

*В. В. Карстен*¹✉

Неоднозначности при определении наклона отражающих границ по данным непродольного ВСП

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им А.А.Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: karstenvv@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Анализ алгоритма построения изображения показывает, что при ВСП с выносным источником всегда существует такой критический наклон отражающей границы, что её изображение не может быть получено. Кроме того, для каждого не равного критическому наклона отражающей границы всегда существует другой наклон, при котором географы отражённой волны совпадают и эти два наклона при построении изображения не различимы.

Ключевые слова: непродольное ВСП, сейсмическое изображение

*W. V. Karsten*¹✉

Ambiguity in resolving reflector dip angle from offset VSP data

¹ Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: karstenvv@ipgg.sbras.ru

Abstract. Analysis of the VSP imaging algorithm demonstrates that in offset VSP geometry there always is a specific critical reflector dip angle that this reflector cannot be imaged altogether. Moreover, every dip angle other than critical has its different counterpart with similar reflected wave traveltimes, and these two dips cannot be distinguished in VSP imaging.

Keywords: offset VSP, seismic imaging

Введение

Наблюдения ВСП с выносных ПВ освещают среду на значительном, в сравнении с каротажными методами, удалении от скважины, что даёт возможность получить изображение околоскважинного пространства [1]. Однако, данные ВСП на суше, как правило, получаются для весьма небольшого числа источников, что затрудняет применение для этого миграционных преобразований.

Радиус r зоны Френеля для отражённой волны можно оценить [2] как

$$r \approx \sqrt{\frac{H\lambda}{2}}, \quad (1)$$

где H – глубина отражающей границы; λ – длина волны.

Для частоты $f = 50$ Гц и скорости $v = 3000$ м/с длина волны $\lambda = \frac{f}{v}$ составит 60 м, и радиус зоны Френеля на глубине $H = 3000$ м будет около 300 м, что срав-

нимо с размером освещённой области. Поэтому применение миграционных преобразований, разработанных для метода ОГТ, даёт весьма интенсивные артефакты, связанные с размытием энергии по эллипсам равных времен [3,4].

Представление о границах как о совокупности объектов, рассеивающих падающую волну равномерно во все стороны, работает только тогда, когда имеется достаточно высокая кратность системы наблюдения. В случае ВСП, при наличии одного пункта возбуждения на профиле, кратность системы наблюдения равна единице, и для подавления артефактов миграции необходимо использование априорной информации о свойствах границ.

Устранения артефактов, связанных с размытием энергии, можно добиться путём ограничения апертуры миграции, вплоть до отказа от суммирования [1]. Такая процедура сводится к взаимно-однозначному отображению разреза околоскважинного пространства на сейсмограмму ВСП, и иногда называется лучевой миграцией. Это название представляется неверным, поскольку миграция является контактным отображением [5], которое не даёт взаимно-однозначного соответствия. Предпочтительнее называть такую процедуру преобразованием ВСП-ОГТ [1], или изображением разреза околоскважинного пространства [4]. Для выполнения этой процедуры необходимо задать скоростную модель среды, которая получается методом кинематической инверсии данных ВСП [1].

Алгоритм построения изображения

Совместить построение изображения и уточнение скоростной модели можно в алгоритме с ограничением апертуры путём задания диапазона допустимых углов наклона отражающих элементов [4], разработанном в ИНГГ СО РАН и реализованном в обрабатывающей системе ВСП.

Изображение строится последовательно для всех точек двумерной сетки, при этом в каждом узле сетки задаётся значение угла наклона отражателя. При ненулевой апертуре задаётся диапазон возможных углов. Построение изображения включает в себя трассировку луча через горизонтально-слоистую скоростную модель до точки отражения методом пристрелки [6], отражение, соответствующее отражению от наклонной границы с нормалью, лежащей в заданном ограниченном диапазоне, и трассировку отражённого луча. Данная схема легко обобщается для случая построения изображения по отражённым обменным волнам путём задания двух различных скоростных моделей для падающего и для отражённого луча.

При задании диапазона допустимых значений углов нормали отражающего элемента отображаемое значение накапливается в соответствующем узле сетки. Однако практика обработки данных ВСП показала, что задание ограниченного диапазона углов, не позволяя провести контактное отображение, приводит лишь к заглаживанию изображения отражающих границ (рис. 1). Такое заглаживание можно выполнить более контролируемым образом путём направленного суммирования поля отражённых волн, или в $f-k$ области, и задание диапазона углов на практике признано неэффективным. При отказе же от суммирования заданный угол отражения однозначно определяет глубину и время на сейсмограмме.

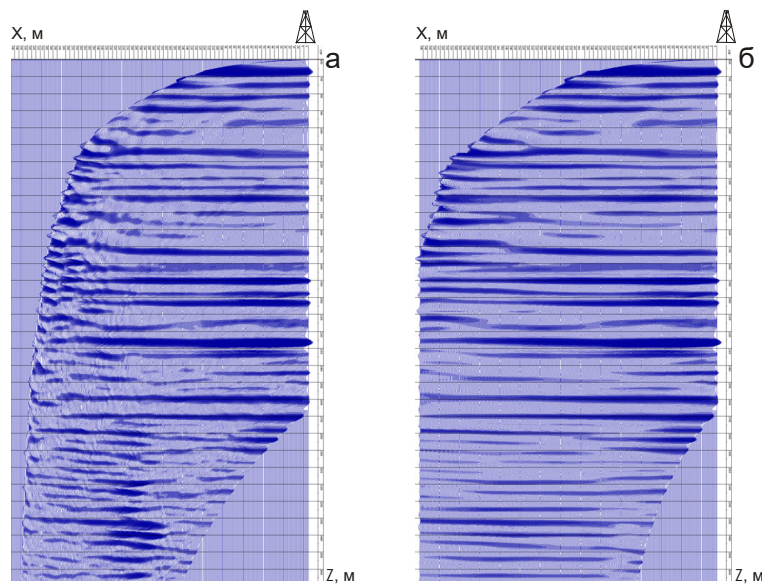


Рис. 1. Сопоставление двух режимов построения разреза: а) без суммирования по углам отражения; б) суммирование в диапазоне углов $\pm 2^\circ$

Анализ алгоритма

Для анализа алгоритма построения изображения рассмотрим модель с одной наклонной границей, в которой проведены наблюдения ВСП с выносного ПВ в вертикальной скважине (рис. 2).

Начало координат поместим на устье скважины, ось x направим на ПВ, ось z вниз. По анализу падающих волн определена глубина границы в скважине z_0 и установлена однородность вышележащего слоя со скоростью v . Удаление источника x_s , глубина приёмника z_g лежит в интервале от нуля до глубины границы. Наклон границы α отсчитываем от горизонтали по часовой стрелке.

Повернём теперь систему координат, чтобы ось x' была параллельна границе. В этой системе источник имеет координаты $x'_s = -x_s \sin \alpha$ и $z'_s = x_s \cos \alpha$, приёмник – $x'_g = z_g \sin \alpha$ и $z'_g = z_g \cos \alpha$, а граница горизонтальна и имеет глубину $z'_0 = z_0 \cos \alpha$.

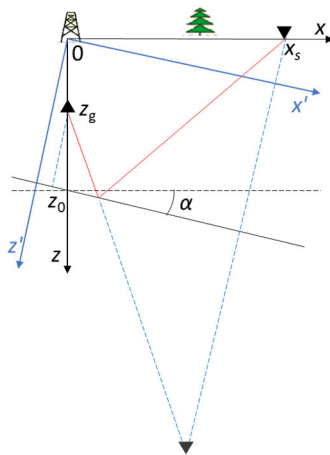


Рис. 2. Анализ алгоритма построения изображения

В этой системе координат легко найти положение мнимого источника и рассчитать время пробега t отражённой волны

$$v^2 t^2 = \left(x_s' - x_g' \right)^2 + \left(2z_0' - z_g' - z_s' \right)^2, \quad (2)$$

Подставив значения в новой системе координат, после преобразований получим:

$$v^2 t^2 = x_s^2 + z_0^2 + \left(z_0 - z_g \right)^2 + 2 \left(z_0 - z_g \right) \left(x_s \cos \alpha + z_0 \sin \alpha \right). \quad (3)$$

Эта формула имеет понятный геометрический смысл, если заметить, что треугольники ABS и ABS^+ (рис. 3) равны, и поэтому мнимые источники при различных углах наклона отражающей границы располагаются на окружности. Центр её находится в точке пересечения границы скважины, а радиус равен расстоянию до источника $x_s^2 + z_0^2$.

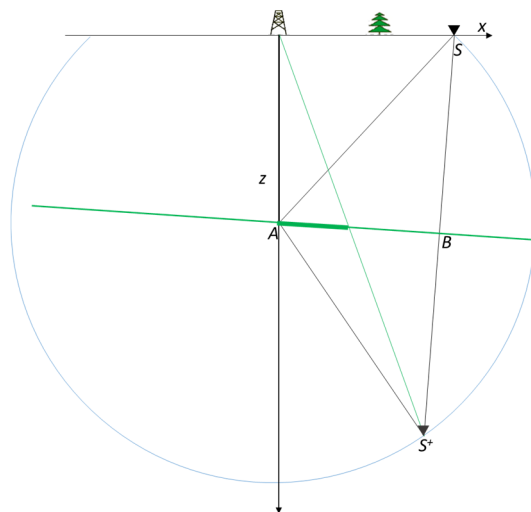


Рис. 3. Расположение мнимых источников на окружности

Расположение мнимых источников на окружности означает, что для заданного положения источника существует такой критический угол наклона границы $\alpha^* = \frac{1}{2} \arctg \frac{x_s}{z_0}$, при котором мнимый источник S^* располагается точно под скважиной (рис.4). Лучи, попадающие во все приёмники, отражаются в одной точке и направлены вертикально вдоль ствола скважины, и изображение такой границы, показанной на рисунке 4 красным, не может быть получено. При этом время прихода отражённой волны во все приёмники максимально.

Критическим углом наклона вся окружность разделяется на две ветви. При углах наклона меньше критического изображение строится на интервале между

скважиной и источником, при углах больше критического – за скважиной. Время прихода отражённой волны в каждой ветви монотонно уменьшается по мере удаления от критического угла.

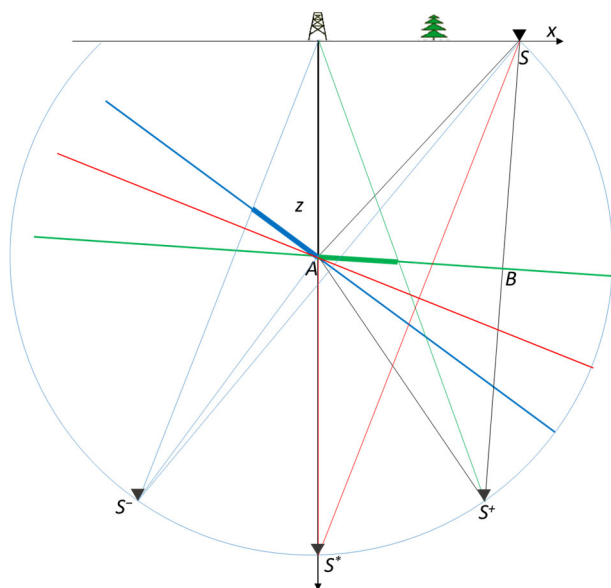


Рис. 4. Построение изображения при различных наклонах отражающей грани

При этом для каждого положения границы с углом наклона меньше критического найдётся сопряжённое ему положение с углом наклона больше критического, что мнимые источники S^+ и S^- будут расположены симметрично относительно вертикали. На рисунке 4 эти положения показаны синим и зелёным. В силу симметрии, времена на всех приёмниках для этих двух различных наклонов границы будут совпадать, и, таким образом, эти два положения границы будут не различимы по данным отражённой волны. Для их различения можно привлечь априорную информацию, провести анализ времён регистрации кратных отраженных волн, поскольку у них положения мнимых источников будут по-разному смещены по горизонтали [7] и уже не будут симметричны, или использовать дополнительный источник с другим выносом. Кроме того, различить эти положения границы можно по анализу знака отражения на горизонтальной компоненте.

Заключение

Таким образом, показано, что при ВСП с выносным источником всегда существует такой критический наклон отражающей границы, что её изображение не может быть получено. Кроме того, для каждого не равного критическому наклона отражающей границы всегда существует другой наклон, при котором географы отражённой волны совпадают и эти два наклона при построении изображения не различимы.

Для разрешения этой неоднозначности можно использовать априорную информацию или усложнять методику работ. Можно также использовать горизонтальные компоненты отражённых волн, или кратные отражения, при условии их

выделения в данных. Кроме того, необходимо разработать итерационный подход к подбору углов наклона.

Благодарности

Эта работа посвящена памяти моего учителя С.Б. Горшкалёва.

Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта ФНИ № FWZZ-2022-0022 «Разработка численных методов и алгоритмов, ориентированных на высокопроизводительные вычислительные системы, для моделирования и инверсии геофизических полей: от петрофизики к сейсмологии».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шехтман Г.А. Вертикальное сейсмическое профилирование. – М: EAGE Геомодель, 2017. – 286 с.
2. Yilmaz Ö. Seismic data analysis: processing, inversion, and interpretation of seismic data. – Tulsa, OK : SEG, 2001. – Vol. I. – 1000 p.
3. Grech M.G.K., Lawton D.C., Cheadle S. Integrated prestack depth migration of vertical seismic profile and surface seismic data from the Rocky Mountain Foothills of southern Alberta, Canada // *Geophysics*. – 2003. – Vol. 68 – P.1782-1791.
4. Карстен В.В., Черноиванов А.И. Построение изображения по данным ВСП путём Кирхгофской миграции с контролем угла отражателя. – К эффективности через сотрудничество: Материалы международной конференции геофизиков и геологов. – Тюмень, 2007.
5. Гольдин С.В. Геометрический подход к сейсмовидению: реализация контактных отображений // *Сибирский журнал вычислительной математики*. – 2003. – Т. 6. – № 4 – С. 323-345.
6. Карстен В.В. Быстрое решение двухточечной задачи для горизонтально-слоистой среды. Интерэкспо ГЕО-Сибирь: XV Международный научный конгресс: Сборник материалов в 9 т. – Новосибирск : СГУГиТ, 2019. – Т. 2. – № 3. – С. 131-134.
7. Боганик Г.Н., Гурвич И.И. Сейсмическая разведка. – М: Недра, 1980. – 551с.

© В. В. Карстен, 2025