



УДК 550.834

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ПОЛЕВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ МОГТ 3D

А. П. Сысоев

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Анализ параметров системы полевых наблюдений 3D выполняется с позиции миграции Кирхгофа. На первом шаге преобразования суммированием по годографу дифрагированной волны по выборке трасс общего пункта взрыва решается задача выделения сигналов, отраженных от заданных точек среды (точек изображения). Эффективность интерференционной системы определяется параметрами расстановки приборов, формирующих приемную антенну. На втором шаге осуществляется суммирование по выборкам трасс общих точек изображения, где эффект накапливания сигналов определяется плотностью распределения источников возбуждения. Варьируя параметрами распределения источников и приемников, можно конструировать системы наблюдения, эквивалентные для решения задач миграции, нократно различающиеся по количеству физических наблюдений. Обсуждается взаимосвязь шага общих срединных точек системы полевых наблюдений (бинирование наблюдений) и шага пространственной дискретизации при построении изображений среды (бинирование изображений).

Ключевые слова: 3D сейсморазведка, системы наблюдений 3D, миграция, зона Френеля, Гауссовы пучки.

SUBSTANTIATION OF PARAMETERS OF THE 3D CDP FIELD OBSERVATION SYSTEM

A. P. Sysoev

Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

The substantiation of parameters of the 3D observation system is considered from the perspective of the Kirchhoff migration. At the first step of this transformation, on the basis of diffraction transformation on a gather of CSP, the problem of wavelet extraction reflected from specified points of the medium (image points) is solved. The characteristic of the directivity of this transformation is determined by parameters of the arrangement of devices. At the second step, summation is performed by gathers of the common image point (CIP). The distribution density of the observation system sources determines the stacking fold by CIP. In the process of selecting survey parameters, the comparative analysis of equivalent observation systems with the same data properties for the migration task, but with different parameters of the observation system, is of great important. The relationship between the step of common midpoints of the observation system and the step of traces of resulting images of the medium is discussed. The Gaussian beam migration algorithm is considered as a method for solving the problem of constructing an image of the medium that correctly takes into account the irregularity of the initial data.

Keywords: 3D seismic survey, 3D observation systems, migration, Fresnel region, Gaussian beams.

DOI 10.20403/2078-0575-2021-3-40-47

Мотивом для написания статьи послужило ознакомление с результатами отчета экспертной геофизической компании на тему «Расчет оптимальной системы наблюдения сейсморазведочных работ МОГТ 3D с использованием сейсмогеологического моделирования» для одного из участков Западной Сибири. В предшествующие годы на смежной площади были проведены работы с параметрами: шаг линий взрыва/приема 400/300 м, шаг ПВ/ПП 50/50 м, число активных каналов в линии 128. Экспертами по результатам полноволнового конечно-разностного моделирования, анализа и обработки синтетических сейсмограмм в качестве оптимальной рекомендована система наблюдений с параметрами 250/250 м и 50/50 м, 156 каналов соответственно. При выполнении работы авторы создали виртуальную действительность и, не особенно заботясь о соответствии реального и виртуального волновых полей, сформировали критерии сравнительной оценки эффективности систем наблюде-

ния. Для задачи выделения сигнала предложенная система наблюдений очевидно лучше предшествующей. Но такова особенность задачи обработки избыточных систем: чем больше объем исходных данных, тем теоретически устойчивее любые численные оценки параметров поля. Более сложный вопрос, который невозможно решить модельными экспериментами, освещен экспертами не был: насколько улучшается результат по сравнению с ранее проведенными работами и окупается ли при этом увеличение стоимости полевых работ.

Численные значения параметров, характеризующих ключевые элементы технологии сейсморазведочных работ МОГТ 3D, постепенно изменяются в сторону увеличения плотности сейсмических наблюдений. Увеличиваются число используемых каналов, кратность наблюдений, число линий приема и уменьшаются значения параметров, характеризующих расстояния между срединными точками (размером бина), которые определяются шагом



пунктов взрыва по линиям возбуждений и пунктов приема по линиям приема. Так, в работе [2] отмечено: «...если на производстве станут реально достижимыми параметры сейсморазведочных работ... например, размер бина – 10×10 м, кратность 250–400, ежесуточная производительность на уровне 800–1500 ф. н., то и такие работы будут востребованы практикой. Результаты таких сейсморазведочных работ будут идеальными с точки зрения требований к их информативности и качеству и могут еще долгие годы (ближайшие 10–15 лет) служить маяком на пути совершенствования технологии сейсморазведочных работ».

Системное представление о тенденциях изменения методики полевых сейсморазведочных работ с целью построения высокоразрешающего изображения среды и достоверной оценки сейсмических атрибутов представлено в работе [9]. Рекомендуются:

– увеличивать плотность ПВ с использованием точечных источников возбуждения, а для обеспечения высокой производительности съемки – применять высокопроизводительные системы отстрела;

– использовать одиночные приборы (или установленные в точку) с соответствующим увеличением каналов станции.

Из сказанного следует, что в качестве наиболее вероятного направления совершенствования технологии МОГТ 3D на ближайшие 10–15 лет рассматривается повышение плотности съемки и, как следствие, интенсификация процесса проведения сейсморазведочных работ. И это направление контролируется производителями геофизического оборудования, которые однозначно заинтересованы в постоянной модернизации технических средств.

Пожалуй, единственной российской публикацией, в которой рассматривается противоположная точка зрения на методику сейсмической съемки 3D, является статья [5]. В ней, также со ссылкой на зарубежный опыт, формулируется, что «экономичная 3D-сейсморазведка с умеренной плотностью наблюдений становится повседневной практикой передовых компаний».

При обосновании параметров системы наблюдения необходимо учитывать требования к данным, возникающие при решении трех основных задач:

1. Оценка параметров структурно-скоростной модели верхней части разреза на основе интерпретации волн первых вступлений.

2. Подавление регулярных волн-помех с линейными годографами.

3. Подбор скоростной модели и построение изображений.

Как отмечено в [5], особенность проблемы обоснования параметров системы наблюдения состоит в том, что для ее решения необходимо иметь в распоряжении априорную информацию в виде результатов предшествующих работ, на основании

которых можно определить основные характеристики полезной составляющей и помех волнового поля. Далее на основе анализа волнового поля и проблем, возникающих при обработке сейсмических данных, требуется сформулировать основные требования к системе полевых наблюдений. Даже на основе хорошо изученной структурно-скоростной модели среды невозможно определить требования к системе полевых наблюдений на основе математического моделирования, поскольку помехи являются наиболее сложно моделируемой составляющей волнового поля.

Требования к построению изображения

Прежде чем рассматривать вопросы обоснования параметров систем наблюдения, целесообразно изучить требования к параметрам системы изображения. Для 3D наблюдений система изображения определяется значениями шага дискретизации куба временных (глубинных) разрезов по времени (глубине) и двум координатам плоскости наблюдения. Шаг дискретизации на плоскости определим как размер *бина изображения*. При суммировании по сейсмограммам общих срединных точек (ОСТ) бинирование результатов суммирования определяется шагом ОСТ системы наблюдения. При построении изображений миграционными преобразованиями координаты результирующих трасс не привязаны к сейсмограммам ОСТ и параметрам системы наблюдения.

Обсудим вопрос о том, как обосновать размер бина изображения на выходе процедуры миграции, причем важна теоретическая оценка этого параметра.

Эта проблема непосредственно связана с разрешающей способностью МОВ по горизонтали и трактуется как эффективная ширина отображения в волновом поле дифрагирующей точки после выполнения миграции. Наиболее популярна точка зрения, согласно которой ширина изображения дифрагирующего объекта определяется половиной длины волны ($\approx 0,5\lambda$) [5]. Для получения такой оценки рассчитывается годограф дифрагированной волны от точки дифракции и оценивается результат свертки сигнала по годографу дифрагированной волны с последовательным смещением по горизонтали точки восстановления изображения относительно дифрактора. Сомнения в качестве такой оценки возникают в силу нефизичности моделирования поля точечного дифрагирующего объекта по принципам геометрической сейсмики. В работе [5] также приведена другая оценка предельной ширины точки дифракции, отображаемой в мигрированном волновом поле:

$$d = \lambda \sqrt{1 + (h/L)^2}. \quad (1)$$

Здесь λ – преобладающая длина волны; h – глубина; L – апертура миграции.

Оценим значение этой величины. При скорости 3000 м/с, преобладающей частоте 50 Гц, длине волны 60 м и соотношении $h/L = 1,5$ линейный размер отображения точечного объекта составляет около 70 м. Следуя этой оценке, для изображения непрерывного объекта как совокупности дифрагирующих площадок шаг дискретизации по латерали $\Delta = d/2$ можно считать достаточным.

Для получения качественного визуального изображения наклонных отражающих границ сдвиг по фазе соседних трасс ограничим четвертью видимого периода. Соответственно, на размер бина изображения Δ накладывается дополнительное условие:

$$\frac{\Delta}{v_k} < T/4 \Rightarrow \Delta < \frac{Tv}{4 \sin \varphi} = \frac{\lambda}{4 \sin \varphi}.$$

Здесь v_k – кажущаяся скорость волны; T – видимый период сигнала. Для приведенных параметров модели среды и угла наклона границы 30° последнее условие ограничивает размер сетки изображения $\Delta < 30$ м. Размер бина изображения можно уменьшать до сколь угодно малой величины, но если опираться на приведенные выше критерии, то уменьшение шага построения изображений относительно представленных оценок не увеличивает детальность изображения по горизонтали. Так, из практики известно, что при интерпретации кубов 3D, полученных с размером бина изображения 12,5×6,25 м, для устранения избыточной плотности данных выполнялось прореживание изображений до размеров сетки 25×25 м.

Следуя принципу Гюйгенса – Френеля определим, что формирование сейсмического сигнала сводится к интерференционному накапливанию сигналов вторичных источников в пределах первой зоны Френеля, радиус которой определяется выражением [5]

$$r = \sqrt{\lambda h/2}. \quad (2)$$

Формула (2) получена для волнового поля центровых лучей. Первая зона Френеля в сейсморазведке определяется как область границы вокруг точки зеркального отражения, которая определяет максимальную накопленную энергию отраженного сигнала [10].

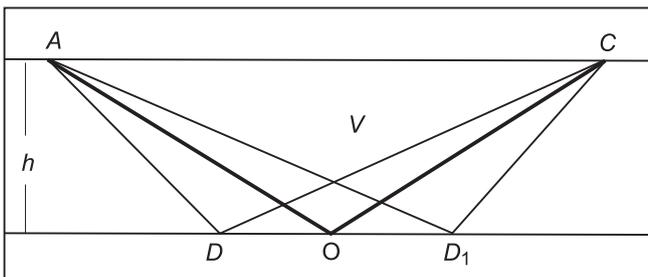


Рис. 1. Схема формирования интерференционного сигнала (v – скорость в слое, A и C – точки возбуждения и приема отраженного сигнала)

Схема лучей, поясняющая принцип формирования интерференционного сигнала для ненулевых удалений ПП–ПВ, приведена на рис. 1 (A и C – точки возбуждения и приема отраженного сигнала).

Согласно принципу Гюйгенса все точки отражающей границы являются источниками вторичных волн. Разность времени прохождения волны по зеркально отраженному лучу AOC и лучей ADC и AD_1C , образованных вторичными источниками, определяет условие интерференции двух сигналов. Если разность времени по лучам AOC и $ADC = AD_1C$ составляет половину кажущегося периода или разность пути p – половину длины волны

$$p = ADC - AOC = \sqrt{h^2 + (l/2 - r)^2} + \sqrt{h^2 + (l/2 + r)^2} - \sqrt{4h^2 + l^2} = \lambda/2, \quad (3)$$

то сигналы приходят в противофазе. Этим условием определяется радиус первой зоны Френеля.

Пусть $l = AC$ – удаление ПП–ПВ; $r = DO = D_1O$ – радиус первой зоны Френеля. Необходимо определить значение r , удовлетворяющее условию (3).

Определим разность хода лучей, используя разложение правой части уравнения (3) в ряд Тейлора в окрестности $r = 0$ и ограничиваясь полиномом второй степени:

$$p \approx r^2 \left(h^2 + (l/2)^2 \right)^{-1/2} = \lambda/2 \Rightarrow \Rightarrow r = \sqrt{\lambda h/2} \left(1 + k^2 \right)^{1/4}, \quad k = l/(2h). \quad (4)$$

С увеличением удаления ПП–ПВ, точнее с увеличением угла отражения, размер зоны Френеля возрастает. На рис. 2 представлены графики, характеризующие изменение «радиуса» зоны Френеля в зависимости от глубины отражающей границы для нормального падения r_0 и удаления ПП–ПВ r_1 , составляющего 1,5 глубины ОГ (скорость изменялась линейно от 1600 до 3900 м/с). Для удалений ПП–ПВ, используемых в сейсморазведке МОВ, радиус зоны Френеля увеличивается, но не более чем

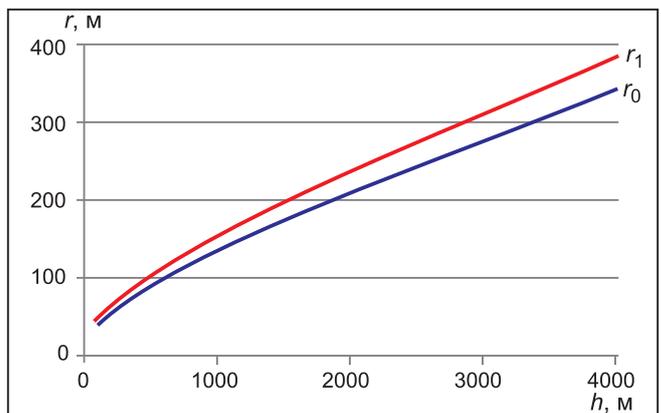


Рис. 2. Зависимость радиуса зоны Френеля от глубины отражающего горизонта

на 15 % относительно расчетов, выполненных для центрального луча по формуле (2).

Плотность распределения ПВ и ПП

Значение шага ПВ по линиям возбуждения является ключевым параметром системы наблюдения, определяющим производительность сейсмических работ 3D. Как уже отмечено, стремление уменьшить шаг ПВ с одновременным выполнением условия высокой производительности съемки – причина применения технологий типа поочередного возбуждения сигналов (flip-flop), перекрывающихся сигналов (slip-sweep), независимого возбуждения сигналов (ISS) и их комбинаций [9].

Роль параметров расстановки регистрирующих приборов рассмотрим на примере алгоритма миграции по сейсмограммам ОПВ. При фиксированном положении источника изображение произвольной точки среды (точки изображения) с координатами (x_0, y_0, z_0) «собирается» из амплитуд волнового поля по кинематике дифрагированной волны, сформированной от заданной точки. Если точка (x_0, y_0, z_0) принадлежит отражающей границе, то точка выхода луча на поверхность наблюдения (x_r, y_r) есть точка касания годографов отраженной и дифрагированной волны. Аналогично оценке радиуса зоны Френеля можно выполнить оценку радиуса зоны интерференционного накопления сигнала в точке визуализации по условию, что расхождение годографов отраженной и дифрагированной волн не превышает половины видимого периода сигнала. Оценим величину эффективной зоны приема (ЗП) для горизонтальной отражающей границы.

В соответствии с принципом Гюйгенса каждой точке временного разреза (точке визуализации) с координатами x_m, h поставим в соответствие семейство лучей дифрагированной волны с координатами источника x_s и приемника x_r . Время регистрации дифрагированной волны определяется уравнением годографа ОПВ, включающим две составляющие: время пробега падающей и восходящей волн (так называемое уравнение двойного квадратного корня [3]).

Из условия, что разность времени (τ) регистрации дифрагированной и отраженной волны составляет половину преобладающего периода сейсмического сигнала T

$$\tau(l, r) = t_{\text{диф}}(x_m - x_s, r = x_r - x_m) - t_{\text{отр}}(x_r - x_s) \quad (5)$$

и ограничиваясь второй степенью разложения в ряд Тейлора в окрестности $r = 0$, получим оценку радиуса зоны интерференционного приема. Строго говоря, полученные оценки нельзя назвать радиусом, поскольку последние зависят от азимутального угла направления радиуса относительно лучевой плоскости. Далее приведены формулы для «радиуса» зоны приема по линии приемник – источник r_1 и в перпендикулярном направлении r_2 :

$$r_1^2 \approx TV\sqrt{4h^2 + l^2} \left(1 + \frac{l^2}{4h^2} \right) = \lambda\sqrt{4h^2 + l^2} \left(1 + \frac{l^2}{4h^2} \right); \quad (6)$$

$$r_2^2 \approx TV\sqrt{4h^2 + l^2} = \lambda\sqrt{4h^2 + l^2}.$$

Для центрального луча формула упрощается:

$$r_0 \approx \sqrt{2TVh} = \sqrt{2\lambda h}. \quad (7)$$

На рис. 3 представлен график расхождения годографов дифрагированной и отраженной волны от горизонтальной границы с параметрами $h = 2000$ м, $v = 3000$ м/с. Линейная координата точки дифракции составляет 1500 м, точка касания годографов находится на удалении ПП–ПВ 3000 м. График τ рассчитан как разность времен регистрации дифрагированной и отраженной волны по формулам годографов, $\sim\tau$ – по аппроксимации (6). Горизонтальная линия $T/2$ в точках пересечения с графиками определяет границы расхождения годографов на значение половины преобладающего периода волны 20 мс, тем самым фиксируя размер зоны приема примерно 1400 м.

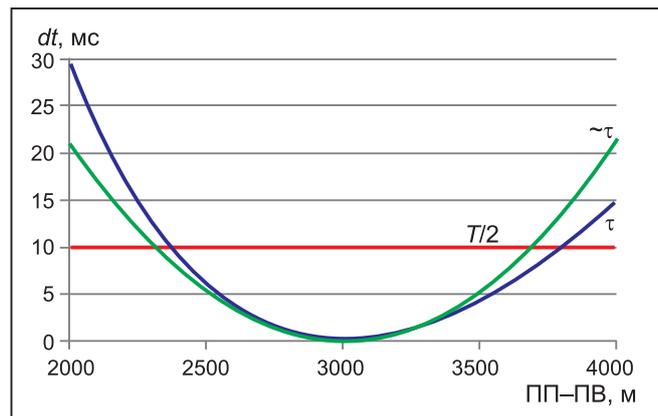


Рис. 3. Графики расхождения годографов дифрагированной и отраженной волны, рассчитанные по уравнениям годографов (τ) и приближенной формуле ($\sim\tau$)

Как следует из выражений (6) и (7), радиус зоны интерференционного приема сигнала в два раза превышает радиус зоны Френеля (2, 4). На рис. 4 представлен график, иллюстрирующий изменение «радиуса» области интерференционного накопления в зависимости от глубины. Расчеты выполнены для параметров сигнала и скоростной модели, аналогичных данным графиков на рис. 2.

Линии приема (ЛП), расположенные внутри зоны приема (ЗП), формируют приемную антенну, а объем выборки ее трасс определяется расстоянием между ЛП системы наблюдения и шагом ПП по линиям приема. В том случае, если отражающие границы горизонтальны и точки визуализации определены в общих срединных точках, ОГТ и ОСТ совпадают и центры зон распределены по ЛП. Для наклонных границ в силу сейсмического сноса, даже при определении точек визуализации в общих срединных точках, центры ЗП (точки выхода на поверх-

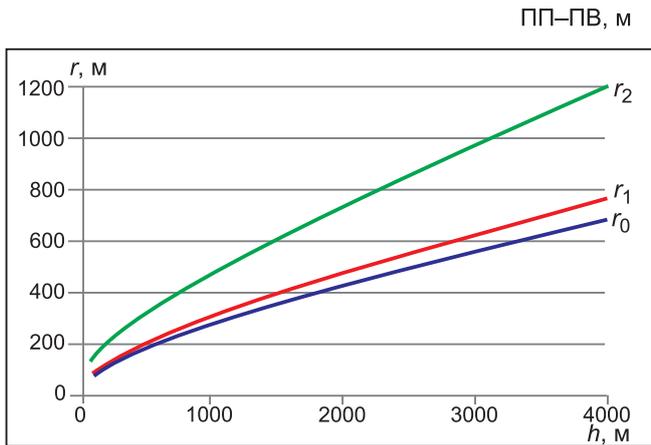


Рис. 4. Размер «радиуса» (полуоси) зоны приема для центрального луча, удаления ПП–ПВ $1,5h$ в поперечном и продольном направлениях

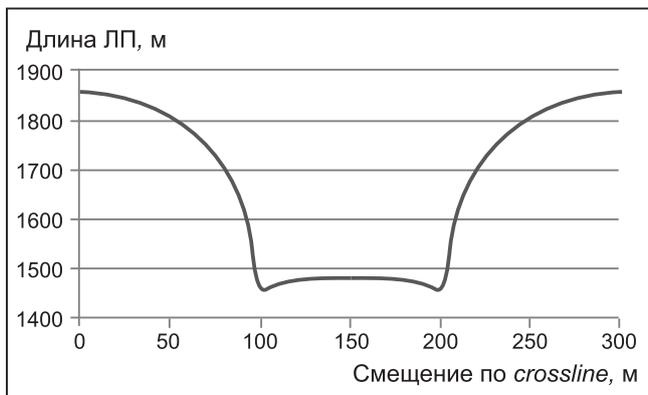


Рис. 5. Изменение длины линий приемной антенны при смещении центра зоны приема по *crossline*

ность отраженного луча) смещаются относительно ЛП. Как следствие, в общем случае годографы отраженных и дифрагированных волн не имеют точек касания.

В зависимости от положения центра ЗП относительно ЛП, изменяется общая длина линий приемной антенны. На рис. 5 представлен график, отображающий общую длину линий приемной антенны при смещении центра зоны между двумя линиями приема расстановки. Расчеты выполнены для размера ЗП, соответствующей нулевому удалению $r_0 = 400$ м при шаге ЛП 300 м. Начальная и конечная точки графика определяют положение центра зоны на ЛП. На рис. 5 длина линий приемной антенны изменяется в пределах 25 %. График иллюстрирует тот факт, что формирование сигналов на трассах общей точки изображения выполняется по нерегулярному объему выборок трасс входного набора данных.

Отметим различие в длине линий приемной антенны 2D и 3D данных. При шаге ЛП 300 м и радиусе ЗП $r_0 = 400$ м среднее значение длины линий антенны составляет приблизительно 1630 м. Для 2D данных длина ЛП соответствует диаметру ЗП (800 м). На этом основании в работе [5] отмечено: «Площадная апертура 3D-миграции – это интерференционная система с гораздо большим числом

элементов, чем линейная апертура 2D-миграции, что дает большой выигрыш в степени подавления помех».

Для системы наблюдения с шагом ЛП 400 м среднее значение длины линий приемной антенны составляет около 1250 м. Предполагая, что уровень подавления случайных помех пропорционален \sqrt{N} , где N – число каналов интерференционной системы, можно получить относительную оценку влияния шага ЛП на уровень подавления случайных помех, согласно которой при изменении шага ЛП с 400 на 300 м отношение сигнал/помеха увеличивается примерно на 11 %.

Мы рассмотрели формирование одной мигрированной трассы точки изображения по набору трасс ОПВ. Количество трасс общей точки изображения (ОТИ) определяется числом ПВ, входящих в апертуру миграционного преобразования. Окончательный результат формируется суммированием по выборке трасс ОТИ. Отсюда следует, что уменьшение шага ПВ по *crossline* увеличивает кратность суммирования по ОТИ и, соответственно, статистический эффект подавления помех. За счет подавления помех и последующей деконволюции возможно расширение спектра сигнала в области высоких и низких частот, уменьшение кажущейся длины волны и, в соответствии с выражением (1), повышение горизонтальной разрешающей способности метода.

Чтобы связать статистический эффект накопления сигнала в процессе миграции с параметрами системы наблюдения, проще всего воспользоваться формулой расчета кратности системы 3D

$$kr = \frac{N}{2} \frac{L \Delta_x}{2 \Delta_{cr}}$$

где N , L , Δ_x , Δ_{cr} – число активных линий приема, число каналов в линии, шаг ПП и расстояние между линиями взрыва соответственно. Но в этой формуле определяется кратность выборки трасс ОСТ, приведенная к размеру бина наблюдения – размеру сетки распределения общих срединных точек. Если опираться на формулу (1), то эффективная площадь изображения точечного объекта d^2 определяется значением, пропорциональным длине волны. Имеет смысл оперировать параметром, описывающим число трасс, приходящихся на эффективную площадь изображения точечного объекта

$$p = N \frac{L \Delta_x}{\Delta_{cr}} \frac{d^2}{\Delta_x \Delta_r} = N \frac{L_x}{\Delta_{cr}} \frac{d^2}{\Delta_x \Delta_r}, L_x = L \Delta_x.$$

При всей условности параметра в представленном выражении явно выражается прямая зависимость плотности наблюдений от числа активных линий приема N и обратная от шага ПП (Δ_x) и ПВ (Δ_r) по *line* и *crossline* соответственно. Можно говорить об эквивалентности систем наблюдений с равным значением плотности и, в частности, произведения $\Delta_x \Delta_r$. При заданной плотности наблюдения мы можем варьировать общим числом ПВ и ПП поле-

вой съемки, ориентируясь на производительность и экономические показатели полевых работ. Так, если взять за основу наиболее распространенную систему наблюдения с бином наблюдения 25×25 м, то ближайший эквивалент будет представлен системой с параметрами 12,5×50 м.

О выделении дифрагированных волн

Автору представляется важным принцип наиболее эффективного использования энергии источника [5], который реализуется равномерной расстановкой приборов по линиям приема с шагом первые метры и объединением приборов в линейные группы с шагом центров групп не более 25 м. В работе [8] показано, что такая расстановка позволяет на этапе цифрового группирования согласовать характеристики групп приборов с пространственной дискретизацией волнового поля для эффективного подавления волн-помех с линейным годографом.

В порядке дискуссии рассмотрим вопрос о возможности выделения отраженных и дифрагированных волн. Хорошо известен и понятен подход к представлению сейсмических границ как совокупности дифрагирующих точек, основанный на теории Гюйгенса–Френеля алгоритм дифракционных преобразований, который принято называть миграцией Кирхгофа, хотя в отмеченной миграции от интеграла Кирхгофа осталось только одно слагаемое из трех и исключено дифференцирование волнового поля [1]. Тем не менее алгоритм дифракционного преобразования, предложенный Ю. В. Тимошиным, справляется с задачами устранения дифракционных составляющих поля и миграции отражающих границ.

Как минимум не хуже с этими задачами справляется алгоритм миграции [4], основанный на параметрической развертке отражений (ПРО). Здесь преобразования основаны на кинематике отраженных волн, но также успешно мигрируют все волны, которые по визуальным признакам удовлетворяют кинематике дифрагированных волн.

Метод миграции на Гауссовых пучках [7] также основывается на кинематике отраженных волн, и изображение среды формируется по совокупности элементарных отражающих элементов. Веса сигналов при построении изображения рассчитываются с учетом удаления от центра пучка, что делает алгоритм устойчивым к эффекту пространственного алейсинга, нерегулярности объема и площадных координат выборок трасс приемной антенны (рис. 6).

Поскольку алгоритмы миграции, основанные на кинематике отраженных волн, полностью решают задачи миграции волновых полей реальных сред, то можно заключить: интенсивность собственно дифрагированных незначима на фоне отраженных волн и помех волнового поля. Образование этого типа волн на неоднородностях среды следует из теории решения динамических задач сейсмики, методики выделения рассеянной компоненты поля

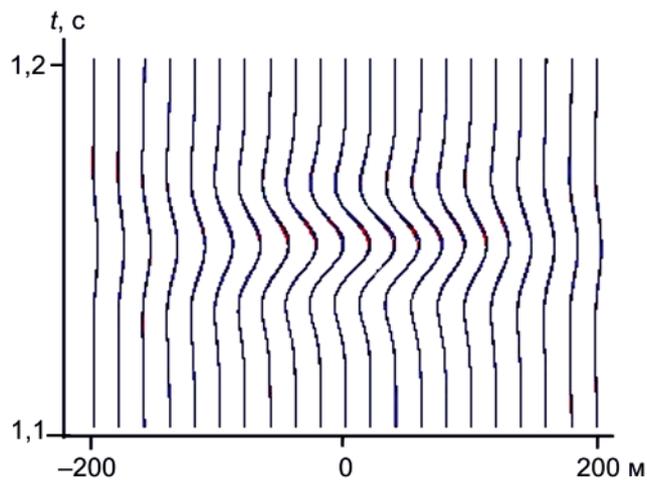


Рис. 6. Распределение амплитуды волны в плоскости Гауссова пучка [7]

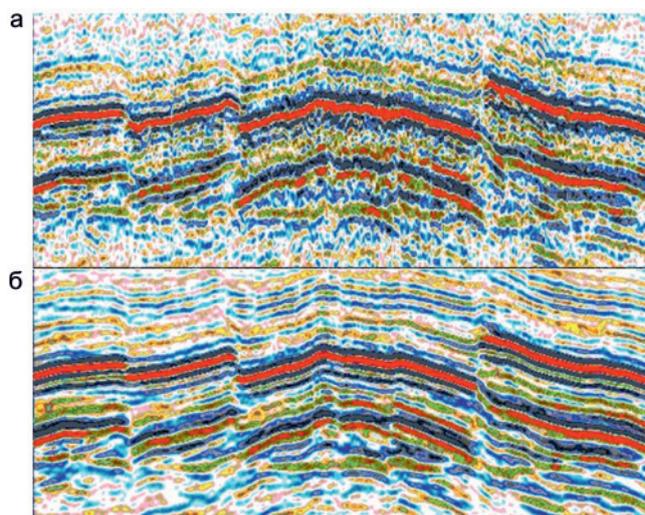


Рис. 7. Фрагмент временного разреза до (а) и после (б) миграции

[6] и разрабатываются исключительно на теоретических положениях. В обоснование этого предположения на рис. 7 приведены два фрагмента временного разреза на разных стадиях обработки: а – до миграции (после коррекции статических и кинематических поправок), б – после выполнения миграции и постмиграционной обработки. На разрезах отмечается серия разломов со значительным вертикальным смещением осей синфазности, но даже в ближней к разломам зоне на разрезе до миграции отсутствуют сопутствующие этому виду объектов элементы дифрагированных волн.

Приведенный пример не соответствует точке зрения, представленной в работе [1], где отмечается: «На временных разрезах ОГТ дифрагированные волны часто имеют хорошую прослеживаемость, хотя они слабы на исходных сейсмограммах. Причина в том, что условия суммирования остаются благоприятными... для последних». Можно предположить, что наблюдаемые на сейсмограммах и временных разрезах волны с кинематикой дифрагированных являются отраженными, порождае-



мыми флексуобразными перегибами на крыльях разломов, и при отсутствии этих элементов границ в зоне разломов волны такого типа не проявляются.

Выводы

Разложение алгоритма построения изображения среды на два этапа позволяет на принципиальном уровне оценить роль основных параметров системы наблюдений 3D.

На первом шаге по выборкам трасс ОПВ выполняется формирование отраженного сигнала для заданных точек изображения (отражения) на основе суммирования по годографам дифрагированных волн. Результат определяется спектром входного сигнала и частотной характеристикой приемной антенны, которая обусловлена параметрами группирования приборов и расстоянием между линиями приема.

На втором шаге реализуется статистический эффект накапливания сигналов по выборке трасс общей точки изображения. Кратность суммирования по ОТИ пропорциональна шагу ПВ по *crossline*. Например, выбирая шаг ПВ 150, 100, 50, 25 м и принимая кратность суммирования при 25 м за 100 единиц, приходим к соотношению условной кратности примерно 16, 25, 50, 100. Чтобы принять обоснованное решение по выбору шага ПВ, необходимо оценить эффективность решения задачи выделения сигнала по материалам предшествующих работ.

Автор надеется, что ему удалось обратить внимание на то, что сгущение шага ПВ по линиям возбуждения не является основным способом повышения разрешающей способности МОВ. Расширение спектра сигнала и повышение разрешенности в этом случае обусловлено чисто статистическим эффектом подавления помех за счет увеличения объема выборки трасс общей точки изображения.

Полезно закрепить в геофизическом словаре термин «бин изображений», с тем чтобы четко определить, что при обработке сейсмических данных шаг трасс выходного набора после миграции не определяется бином наблюдений и устанавливается как параметр выходного набора процедуры миграции. Вопрос горизонтальной разрешающей способности МОВ и обоснование нижней границы размера бина изображения слабо обоснован теоретически, потому желательно изучить этот вопрос на материалах с избыточно малым размером бина наблюдения.

При планировании сейсмических наблюдений необходимо оперировать критериями плотности наблюдений, а не кратности, поскольку плотность более корректно отражает эффективность систем наблюдений в задачах построения изображения среды. В силу инерции можно рассматривать кратность выборки ОСТ, но отнесенную к стандартному (например, 25×25 м) размеру бина. При фиксированной плотности наблюдения возможен выбор из нескольких альтернативных вариантов системы на-

блюдения с различной производительностью и стоимостью полевых работ.

Необходимо расширить объем тестирования на полевом материале алгоритма миграции на Гауссовых пучках. При всей неопределенности описания алгоритма в геофизической литературе, его ключевые положения (учет нерегулярности наблюдений при оценке истинных амплитуд отражений, устойчивость к пространственному аляйсингу и возможность учета априорных данных о диапазоне наклона отражающих границ) определяют его высокие перспективы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Боганик Г. Н., Гурвич И. И.** Сейсморазведка. – Тверь: АИС, 2006. – 744 с.
2. **Бондарев В. И., Крылатков С. М., Крылаткова Н. А.** Основные этапы развития технологии сейсморазведочных работ на нефть и газ в 20-м веке и прогнозе возможных изменений в 21-м веке // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 2. – Точка доступа: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=5616>.
3. **Воскресенский Ю. Н.** Полевая геофизика. – М.: Недра, 2010. – 479 с.
4. **Кондрашков В. В., Анискович Е. М., Богданов А. Н.** Сравнительное получение глубинно-скоростной модели среды в результате миграции Кирхгофа и ПРО (параметрическая развертка изображений) // Геофизика. – 2018. – № 3. – С. 52–60.
5. **Лучше** сеймики 3D – только сеймика 3D, хорошо спланированная / Е. Козлов, Дж. Боуска, Д. Медведев, А. Роденко // Геофизика. – 1998. – № 6. – С. 3–15.
6. **Методика** восстановления зон трещиноватости по сейсмическим данным посредством топологического анализа трехмерных дифракционных изображений / М. И. Протасов, Т. С. Хачкова, Д. Р. Колюхин, Я. В. Базайкин // Геофизика. – 2018. – № 2. – С. 2–9.
7. **Протасов М. И.** Распространение Гауссовых пучков через неплоские границы // Технологии сейсморазведки. – 2015. – № 4. – С. 44–50.
8. **Сысоев А. П.** Обоснование параметров системы полевых наблюдений МОГТ 2D // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2020. – № 3. – С. 59–65.
9. **Череповский А. В.** Наземная сейсморазведка нового технологического уровня. Изд. 2-е, доп. – М.: ЕАГЕГеомодель, 2017. – 252 с.
10. **Vermeer G. J. O.** 3D Seismic Survey Design. Second Edition // Geophysical References, Series No. 12. – Tulsa, Oklahoma, USA, 2016. – 341 p.

REFERENCES

1. Boganik G.N., Gurchich I.I. *Seismorazvedka* [Seismic survey]. Tver, AIS Publ., 2006. 744 p. (In Russ.).
2. Bondarev V.I., Krylatkov S.M., Krylatkova N.A. [The main periods of the development of seismic explo-



ration technology for oil and gas in the 20th century and a forecast of its further changes in the 21st century]. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya – Modern Problems of Science and Education*, 2012, no. 2. Available at: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=5616>. (In Russ.).

3. Voskresenskiy Yu.N. *Polevaya geofizika* [Field geophysics]. Moscow, Nedra Publ., 2010. 479 p. (In Russ.).

4. Kondrashkov V.V., Aniskovich E.M., Bogdanov A.N. [Comparative acquisition of a depth-velocity model of the medium as a result of Kirchhoff and PSR migrations (parametric sweeping of reflections)]. *Geofizika – Russian Geophysics Journal*, 2018, no. 3, pp. 52–60. (In Russ.).

5. Kozlov E., Bouska J., Medvedev D., Rodenko A. [Better than 3D seismics – only well-planned 3D seismic]. *Geofizika – Russian Geophysics Journal*, 1998, no. 6, pp. 3–15. (In Russ.).

6. Protasov M.I., Khachkova T.S., Kolyukhin D.R., Bazaikin Ya.V. [Methodology of fractures reconstruction from seismic data via topological analysis of 3D diffraction images]. *Geofizika – Russian Geophysics Journal*, 2018, no. 2, pp. 2–9. (In Russ.).

7. Protasov M.I. [Gaussian beam propagation through irregular interfaces]. *Tekhnologii seismorazvedki – Seismic Technologies*, 2015, no. 4, pp. 44–50. (In Russ.).

8. Sysoev A.P. [Justification of parameterers of the 2D CDP field system] *Geologiya i mineralno-syryevyye resursy Sibiri – Geology and Mineral Resources of Siberia*, 2020, no. 3, pp. 59–65. (In Russ.).

9. Cherepovskiy A.V. *Nazemnaya seismorazvedka novogo tekhnologicheskogo urovnya* [Land seismic of new technological level]. Moscow, OOO EAGEGeomodel Publ., 2017. 252 p. (In Russ.).

10. Vermeer G.J.O. 3D Seismic Survey Design. Second Edition. *Geophysical References*, Series No. 12. Tulsa, Oklahoma, USA, 2016. 341 p.

© А. П. Сысоев, 2021