

План

1. Что такое сейсмическое изображение
2. Искажения на временных разрезах
3. Модель взрывающихся границ
4. Аналогия с физическим экспериментом: гаванью и барьером от волн
5. Понятие о миграции как о суперпозиции по окружностям
6. Примеры
7. Уравнение миграции

I. Что такое сейсмическое изображение

Идеальным разрезом был бы такой разрез, где каждой границе соответствовал бы дельта-импульс на соответствующей глубине (или двойном времени пробега), причём амплитуда этого дельта-импульса зависела от контрастности границы по акустическим свойствам. Это недостижимый идеал.

Сейсмическое изображение можно понимать как разрез отражающей способности границ в сейсмической полосе частот. Вместо дельта-импульсов мы имеем импульс сейсмический.

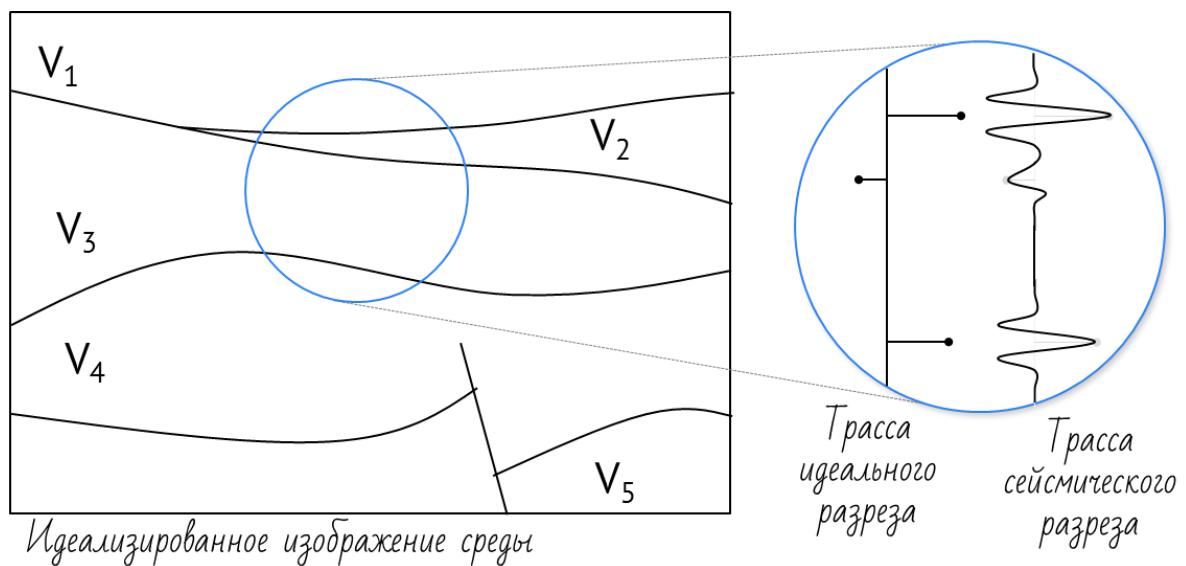


Рисунок 1.1

Результатом построения сейсмического изображения служат:

1. Изображение коэффициентов отражения в сейсмическом диапазоне частот
 $A(x,y,t) = R(x,y,t) * w(t)$
2. Модель скоростей P-волн
3. Зависимость отражающей способности от угла падения волны $R(\theta)$

В чем сложность получения хорошего изображения?

А) Присутствие помех – их стараются устранить на этапе предобработки (preprocessing). Цель предобработки – обеспечить выделение полезного сигнала (однократно отражённых волн) и ослабить помехи.

Б) Даже в отсутствие регулярных и нерегулярных помех (имея только полезный сигнал) построить разрез представляет собой отдельную задачу. Она как раз и известна под термином «построение сейсмического изображения», или *Seismic imaging*. Наиболее важные составляющие построения изображений – это создание *модели сейсмических скоростей и миграция*.

II. Искажения на временных разрезах

С этого момента, в основном, предполагается, что волны-помехи устранены и все данные, с которыми мы работаем, – однократно отражённые от целевых границ продольные волны. Среда на простых примерах в этой лекции полагается однородной, и для простоты примем, что скорость в ней 2000 м/с. Это позволит нам приравнять масштабы по осям глубин и двойных времен: $1 \text{ м} = 1 \text{ мс}$ двойного времени.

Какие явления мешают получению разреза с правильной геометрией границ и истинной амплитудой?

1. Сейсмический снос
2. Дифракция
3. «Петли» на временных разрезах

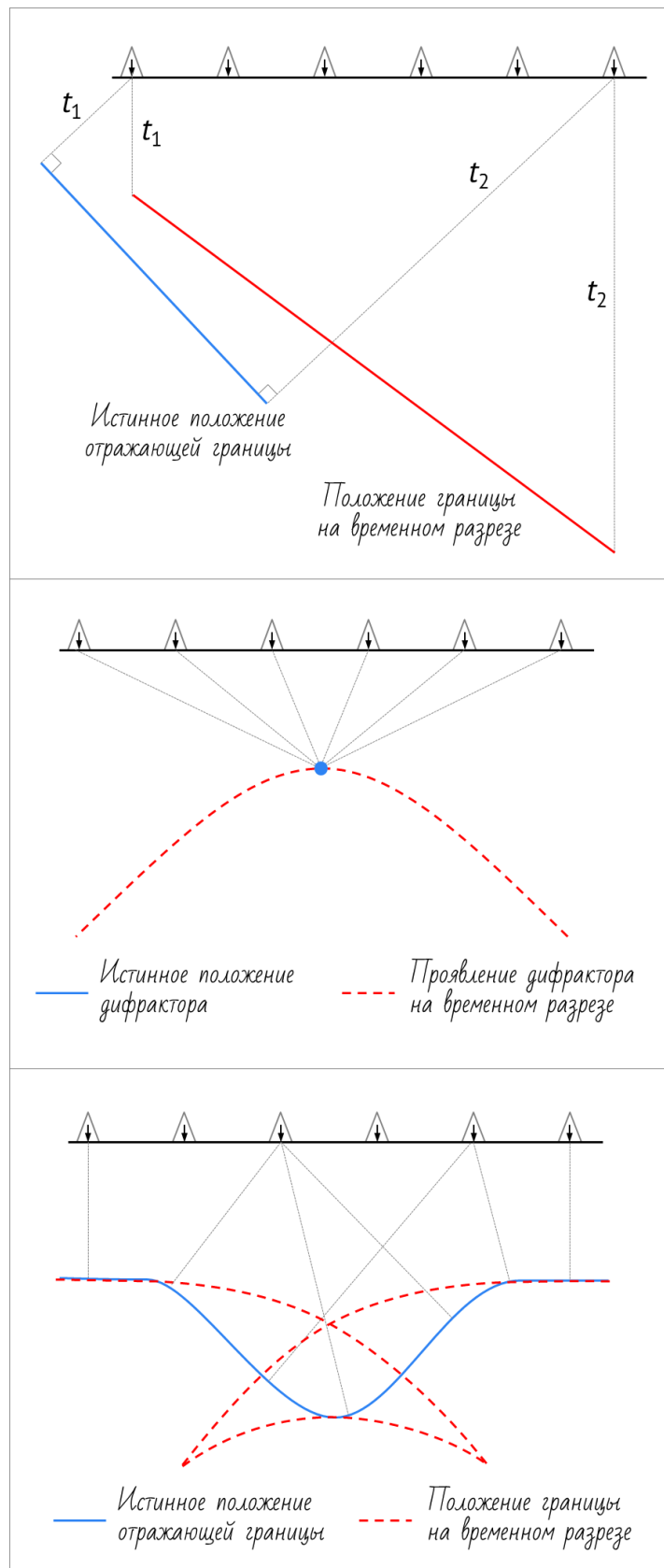


Рисунок 1.2

Вообще-то, три этих типа искажений, хотя формально и разделяются, имеют общую природу. Это легко проиллюстрировать. Для этого введём и рассмотрим мысленную модель «взрывающихся границ».

III. Модель взрывающихся границ

Предположим, что на изучаемой отражающей границе с очень малым шагом (непрерывно) расположены источники упругих колебаний. Пусть в заданный момент времени эти источники «взорвались», т.е. начали порождать упругую волну. Фронт такой волны в начальный момент времени будет в точности повторять форму границы. Распространяясь в пространстве, он через определённое время достигнет приёмников на поверхности земли. Сигнал, записанный приёмниками, будет точно такой же, как если бы мы получили обычный разрез нулевых удалений, но на нём бы осталось только отражение от одной границы.

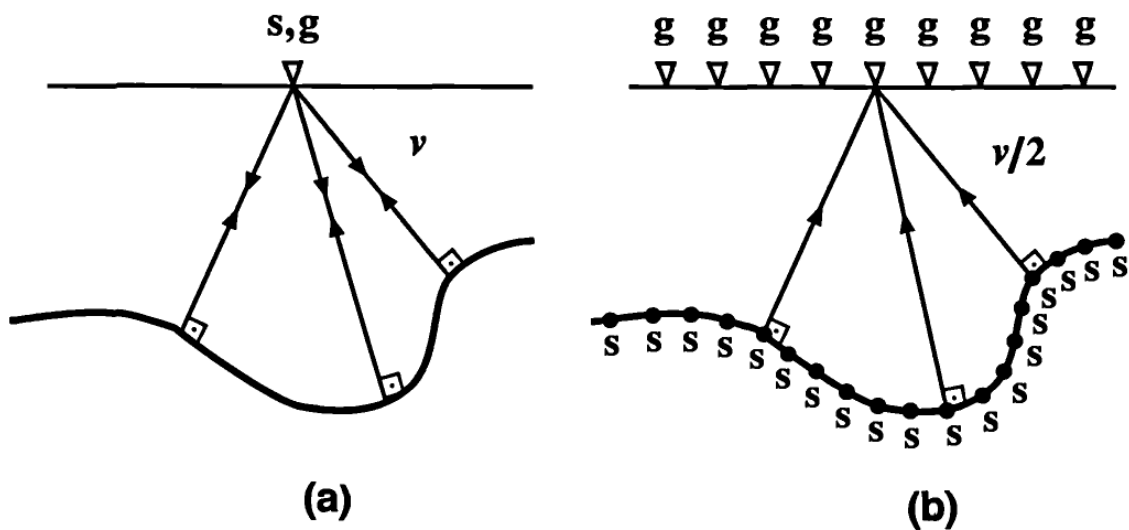


FIG. 4.0-6. Geometry of zero-offset recording (left), and hypothetical simulation of the zero-offset experiment using exploding reflectors (right) (Claerbout, 1985).

Рисунок 1.3.

Это легко продемонстрировать на рисунке сверху (Уилмаз, Клаербоут). Действительно, лучевые траектории полностью совпадают для совмещённого источника и приёмника (а) и взрывающихся границ (б). Разница лишь в том, один раз или два преодолевается путь от поверхности до границы. Поэтому скорость для взрывающейся границы уменьшают вдвое.

Резюме: принципиально ничего не изменится, если для рассуждений мы будем считать, что каждый элемент отражающей границы является источником колебаний. То же касается и дифракторов.

Подробнее:

Клаербоут «Сейсмическое изображение земных недр», 1989, страницы 12,20

Yilmaz "Seismic data analysis", стр.467

Зато теперь мы можем переформулировать задачи построения сейсмического изображения:

- определить положение границ
- амплитуды отражений от них
- скорости Р-волн

в терминах модели взрывающихся границ:

- определить положение каждого источника (элемента границы)
- амплитуды (интенсивность) источников
- скорости Р-волн

Как это сделать? Покажем на простой аналогии с гаванью.

IV. Аналогия с физическим экспериментом: гаванью и барьером от волн

Пусть мы на берегу регистрируем колебания морских волн, а море от нас отгорожено барьером. Если в барьере есть брешь, то она по принципу Гюйгенса начинает излучать в сторону берега вторичные колебания – т.е. она становится для нас точечным источником (рис.ниже). Приёмники зарегистрируют приход сферической волны, и годограф её будет гиперболой.



https://manoa.hawaii.edu/exploringourfluidearth/media_colorbox/2180/media_original/en

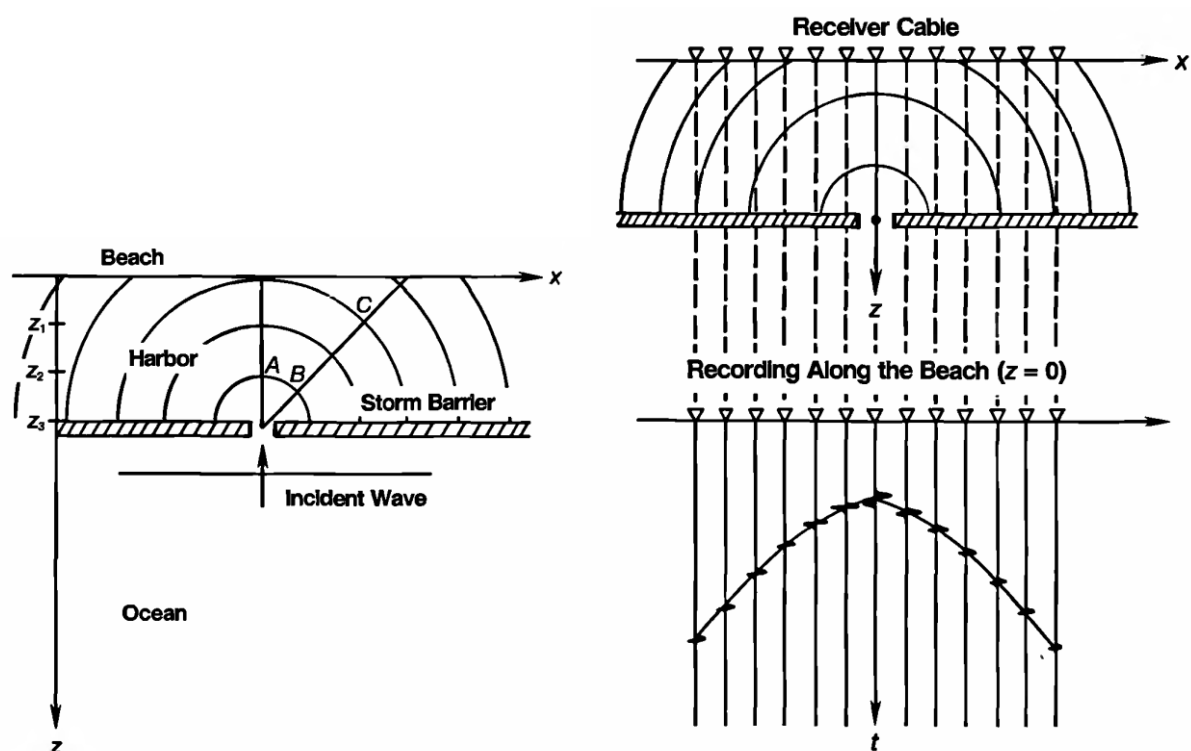


Рисунок 1.5.

Точно так же, в соответствии с моделью взрывающихся границ, ведёт себя любой фрагмент отражающей границы в сейсморазведке: всякую сейсмическую границу можно рассматривать как набор дифракторов (рис.ниже). Более того, вообще весь сейсмический разрез можно рассматривать как набор наложенных друг на друга гипербол – вторичных дифрагированных волн от каждой точки среды. Где-то они сливаются в границы, где-то образуют петли, где-то выглядят хаотично. Миграция, в таком случае, – процесс, обратный дифракции: весь разрез, состоящий из наложенных друг на друга «гипербол», необходимо трансформировать в набор дифракторов в их истинных положениях.

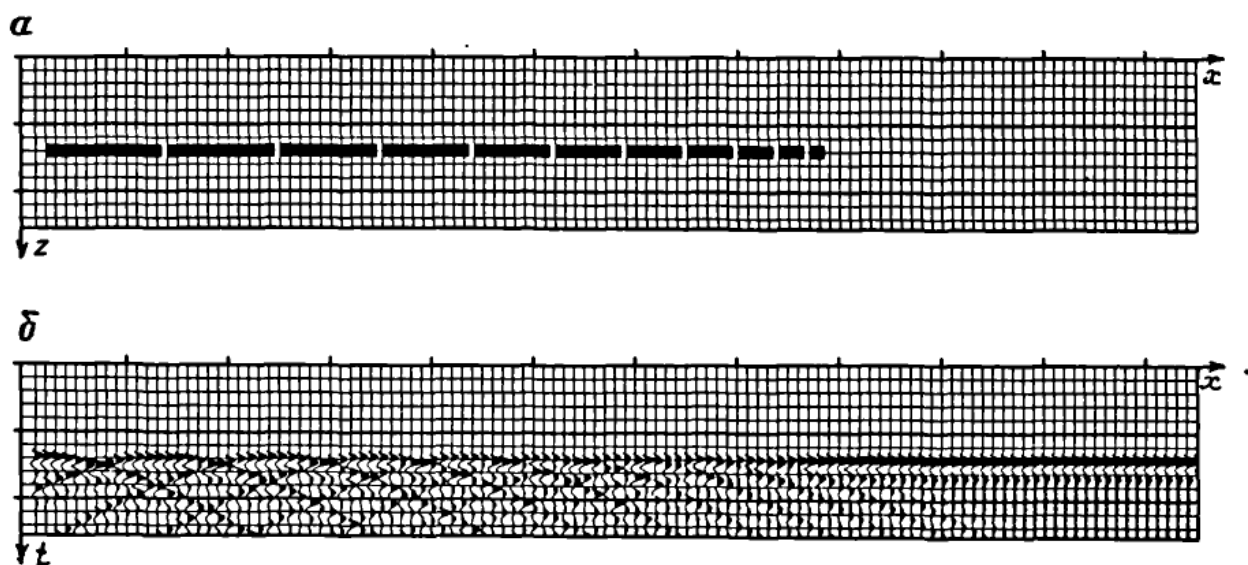


РИС. 3. Барьер с множеством отверстий (а) и волны, наблюдаемые за барьером (б)

Рисунок 1.6.

Задача – определить координаты бреши в барьере, скорость волны, интенсивность источника. В терминах сеймики – определить положение границ, скорости в среде, амплитуду отражения.

1. С координатой вдоль оси X всё ясно – положение бреши однозначно определяется по вершине гиперболы, зарегистрированной приёмниками.
2. Скорость волны можно вычислить по форме гиперболы. Затем, умножив скорость на время t_0 вершины гиперболы, узнаем, как далеко от берега располагается барьер – т.е. вторую координату бреши.
3. Осталось определить лишь амплитуду волны – для этого просуммируем все импульсы, зарегистрированные приёмниками, вдоль годографа-гиперболы.
4. Поместив значение суммы в точку, соответствующую найденным координатам, мы получим *мигрированное изображение*.

В терминах сейсмических задач – таким образом мы восстановили истинное положение элемента отражающей границы и определили амплитуду отражения от

него. Метод сейсмической миграции, в основе которого лежит описанная последовательность действий, называется миграцией Кирхгофа.

Существуют и другие способы миграции, которые удобно рассмотреть на примере с гаванью. Первый предлагает перемещать приёмную линию в сторону моря (ближе к источнику) с некоторым шагом Δz и проводить регистрацию волн на каждом шаге. В определённый момент мы приблизимся к источнику колебаний так близко, что гипербола «стянется» в точку – а это значит, мы в точности определили расстояние до источника. Конечно, в наземной сейсморазведке погрузить приёмники на заданную глубину физически невозможно, но зато это можно смоделировать математически.

Кроме того, математически, основываясь на полученной сейсмограмме, можно рассчитать, как выглядело волновое поле за мгновение до его регистрации приёмниками. Потом «отмотать время назад» ещё на мгновение. Так постепенно доберёмся до момента времени, когда источник только что произвёл возбуждение колебаний.

Методы миграции, основанные на погружении волновых полей или путешествиям во времени, относятся к *конечно-разностным методам миграции* и будут рассмотрены в следующих лекциях.

Еще раз отмечаем, что для проведения миграции, независимо от метода, необходимо знать распределение скоростей в среде. Без данных о скоростях расчёт миграции невозможен.

Итак, мы описали основные искажения, которые возникают на временных разрезах, и ввели модель взрывающихся границ, чтобы провести физическую аналогию с наблюдениями на берегу моря. Это помогло описать задачу миграции в терминах нахождения координат и параметров источника волн. *Воскресенский («Построение сейсмических изображений»)* вообще предлагает рассматривать миграцию как «процесс, обратный процессу распространения волн». Затем мы вкратце описали несколько способов миграции: путём суммирования по гиперболам (аналог миграции Кирхгофа) и путём продолжения волнового поля вглубь Земли или назад во времени (принцип конечно-разностной миграции).

Подробнее:

Yilmaz “Seismic data analysis”, стр.481 – 487

V. Понятие о миграции как о суперпозиции по окружностям

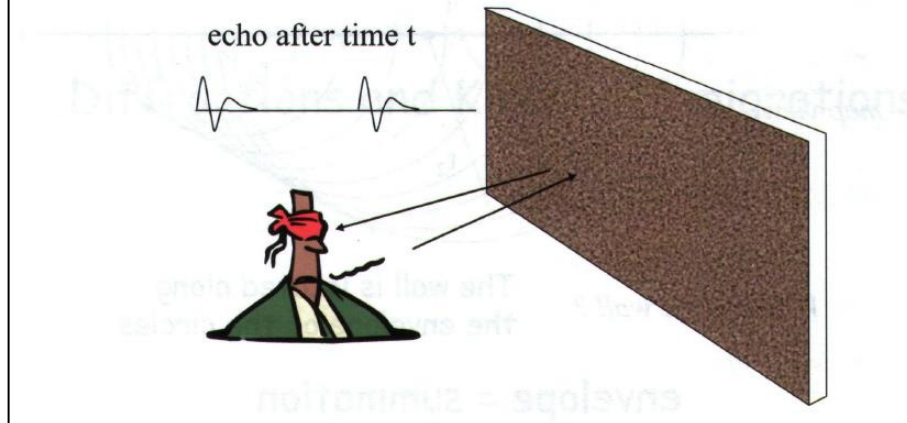
Вернемся к миграции Кирхгофа и взглянем на неё под другим углом.

Рассмотрим отражение с амплитудой A_0 , пришедшее на сейсмоприёмник на времени t_0 . Проблема: мы, находясь на поверхности земли, не знаем точно, откуда именно пришёл импульс: от горизонтальной или наклонной границы или от дифрактора. В общем случае этот импульс – результат интерференции всего перечисленного. Миграция нам должна с этим помочь: сказать, как и где расположены границы и дифракторы, породившие отражения. Удобно рассмотреть задачу на примере «слепого геофизика», который слышит эхо от

стены и ему очень нужно понять, где стена находится. (рис.ниже). Он рассуждает так:

1. Импульс на времени t_0 мог прийти откуда угодно, всё что мы знаем – это время его прихода
2. Зная скорость распространения волны, вычислим расстояние от наблюдателя, на котором находится стена (т.е. граница или дифрактор). Расстояние даёт нам окружность (изохрону), на которой где-то (неизвестно, где) расположена стена.
3. Перемещаясь в сторону и сделав серию измерений, наблюдатель может установить положение отражающего объекта (см.рис.).

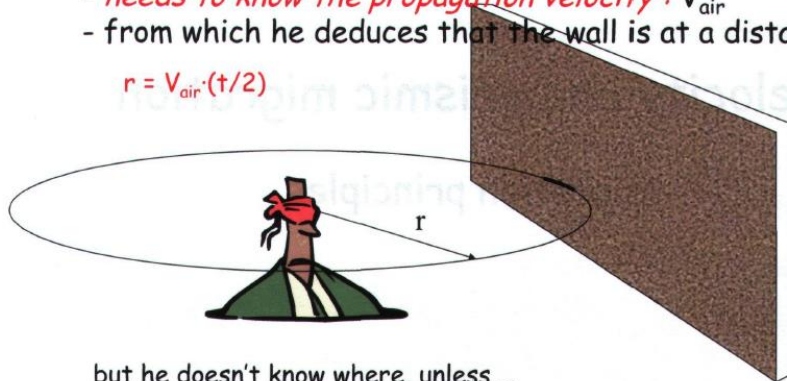
The blind geophysicist's reflection problem: Where is the wall ?



Where is the wall ? (a strong AI contrast !)

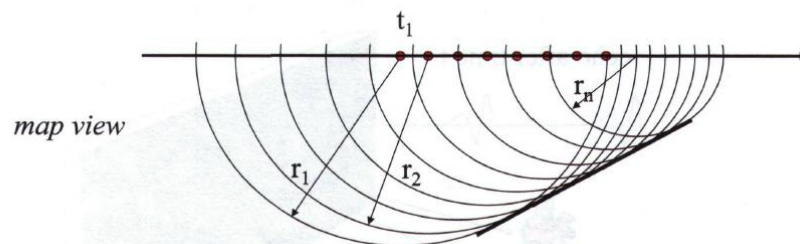
- he knows the propagation time
- *needs to know the propagation velocity* : V_{air}
- from which he deduces that the wall is at a distance r

$$r = V_{\text{air}} \cdot (t/2)$$



but he doesn't know where, unless ...

... he starts moving



Where is the wall ?

The wall is located along the envelope of the circles

envelope = summation

'circles' are wavefronts; they are more complex curves in heterogeneous earth

Этот метод работает и для сейсмических задач. Чтобы отмигрировать линию на временном разрезе, соответствующую границе, достаточно приложить к каждой точке этой линии соответствующую окружность.

Применительно к сейсмическим задачам этот метод используют так:

1. Выберем отсчёт на временном разрезе с координатами (x, t) . Пусть его амплитуда равна A
2. Рассчитаем изохрону – геометрическое место всех точек, где может находиться отражающая граница или дифрактор, породившие импульс. В нашем случае с постоянной скоростью это будет просто полуокружность с радиусом $r = vt/2$. Если скорость не постоянна, форма изохроны будет более сложная.
3. Распределим равномерно амплитуду A вдоль этой изохроны
4. Повторим эту операцию для всех трасс – получим мигрированный разрез. Границы отобразятся там, где располагаются огибающие окружностей. В местах, где границ нет, произойдет несинфазное суммирование и амплитуды уменьшатся.

Отметим, что каким бы методом ни рассчитывалась миграция Кирхгофа – суммированием вдоль гипербол или суперпозицией по изохронам – результат будет эквивалентным. Это проще всего продемонстрировать на примерах.

VI. Примеры.

Пример 1. Дано: наклонная граница на временном разрезе (нарисована ручкой)

Задача: провести миграцию границы с использованием циркуля и линейки. Временной масштаб равен глубинному ($V = 2$ км/с)

Решение: построить окружность с радиусом t_0 для каждой точки границы. Огибающая этих окружностей даст истинное положение границы.

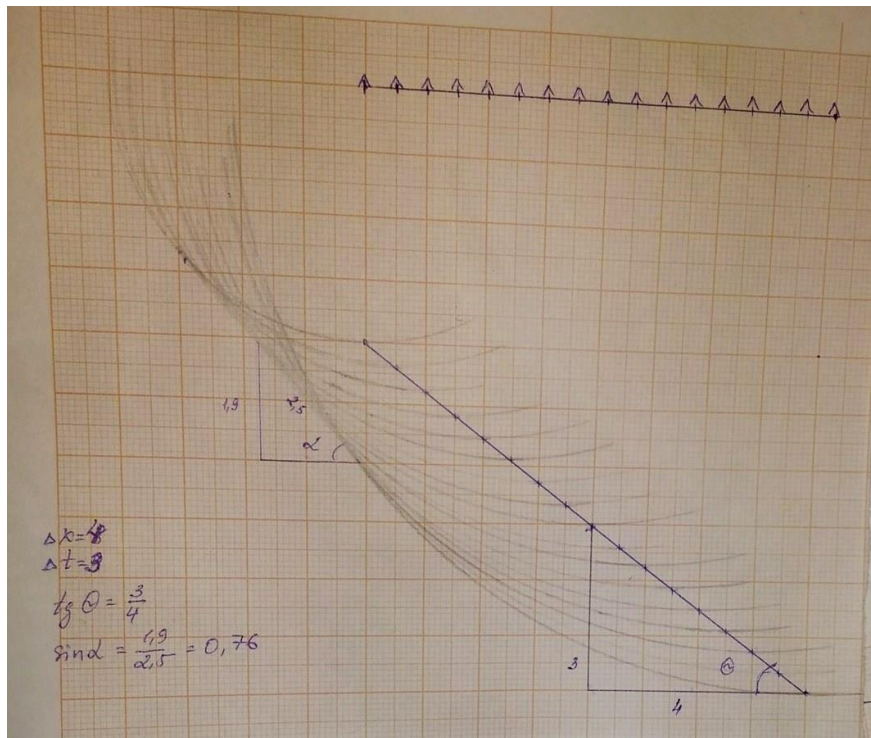


Рис. Пример1

Пример 2. Дано: годограф дифрагированной волны на временном разрезе (нарисован ручкой)

Задача: см. пример 1

Решение: построить окружность с радиусом t_0 для каждой точки годографа. Точка пересечения этих окружностей даст истинное положение дифрактора

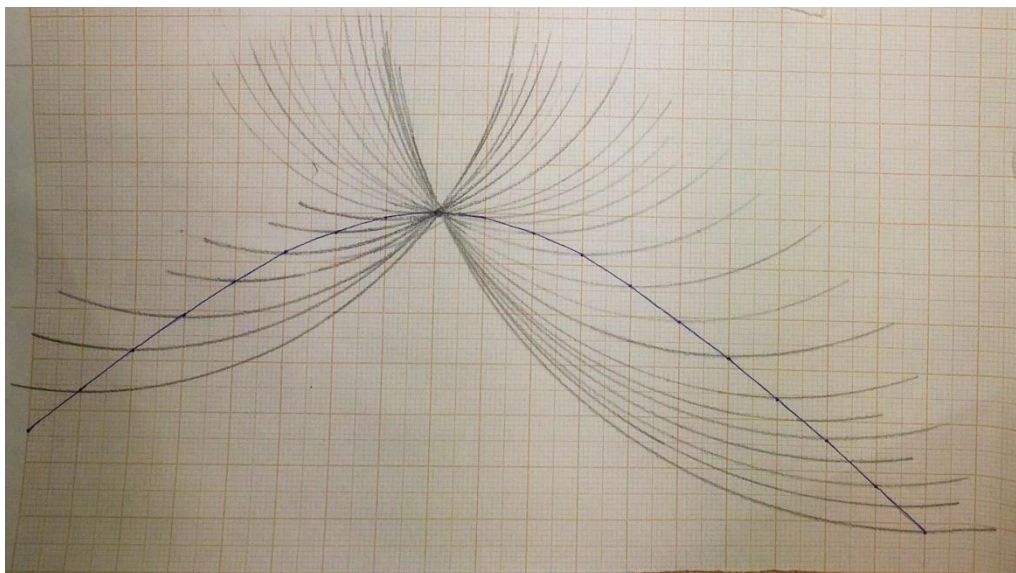


Рис. Пример 2

Обратить внимание: на примере 2 легко проверить, что суперпозиция по окружностям и суммирование по гиперболам дадут эквивалентный результат.

Пример 3.

Дано: модель среды с одной наклонной границей и двумя дифракторами (А)

Задача: а) рассчитать модель временного разреза б) получить мигрированное изображение

Решение: рассмотрим отражающую границу как совокупность дифрагирующих элементов. Каждый из них породит на временном разрезе дифрагированную волну, но для близко расположенных дифракторов они сольются в одну границу (Б, В).

Приложим соответствующую окружность (изохрону) к каждой границы и видимой дифрагированной волны на разрезе (Г). Дифракторы проявятся как места пересечения окружностей, границы – как их огибающие. Сравним с исходной моделью (Д).

Пример 4.

Дано: временной разрез с двумя «петлями»

Задача: построить границу на мигрированном разрезе

Решение: аналогично примеру 3б. См.рис.ниже.

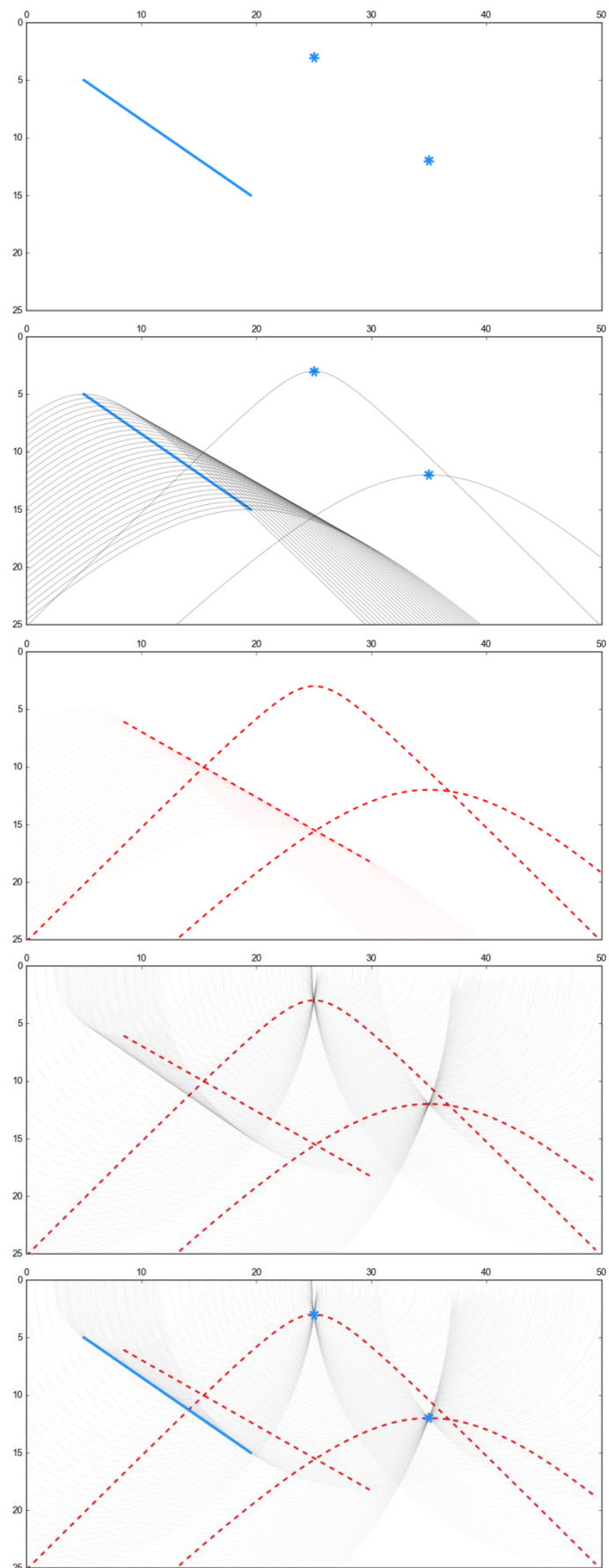


Рисунок . Пример 3.

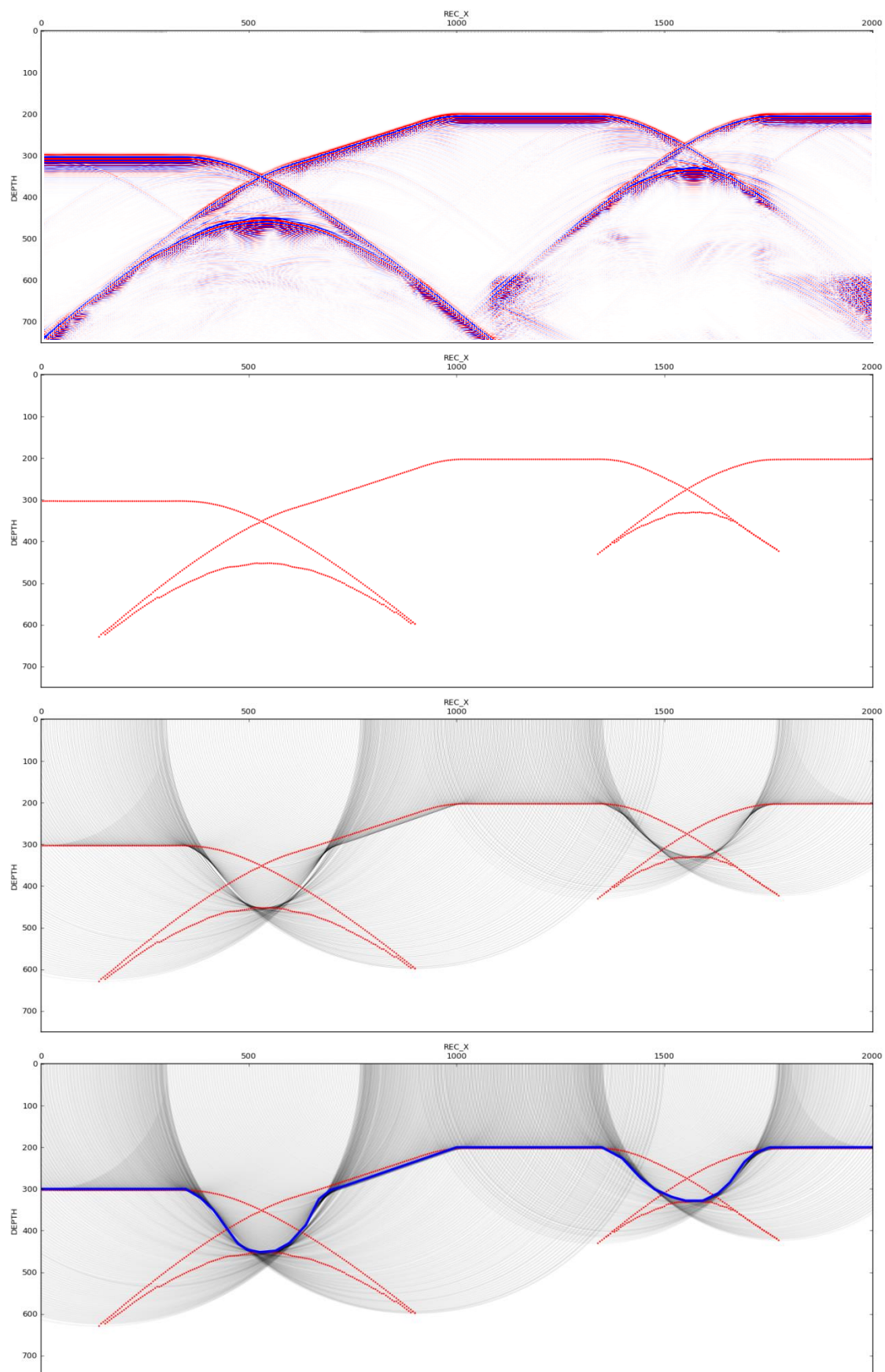


Рисунок . Пример 4.

VII. Уравнение миграции

Пытливый читатель наверняка уже и сам может сформулировать, в чём состоят отличия границ на временном разрезе от границ на мигрированном изображении. Тем не менее, на всякий случай обозначим их. Итак, в результате миграции границы становятся:

- Более крутыми
- Более короткими
- Смещёнными по восстанию.

Кроме того, мнимая и реальная границы пересекаются в точке, расположенной на поверхности.

Количественно эти изменения можно описать так называемым *уравнением миграции*. Его легко вывести из рисунка ниже.

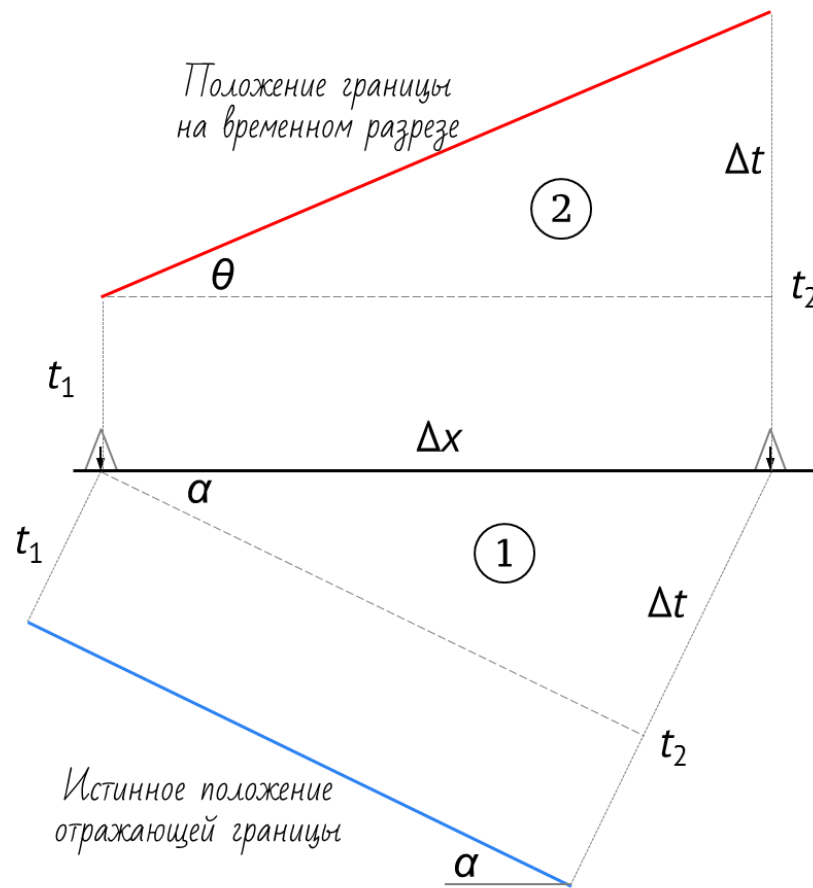


Рисунок . . .

Рассмотрев треугольники с номерами 1 и 2, делаем вывод, что $\Delta t / \Delta x = \sin \alpha = \operatorname{tg} \theta$.

Что будет для случая, когда скорость не равна 2 км/с?

Заключение

1. Сейсмическая миграция – процедура, позволяющая устранять искажения, вызванные дифракцией и сейсмическим сносом, с временных разрезов.
2. Наиболее широко применяемый метод миграции – миграция Кирхгофа. В её основе лежит либо суперпозиция (распределение) амплитуд на временном разрезе по изохронам, либо суммирование амплитуд вдоль дифракционных квазигипербол. Эти две операции эквивалентны.
3. Для того, чтобы провести миграцию, надо рассчитать форму изохрон или гипербол для этого необходимо знать скоростную модель среды. Иными словами, без данных о скоростях сделать миграцию невозможно.