Измерения на установке ПУМА-650 производятся на цилиндрических образцах диаметром 27-31 мм, длиной 25-45 мм.

Установка ПУМА-650 позволяет определять следующие параметры:

- коэффициент открытой пористости
- коэффициент сжимаемости порового пространства
- коэффициент абсолютной проницаемости по жидкости
- удельное электрическое сопротивление
- скорости распространения продольных и поперечных упругих акустических волн.

Установка состоит из следующих основных составных частей:

- системы создания горного давления
- системы создания пластового давления
- системы создания температурного режима
- электронного блока управления
- измерительного блока удельного электрического сопротивления
- измерительного блока скорости распространения упругих акустических волн
- интерфейса
- кернодержателя (рис. 13)
- персонального компьютера с программным обеспечением.

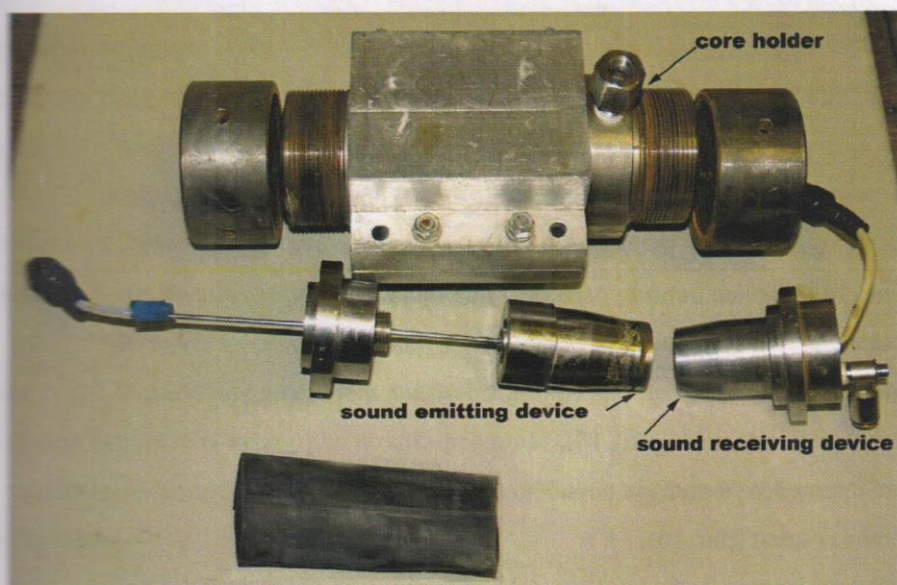


Рис. 13. Устройство кернодержателя.

Измерительный блок скорости распространения упругих акустических волн состоит из 2^х раздельно-совмещенных преобразователей продольной и поперечной акустических волн, пульс-рессивера, блока предварительного усиления и электронного осциллографа АСК 31-51М.

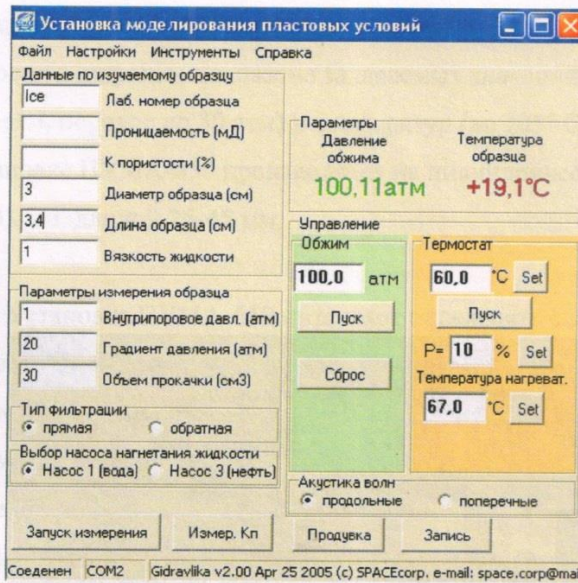


Рис. 14. Рабочее окно программы по управлению установкой ПУМА-650.

Так же предусмотрено программное обеспечение как для общего управления установкой (рис. 14), так и для записи волновых характеристик (рис. 15) и последующей их обработки и определения скорости продольных и поперечных волн (рис.16).

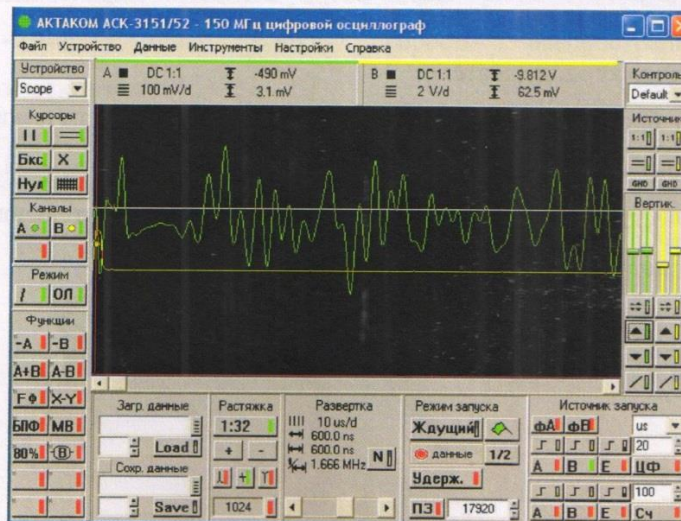


Рис. 15. Рабочее окно программы измерительного блока скорости распространения упругих акустических волн электронного осциллографа АСК 31-51М.

Ход эксперимента

Предварительно, перед началом измерений, производился обмер, взвешивание и фотографирование изучаемых образцов. После производилась сборка кернодержателя. Остатки образцов шли на определение плотности, карбонатности, и коэффициента открытой пористости. В измерительную установку кернодержатель помещался в готовом к эксперименту состоянии. Сам анализ занимает не более 2 минут и состоит из нескольких этапов:

1. Присоединяется датчик температуры, штекеры акустических датчиков и включается непрерывная запись показаний датчиков давления обжима (атм), температуры ($^{\circ}\text{C}$).
2. Создается внешнее давление обжима (пластовое давление) равное 20 атмосфер с использованием дистиллированной воды. Процесс занимает около 20-30 секунд.
3. Производится запись волновой картины продольных акустических волн.
4. Производится переключение датчиков на измерение скорости поперечных акустических волн.
5. Производится запись волновой картины поперечных акустических волн.

На протяжении всего эксперимента ведется в непрерывном режиме каждую секунду запись показаний датчиков давления обжима (атм), температуры ($^{\circ}\text{C}$).

После всех этапов производится сброс давления обжима и извлечение исследуемого образца.

Обработка полученных данных

В программе Research 2 (рис. 16) определяются скорости продольных и поперечных волн при помощи определения вручную времени вступления волн на приемный датчик акустических волн.

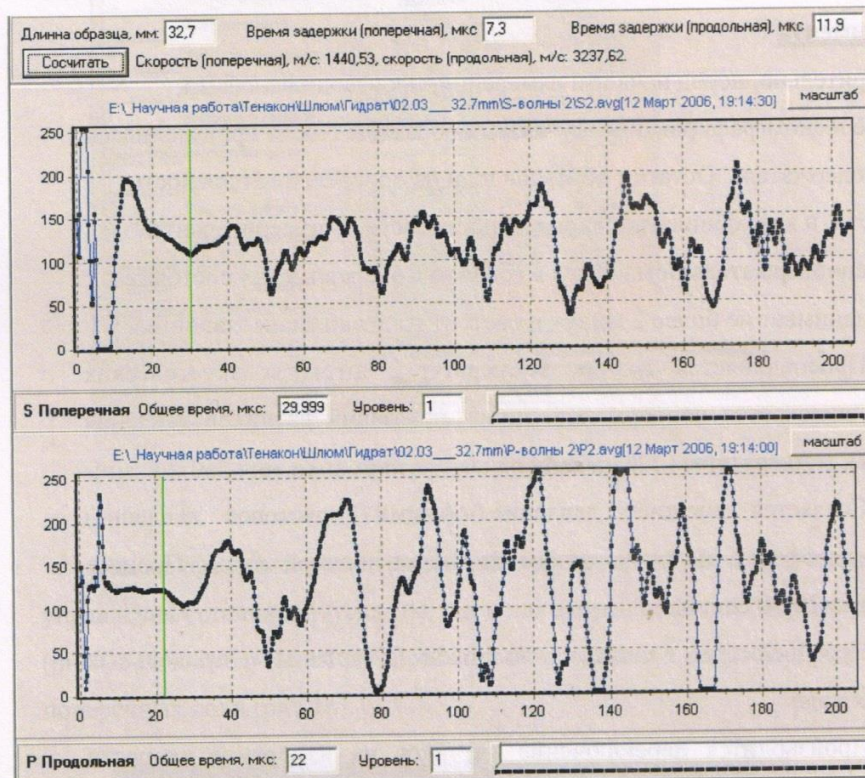


Рис.16. Окно программы Research для определения скорости акустических волн.

Таблица 2. Результаты измерений на цилиндрах.

№ образца	№ цилиндра	Ккарб, %	$\rho_{\text{мин}}$, г/см ³	V_p , м/сек	V_s , м/сек	$\rho_{\text{об}}$, г/см ³	Кп, %
1	1-х-1	от 82,7 до 90,1	2.69	2153	1003	1.86	29.6
	1-х-3						

	1-x-4			2064	1031		
	1-x-5			2467	1116		
	1-x-6			2373	1279		
	1-x-7			2500	1164		
	1-x-8			2135	1031		
	1-y-1			2224	1049		
	1-y-2			2172	1061		
	1-y-3			2172	1061		
	1-y-4			2314	1100		
	1-y-5			2285	1100		
	1-y-6			2314	1080		
	1-z-1			2443	1096		
	1-z-2			2299	1129		
	1-z-3			2135	984		
	1-z-4			2307	1038		
	1-z-5			2211	1061		
	1-z-6			2258	1104		
2	2-x-1	от 58,4 до 66,7	2.62	2358	1079		
	2-x-2			2403	1116		
	2-y-1			2475	1211		
	2-y-2			2251	1080		
	2-z-1			1645	828		
	2-z-3			1930	974	1.68	35.3
3	3-y-1	30.2	2.6	1940	906	2.04	31.7
4	4-x-1	от 76,1	2.66	2443	1206		

		до 89,4					
	4-x-2			1920	923		
	4-x-3			1920	892		
	4-x-4			1966	879		
	4-y-1			2508	1246		
	4-y-2			2285	1146		
	4-y-3			2661	1206		
	4-y-4			2560	1355		
	4-y-5			2172	1021		
	4-z-1			2483	1206		
	4-z-2			2419	1207		
	4-z-4			2198	1092	2.06	20.4
	4-z-5			2307	1242		
	4-z-6			2264	1137		
5	5-x-1	от 59,6 до 61,5	от 2,56 до 2,66	2047	1221		
	5-x-2			2204	1100		
	5-x-3			2030	1137		
	5-x-4			1645	895		
	5-x-5			2008	1049		
	5-x-6			1930	821		
	5-x-7			2047	974		
	5-y-2			2008	1104	1.72	31.8
	5-y-3			1891	1024		
	5-z-1			2153	1187		
	5-z-2			2251	1072		

	5-z-3			2191	1072		
	5-z-4			-	-		
6	6-x-1	от 61,2 до 61,3	от 2,60 до 2,67	2380	1284		
	6-x-2			2321	1284		
	6-x-4			2467	1155	1.94	25.8
	6-x-5			2159	1042		
	6-x-6			2058	1007		
	6-x-7			2358	1104		
	6-y-1			1840	823		
	6-y-2			1745	1053		
	6-y-3			2178	1268		
	6-y-4			1290	2451		
	6-y-5			2321	1231		
	6-y-6			1736	980		
	6-y-7			2036	1017		
	6-z-1			2105	1164		
	6-z-2			1896	961		
	6-z-3			1930	983		
	6-z-4			2224	1042		
	6-z-5			2105	1024		
	6-z-6			2321	1075		
	6-z-7			2141	1068		
	6-z-8			2116	1024		
	6-z-9			1765	923		
	6-z-10			2014	993		
7	7-x-1	от	2.68	2739	1467		

		80,2 до 91,2					
	7-x-2			2358	1028		
	7-x-3			2231	1319		
	7-y-1			-	-		
	7-y-2			2178	1028	1.71	33.9
	7-z-1			2419	1104		
	7-z-2			2153	1330		
	7-z-3			2081	1226		
	7-z-4			2019	980		
8	8-x-1	от 90,6 до 99,8	2.67	3130	1674		
	8-x-2			3840	1828		
	8-x-3			2865	1602		
	8-x-4			2321	1386		
	8-x-5			3130	1426		
	8-x-6			2922	1433		
	8-x-7			2833	1505		
	8-y-1			3157	1454		
	8-y-2			2019	1183		
	8-y-3			3143	1497		
	8-y-4			3130	1577		
	8-y-5			3130	1536		
	8-y-6			2739	1419		
	8-z-1			2623	1221		
	8-z-2			3670	1817		

	8-z-3			3840	1628		
	8-z-6			3184	1433	2.49	6.6
	8-z-7			-	-		
	8-z-8			-	-		
9	9-x-1	от	от	2642	1247		
		51,1	2,56				
		до	до				
		54,7	2,66				
	9-y-1			2321	1088		
9-y-2			2690	1336			
9-y-3			2036	949			
9-z-3			2178	1173	2.25	17.0	
	10-y-2	33.2	2.68	1674	810	2.08	24.3
	10-z-1			1582	749		

Таким образом, целью предыдущих параграфов было показать приемы и способы получения информации о среде для последующего формирования сейсмогеологических моделей среды, обладающих более или менее обобщенными упругими, петрофизическими и геометрическими характеристиками реальной среды.

Степень приближения модели к реальной среде, набор и подробность закладываемых в модель характеристик зависит от возможностей проведения, количественных и качественных сведений, полученных на стадии подготовки к проведению сейсмических многоволновых исследований.

§5. Формирование набора сейсмогеологических моделей района Крымской научной базы для расчета синтетических сейсмограмм.

Расчет синтетических сейсмограмм производился для двух моделей. В основу первой были положены обобщенные данные, полученные по

нескольким разрезам крымских квест, в основу второй – результаты скважинных наблюдений на полигоне МГУ. Первая модель будет в дальнейшем называться «Крым», вторая - «Полигон».

Первая модель, как указано выше, была построена по разрезам квест. Следует отметить, что квесты, встречающиеся на территории полигона МГУ, имеют практически одинаковое строение и одинаковое количество пластов, поэтому подход, при котором по разрезам нескольких квест строится один унифицированный разрез, вполне оправдан. Во время геологической практики, проводимой для студентов 1 и 2го курсов геологического факультета МГУ, помимо образцов, собираемых студентами для отчета, были отобраны образцы с трех квест и зафиксировано их положение в разрезе. Следует отметить, что данные образцы имели достаточно большие размеры, чтобы обеспечить все необходимые измерения скоростей и плотности на образцах. Разрезы, вдоль которых производился отбор образцов, приведены на рис. 17-19 (здесь уместно повторить некоторые иллюстрации из первого раздела). На образцах, отобранных вдоль этих трех разрезов, были выполнены все необходимые измерения скоростей продольных и поперечных волн и плотности горных пород. Из этих трех разрезов был составлен один разрез, в котором были привязаны к возрастам полученные скорости волн и плотности. Следует отметить, что ввиду технических особенностей измерений на образцах не представлялось возможным померить скорость поперечных волн в глинах, поэтому она по общим соображениям была взята равной 700 м/с. Также и скорость в мергелях ипрского возраста была взята не по измерениям на образцах, а по литературным данным, так как данный интервал не был представлен ни одним образцом.

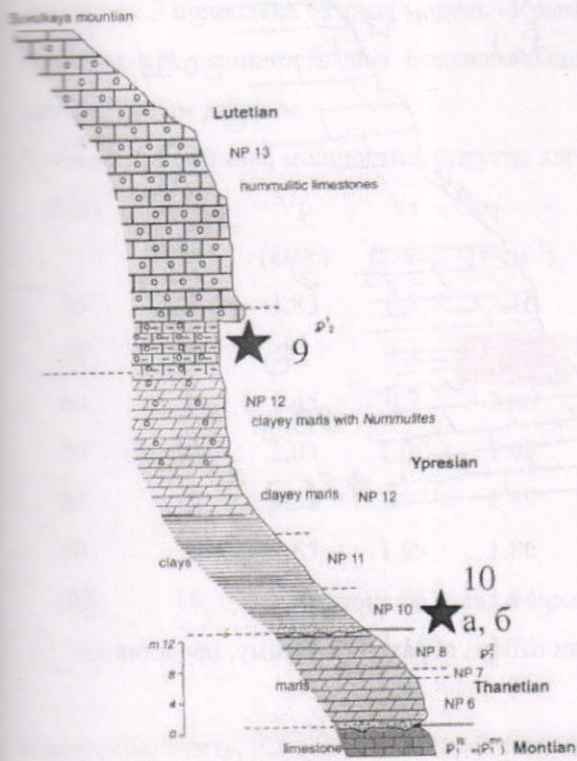


Рис. 17. Разрез вдоль горы Сувлу-Кая.

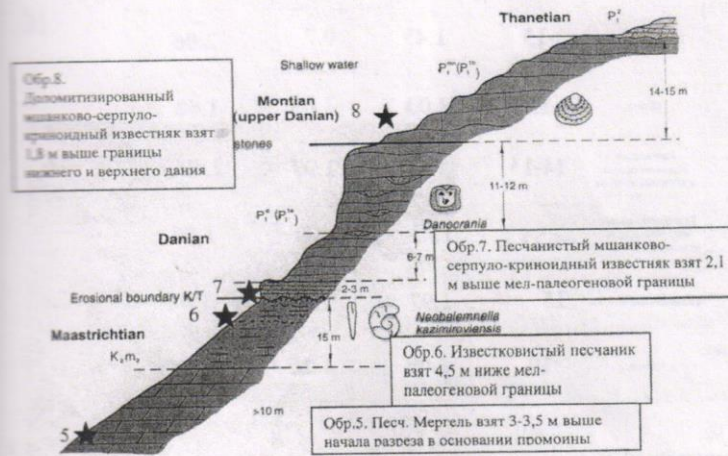


Рис. 18. Разрез около деревни Староселье.

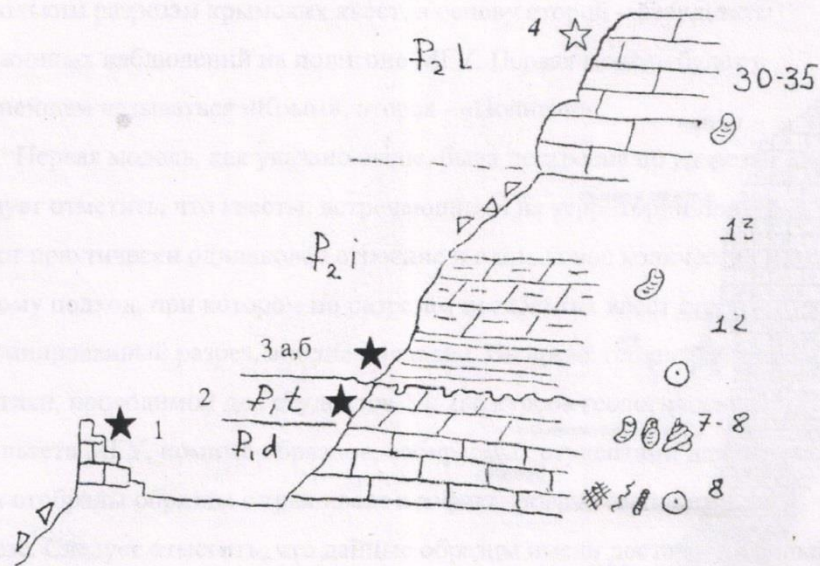


Рис. 19. Разрез в заброшенном карьере в селе Скалистом.

Разрез, построенный по результатам отбора образцов в Крыму, представлен на рис. 20.

		МОЩНОСТЬ СЛОЯ, м	$V_p, \text{м/с}$	$V_s, \text{м/с}$	$\rho, \text{т/см}^3$
Луганский P2L	Нуммулитовый известняк	30-40	1.83	0.7	2.16
Нирский P2p	Глинистый Мерель	15-25	2.22	1.1	2.0
Нирский P2p	Песчаная глина	3-15	1.45	0.7	2.06
Телецкий P1t	Мерель	8-15	2.03	1.09	1.68
Монский P1m	Песчаный Миланно-серпуло-аргонидный известняк	14-15	3.32	1.97	2.49
Дугский P1d	Доломитовый Миланно-серпуло-аргонидный известняк	6-22	1.45	1.09	1.86
Маштростский K2m	Известняковый песчаник	15	1.97	1.05	1.94
Маштростский K2m	Мерель	>10	2.09	1.16	1.72

Рис. 20. Обобщенный разрез «Крым».

В таблице 3 приведена базовая модель «Крым». Здесь Z – глубина до границы, а H – мощность слоя. Красным выделена плотность, взятая по литературным данным.

Таблица 3. Глубины, мощности и упругие характеристики модели «Крым».

Z (м)	H (м)	V_p (км/с)	V_s (км/с)	ρ (г/см ³)
35	35	1.83	0.7	2.16
55	20	2.2	1.1	2
60	5	1.45	0.7	2.06
70	10	2.03	1.09	1.68
85	15	3.32	1.97	2.49
90	5	1.85	1.09	1.86
105	15	1.97	1.05	1.94
		2.09	1.16	1.72

Следует заметить, что все модели представляют собой горизонтально-слоистую толщу, залегающую на полупространстве. Рассматривалась идеально-упругая среда.

Разрез скважины, пробуренной на Крымском полигоне, представлен на рис. 21.

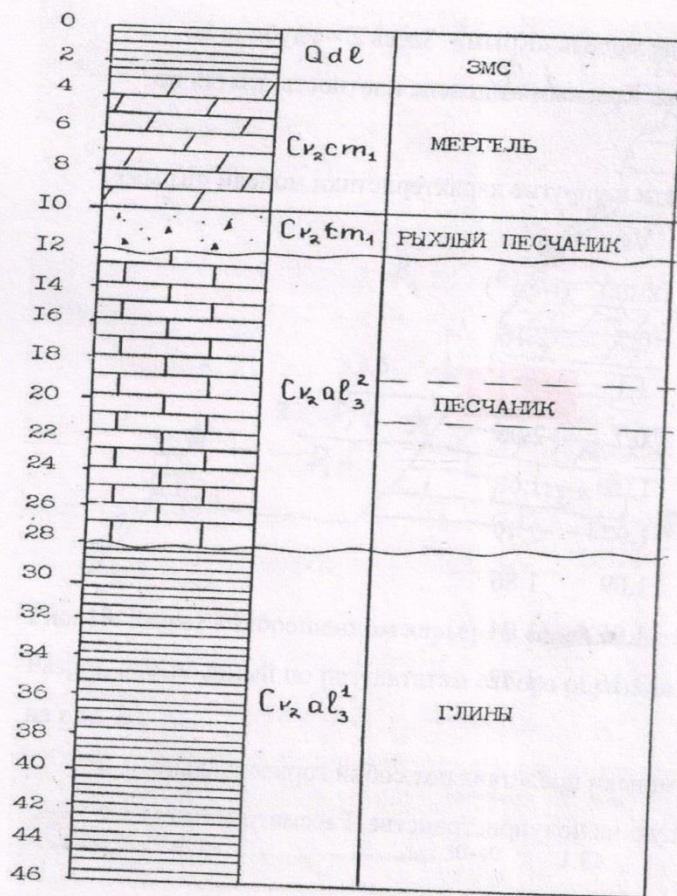


Рис. 21. Геологический разрез по скважине на Крымской научной базе МГУ.

На данном разрезе хорошо видно, что в интервале глубин 19-21 м находится слой ослабленного песчаника, скорости распространения волн в котором примерно на 10-12 % меньше, чем в выше- и нижележащем песчанике. Задачей моделирования было выяснить, возможно ли выделить этот слой на волновой картине при возбуждении продольных волн, либо при возбуждении и регистрации волн SH. В этой связи использовались 2 модификации данной модели – с трещиноватым слоем и без, приведенные в таблицах 4 и 5, соответственно.

Таблица 4. Базовая модель «Полигон_1» с тонким слоем разрушенного песчаника.

Z(м)	H (м)	Vp(км/с)	Vs (км/с)	ρ (г/см ³)
3	3	0.3	0.18	1.9
10	7	0.5	0.15	2.0
19	9	2.2	1.13	2.6
21	2	1.93	1.0	2.56
28	7	2.2	1.13	2.6
		1.9	0.63	2.0

Таблица 5. Базовая модель «Полигон_2» без тонкого слоя разрушенного песчаника.

Z(м)	H (м)	Vp (км/с)	Vs (км/с)	ρ (г/см ³)
3	3	0.3	0.18	1.9
10	7	0.5	0.15	2.0
28	18	2.2	1.13	2.6
		1.9	0.63	2.0

Контрольные вопросы к разделу 2.

1. Каковы задачи формирования набора моделей среды?
2. Что может служить основой формирования моделей среды?
3. В чем состоит анализ данных ГИС ?
4. Что является результатом акустического моделирования?
5. Какие виды физических измерений на образцах пород проводятся в лабораторных условиях?
6. В чем состоят стандартные петрофизические исследования кернового материала?
7. Как физически моделируются пластовые условия?
8. Как формировались сейсмогеологические модели среды на Крымском полигоне?
9. Каковы исходные данные для моделей «Полигон» и «Крым»?

Раздел 3. Расчет синтетических сейсмограмм для набора моделей.

Для сформированного набора моделей рассчитываются синтетические сейсмограммы. Важными элементами расчета являются:

- выбор способа расчета синтетических сейсмограмм;
- выбор и учет основных факторов - правильное соотношение между временами прихода и амплитудами волн, отраженных от различных горизонтов.

Желание удовлетворить второму требованию существенно влияет на выбор способа моделирования и его конкретную реализацию. Количество рассчитываемых моделей может исчисляться десятками, поэтому используемый алгоритм должен быть достаточно производительным в силу того, что практически все технологии, построенные на использовании динамических характеристик упругих волн, используемые в настоящее время, построены на одномерной модели среды, вполне разумно использовать такой способ моделирования, который позволяет работать с одномерной моделью.

Диапазон выносов - расстояний «источник-приемник» и шаг по ним разумно брать с некоторым запасом, т.е. если глубина до самого глубокого целевого отражающего горизонта X , то диапазон выносов должен быть $1.2-1.5 X$, шаг по выносам должен позволять в последствии моделировать различные варианты пространственных групп, т.е. составлять доли от наименьшей длины волны, которая может быть зарегистрирована в реальных наблюдениях.

В силу того, что необходимый частотный диапазон является для нас изучаемым параметром, полученные сейсмограммы должны обладать диапазоном, заведомо несколько превышающим любой реально ожидаемый.

Анализ архивных сейсмических материалов и результатов опытно-методических работ необходим для оценки возможных динамических параметров записи и изучения поля помех.

Информация, необходимая для расчета оптимальной методики наблюдения, которая содержится в результатах опытно-методических работ (или, если таковые не проводились, то в архивных сейсмических материалах по изучаемой или смежным площадям), сводится к следующим параметрам:

1. Интервальная скорость непосредственно над целевыми отражениями.
2. Доминирующая частота в спектре.
3. Максимальная частота в спектре.
4. Глубина до самого мелкого горизонта, который должен быть получен.
5. Глубина до целевых отражающих границ.
6. Глубина до самого глубокого горизонта, который должен быть получен.
7. Удвоенное вертикальное время целевых отражений.
8. Скорость прямой волны.

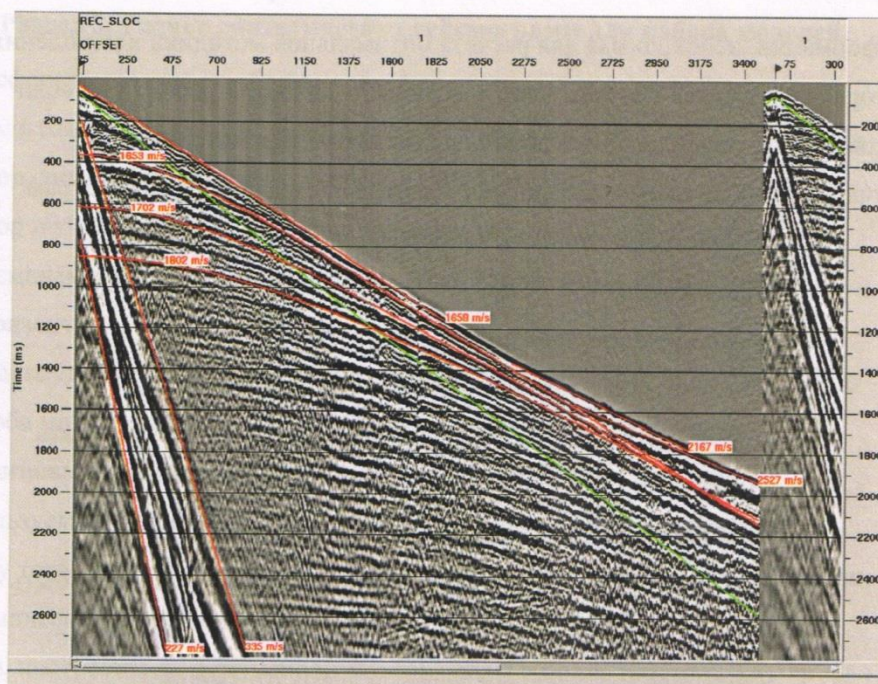


Рис. 22. Пример записи волнового зонда.

Отдельного внимания заслуживают помехи. Необходимо оценить интенсивность, частотный состав, кажущиеся скорости и зоны прослеживаемости помех разных типов. Вообще говоря, такие оценки должны быть проведены по отдельности для различных поверхностных условий, ожидаемых на изучаемой площади.

К помехам относятся:

- некогерентные помехи (микросейсмы);
- когерентные помехи (поверхностные волны, кратные волны и т.д.).

Очевидно, наилучшим вариантом является анализ волновых зондов – результатов опытно-методических работ, получаемых при отстреле одной или нескольких расстановок, состоящих из приемной линии с минимальным шагом (на рис.22 приведен пример волнового зонда для условий Западной Сибири с шагом 5 м) между приемниками (одиночными приемниками, а не группами) и реже располагающимися ПВ. Вообще, не смотря на

исключительную важность, вопрос о проведении опытно-методических работ настолько широк, что заслуживает отдельного обсуждения, которое выходит за рамки настоящего пособия.

§1. Математическое моделирование сейсмических волновых полей

[1-3,6,9,12,14] .

Математическое моделирование волновых полей является одним из основополагающих элементов обработки и интерпретации сейсмических данных. Кроме того, сейсмическое моделирование играет важную роль в разработке методики сейсмической съемки. В нашем случае математическое моделирование использовалось с целью оценки вклада обменных отраженных волн в волновую картину и возможности их использования при решении геологических задач. Исходя из поставленной задачи, был предложен следующий подход. Синтетические волновые поля рассчитывались двумя методами: полноволновым методом, в основе которого лежит решение волнового уравнения методом конечных разностей, и лучевым методом. Для полноволнового моделирования использовалась программа двумерного моделирования методом конечных разностей, разработанная в компании Деко-геофизика, для лучевого – программа, разработанная на кафедре сейсмометрии и геоакустики А.В.Калининым и Н.В.Шалаевой. Как известно, эти два подхода существенно отличаются, и основное различие состоит в том, что результатом полноволнового моделирования является действительно полное волновое поле, содержащее все возможные типы сейсмических волн, включая не только объемные отраженные, но и дифрагированные, головные, рефрагированные (в случае непрерывных сред), поверхностные (неоднородные) волны. Лучевое моделирование позволяет рассчитать с определенной степенью точности только динамику отраженных волн. С другой стороны, лучевое моделирование обеспечивает очень важную возможность – рассчитывать сейсмограммы выбранных пользователем типов волн, т.е. получать отдельно сейсмограммы однократных отраженных волн, многократных отраженных,

монотипных отраженных или обменных отраженных т.п. При
полноволновом моделировании не предоставляется возможным рассчитывать
отдельные типы волн.

В этой связи нами была выбрана следующая методика расчетов: по одной и
той же модели выполнялись расчеты синтетических сейсмограмм тем и
другим способом, причем в лучевом приближении рассчитывались
сейсмограммы разных типов волн на горизонтальной и вертикальной
компонентах сейсмоприемника. Кроме того, лучевым способом были
рассчитаны синтетические сейсмограммы SH-волн. Нами были также
рассчитаны годографы всех типов волн для упрощения идентификации
конкретных волн на сейсмограммах.

Полноволновое моделирование производилось для условной расстановки
длиной 300 метров с приемниками, расположенными через полметра, и
источником, расположенным в середине расстановки. Синтетические
лучевые сейсмограммы и годографы для модели «Полигон» рассчитывались
для расстановки длиной 45 м с шагом между сейсмоприемниками 1 м, для
модели «Крым» - для расстановки длиной 150 м с шагом между
сейсмоприемниками 5 м. В качестве импульса, формирующего лучевую
сейсмотрассу, был выбран импульс, спектр которого задавался в полосе
частот 20-80-160-300. Форма импульса и его спектр приведены на рис. 23 .
Для полноволнового моделирования был выбран несколько более
низкочастотный импульс (рис. 24).

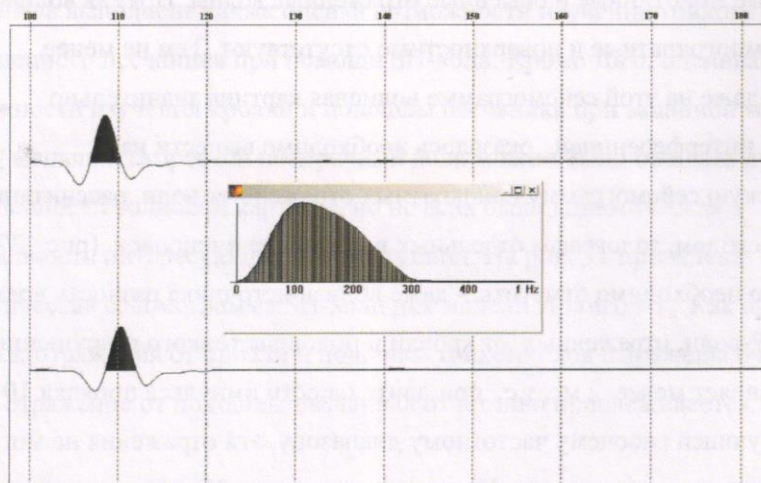


Рис. 23. Форма импульса, используемого для лучевого моделирования, и его амплитудный спектр.

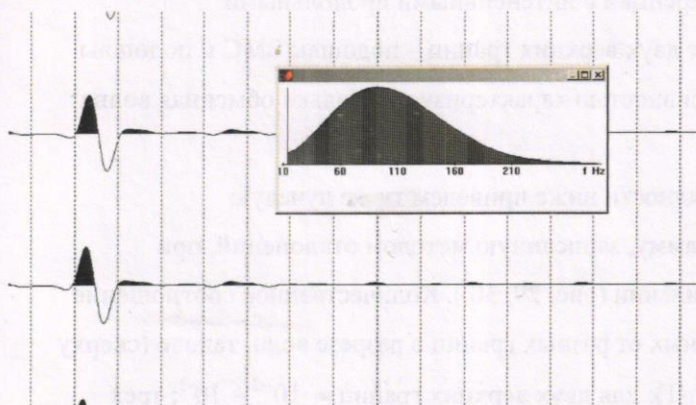


Рис. 24. Форма импульса, используемого для полноволнового моделирования, и его амплитудный спектр.

§2. Результаты моделирования для моделей «Полигон» и «Крым».

Рассмотрим вначале результаты моделирования для модели «Полигон».

На первом этапе была проведена идентификация основных однократных отражений и возможных головных волн. На рис. 25 и 26 показаны синтетические сейсмограммы, рассчитанные полноволновым (рис.25) и лучевым методами (рис. 26). Лучевая сейсмограмма содержит только

однократные монотипные и обменные отраженные волны. Прямая волна, головные, многократные и поверхностные отсутствуют. Тем не менее, поскольку даже на этой сейсмограмме волновая картина значительно осложнена интерференцией, оказалось необходимо вынести на синтетическую сейсмограмму однократных отраженных волн, рассчитанную лучевым методом, годографы отдельных волн в виде пикировок. (рис. 27). Первое, что необходимо отметить, - даже вблизи источника разность времен пробега РР-волн, отраженных от кровли и подошвы тонкого разрушенного слоя, составляет менее 2 мс, т.е. при длительности импульса порядка 10 мс, соответствующей рабочему частотному диапазону, эти отражения не могут быть выделены по отдельности. Как видно из рисунка 27, обменные волны от этих границ, во-первых, динамически не выражены, а во-вторых, находятся в зоне интерференции с интенсивными продольными отраженными волнами от двух верхних границ – подошвы ЗМС и подошвы мергеля. Высокой интенсивностью характеризуется только обменная волна от кровли песчаников.

Для большей наглядности ниже приведем ту же лучевую синтетическую сейсмограмму, записанную методом отклонений, при значительно большем усилении (рис. 29, 30). Количественное соотношение интенсивностей отраженных от разных границ в разрезе волн, таково (сверху вниз для модели Полигон-1): для двух верхних границ $\approx 10^{-2} - 10^{-3}$; трех нижних - $\approx 10^{-6}$. Очевидно, что при таком соотношении времен и амплитуд отраженных волн волновая картина для моделей с тонким разрушенным слоем и без него (рис. 28) практически неотличима на обеих компонентах. На полноволновой синтетической сейсмограмме интересующие нас отражения оказываются дополнительно и в зоне интерференции с прямой и головными волнами. Волна Рэлея для этой модели слабо выражена динамически. На полноволновой сейсмограмме также присутствует интенсивные полнократные и неполнократные от кровли песчаников.

Здесь была выполнена также оценка возможности изучения тонкого слоя разрушенного песчаника при помощи SH-волн. Кроме того, оценивались возможности изучения кровли и подошвы песчаника при заданной методике. В силу меньших скоростей поперечных волн можно было ожидать лучшей разрешенности волновой картины, но не ясна была динамическая выраженность интересующих нас отражений. На рис. 31 приведена синтетическая сейсмограмма SH-волн для модели Полигон-1. Как видно из рисунка, отражения от кровли и подошвы тонкого слоя выражены очень слабо, отражение от подошвы песчаника отчетливо прослеживается.



Рис.25. Синтетическая сейсмограмма для модели «Полигон-1», рассчитанная полноволновым методом.



Рис. 27 . Синтетическая сейсмограмма однократных отраженных PP- и PS- волн (лучевое приближение, Z-компонента) с вынесенными на нее годографами. Годографы обменных волн показаны тем же цветом, но более тонкими линиями.

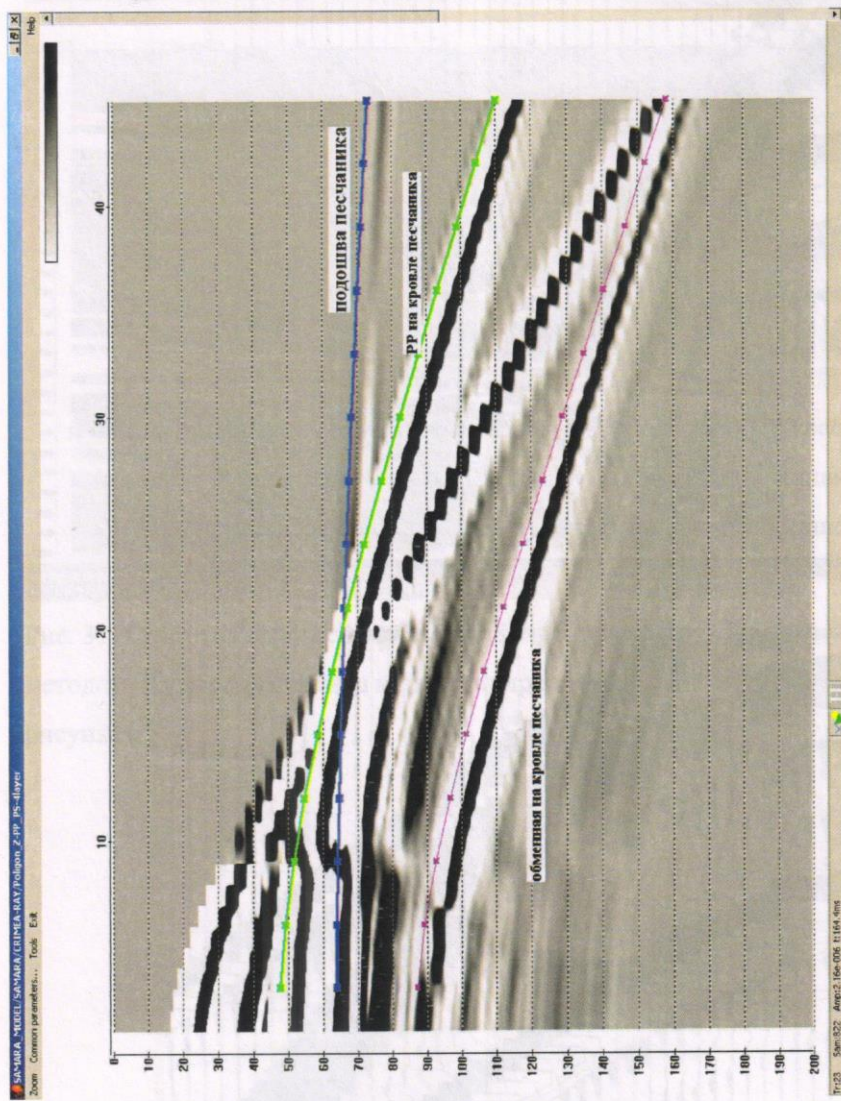


Рис. 28. Синтетическая сейсмограмма для модели «Полигон-2».

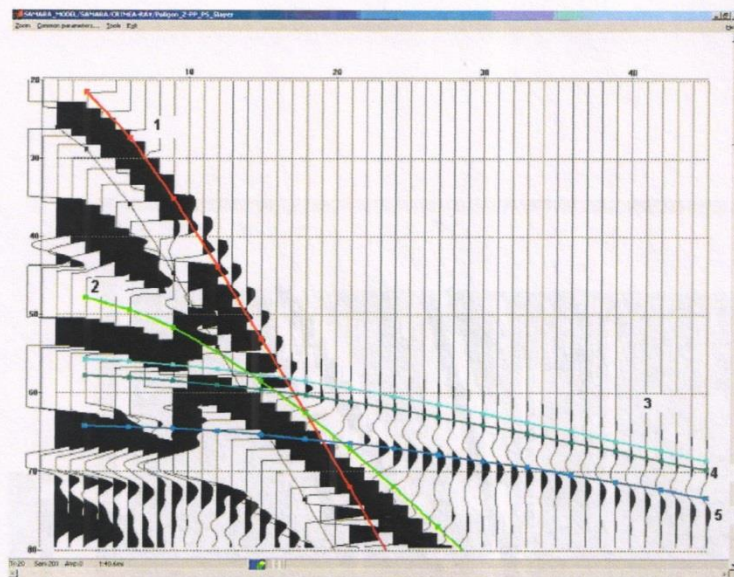


Рис. 29. Интервал регистрации РР-отражений от границ разрушенного слоя и подошвы песчаника при большом усилении. 3,4 – РР-отраженные волны от кровли и подошвы разрушенного слоя, 5 – от подошвы песчаников.

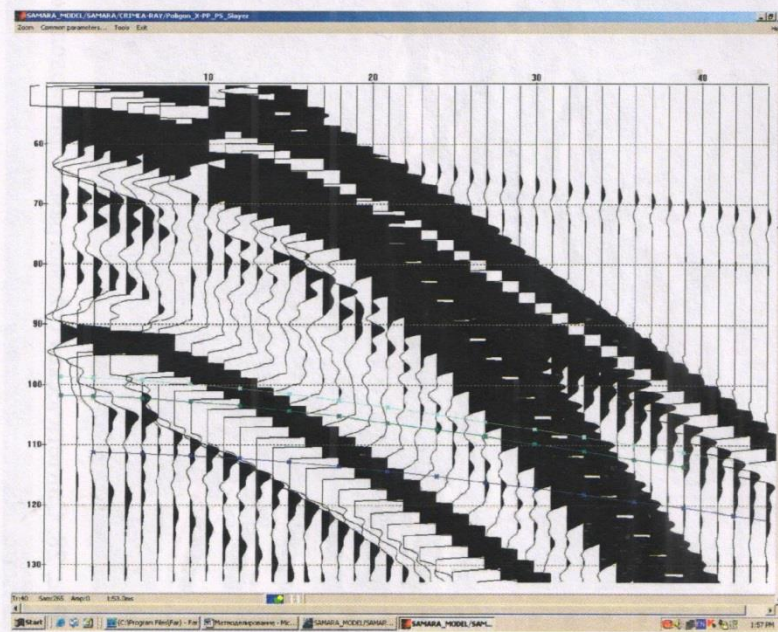


Рис. 30. Интервал регистрации PS-отражений (X-компонента) от границ разрушенного слоя и подошвы песчаника при большом усилении. Цвета пикировок те же, что и на предыдущем рисунке.

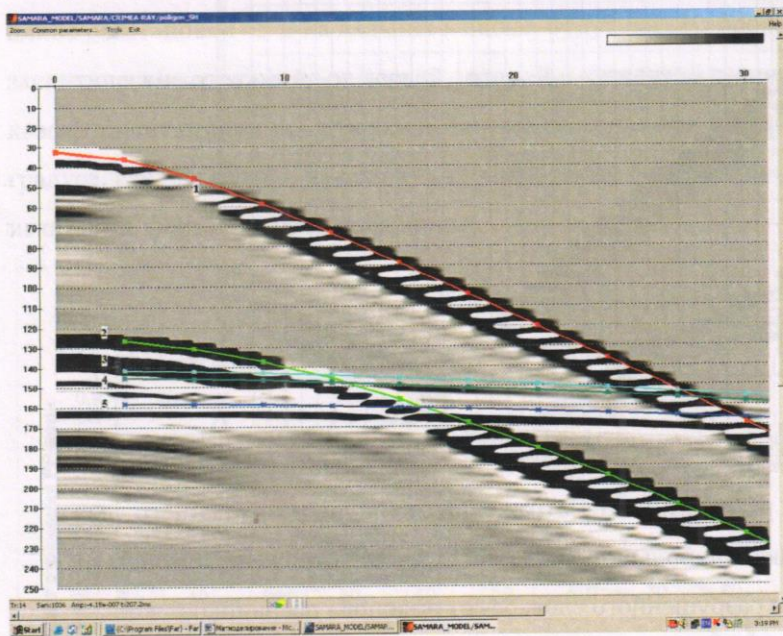


Рис. 31. Синтетическая сейсмограмма SH-волн, рассчитанная лучевым методом. Нумерация границ и цвет пикировок такие же, как на предыдущих рисунках.

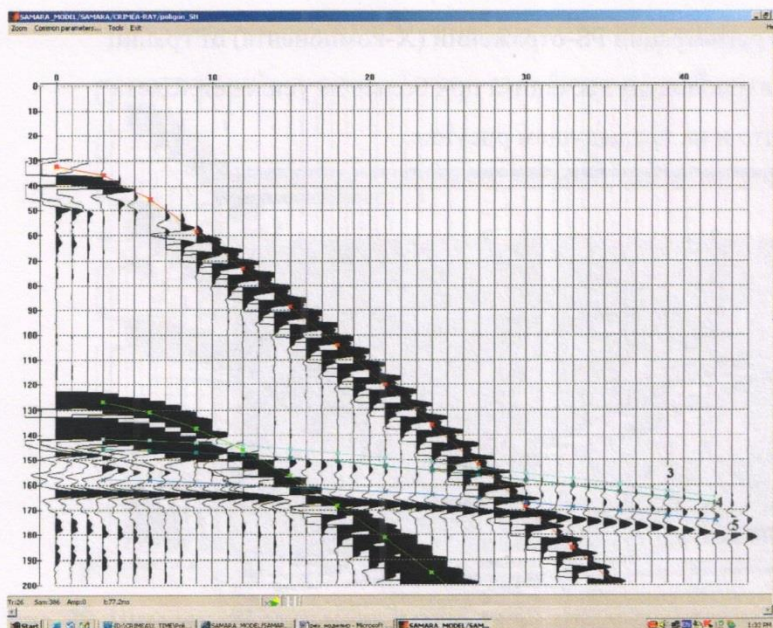


Рис. 32. Интервал регистрации SH-отражений от границ разрушенного слоя и подошвы песчаника при большом усилении. 3,4 – SH-отраженные волны от кровли и подошвы разрушенного слоя, 5 – от подошвы песчаников.

Для большей ясности динамики волновой картины были рассчитаны графики коэффициентов отражения и обмена плоских волн для описанных моделей. На рис. 33-35 приведены графики зависимости коэффициентов отражения и обмена плоской P-волны и плоской SH-волны от угла падения для всех границ в модели «Полигон-1». Как известно, если скорость продольных волн в нижней среде меньше, чем в верхней, коэффициент отражения и обмена является действительной величиной во всем диапазоне углов падения. В данном разрезе такими границами являются третья – кровля тонкого слоя разрушенных песчаников и кровля глин. В остальных случаях при достижении критического угла, синус которого равен отношению скоростей продольных волн, коэффициент отражения становится комплексной величиной, и форма отраженной волны не совпадает с формой падающей.

Диапазон углов падения РР-волн на границы для модели «Полигон-1» для удалений 0 – 45 м: кровля песчаника 0-70°; кровля тонкого слоя 0-66°; подошва тонкого слоя – 0-52°; кровля глин 0-50°. Как следует из рис.33, при длине расстановки 45 м на дальних каналах будут регистрироваться закритические отражения от первой, второй и четвертой границ. Кроме того, коэффициент отражения от кровли глин меняет знак при угле падения 42 градуса, следовательно, на дальних каналах также будет наблюдаться искажение формы – смена полярности.



Рис. 33. Графики зависимости коэффициента отражения плоской Р-волны от угла падения для пяти границ в разрезе.

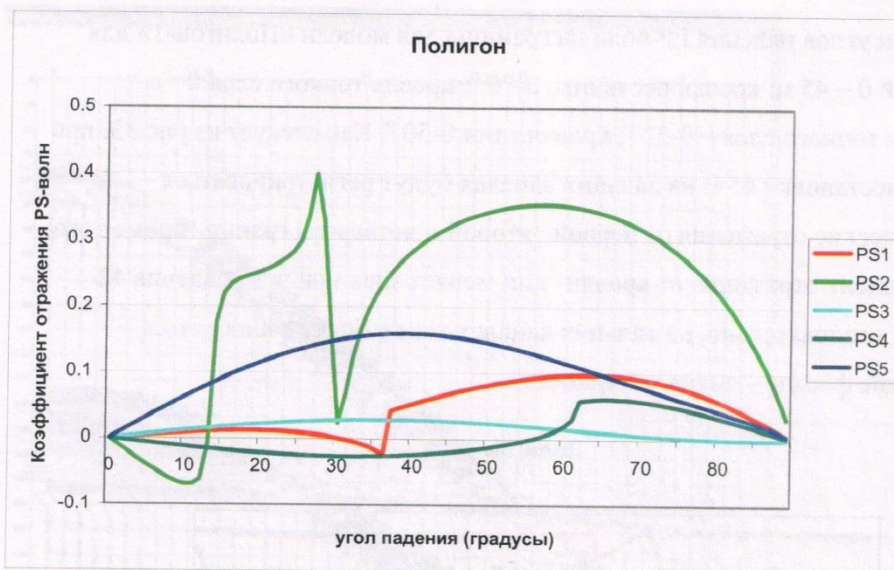


Рис. 34. Графики зависимости коэффициента обмена плоской Р-волны от угла падения для пяти границ в разрезе.

Из этих графиков с очевидностью следует, что только за счет различий в коэффициентах отражения амплитуды РР-отражений от границ тонкого слоя почти на порядок будут отличаться от отражений от верхних границ.

Для обменных волн ситуация иная: основная проблема – очень малые значения коэффициентов обмена, особенно для границ тонкого слоя и верхней границы. Относительно большим коэффициентом обмена характеризуется только кровля песчаника – вторая граница в модели «Полигон» и кровля глин.

Коэффициенты отражения SH-волн в области средних углов падения близки к нулю, наибольшим коэффициентом отражения характеризуются кровля песчаников и кровля глин.

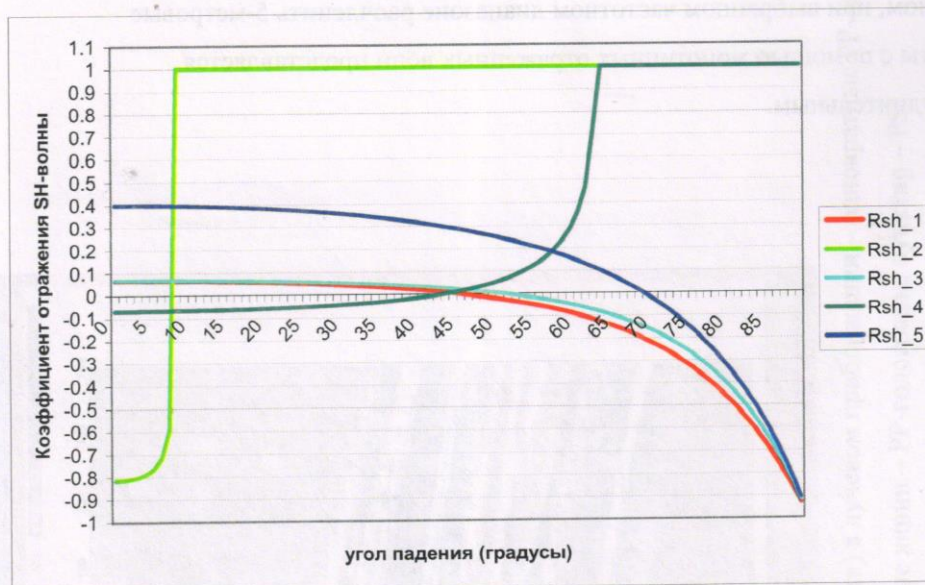


Рис. 35. Графики зависимости коэффициента отражения плоской SH-волны от угла падения для пяти границ в разрезе.

Рассмотрим теперь результаты моделирования для обобщенного разреза «Крым» на рисунках 36-40. На рис. 36 приведены результаты лучевого моделирования с вынесенными на сейсмограмму теоретическими годографами монотипных и обменных волн. Расчеты производились для расстановки длиной 150 м, сейсмоприемники располагались через 5 м. Полноволновое моделирование выполнялось для расстановки длиной 300 м с источником, расположенным на 150 м, с шагом 0.5 м. Оси синфазности монотипных отраженных волн, начиная с подошвы глин, находятся в области интерференции с обменными волнами, которые имеют близкую интенсивность, что особенно хорошо видно на сейсмограммах горизонтальной компоненты. Отраженная обменная волна от кровли глин становится видна на горизонтальной компоненте (рис. 37). На полноволновой синтетической сейсмограмме отчетливо видна интенсивная поверхностная волна, ось синфазности которой пересекает в центральной части расстановки оси полезных волн.

В целом, при выбранном частотном диапазоне расчленив 5-метровые пласты с помощью монотипных отраженных волн представляется затруднительным.

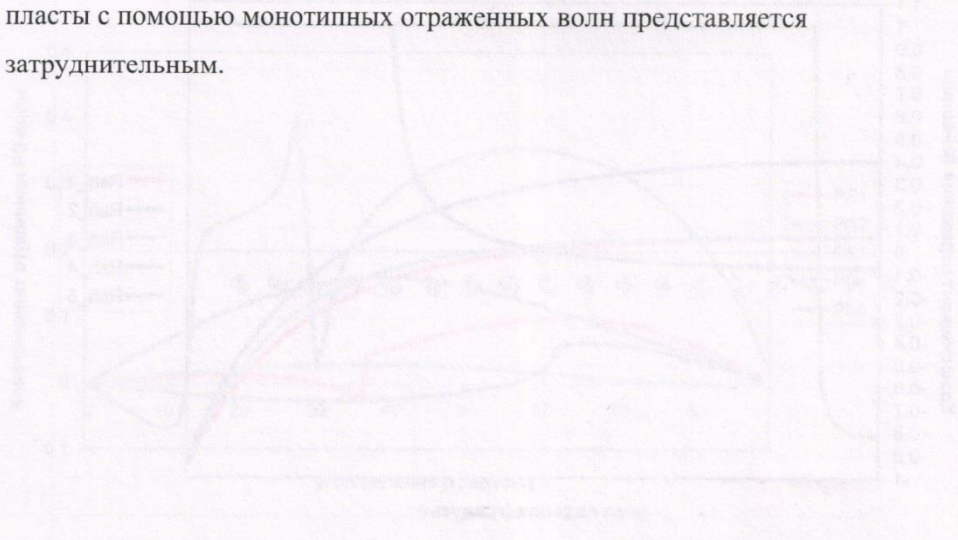


Рис. 14. Численные зависимости коэффициента отражения от частоты для различных слоев. Рис. 15. Численные зависимости коэффициента отражения от частоты для различных слоев.

В этих графиках и таблицах показаны зависимости коэффициента отражения от частоты для различных слоев. В таблице приведены значения коэффициента отражения для различных слоев и частот. В графиках показаны зависимости коэффициента отражения от частоты для различных слоев. Для удобства чтения таблицы и графики приведены в приложении. В таблице приведены значения коэффициента отражения для различных слоев и частот. В графиках показаны зависимости коэффициента отражения от частоты для различных слоев. Для удобства чтения таблицы и графики приведены в приложении.

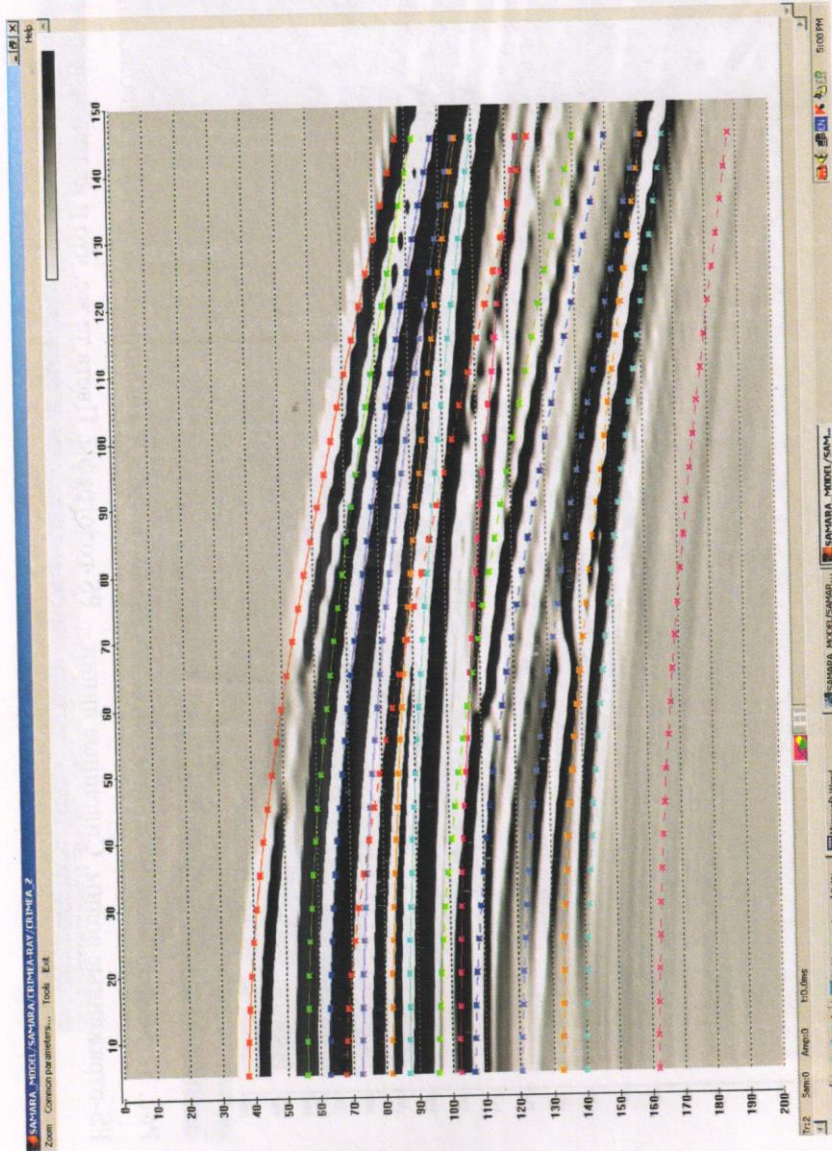


Рис. 36. Модель Крым. Синтетическая сейсмограмма (Z-компонента) в лучевом приближении – однократные PP- и PS отраженные волны. Каждой границе присвоен свой цвет; сплошные линии – PP-годографы, пунктир – PS.



Рис. 37. Модель «Крым». Синтетическая сейсмограмма (X-компонента) в лучевом приближении – однократные PP- и PS-отраженные волны. Сплошные линии – PS-годографы. Цвета те же, что и на предыдущем рисунке.

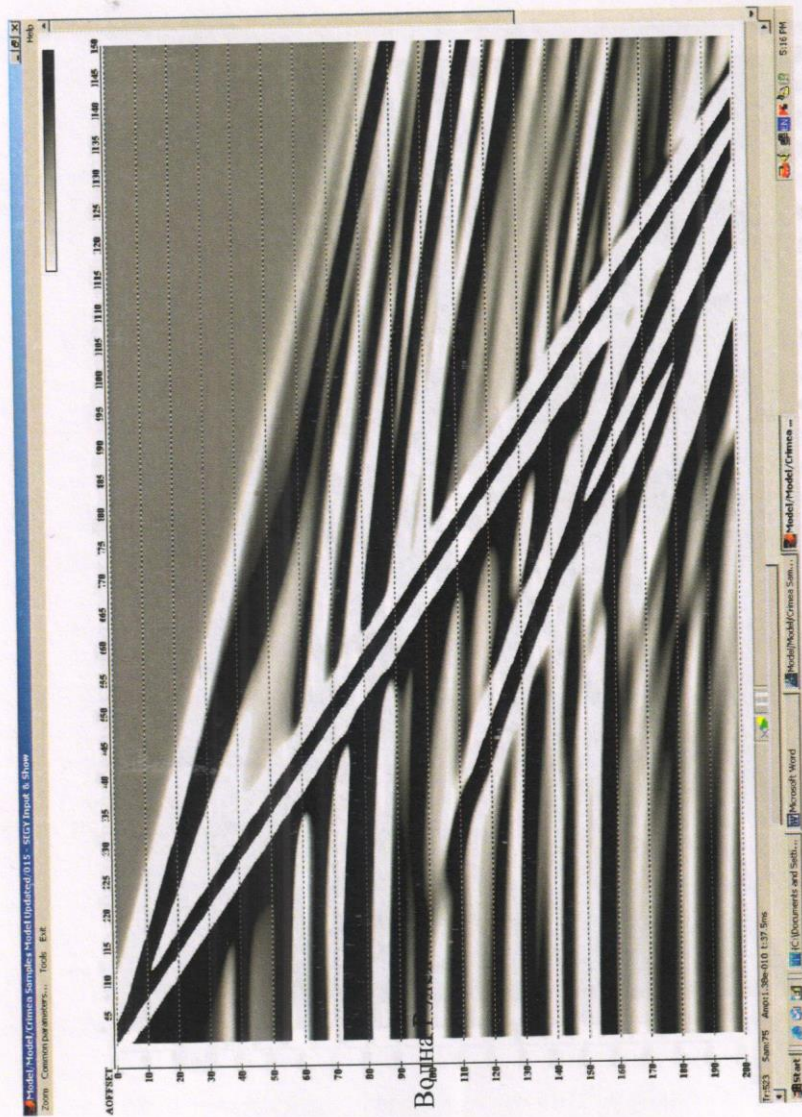


Рис. 38. Модель «Крым». Полноволновое моделирование, Z-компонента.

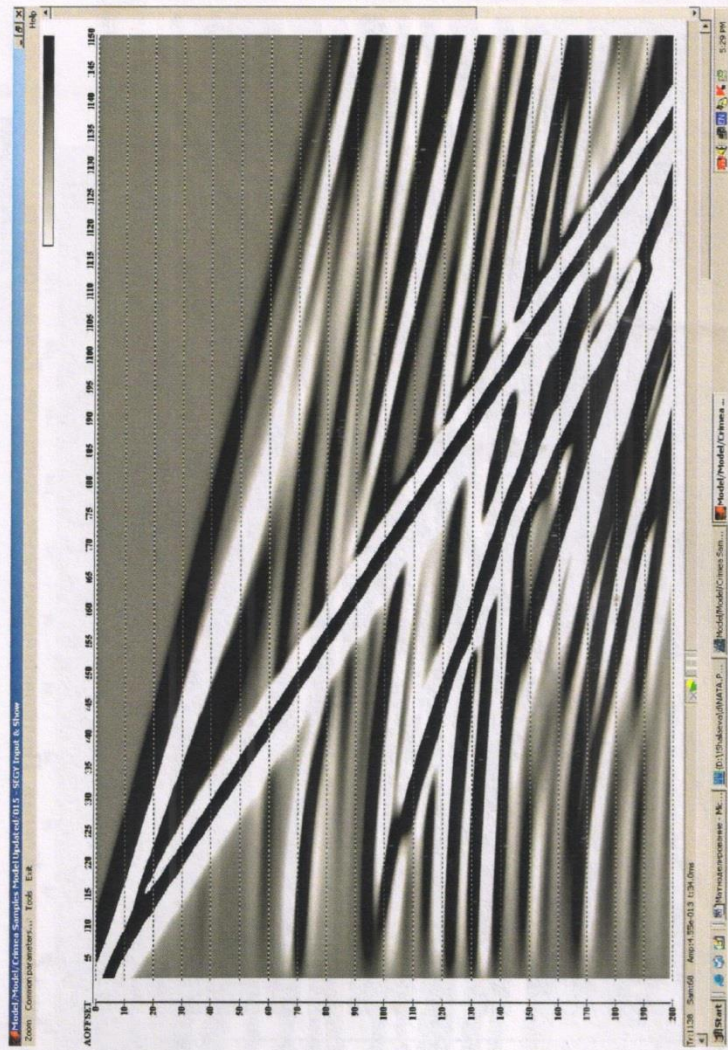


Рис. 39. Модель «Крым». Полноволновое моделирование, X-компонента

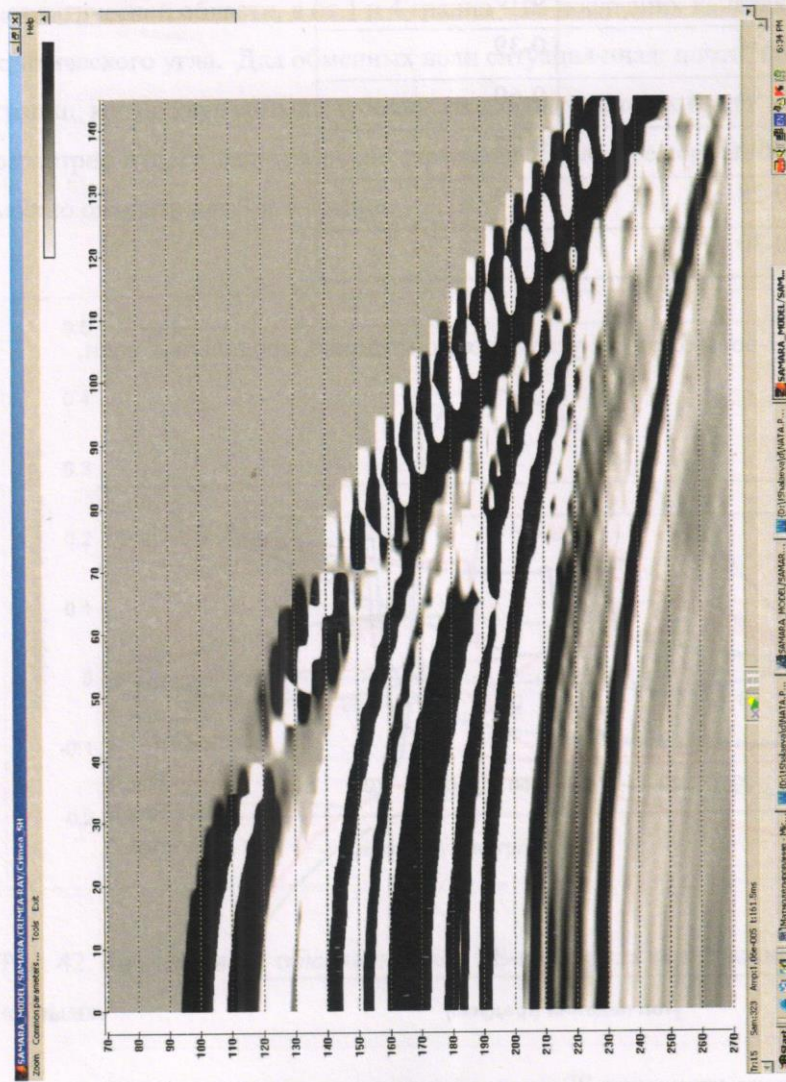


Рис. 40. Модель «Крым». Лучевая синтетическая сейсмограмма SH-волн.

Диапазон углов падения Р-волн в градусах на границу для моделируемой расстановки приведены ниже:

Номер границы	Углы для РР-волн	Углы для PS-волн
1	0-64	0-74
2	0-60	0-75
3	0-34	0-39
4	0-46	0-60
5	0-63	0-77
6	0-28	0-33
7	0-30	0-35

Диапазон углов SH-волн близок к углам для монотипных продольных волн.

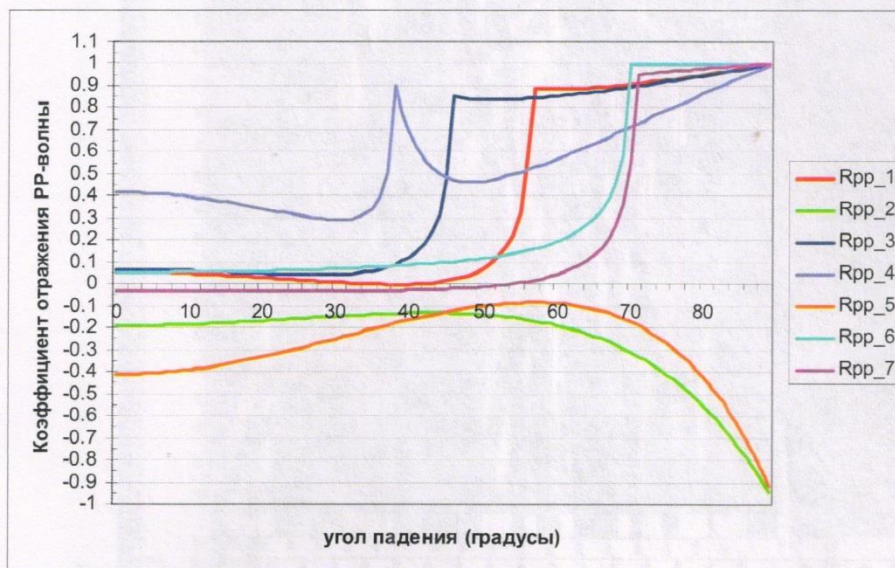


Рис. 41. Коэффициент отражения РР-плоской волны от всех границ в разрезе «Крым».

В данном разрезе действительным коэффициентом отражения во всем диапазоне углов характеризуются вторая и пятая границы – кровля глин и граница разновозрастных известняков. Как следует из рисунка 41, при длине расстановки 150 м отражения от границ 3, 6 и 7 будут зарегистрированы в докритической области, а от 1 и 4 границ – на последних каналах – в области критического угла. Для обменных волн ситуация иная: почти для всех границ, кроме двух самых глубоких, на дальних каналах будут регистрироваться закритические отражения. Наиболее серьезные искажения можно ожидать для 3 и 4 границ.

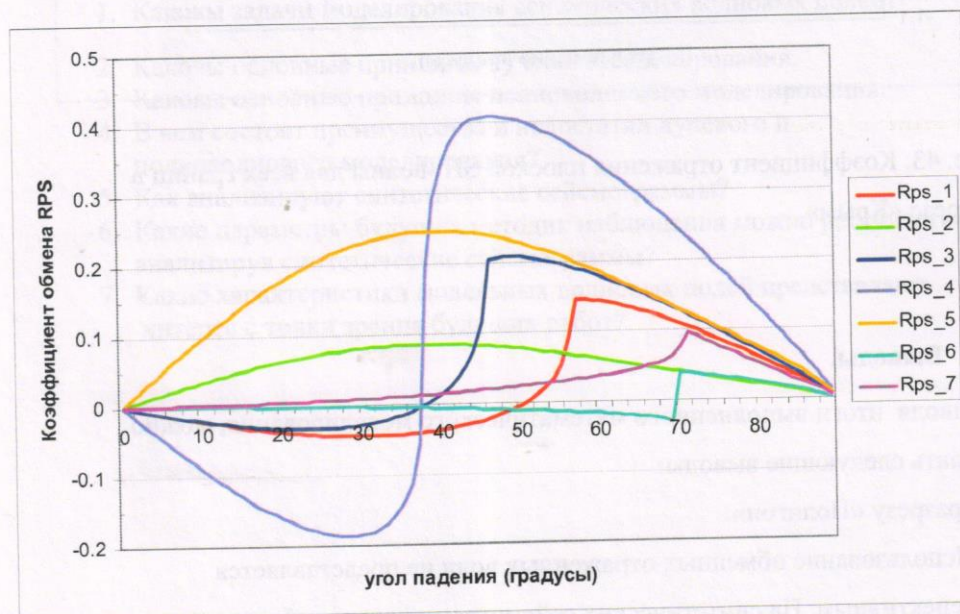


Рис. 42. Коэффициент обмена плоской PS-волны для всех границ в разрезе «Крым».

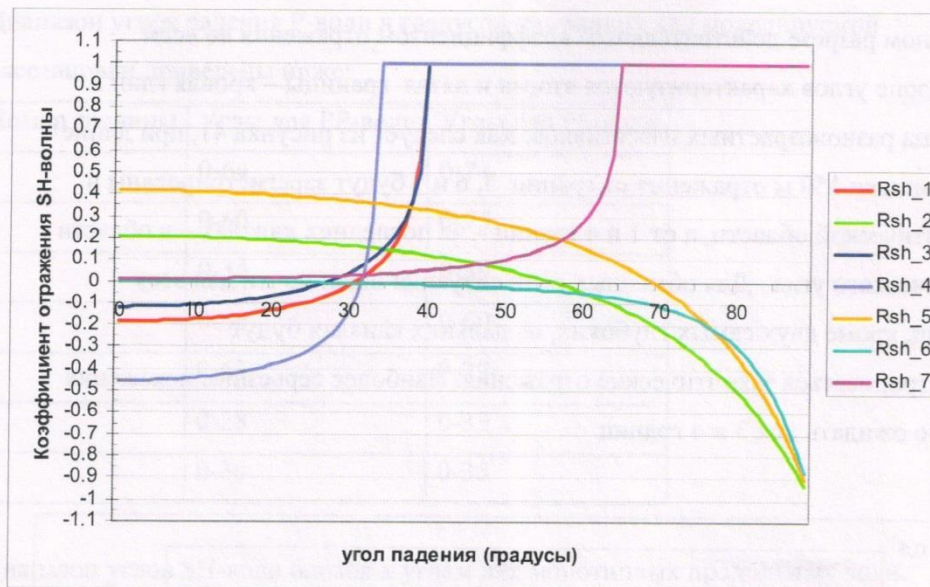


Рис. 43. Коэффициент отражения плоской SH -волны для всех границ в разрезе «Крым».

Выводы.

Подводя итоги выполненного математического моделирования, можно сделать следующие выводы:

По разрезу «Полигон»:

1. Использование обменных отраженных волн не представляется перспективным. На синтетических сейсмограммах высокой интенсивностью обладает только обменная волна от кровли песчаника.
2. Более обнадеживающим представляется применение SH-волн. При надлежащей обработке можно попытаться обнаружить наличие тонкого слоя разрушенного песчаника, если рабочая полоса частот будет не уже 60-180 Гц.
3. С помощью Р-волн выделить тонкий разрушенный пласт крайне затруднительно.

По обобщенному разрезу «Крым»:

Применение обменных волн может оказаться удачным для обнаружения 4 и 5 границ (кровли известняков и границы между известняками), которые не расчлняются продольными волнами.

Контрольные вопросы к разделу 3.

1. Каковы задачи моделирования сейсмических волновых полей?
2. Каковы основные принципы лучевого моделирования.
3. Каковы основные принципы полноволнового моделирования.
4. В чем состоят преимущества и недостатки лучевого и полноволнового моделирования?
5. Как анализируют синтетические сейсмограммы?
6. Какие параметры будущих методик наблюдения можно рассчитать анализируя синтетические сейсмограммы?
7. Какие характеристики модельных волновых полей представляют интерес с точки зрения будущих работ?

Раздел 4. Формирование требований к получению и качеству исходных данных на основе анализа результатов моделирования [8,12-14].

В результате выполнения предыдущих шагов в распоряжении специалистов, занимающихся планированием съемки, попадает набор синтетических сейсмограмм и сформированное поле помех, которые позволяют проанализировать возможность или невозможность получения надежных оценок параметров целевых объектов с использованием существующих технологий и определить требования к качеству исходных данных.

§1. Пример оценки качества материала для AVO-анализа.

Рассмотрим, как это может быть сделано на примере AVO-анализа волн, отраженных от кровли коллектора с различным типом флюида.

Проиллюстрируем влияние на возможности AVO-анализа:

1. спектрального состава сигнала.
2. интенсивности помех (соотношение сигнал шум) как для модели «микросейсм», так и для моделей когерентных помех.

В данном примере важно определить требования к записи, при которых оценки AVO-атрибутов оказываются достаточно устойчивыми, для того, чтобы, например, определить тип флюида.

На рисунке 44 показаны исходные синтетические сейсмограммы и линия, вдоль которой будут анализироваться амплитуды.

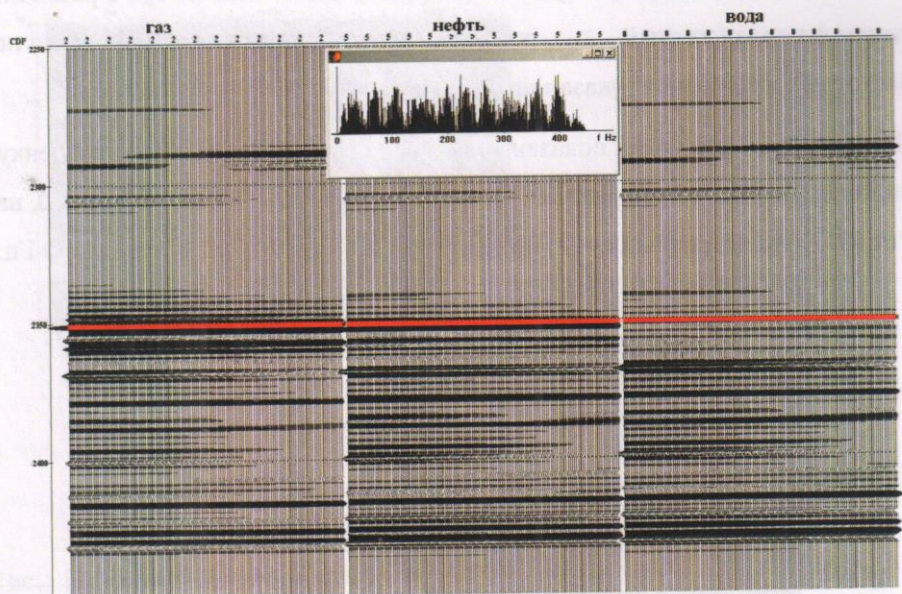


Рис. 44. Исходные сейсмограммы (красным показана линия, вдоль которой оцениваются амплитуды).

На рисунке 45 показано влияние различного частотного состава сигнала на амплитуды, которые будут наблюдаться на сейсмических трассах. Очевидно, что спектральный состав данных оказывается значимым параметром.

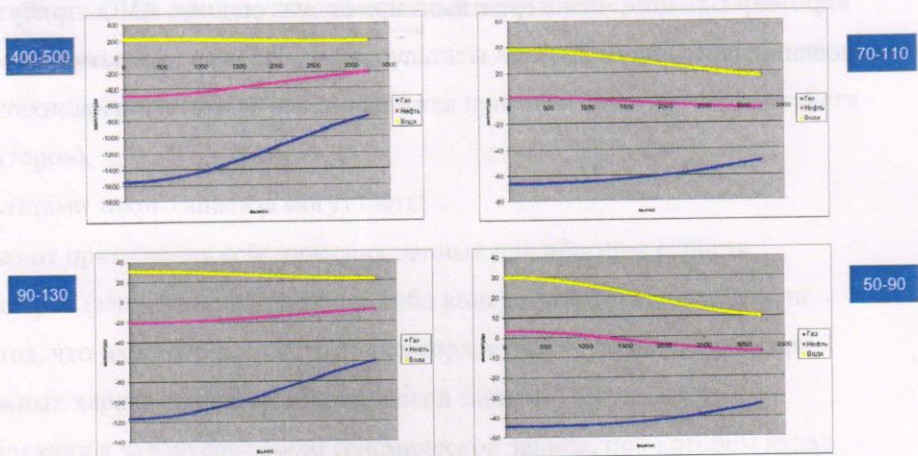


Рис. 45. Оценка амплитуд волн, отраженных от коллектора с различным типом флюида (желтый – газ, розовый – нефть, синий - вода) для различных частотных диапазонов (указан правый склон фильтра, значения в Гц).

На следующих рисунках показано влияние некогерентного шума на оценку амплитуд (на Рис. 46 – нереально большое соотношение сигнал/шум = 20, на Рис.47. – вполне реальное – 2) при достаточно широком спектре – до 90 Гц.

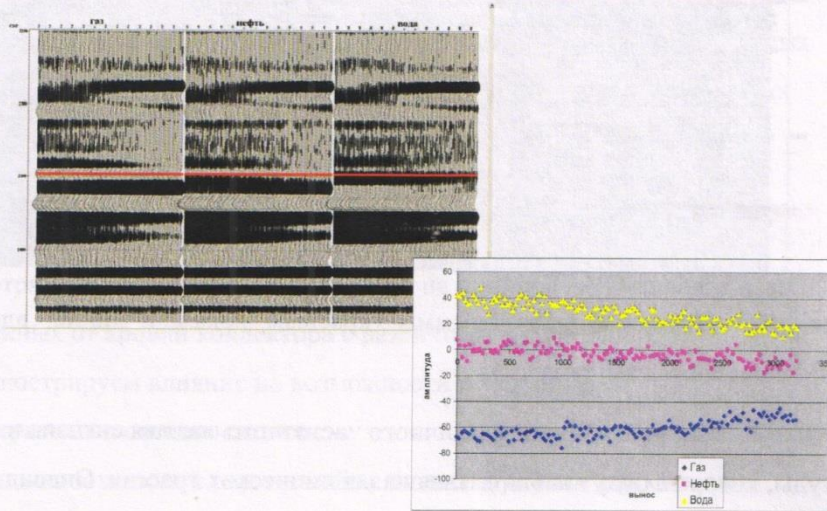


Рис. 46. Влияние некогерентных помех на оценку AVO-атрибутов, соотношение сигнал/шум 20

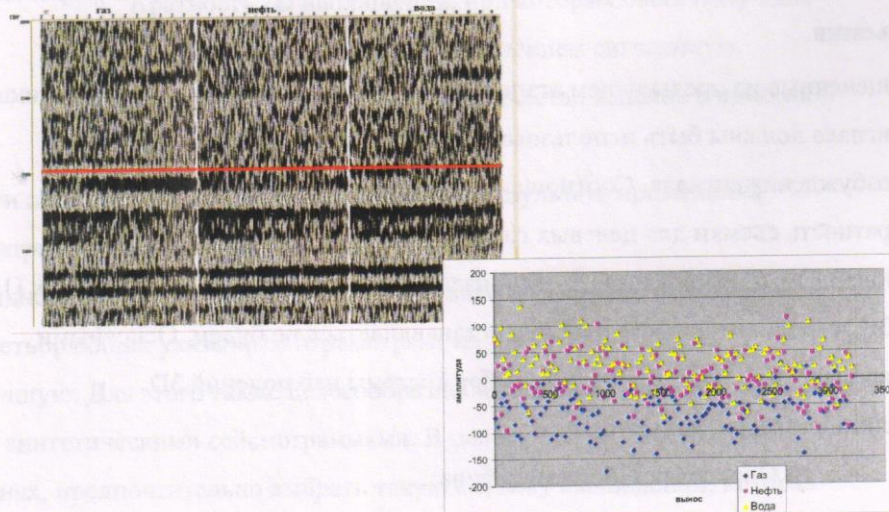


Рис. 17. Влияние некогерентных помех на оценку AVO-атрибутов, соотношение сигнал/шум 2.

В последнем случае, естественно, разделение коллекторов, заполненных водой или нефтью при помощи AVO-анализа окажется невозможным. Также важно проанализировать влияние когерентных помех (например, кратных волн) и других факторов (влияние фильтров, качества анализа скоростей и т.д.) на амплитуды однократных волн и измеряемые параметры (AVO-атрибуты, другие атрибуты, результаты инверсии – результаты той самой технологии, которую предполагается применять для прогноза свойств коллекторов).

Результатами такого анализа могут быть:

1. Отказ от применения сейсмических данных для прогноза свойств коллекторов (или применения какой-либо конкретной технологии), если окажется, что изменения свойств коллектора не могут быть оценены при возможных характеристиках сейсмической записи.
2. Требования к характеристикам сейсмической записи, при котором вклад ожидаемых изменений свойств целевых объектов в оцениваемые атрибуты может быть использован.

§2. Определение основных параметров съемки и планирование съемки.

Оцененные на предыдущем этапе требуемые спектральные характеристики сигнала должны быть использованы при выборе параметров (способов) возбуждения сигнала. Соотношение сигнал/шум определяет требуемую кратность съемки для целевых горизонтов.

Подходы к планированию съемки изложены в литературных источниках [16-23], и здесь мы подробно на них останавливаться не будем. Основными параметрами, определяющими выбор системы наблюдений 3D сейсморазведки, являются

1. Определяющие размер бина:

- a. Интервальная скорость непосредственно над целевыми отражениями.
- b. Доминирующая частота в спектре.
- c. Максимальная частота в спектре.
- d. Минимальный латеральный размер объектов.
- e. Максимальный угол наклона границ.

2. Определяющие X_{\min} :

- a. Глубина до самого мелкого горизонта, который должен быть получен.

3. Определяющие X_{\max} :

- a. Глубина до целевых отражающих границ.
- b. Глубина до самого глубокого горизонта, который должен быть получен.
- c. Удвоенное вертикальное время целевых отражений.
- d. Скорость прямой волны.
- e. Максимально-допустимая растяжка сигнала при вводе кинематических поправок.

4. Определяющие необходимую кратность:

- a. Кратность 2D наблюдений, при которых были получены данные с достаточным соотношением сигнал/шум.
- b. Максимально допустимое количество каналов в приемной расстановке.

Все эти параметры могут быть определены в результате применения рассматриваемого подхода.

Очевидно, окажется, что существует несколько возможных расстановок, удовлетворяющих указанным параметрам. Из них нужно выбрать наилучшую. Для этого также целесообразно воспользоваться полученными ранее синтетическими сейсмограммами. В целом, при прочих равных условиях, предпочтительно выбрать такую систему наблюдений, которая обеспечит минимальную амплитуду футпринтов – аномальных участков записи не геологической природы.

Для анализа футпринтов воспользуемся следующим алгоритмом.

Сгенерируем, используя выбранную приемную расстановку и правила перемещения ее по площади, небольшой полнократный участок съемки, подставив вместо трасс, результаты моделирования, отвечающие

соответствующим выносам (при необходимости, осложненные шумом)

Получим суммарный куб (или куб AVO-атрибутов)

Проанализируем его временные срезы. Все аномалии на них могут быть только футпринтами.

В том, случае, если амплитуда футпринтов окажется больше ожидаемой амплитуды аномалий, вызванных ожидаемым изменением свойств целевых объектов, попробуем изменить параметры расстановки/съемки.

На рисунке 48 показан пример такого анализа. На этом рисунке изменение амплитуды сигнала на временном срезе только в результате наличия футпринтов (скорости оценены с наилучшей возможной точностью в предположении гиперболических годографов, сейсмограммы без шума), может составлять 50%.

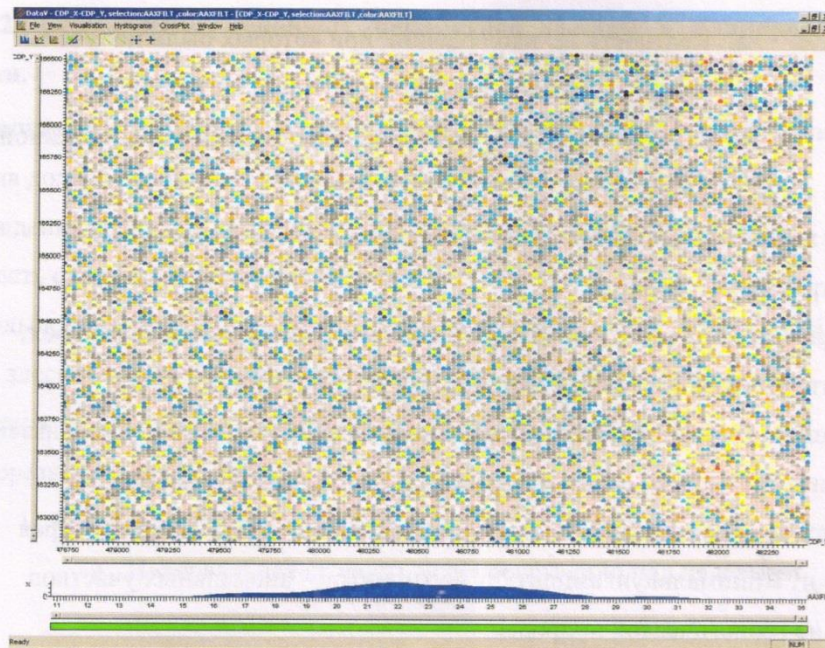


Рис. 48. Пример анализа футпринтов по синтетическим сейсмограммам.

§3. Оценка качества сейсмических данных.

Во время проведения полевых работ (вообще говоря, и на всех этапах обработки данных) необходимо контролировать качество получаемого материала. Традиционно, когда речь идет о контроле качества данных в поле, под этим понимают следующие процедуры [регламент]:

1. Контроль технологии проведения полевых работ

- a. контроль обоснованности проектных решений по методике работ (топо-геодезических, дорожных, условиям возбуждения, условиям приема и регистрации);
- b. контроль качества топографо-геодезических работ;
- c. контроль качества подготовки сейсмических профилей;
- d. контроль за соблюдением технологии зарядки взрывных скважин (подготовки и эксплуатации невзрывных источников возбуждения);

- e. контроль за соблюдением технологии расстановки приемных линий;
 - f. контроль за соблюдением технологии взрывных работ на отстреле (параметрами возбуждений при невзрывных источниках возбуждений);
 - g. контроль за технологией регистрации полевых наблюдений;
 - h. контроль за полевой технической документацией.
2. Контроль качества и предварительная обработка получаемых сейсмических данных

При этом задачи контроля качества и предварительной обработки непосредственно сейсмических данных формулируются следующим образом:

1. Своевременное выявление несоответствия технологии проведения полевых работ или получения непригодных для дальнейшей обработки данных.
2. Подготовка данных к последующей обработке.

В данном пособии будут рассмотрены только те вопросы, которые касаются контроля качества сейсмических данных, направленные на своевременное выявление непригодных к дальнейшей обработке физических наблюдений.

3.1. Подходы к оценке качества сейсмических данных.

Существует несколько подходов к оценке качества сейсмических данных. Все они предполагают, что часть физических наблюдений может быть отбракована по причине каких либо существенных недостатков (не читается лента, отсутствует отметка момента, и пр.), для остальных данных непосредственно оценивается их качество.

Принципиальными свойствами, которыми обязаны обладать все методики являются:

1. Объектом является конкретное ф.н., то есть в результате оценки должно быть принято решение о необходимости повторного наблюдения
2. Критично время, затрачиваемое на принятие такого решения

По способу, которым может быть оценено качества, можно условно выделить следующие группы.

3.1.1. Классический (субъективный) подход.

Контроль качества осуществляется, как правило, по результатам повального вывода всех физических наблюдений (ф.н.), оценку каждому ф.н. дает супервайзер, ориентируясь на собственный опыт и качественные характеристики сейсмической записи.

Классическим примером такого подхода является книга [7]. В ней предлагается оценивать качество ф.н. по трехбалльной шкале, например, оценка «отлично» ставится при «высоком техническом и методическом качестве полевых работ и высоком качестве регистрации при наличии прослеживаемых осей синфазности целевых отражений». В последствии по совокупности поставленных оценок получалась некая средняя оценка качества съемки в целом.

3.1.2. Автоматизированные методики оценки качества сейсмических данных.

Второй традиционный подход к контролю качества сейсмических данных основан на оценке различных характеристик волнового поля, зарегистрированного на каждом конкретном ф.н. При этом полученные параметры могут использоваться для формирования некоторой обобщенной оценки сейсмической записи или же работать как необходимые условия для того, чтобы ф.н. было принято в обработку.

Список используемых параметров бывает достаточно разнообразным, например, в статье [5] авторы предлагают измерять:

1. Спектральные характеристики записи:
 - a. частоты максимума спектра MSP;
 - b. нижние частоты спектра на заданном уровне LCUT;
 - c. верхние частоты спектра на заданном уровне HCUT;
 - d. ширину спектра, как разницы $WSP = HCUT - LCUT$

2. Соотношения сигнал/помеха в заданном окне.
3. Скорости $V_{\text{вчр}}$ прямой и (или) головной волны, как характеристики ВЧР (верхней части разреза).

Комплексного коэффициента качества

$$QC = \frac{SN + \frac{WSP}{90} + \frac{MSP}{35}}{0.7 + 0.7 + 0.7} * k \quad (3.1)$$

где k – калибровочный коэффициент.

Список измеряемых параметров может изменяться в зависимости от требований заказчика полевых работ, однако, как правило, он будет включать следующие характеристики (для сухопутных работ):

1. Оценка времен прихода прямой волны (используется для контроля правильности геометрии и оценки скорости распространения продольных волн в ВЧР, сравнение которой со скоростью по измерениям T вертикального позволяет выявлять грубые нарушения технологии при выборе глубины заряда)
2. Оценка спектрального состава различных волн (аномалии спектрального состава, такие как слишком низкая центральная частота, могут свидетельствовать о нарушениях технологии или необходимости изменения условий возбуждения)
 - a. Целевых отражений
 - b. Поверхностных волн
3. Оценка энергии части волнового поля
 - a. Уровень микросейсм (оценивается в окне до первых вступлений, слишком высокий уровень может свидетельствовать о нарушениях технологии при установке (групп) сейсмоприемников)
 - b. Энергия в интервале записи, содержащей целевые отражения
 - c. Энергия поверхностных волн или иных когерентных помех

4. Оценка отношения сигнал/помеха, которая получается или из оценок энергии в различных участках записи, или из при помощи методов, описанных в заключительном разделе этой главы.

Подходы к получению перечисленных оценок будут приведены ниже.

Традиционных применений для полученных оценок есть два:

1. Отбраковка тех физических наблюдений, которые не попадают в заданные заказчиком работ диапазоны изменения. Границы диапазонов задаются на основании обобщения практического опыта работы в соответствующем районе.
2. Формирование некоторой интегральной оценки качества записи. Это применение носит сугубо экономический характер и в контексте отчета интереса не представляет.

Описанный подход к оценке качества достаточно объективен и, в настоящее время, становится все более и более распространенным. Единственный присущий ему недостаток заключается в том, что критерием отбраковки физических наблюдений является обобщенный опыт работ в сходных сейсмогеологических условиях, при этом пригодность получаемых данных для дальнейшей обработки и динамической (например) интерпретации не учитываются. То есть, несмотря на развивающиеся методики анализа (основанные на применении динамических характеристик сейсмической записи), полевые данные продолжают собираться исходя из сложившихся традиций.

3.1.3. Использование математического моделирования для формирования критериев качества сейсмических данных.

Разумным развитием описанных в предыдущем разделе методов контроля качества является определение критериев качества сейсмических данных на основании изучения возможности решения различных геологических задач сейсморазведкой на этапе планирования съемки тем способом, как это было показано в предыдущей главе.

3.2. Оценки динамических характеристик сейсмической записи.

Определение динамических характеристик сейсмической записи для целей оценки качества конкретного физического наблюдения следует проводить в различных окнах. Проще всего использовать окна, заданные граничными значениями времен и удалений источник/приемник. Пример расположения окон на сейсмограмме приведен на рисунке 49.

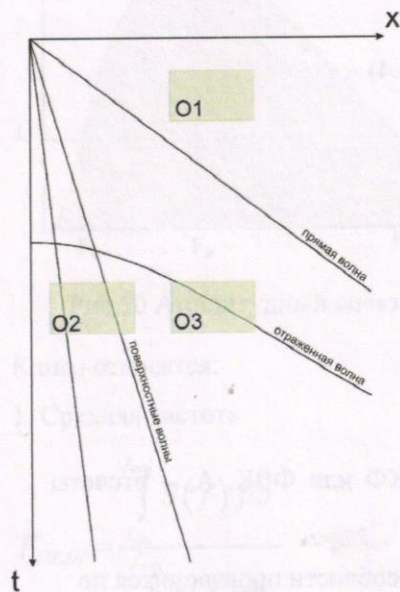


Рис. 49. Пример расположения окон на сейсмограмме

Окна следует размещать в областях, где регистрируются только микросейсмы или иные шумы не связанные с источником (O1), целевые отражения (O3, при этом трассы на которых оцениваются характеристики микросейсм и целевых отражений разумно выбирать одни и те же) и какие-либо когерентные помехи, например – поверхностные волны (O2).

3.2.1. Оценка амплитуды/энергии.

Предлагается использовать несколько оценок амплитуды или энергии в окне.

1. Средняя абсолютная амплитуда

$$A_{MEAN} = \frac{1}{NT} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^T |A_{i,j}| \quad (3.2)$$

(A_{ij} – j – ый отсчет i –ой трассы отсчет, N – количество трасс в окне, T – количество отсчетов в окне)

2. Осредненная по ансамблю среднеквадратичная амплитуда участка сейсмической трассы

$$A_{1D_RMS} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{j=1}^T A_{i,j}^2} \quad (3.3)$$

3. Среднеквадратичная амплитуда в окне

$$A_{2D_RMS} = \sqrt{\frac{1}{NT} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^T A_{i,j}^2} \quad (3.4)$$

3.2.2. Оценка разрешающей способности

Оценка проводится по следующей формуле:

$$\lambda = \frac{1}{2q} \frac{\sum_{i=1}^q A_i^2}{\sum_{i=q}^N A_i^2}, \quad (3.5)$$

где $2q$ – ширина главного полупериода АКФ или ФВК, A_i – отсчеты автокорреляционной функции [4].

В том случае, если оценивание разрешающей способности производится по набору трасс, то можно в качестве последовательности A использовать осредненную АКФ или осредненную ФВК (между парами соседних трасс, в этом случае делается предположение о том, что сигнал от трассы к трассе не изменяется и АКФ собственно сигнала может быть приближено ФВК между соседними трассами), также можно использовать АКФ отдельных трасс, полученные оценки осреднить.

При расчете такой оценки следует нормировать корреляционные функции при осреднении .

3.2.3. Оценка спектральных характеристик

Обычно используется несколько различных спектральных оценок. К ним относятся граничные частоты спектра (F_L и F_R), которые оцениваются по

осредненному амплитудному спектру ($S(f)$) внутри окна с указанием уровня L , по которому проводится оценка (Рис.5050), ширина спектра ($F_R - F_L$) и несколько оценок, характеризующих среднюю частоту.

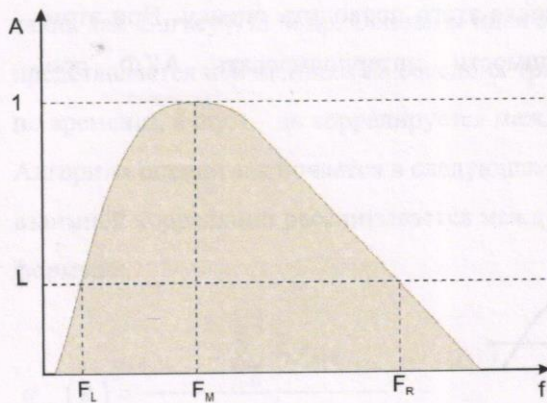


Рис.50 Амплитудный спектр.

К ним относятся:

1. Средняя частота

$$F_{MEAN} = \frac{\int_{f_{min}}^{f_{max}} S(f) f df}{\int_{f_{min}}^{f_{max}} S(f) df} \quad (3.6)$$

(где $S(f)$ – осредненный амплитудный спектр, f – частота)

2. Частота максимума в спектре (F_M на предыдущем рисунке)

3. Оценка видимой частоты

- а. По количеству переходов через 0. Вычисляется для каждой трассы по формуле

$$f_{zc} = \frac{N_{zc} - 1}{2(t_{last} - t_{first})}, \quad (3.7)$$

значения осредняются внутри окна.

- б. По ширине главного полупериода АКФ (рис. 51). Вычисляется для каждой трассы по формуле

$$f_{ACF} = \frac{1}{2q} \quad (3.8)$$

для каждой трассы, результаты осредняются в пределах окна. Также можно сначала осреднять АКФ, а после этого проводить оценку. При этом необходимо помнить о необходимости интерполировать АКФ при определении величины q .

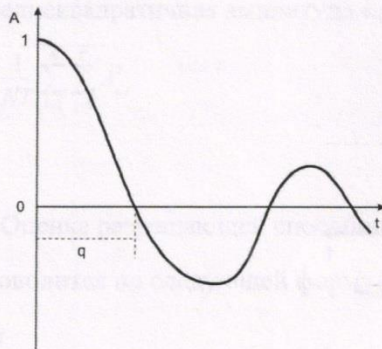


Рис. 51. Оценка видимой частоты по АКФ.

3.2.4. Оценка соотношения сигнал/шум.

Оценка соотношения сигнал/шум, очевидно, зависит от того, что будет принято считать сигналом и относительно какого именно шума будут проводиться оценки. В нашем случае сигналом всегда оказываются отраженные волны от тех границ, которые находятся в целевом интервале исследования. Зато типов помех, относительно которых целесообразно оценивать уровень сигнала может быть довольно много.

Так, самую простую, но, тем не менее, полезную на практике оценку соотношения сигнал/шум можно получить разделив оценку амплитуды сигнала (в целевом интервале) на оценку амплитуды микросейсм.

Недостатки такой оценки заключаются в том, что часто микросейсм не являются наиболее значимой шумовой компонентой с одной стороны, а оценка средней амплитуды волнового поля в интервале, где проводятся оценки сигнала не обязательно характеризует амплитуду только сигнала.

Оценка соотношения сигнал/шум по максимуму нормированной ФВК между соседними трассами с последующим осреднением оценки в ансамбле была описана в работе [6] и реализована во многих программных комплексах, таких как SurveyWin и др. Основная идея состоит в том, что сигнал представляется неизменным на соседних трассах (но, возможно, сдвинутым по времени), а шум – не коррелируется между соседними трассами. Алгоритм оценки заключается в следующем. Нормированная функция взаимной корреляции рассчитывается между парами соседних трасс по формуле:

$$g'_{xy}(k) = \frac{\sum_{t=0}^{N-1} \bar{x}_t y_{t+k}}{\left(\sum_{t=0}^{N-1} x_t^2\right)^{1/2} \left(\sum_{t=0}^{N-1} y_t^2\right)^{1/2}}, \quad (3.9)$$

где x и y – последовательность отсчетов трассы, t – номер отсчета.

Соотношение сигнал/шум получается

$$[S/N] = \left[\frac{[g'_{ij}]_M}{1 - [g'_{ij}]_M} \right]^{1/2}, \quad (3.10)$$

где $[g'_{xy}]_M = \max_k (g'_{xy}(k))$.

Достоинства такого метода оценки заключаются в том, что она пригодна для суммарных разрезов (кубов) и может быть применена для сейсмограмм (оценка по парам трасс с последующим осреднением внутри ансамбля), однако она непригодна для анализа соотношения сигнал/шум в различных диапазонах частот и никак не учитывает влияние когерентных помех. Очевидным развитием такого подхода, позволяющая выбирать диапазон частот, является оценка соотношения сигнал/шум по формуле (для пары трасс):

$$[S/N] = \frac{\sum_{f=f_{MIN}}^{f_{MAX}} \hat{S}_{xy}(f)}{\frac{1}{2} \left(\sum_{f=f_{MIN}}^{f_{MAX}} \hat{S}_{xx}(f) + \sum_{f=f_{MIN}}^{f_{MAX}} \hat{S}_{yy}(f) \right) - \sum_{f=f_{MIN}}^{f_{MAX}} \hat{S}_{xy}(f)}, \quad (3.11)$$

где $g_{xy}(k) \xrightarrow{\text{Fourier}} \hat{S}_{xy}(f)$, f_{min} и f_{max} – граничные частоты

диапазона, в пределах которого проводится оценка такого отношения, ФВК рассчитывается по формуле

$$g_{xy}(k) = \sum_{t=0}^{N-1} \bar{x}_t y_{t+k} \quad (3.12).$$

Для того, чтобы использовать предложенную оценку для нескольких трасс из одного ансамбля, можно поступить следующим образом. внутри ансамбля рассчитываются ФВК между соседними трассами и АКФ для каждой трассы, рассчитывается средняя ФВК и АКФ. Предполагается, что осредненная ФВК – это АКФ сигнала, а АКФ – это АКФ сигнала + шума. Рассчитывается спектр осредненной ФВК $S_{CCF}(f)$ и АКВ $S_{ACF}(f)$, соотношение сигнал/шум определяется по следующей формуле:

$$S/N = \sum_{f=f_{MIN}}^{f_{MAX}} \frac{S_{CCF}(f)}{S_{ACF}(f) - S_{CCF}(f)} \quad (3.13)$$

Однако такой подход по-прежнему не позволит отнести когерентные помехи к шуму – они медленно изменятся от трассы к трассе. Кроме того, во всех предыдущих случаях порядок, в котором рассчитывались взаимные корреляции между трассами, очевидно, влиял на полученную оценку.

Поэтому можно изменить алгоритм и вычислять попарные корреляции между трассами ансамбля и модельной трассой, полученной осреднением всех трасс ансамбля, при этом можно сделать дополнительное предположение о том, что модельная трасса и есть сигнал без шума. Ее АКФ полагается АКФ сигнала. Тогда формула (3.11) будет преобразована к виду:

$$[S/N] = \frac{\left(\sum_{f=f_{MIN}}^{f_{MAX}} \frac{1}{N_X} \sum_{i=1}^{N_X} \hat{S}_{Mx_i}(f) \right)}{\left(\sum_{f=f_{MIN}}^{f_{MAX}} \frac{1}{N_X} \sum_{i=1}^{N_X} \hat{S}_{x_i, x_i}(f) \right) - \left(\sum_{f=f_{MIN}}^{f_{MAX}} \frac{1}{N_X} \sum_{i=1}^{N_X} \hat{S}_{Mx_i}(f) \right)},$$

(3.14)

$$M(k) = \frac{1}{N_X} \sum_{i=1}^{N_X} x_i(k).$$

Проиллюстрируем разницу между последними двумя способами рассчитывать соотношение сигнал шум на следующем примере. Пусть у нас есть синтетическая сейсмограмма МОВ с введенными кинематическими поправками, осложненная случайным шумом (находящемся в том же диапазоне частот, что и отраженные волны), показанная на рисунке (Рис. 52)

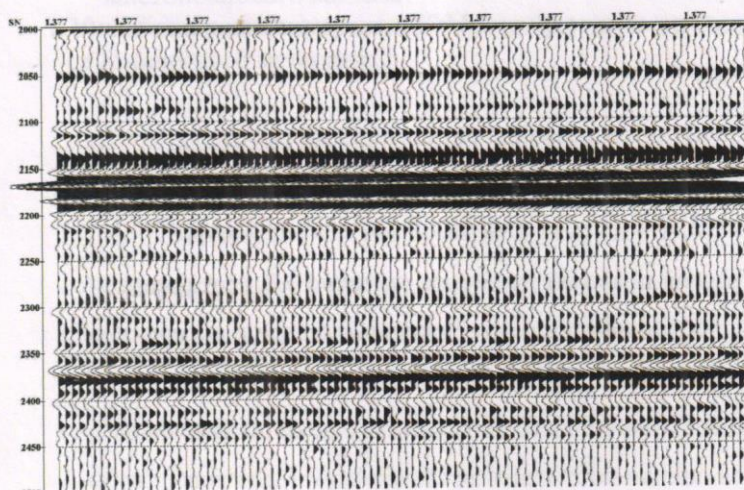


Рис. 52. Синтетическая сейсмограмма МОВ, осложненная случайным шумом.

Обе оценки соотношения сигнал/шум дадут приблизительно одно и то же значение ~ 1.8 (что вполне отвечает способу получения сейсмограммы).

Добавим интенсивную когерентную помеху (в этом примере – кратную волну, интерферирующую с сигналом и несколько отличающуюся своей кинематикой)

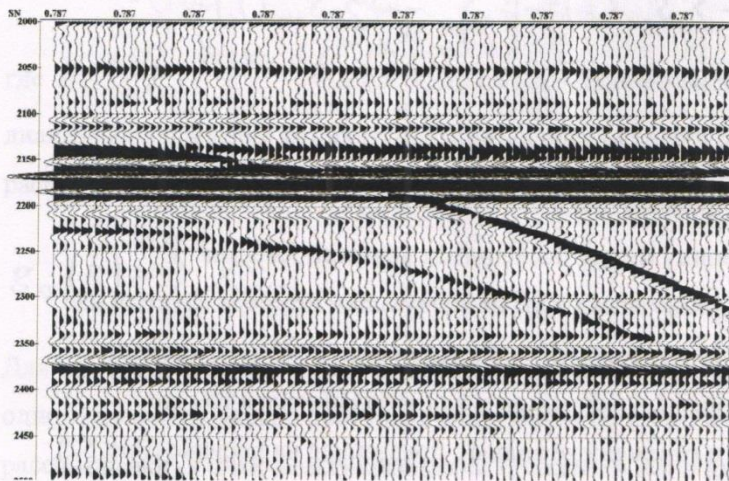


Рис. 53. Синтетическая сейсмограмма MOB, осложненная случайными и когерентными помехами.

В этом случае оценки получатся довольно разными. Если просто рассчитывать попарные корреляции, то оценка будет приблизительно как и в предыдущем случае ~ 1.8 , что по сути неверно, а вот использование корреляций с суммотрассой позволит получить значение 0.8, которое представляется гораздо более «физичным» - уровень сигнала и когерентной составляющей шума сопоставим.

Кроме того, приведенный пример позволяет сделать еще одно замечание относительно способов оценки соотношения сигнал/шум – для того, чтобы можно было использовать в качестве модели сигнала суммотрассу, при подготовке данных следует вводить кинематические поправки.

Контрольные вопросы к разделу 4.

1. От чего зависят набор и жесткость требований к качеству сейсмического материала?
2. В чем специфика требований к сейсмическому материалу для будущего AVO- анализа?
3. Как определяются основные параметры съемки?
4. Какие существуют подходы к оценке качества сейсмического материала?
5. Как формируются требования к кинематическим характеристикам сейсмического материала?
6. Как формируются требования к динамическим характеристикам сейсмического материала?
7. Какова роль шума и помех при оценке качества сейсмического материала?
8. Какие характеристики записи определяют конечную разрешающую способность?
9. Какие характеристики записи определяют возможности многоволнового анализа?
10. Какова роль спектральных характеристик в оценке качества сейсмического материала?

Заключение.

Современные системы получения сейсмических данных – трехмерные и многокомпонентные - нацелены на современные же и довольно сложные системы обработки данных, которые, в свою очередь, позволяют строить информативные и более или менее достоверные модели геологической среды. В этих условиях, собственно процесс формирования задания на получение данных и их оценка с точки зрения дальнейшего использования приобретают первостепенное значение, определяющую роль для всего процесса решения геологической задачи.

Авторы пособия надеются, что изложенный материал, включающий в себя, как теоретические посылки, так и конкретные примеры, будет полезен для студентов и магистрантов при изучении процесса получения сейсмических данных для целей изучения месторождений нефти и газа.

Рекомендованная литература.

1. Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология, М., «Мир», 1983.
2. Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах, М. Наука, 1973
3. Калинин А.В., Шалаева Н.В. О пределах применимости лучевых приближений при оценке динамических параметров отраженных волн». Вестник МГУ, сер. Геология, 1999, № 5, с. 49-54.
4. Кац С.А., Птецов С.Н. Спектральный анализ поля регулярных сигналов и помех // Физика Земли, 1978, №1.
5. Тищенко И.В., Тищенко А.И. Методика автоматизированного контроля качества сейсморазведочных работ с оценкой характеристик ВЧР (ГФУП «ВНИИГеофизика»), 1999.
6. Обработка сейсмических данных: Теория и практика / Л. Хаттон, М. Уэрдингтон, Дж. Мейкин ; Перевод с англ. А. Л. Малкина, 214,[1] с. ил. 26 см, М. Мир 1989.
7. Потапов О.А. Технология полевых сейсморазведочных работ. М., Недра, 1987.308 с.
8. Barnes A.E. Seismic attributes in your facies. CSEG-Recorder, 47,September 2001.
9. Castagna J.P. and Backus M.M. Offset-dependent reflectivity – theory and practice of AVO analysis/ SEG, TULSA. 1995.
10. Mavko G., Mukerji T., Chan Christina., Fluid substitution: Estimating changes in $-V_p$ without knowing V_s .- Geophysics, vol. 60, no.6 (November - December, 1995).
11. Mavko Gary, Tapan Mukerji, Jack Dvorkin , Tools for seismic analysis in porous media , Cambridge University Press, 1998.
12. Mikhailenko B. G. Synthetic seismograms for complex 3D geometries using an analytical-numerical algorithm// Geophys. J. R. Astr. Soc. 1984. V. 3, N 79. P. 963—986.

13. Robertson J.D., Fisher D.A., 1988, Complex seismic trace attributes. The Leading Edge, 7, №6, pp. 22-26.
14. Taner M.T., Koehler E., Sheriff R.E., 1979, Complex seismic trace analysis. Geophysics, 44, pp.1041-1063.
15. Robertsson J., Blanch J., Symes W. Viscoelastic finite-difference modeling// Geophysics. 1999. V. 59, N 9. P. 1444—1456.
16. Vermeer G.J.O. 1994, 3D symmetric sampling: 64th Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts, 906–909.
17. Vermeer G.J.O. 1999a, Factors affecting spatial resolution: Geophysics, 64, 942–953.
18. Vermeer G.J.O. 2003, 3D seismic survey design optimization, The Leading Edge, 10, 934-941
19. Vermeer G.J.O. 2004, An ambitious geometry for 3D land acquisition, The Leading Edge, 10, 1043-1046
20. Vermeer G.J.O. 1991, Symmetric sampling: The Leading Edge, 10, No. 11, 21–27.
21. Vermeer G.J.O. 1998a, 3-D symmetric sampling: Geophysics, 63, 1629–1647.
22. Vermeer G.J.O. 1998b, 3-D symmetric sampling in theory and practice: The Leading Edge, 17, 1514–1519.
23. Vermeer, G. J. O., den Rooijen, H. P. G. M., and Douma, J., 1995, DMO in arbitrary 3D geometries: 65th Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts, 1445–1448.
24. Wiley John, Schulz P. S., Ronen S., et al. Seismic guided estimations of log properties. Pt. 1// The Leading Edge. 1994. Vol. 13(5). P.305 – 310.
25. Wiley John, Schulz P. S., Ronen S., et al. Seismic guided estimations of log properties. Pt. 2// The Leading Edge. 1994. Vol. 13(6). P.674 – 678.
26. Wiley John, Schulz P. S., Ronen S., et al. Seismic guided estimations of log properties. Pt. 3// The Leading Edge. 1994. Vol. 13(5). P.770 – 770.

Учебное издание

Габдуллин Руслан Рустемович, Иванов Михаил Константинович,
Корост Дмитрий Вячеславович, Ошкин Александр Николаевич, Певзнер
Роман Львович, Шалаева Наталья Владимировна

Многоволновая сейсморазведка

Задача получения качественных сейсмических данных

Подписано в печать . Формат 70x102¹/₁₆
Бумага офс. №1. Офсетная печать. Усл. Печ. л. 7. Тираж 100 экз.

Геологический факультет, 2008.