



МУЛЬТИФОКУСИНГ И СТАНДАРТНАЯ СЕЙСМОРАЗВЕДКА

К.Ж. Сыдыков

ФГУП «ВНИГНИ», 105118, Москва, Шоссе энтузиастов, 36, Россия; e-mail: kairat.sydykov@gmail.com

Мультифокусинг – относительно новая технология построения сейсмических изображений, которая начала применяться в коммерческих масштабах чуть более 10 лет назад. За это время она показала свою высокую эффективность при изучении различных осадочных бассейнов мира. Тем не менее специалисты продолжают испытывать недоверие к мультифокусингу, что может быть вызвано несколькими причинами. В частности, в публикациях по основам этой технологии обычно используются сложные модели сред, которые затрудняют понимание технологии. Другая возможная причина – использование лучевых схем, т. е. глубинной области, при объяснении явлений в мультифокусинге, в то время как в стандартной технологии в основном пользуются построениями во временной области. Кроме того, в публикациях по мультифокусингу не используется понятие годографа, хотя для восприятия любого метода сейсморазведки оно является основополагающим. В настоящей статье анализируются указанные и другие особенности освещения мультифокусинга и проводится их сравнение с соответствующими решениями стандартной технологии. Несмотря на простые 2D примеры, в статье затрагиваются некоторые аспекты теоретических основ отражательной сейсмологии.

Мультифокусинг, общая средняя точка, общая точка отражения, общие удаления, DMO, оператор суммирования, диаграмма суммирования

MULTIFOCUSING AND STANDARD SEISMIC

K. Sydykov

FGUP «VNIIGNI», 105118, Moscow, Shosse Entuziastov, 36, Russia; e-mail: kairat.sydykov@gmail.com

Multifocusing is a relatively new seismic imaging technology that started to be commercially used about ten years ago. Since that time, it has demonstrated high performance in a wide variety of sedimentary basins. Nevertheless experts continue to have reservations about the multifocusing technology that may be caused by several reasons. Particularly, publications on multifocusing fundamentals usually consider complex media models complicating understanding of the technology. Another possible reason is that authors apply ray tracings in depth domain when considering events in multifocusing, while in standard technology they mainly use time domain for these purposes. Furthermore, the notion of t-x curve is disregarded in publications on multifocusing, despite of its importance for understanding of any seismic method. This paper offers analysis of the above-mentioned and other peculiarities of the multifocusing elucidation, as well as their comparisons with the standard technology solutions. Despite the paper considers simple 2D models, it touches upon some aspects of reflection seismology fundamentals.

Multifocusing, common midpoint, common reflection point, common offsets, DMO, stacking operator, stacking chart

ВВЕДЕНИЕ

Практически все публикации по теоретическим основам мультифокусинга (МФ), включая фундаментальный труд [Gelchinsky et al., 1999], оперируют моделями с криволинейными отражающими границами, неоднородной покрывающей толщиной, характеризующейся переменной по профилю и глубине скоростью $V(x,z)$ и, как следствие, криволинейными лучами (рис. 1, а). В такой постановке вопроса даже изначально простые выражения метода общей глубинной точки (МОГТ) и стандартной обработки (СО) либо приобретают достаточно сложный вид, либо вообще не находят аналитического решения [Боганик, Гурвич, 2006].

В настоящей статье мы рассмотрим и сравним ключевые свойства МФ и СО с использованием простейшей модели с однородной покрывающей средой, характеризующейся постоянной скоростью V и плос-

ким отражателем (см. рис. 1, б). Мы также рассмотрим случай с постоянной скоростью V и криволинейным отражателем (см. рис. 1, в).

Основываясь на известных публикациях, отметим, что МФ и СО используют одинаковые или схожие подходы ко всем аспектам построения сейсмических изображений, за исключением процедур определения и ввода кинематических поправок. Исходя из этого, сосредоточимся на рассмотрении двух вопросов, определяющих принципиальные кинематические особенности технологий:

– какова форма кинематической поправки как функции удаления пункта приема (ПП) от пункта возбуждения (ПВ);

– какие наборы входных трасс используются для получения выходных трасс.

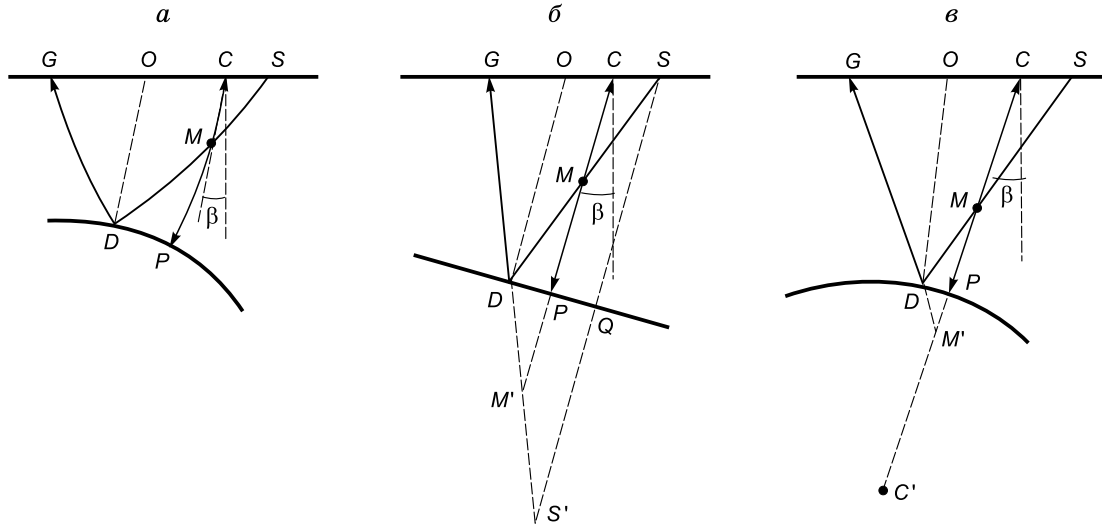


Рис. 1. Базовая лучевая схема МФ: *а* – для неоднородной покрывающей среды и криволинейного отражателя; *б* – для однородной покрывающей среды и плоского отражателя; *в* – для однородной покрывающей среды и криволинейного отражателя.

Следует отметить, что в публикациях по МФ, как правило, используются лучевые схемы, т. е. явления рассматриваются в глубинной области, тогда как в СО обычно применяется временная область. Это создает иллюзию о “непересечении” данных технологий. Ниже мы покажем, что такие пересечения имеют место и они вполне органичны.

ПАРАМЕТРЫ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ ПОПРАВКИ МФ

Рассмотрим, что собой представляет кинематическая поправка в МФ для модели, изображенной на рис. 1, б. Зададим пару ПВ и ПП с некоторыми известными удалениями $\Delta X^+ = CG$ и $\Delta X^- = CS$ (далее во всех формулах – по абсолютным величинам) по разные стороны от точки выхода нормального луча C , относительно которой определим кинематическую поправку.

Точка M является точкой пересечения нормального луча и луча, исходящего из ПВ, расположенного в точке S , и после отражения в точке D приходящего в ПП, расположенный в точке G . В МФ точка M называется фокусом*. Тогда точка M' соответствует мнимому фокусу. Угол β (также далее – по абсолютной величине) представляет собой угол наклона границы, и он же – угол выхода нормального луча к поверхности. Формула кинематической поправки $\Delta\tau_C$ для луча с траекторией SDG относительно нормального луча CP

$$\Delta\tau_C = t_{SDG} - t_{CP} \quad (1)$$

вычисляется по теореме косинусов для треугольников CMS и $CM'G$. Введя обозначения для лучей $MC = R^-$ и $M'C = R^+$, получим

$$\Delta\tau_C = \frac{1}{V} \left[\left(\sqrt{(R^+)^2 - 2R^+\Delta X^+ \sin \beta + (\Delta X^+)^2} - R^+ \right) + \left(\sqrt{(R^-)^2 + 2R^-\Delta X^- \sin \beta + (\Delta X^-)^2} - R^- \right) \right] \quad (2)$$

Ввод кинематической поправки $\Delta\tau_C$ трансформирует трассу с произвольным удалением ПВ–ПП, заре-

гистрированную в точке G , в трассу с нулевым удалением, соответствующую нормальному лучу, выходящему в точке C , т. е. пересчитывает времена t_G во времена t_C .

Введем обозначения

$$R_{CRE} = CP \text{ и } \sigma = CP/MP = R_{CRE}/MP \quad (3)$$

и получим

$$R^+ = \frac{1 + \sigma}{\sigma}; \quad R^- = \frac{1 - \sigma}{-\sigma} \quad (4)$$

Значение σ определяет положение фокуса M на нормальном луче и связано с параметрами модели среды и системы наблюдений соотношением (см. рис. 1, б):

$$\sigma = \frac{\Delta X^+ + \Delta X^-}{(\Delta X^+ - \Delta X^-) + \frac{2\Delta X^+\Delta X^-}{R_{CRE}} \sin \beta} \quad (5)$$

В МФ σ называется параметром фокусировки. Он изменяется от $-\infty$ до ∞ и является положительным, когда нормальный луч пересекается падающим лучом, и отрицательным, когда он пересекается отраженным лучом. Параметр σ также имеет вполне определенный физический смысл, выходящий за рамки МФ, который становится очевидным при анализе формул (3)–(5). Так, при $\sigma = 1$, что означает $MP = R_{CRE}$ и $R^- = 0$, точки M и S совпадают с точкой C . Это соответствует случаю, когда все лучи исходят из одной точки $S(C, M)$ и после отражений выходят к поверхности в разных точках G , образуя совокупность лучей (сейсмограмму) общего ПВ (ОПВ). Аналогично при $\sigma = -1$ и $R^+ = 0$ точки M и G совпадают с точкой C , т. е. все отраженные лучи сходятся в одной точке $G(C, M)$, что соответствует совокупности лучей (сейсмограмме) общего ПП (ОПП). При $\sigma = \pm\infty$ $MP = 0$ и точка M совпадает с точкой P . В этом случае все лучи отражаются от одной и той же точки P , образуя совокупность лучей (сейсмограмму) общей точки отражения (ОТО). Наконец, $\sigma = 0$ возможно, только когда справедливо ра-

* Здесь и далее названия и обозначения, относящиеся к МФ, приняты согласно использованным в [Gelchinsky et al., 1999].

венство $\Delta X^+ = \Delta X^- = 0$. Это соответствует нормальным лучам, т. е. трассам временного разреза. Такие же выводы сделаны и в работе [Gelchinsky et al., 1999], однако в результате довольно сложных и громоздких вычислений.

Таким образом, использование простой модели показывает, что в основе МФ лежат формулы ничуть не сложнее, чем формулы в МОГТ и СО для такой модели.

ФОРМЫ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПОПРАВОК МФ И СО

Проанализируем формулы годографов и кинематических поправок МФ и сравним их с соответствующими формулами в СО. Напомним, что годограф отраженной волны в СО относительно точки C в принятых нами обозначениях и с учетом того, что $\Delta X^+ = \Delta X^- = \Delta X$, описывается формулой [Robein, 2003]:

$$t(\Delta X) = \sqrt{t_c^2 + (2\Delta X)^2 / V^2 - (2\Delta X \sin \beta)^2 / V^2}, \quad (6)$$

где t_c – время пробега волны вдоль нормального луча, выходящего к линии наблюдения в общей средней точке (ОСТ).

Этот годограф соответствует сортировке (сейсмограмме) ОСТ. Не вдаваясь в алгоритмические детали, отметим, что процедура ДМО преобразует трассы сортировки ОСТ в трассы сортировки ОТО, при этом осуществляется пересчет времен t_c во времена t_o :

$$t_o = \sqrt{t_c^2 - (2\Delta X \sin \beta)^2 / V^2}. \quad (7)$$

Это происходит с использованием разрезов общих удалений (ОУ) с введенной кинематической поправкой за удаление ПВ–ПП (поправка НМО). По этим разрезам выполняется миграционная по сути операция, когда каждый отчет входной трассы “размазывается” по эллипсам ДМО, описываемым формулой [Robein, 2003]

$$\frac{x^2}{(\Delta X_k)^2} + \frac{t^2}{t_c^2} = 1. \quad (8)$$

Заметим, что формы эллипсов ДМО не зависят от параметров среды. При этом горизонтальная полу-

ось эллипса равна половинному удалению ПВ–ПП ΔX_k , вертикальная полуось эллипса равна t_c , горизонтальная координата x_o , соответствующая времени t_o , совпадает с точкой O выхода нормального луча из ОТО, количество разрезов ОУ, к которым применяется операция ДМО, равно кратности наблюдений K .

С учетом выражения (7) кинематическая поправка в СО вычисляется по формуле

$$\Delta t(\Delta X) = \sqrt{t_o^2 + (2\Delta X)^2 / V^2} - t_o. \quad (9)$$

Формулы (7) и (9) описывают гиперболы с тем отличием друг от друга, что форма первой гиперболы определяется параметрами t_c и $V/\cos \beta$, а второй – t_o и V .

Вернемся к рассмотрению кинематической поправки МФ. С учетом рис. 1, б, а также формул (2) и (4) имеем $R^+ + R^- = 2R_{CRE}$ и

$$\Delta t_c = \frac{1}{V} \sqrt{(\Delta X_{MФ})^2 + 4h_s (\Delta X_{MФ}) \sin \beta + 4(h_s)^2} - \frac{2R_{CRE}}{V}, \quad (10)$$

где $\Delta X_{MФ} = SG = \Delta X^+ + \Delta X^-$; $h_s = SQ$ – эхо-глубина отражателя в точке S .

Вторая часть формулы (10) представляет собой время $t_{MФ}$, одинаковое для всей сортировки МФ, относительно которого вычисляется кинематическая поправка. Первая часть формулы (10) есть не что иное, как гипербола, описывающая классический годограф ОПВ [Боганик, Гурвич, 2006]. Особо отметим еще одно важное обстоятельство – формула (10) однозначно показывает, что вычисление кинематической поправки в МФ производится в области ОПВ.

Для полноты картины с расчетами кинематических поправок по выше приведенным формулам изобразим на обобщенной плоскости возможные наборы входных трасс при СО и МФ на примере 8-кратной центральной системы наблюдений (рис. 2). Как следует из рисунка, годограф МФ по существу представляет собой совокупность годографов ОПВ, имеющих общую базу пунктов приема (или общую базу ПВ для случая с ОПП).

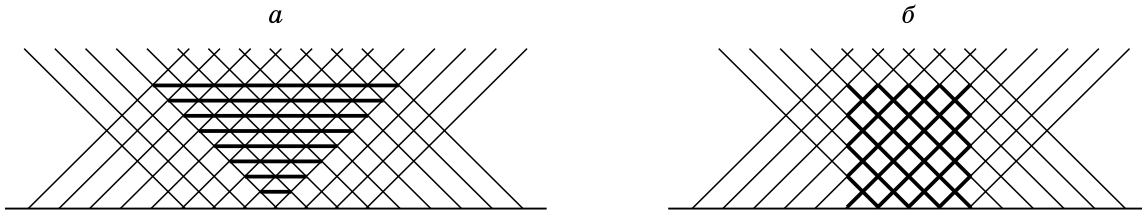


Рис. 2. Изображение наборов входных трасс при СО (а) и МФ (б) на обобщенной плоскости.

СООТНОШЕНИЕ МЕЖДУ КИНЕМАТИЧЕСКИМИ ПОПРАВКАМИ СО И МФ

Изобразим в графическом виде операцию ввода кинематической поправки в СО на плоскости временного разреза ОУ для некоторого удаления $2\Delta X_k$ и наклонного отражателя (рис. 3, а). Для этого построим эллипсы ДМО для двух средних точек C_1 и C_2 , выделив их активные части, согласно теории ДМО [Robein, 2003]. Обозначим следующие особые точки, которые соответствуют:

t_{H1} – времени горизонта после ввода поправки НМО в средней точке C_1 ,

t_{H2} – то же в средней точке C_2 ,
 t_{C1} – времени горизонта после ввода поправки ДМО в средней точке C_1 ,

t_{C2} – то же в средней точке C_2 ,
 t_{O1} – времени горизонта после ввода поправки ДМО в точке O_1 выхода нормального луча, исходящего из точки отражения D_1 ,

t_{O2} – то же в точке O_2 , исходящего из точки D_2 .
 На этом рисунке линия I–I соответствует положению отражателя до выполнения операции ДМО (после ввода НМО); линия II–II – положению отражателя после операции ДМО.

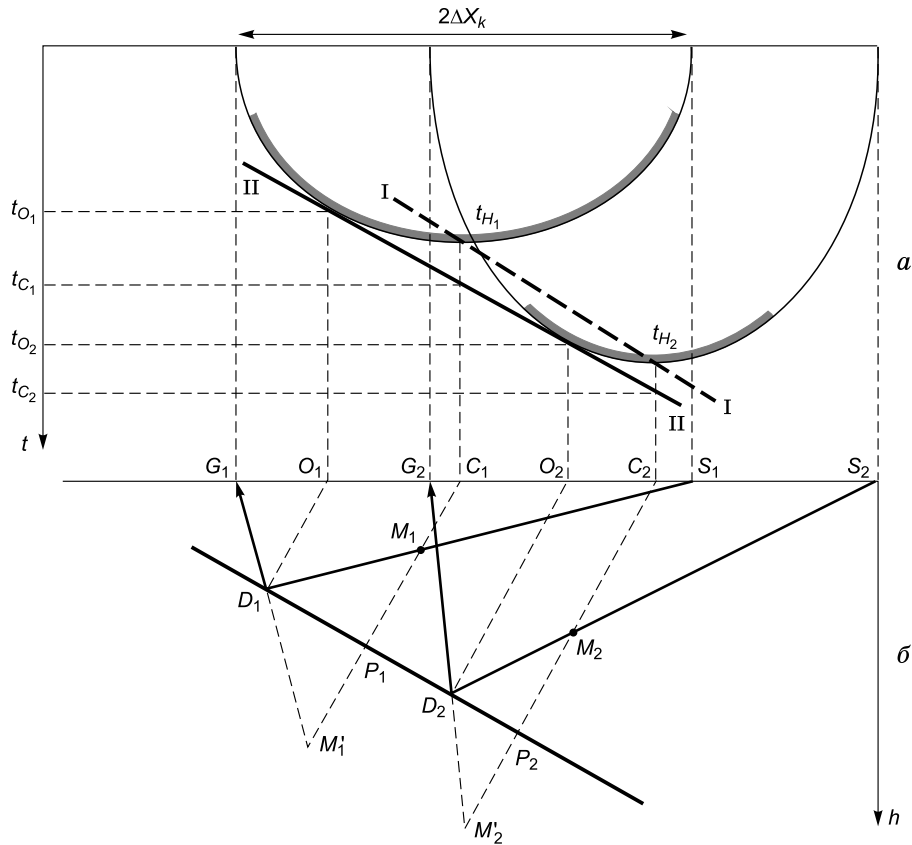


Рис. 3. Схематическое представление результатов применения DMO: *a* – во временной области; *б* – в глубинной области.

Изобразим ниже лучевую схему (в глубинной области), которая соответствует этим построениям (см. рис. 3, *б*). При сопоставлении рис. 3, *б* с рис. 1, *б* видим, что лучевые схемы, соответствующие операции НМО–DMO, и лучевые схемы МФ идентичны для частного случая, когда $\Delta X^- = \Delta X^+ = \Delta X_k$. Поскольку такая идентичность остается в силе для любого положения ПВ и ОСТ, то очевидно, что обе операции, НМО–DMO и МФ, тождественны для трасс с одинаковыми ПВ и ПП.

Таким образом, мы показали, что “кинематика” кинематических поправок в СО и МФ для модели, изображенной на рис. 1, *б*, в конечном счете перед суммированием одинаково гиперболична.

КИНЕМАТИКА СО И МФ ПРИ КРИВОЛИНЕЙНОМ ОТРАЖАТЕЛЕ

До сих пор мы намеренно ограничивались рассмотрением плоского отражателя с тем, чтобы сконцентрироваться на сравнении базовых особенностей технологий в “чистом” виде, без осложняющих факторов. Сейчас рассмотрим общий случай, когда отражатель криволинеен (модель на рис. 1, *в*).

В МФ требуется учет кривизны, поскольку лучевая схема области ОПВ, в которой “работает” МФ, предполагает отражения от разных точек отражателя. В работе [Gelchinsky et al., 1999] показано, что для этого необходимо знание еще одного параметра – R_{CEE} , характеризующего данную кривизну. На рис. 1, *в* $R_{CEE} = CC'$, т. е. параметр R_{CEE} соответствует радиусу кривизны фронта фиктивной волны, исходящей из

центра C' кривизны отражателя. Принимая во внимание, что параметр R_{CRE} известен, разница $R_{CEE} - R_{CRE}$ как раз и будет характеризовать радиус кривизны отражателя. В упомянутой работе показано, что для этого случая формулы (4) трансформируются в

$$R^+ = \frac{1 + \sigma}{\frac{1}{R_{CEE}} + \frac{\sigma}{R_{CRE}}}; \quad R^- = \frac{1 - \sigma}{\frac{1}{R_{CEE}} - \frac{\sigma}{R_{CRE}}}. \quad (11)$$

Кроме того, в работе [Landa et al., 1999] показано, что формула (5) верна и для случая криволинейного отражателя.

В результате при расчете кинематики для криволинейного отражателя в МФ требуется определение трех параметров – β , R_{CRE} и R_{CEE} , т. е. одна триада искоемых параметров – β , R^+ и R^- – заменяется на другую – β , R_{CRE} и R_{CEE} . Такая замена, согласно [Gelchinsky et al., 1999], имела ключевое значение при разработке технологии МФ. Дело в том, что первая триада представляет волновые параметры, вторая – параметры среды (параметр β , как уже указывалось, играет двойственную роль – характеризует угол подхода волны и угол наклона отражателя). Причина того, для чего это сделано, коротко, заключается в том, что диапазон возможных значений параметров R_{CRE} и R_{CEE} существенно уже, чем параметров R^+ и R^- . Соответственно и количество переборов при сканировании значительно меньше. Такая замена во многом способствовала тому, что научную идею удалось воплотить в технологию построения сейсмических изображений, альтернативную технологии СО.

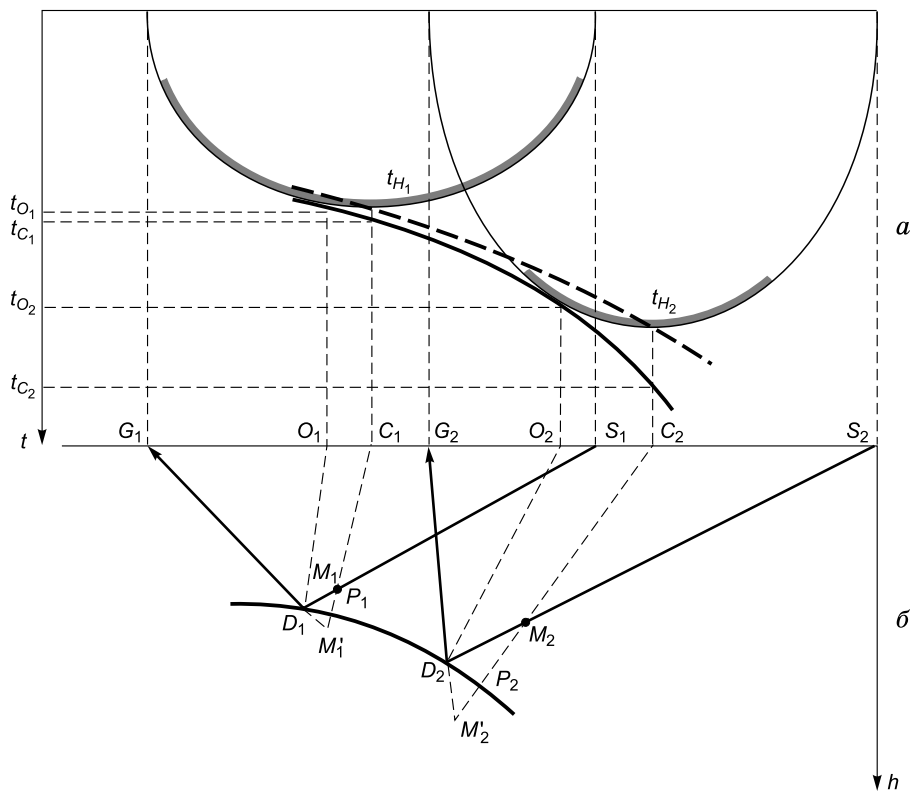


Рис. 4. Схематическое представление результатов применения DMO при криволинейном отражателе: *a* – во временной области; *b* – в глубинной области.

В СО кривизна отражателя также учитывается, и это осуществляется в процессе выполнения операции DMO. На рис. 4 (те же обозначения, что и на рис. 3) показано, что соответствие между операциями НМО–DMO и лучевой схемой МФ сохраняется в прежнем виде и при криволинейном отражателе.

В СО, после того как выполнена операция DMO, сейсмограмма ОСТ трансформируется в сейсмограмму ОТО, чем обеспечивается гиперболичность кинематической поправки, как и в случае плоского отражателя. В результате проблема негиперболичности в СО также находит свое решение в общем случае.

ОПЕРАТОРЫ СУММИРОВАНИЯ СО И МФ

Еще одним важным фактором, определяющим эффективность технологии построения сейсмических изображений, является форма оператора суммирования. Именно она определяет набор суммируемых отчетов трасс в заданные моменты времени после ввода кинематических поправок для получения выходной трассы. В СО форма оператора определяется шириной активной части эллипса, которая ограничена удалениями $\pm x_{\max\text{DMO}}$ относительно ОСТ, определяемых по формуле [Robein, 2003]:

$$|x_{\max}|_{\text{DMO}} = \frac{2(\Delta X_k)^2}{Vt_c}. \quad (12)$$

В МФ, в отличие от СО, нет детерминированной зависимости ширины оператора от параметров среды, поэтому в разных публикациях его ширина рекомендуется различной – от максимального удаления ПВ–ПП [Gelchinsky et al., 1999] до величины, определяемой шириной первой зоны Френеля в более поздних публи-

кациях [Berkovich et al., 2009]. Будем ориентироваться на последнюю публикацию, в соответствии с которой ширина оператора МФ определяется формулой

$$|x_{\max}|_{\text{МФ}} = \frac{V}{2} \sqrt{t_c T}, \quad (13)$$

где T – период отраженной волны.

Построим схематические 3D формы операторов СО и МФ, с учетом указанных условий, в системе координат: ось x – ширина оператора, ось y – половинное удаление ПП–ПВ ΔX_k , ось z – время t (рис. 5). Обратим внимание, что на эти формы, помимо прочего, влияет отсутствие сейсмических данных в области мьютинга, причем мьютинг в МФ за счет отсутствия растяжек на больших удалениях при вводе кинематики [Беркович и др., 2009], как правило, более “мягкий”, чем в СО (проекции зон мьютинга показаны на рис. 5 штриховыми линиями).

Мы видим, что в принятой системе координат операторы СО и МФ имеют существенно различные свойства, а именно:

- с увеличением времени ширина оператора СО уменьшается, а ширина оператора МФ возрастает;
- с ростом удаления ПВ–ПП оператор СО расширяется, а в МФ он остается неизменным.

Оценим количественные соотношения операторов СО и МФ с использованием формул (12), (13) и конкретных сейсмических данных по сечениям операторов на определенных моментах времени. Заметим, что такие сечения по смыслу соответствуют диаграммам суммирования [Sheriff, 2002]. С этой целью воспользуемся сейсмическими данными 2D по профилю, расположенному на одной из площадей юга Тюменской области. Параметры полевой методики

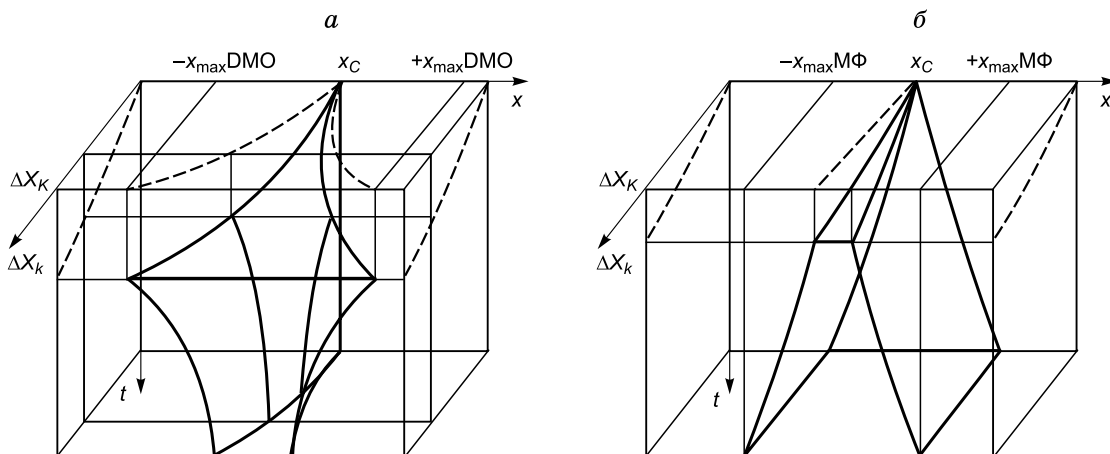


Рис. 5. Формы операторов суммирования: а – в СО; б – в МФ.

при регистрации этих данных применялись следующие: шаги ПВ и ПП – 50 м, диапазон удалений ПП–ПВ – 25–3250 м, количество активных каналов – 130, кратность наблюдений – 65. На рис. 6 представлены немигрированные временные разрезы, полученные с применением СО и МФ. На рис. 7 показаны усредненные контуры сейсмограмм СО и сейсмограмм МФ (приведенные к системе наблюдения СО) и скоростная кривая $V_{эф}(t)$ по указанной площади.

Используя эти данные, построим диаграммы суммирования СО и МФ на временах 2.4 с; 2.0 с; 1.6 с; 1.2 с; 0.8 с и 0.4 с (рис. 8).

Площади диаграмм суммирования характеризуют количество входных трасс, вовлеченных в суммирование СО и МФ. Оценив их отношение на разных временах, можно отметить следующую закономерность: на временах, превышающих 2.5 с, МФ использует в 2 раза и более раз большее количество входных трасс, чем СО; эта разница сокращается с уменьшением времени, и на времени около 1.5 с оба количества сравниваются; на временах менее 1.5 с уже СО использует на 10–15 % больше трасс, чем МФ. Аналогичные расчеты по другим регионам (север Западной Сибири, Восточная Сибирь, Урал–Волга) показывают схожие закономерности. Таким образом, тезис о том, что “су-

пербаза” МФ включает гораздо большее количество трасс, чем СО, утверждаемый в публикациях по МФ [Berkovich et al., 2008; Landa, 2011], справедлив лишь частично. Отсюда следует, что количество вовлекаемых в суммирование трасс не может однозначно являться причиной более высокого качества сейсмических изображений МФ по сравнению с изображениями СО.

Важно выделить еще одну особенность диаграмм суммирования – в СО количества трасс в больших удалениях существенно превосходят количества трасс с малыми удалениями ПВ–ПП. Если разделить все диапазоны удалений пополам на дальние и ближние, то на всех рассматриваемых в нашем примере временах количества дальних трасс превосходят количества ближних трасс в 4 раза и более. Заметим, что в МФ все эти количества одинаковы. Учитывая, что с ростом удалений увеличивается и размер первой зоны Френеля, то это является причиной того, что изображения МФ имеют, как правило, лучшую вертикальную и латеральную разрешенность, чем изображения СО.

Такой “крен” СО в сторону больших удалений, правда, свидетельствует о том, что суммирование в СО является более сильным инструментом подавления кратных и других высокоскоростных регулярных

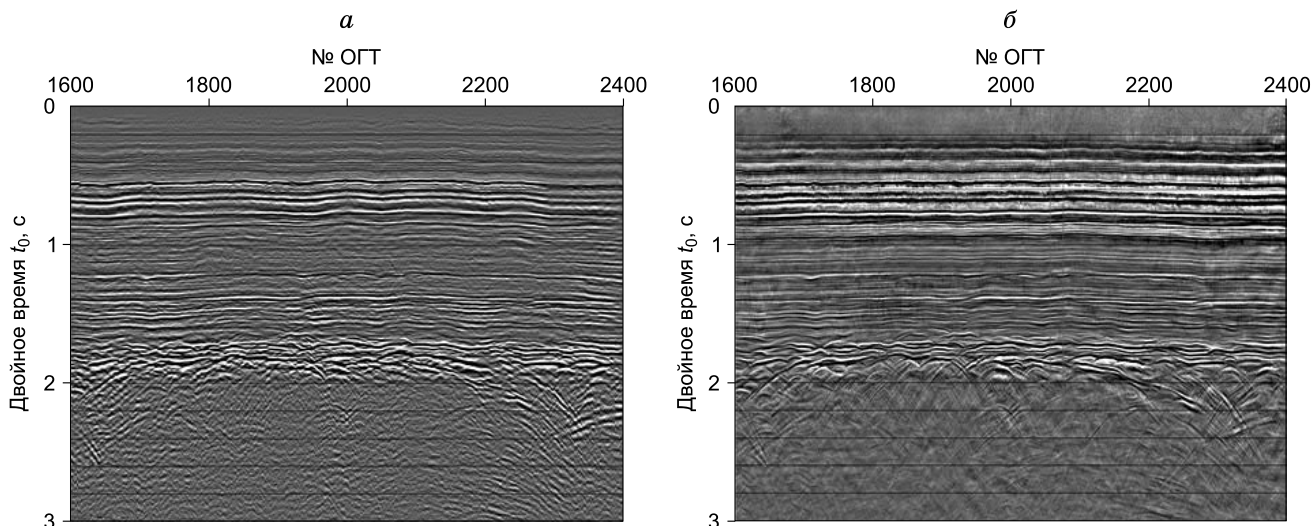


Рис. 6. Немигрированные временные разрезы: а – СО; б – МФ.

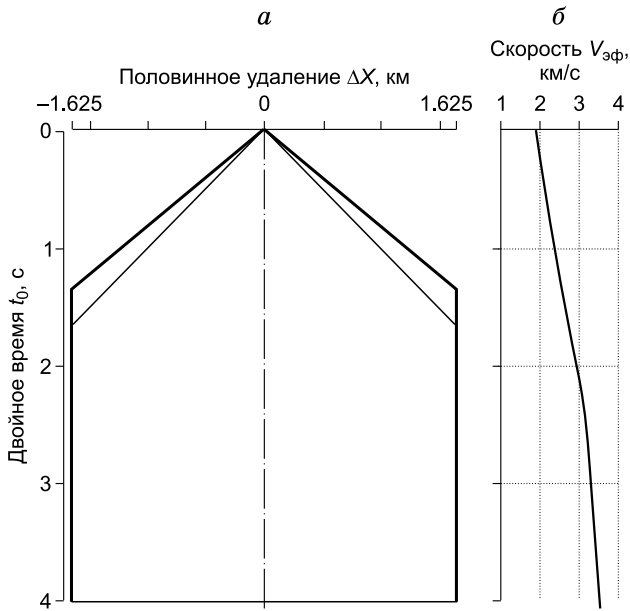


Рис. 7. Усредненные формы: а – контуров сейсмограмм СО (1) и МФ (2); б – скоростных кривых $V_{эф}$.

волн-помех, чем суммирование в МФ. Однако в МФ есть свои ресурсы для подавления указанных волн-помех. Во-первых, ничто не ограничивает увеличение базы суммирования МФ специально для подавления высокоскоростных волн-помех. Во-вторых, кроме скорости в МФ имеется угол β , который также чувствителен к типу отраженных волн, и это может быть использовано в том числе для подавления кратных волн [Landa et al., 2012].

ДМО И СКАНИРОВАНИЕ В МФ

Операции ДМО и сканирования параметров в МФ, в части расчета и ввода поправки за наклон, имеют одно принципиальное отличие. Операция ДМО в явном виде не определяет угол наклона отражателя β , а лишь вносит поправку за наклон отражателя посредством “частичной миграции” отчетов трасс в области ОУ, как это описано в работе [Yilmaz, 2001]. В МФ угол β определяется в явном виде в результате операции трехмерного сканирования (по числу определяемых параметров – R_{CRE} , R_{CEE} и β) и последующего ввода в трассы сортировки ОПВ соответствующим сдвигом отчета по времени. Рассмотрим, к каким результатам приводит это отличие. Для этого представим результаты СО и МФ в математическом виде. Выходная трасса $g(x_0, t_0)$ после ввода кинематических поправок ДМО и НМО и суммирования представляет собой результат двойной суммы [Rochein, 2003]:

$$g(x_0, t_0) = \frac{1}{K} \sum_1^K \sum_{-x_{\max\text{ДМО}}}^{+x_{\max\text{ДМО}}} w_i u_{kj} [\Delta X_k, x_C - x_i, t(t_n, x_i)], \quad (14)$$

где x_0 – координата точки выхода нормального луча из ОТО (точки O_1 и O_2 на рис. 3 и 4), x_i – координата i -й трассы в пределах от $-x_{\max\text{ДМО}}$ до $+x_{\max\text{ДМО}}$ на k -м удалении $2\Delta X_k$, u_{kj} – амплитуда отражения на j -й трассе сейсмограммы ОУ на времени t_n после ввода НМО

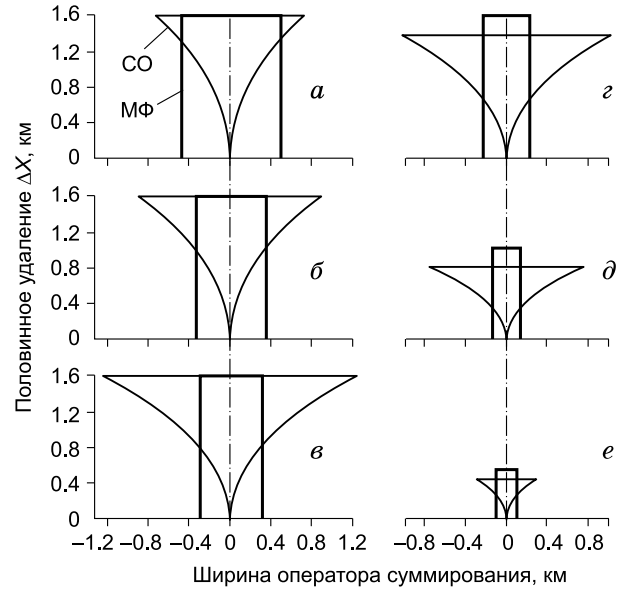


Рис. 8. Диаграммы суммирования СО и МФ на временах: а – 2.4 с; б – 2.0 с; в – 1.6 с; з – 1.2 с; д – 0.8 с, е – 0.4 с.

на k -м удалении, $t(t_n, x_i)$ – время по эллипсу ДМО с вертикальной полуосью t_n , соответствующее координате x_i , K – полная кратность наблюдений, w_i – весовая функция распределения амплитуд вдоль эллипса ДМО (задается).

По аналогии с формулой (14) результат обработки МФ также можно представить в виде двойной суммы:

$$g(x_C, t_C) = \frac{1}{K} \sum_1^K \frac{1}{j} \sum_{-x_{\max\text{МФ}}}^{+x_{\max\text{МФ}}} u_j [x_C - x_{\text{пп}j}, t_C], \quad (15)$$

где $x_{\text{пп}j}$ – координата j -й трассы в пределах от $-x_{\max\text{МФ}}$ до $+x_{\max\text{МФ}}$, j – общее количество отсчетов входных трасс, охватываемых диаграммой суммирования МФ на времени t_C .

Внешние суммы в выражениях (14) и (15) одинаковы и определяются только кратностью наблюдений. Указанное принципиальное отличие заключено во внутренних суммах выражений (14) и (15). Если записать выражение (14) для всех значений x_0 исследуемого профиля отдельно для каждого половинного удаления ΔX_k , то получится математическое описание разрезов ОУ в СО. Разрезы ОУ в МФ получаются в результате выполнения соответствующих операций с использованием формулы (15).

Оценим соотношения сигнал / нерегулярный шум (S/N) по разрезам ОУ на различных половинных удалениях в трех временных окнах: 0.2–1.0 с; 1.0–1.6 с и 1.6–2.4 с, которые соответствуют трем группам наиболее выраженных отражений. На рис. 9 представлены усредненные графики соотношений S/N в указанных окнах. В результате можно отметить несколько интересных закономерностей:

- все соотношения S/N для изображений МФ превосходят соответствующие значения для изображений СО;

- разница между соотношениями S/N для изображений МФ и СО наиболее значительна на половинном удалении 250 м, что объясняется прежде всего

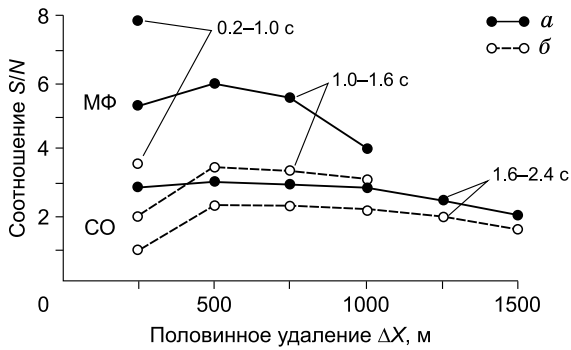


Рис. 9. Графики соотношений сигнал / нерегулярный шум (S/N) по разрезам ОУ на половинных удалениях: 250 м; \bar{b} – 750 м; \bar{a} – для МФ, \bar{b} – для СО.

существенно большим, в 5–10 раз, количеством трасс в диаграмме суммирования МФ по сравнению с СО;

– на половинных удалениях 500–750 м разница в количестве трасс в диаграммах суммирования СО и МФ незначительна в пользу МФ, однако соотношение S/N для изображения МФ в 1,5–2 раза выше, чем для изображения СО;

– на половинных удалениях 1250–1500 м количество трасс в диаграмме суммирования СО существенно больше, чем в диаграмме суммирования МФ, однако соотношение S/N для изображения МФ все же выше, чем для изображения СО.

Указанные закономерности свидетельствуют о том, что результат операции ДМО является более “шумным” (иногда значительно), чем результат применения МФ. Это и понятно – процедура ДМО, повышая соотношение S/N в области когерентного суммирования вблизи отражателя, генерирует нерегулярный шум за счет миграционных “улыбок” над отражателем. Сканирование МФ по определению не вносит дополнительных шумов в процесс суммирования, а лишь определяет сдвиг по времени суммируемой трассы и в худшем случае может обеспечить несинфазное суммирование сигнала. При надлежащем же сканировании суммирование в МФ должно обеспечивать увеличение соотношения S/N , близкое к \sqrt{M} , где M – количество трасс в диаграмме суммирования.

МФ И МИГРАЦИИ

Судя по публикациям, подход к миграции после суммирования в МФ традиционен, т. е. аналогичен тому, что применяется в СО. На рис. 10 представлены временные разрезы СО и МФ, полученные в результате кирхгофской миграции. Логично, что все особенности сейсмических изображений СО и МФ, отмеченные до миграции, остаются в силе и после нее. Однако следует выделить одну принципиальную разницу СО и МФ в отношении традиционной миграции. Методология традиционной миграции, прежде всего кирхгофской, базируется на том утверждении, что всякий отражатель представляет собой совокупность точечных дифракторов. И если подходы СО не противоречат этому утверждению, то МФ опирается на другое предположение, а именно: отражатель представляет собой совокупность кусочно-криволинейных элементов. Такое несоответствие может приводить к тому, что применение расширяющихся со временем (глубиной) апертур и миграции, и МФ создают эффект чрезмерной гладкости отражателей на больших временах (глубинах) результативных разрезов. Вместе с тем анализ многочисленных результатов миграции в сложных сейсмогеологических условиях показывает, что МФ является стойким инструментом против эффекта аляйсинга, которому подвержена СО, особенно на больших временах (глубинах). Яркий пример этого явления по одному из объектов исследований на Ближнем Востоке представлен на рис. 11. Поэтому МФ может рассматриваться и как эффективный антиаляйсинговый инструмент при миграции после суммирования в сложных глубинных сейсмогеологических условиях.

В отношении миграций до суммирования МФ может быть эффективным как инструмент регуляризации отражений на сейсмограммах при низком соотношении сигнал / помеха исходных данных. В остальном же миграция до суммирования является автономной ветвью обработки со своими методами учета и использования различий в удалениях ПВ–ПП.

Следует отметить еще одну особенность МФ, имеющую отношение к миграциям после и до суммирования. Кусочно-криволинейная аппроксимация отражателей, а также определение в явном виде параметра β в МФ, могут хорошо согласовываться с методологи-

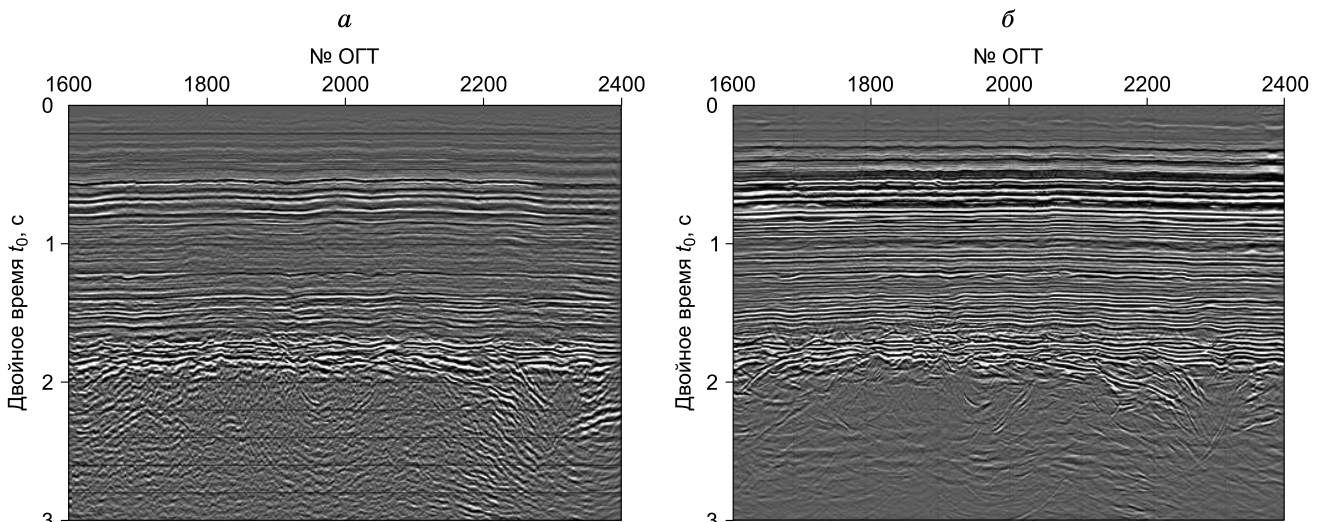


Рис. 10. Мигрированные временные разрезы: \bar{a} – СО; \bar{b} – МФ.

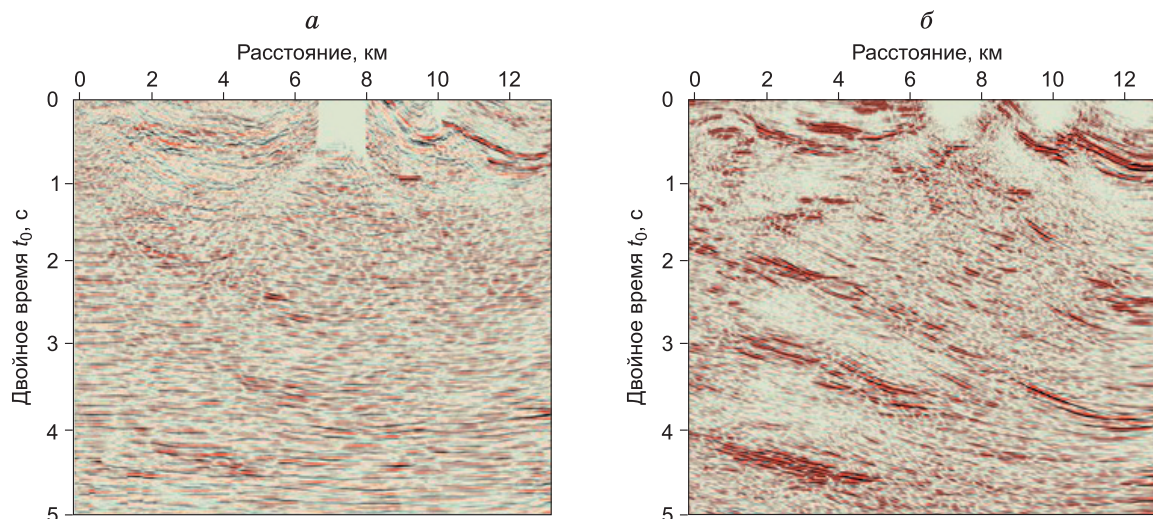


Рис. 11. Результаты кирхгофсовской миграции данных СО (а) и МФ (б) по профилю CSH08-22 (Ближний Восток).

ей гауссовской бим-миграции после и до суммирования [Hill, 1990, 2001]. К сожалению, такой подход не находит применения в МФ (по крайней мере, по публикациям о нем ничего не известно), однако в случае его реализации он, несомненно, мог бы раскрыть потенциал технологии в более полном виде.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный нами анализ показал, что технология мультифокусинга оперирует теми же или схожими подходами, что и стандартная сейсморазведка, и между ними имеются вполне закономерные соответствия. Принципиальным отличием является то, что стандартная обработка опирается на область общей средней точки, а мультифокусинг – на область общего пункта возбуждения (общего пункта приема). Соответственно этому и “раскладываются” преимущества и ограничения стандартной обработки и мультифокусинга.

Кроме рассмотренного, можно отметить, что механизм расчета кинематической поправки в мультифокусинге в виде набора формул (2), (5) и (11) может настраиваться и на выделение дифрагированных волн [Berkovich et al., 2009]. Все вместе это позволяет рассматривать технологию расчета кинематической поправки в мультифокусинге не как более точную (как декларируется в публикациях по этой технологии), но как свободную от ограничений стандартной технологии МОГТ, как в смысле необязательности соблюдения принципа ОСТ суммируемых трасс и выбора оптимальной формы оператора суммирования, так и в смысле адаптивности мультифокусинга на выделение не только отраженных, но и дифрагированных волн.

Литература

Беркович А., Бельфер И., Мешбей В., Цимбалюк Ю.А. Новый эффективный метод обработки данных, полученных в сложных сейсмогеологических условиях // Состояние, тенденции и проблемы развития нефтегазового по-

тенциала Западной Сибири: Материалы Междунар. акад. конф. Тюмень, 2009. С. 105–109.

Боганик Г.Н., Гурвич И.И. Сейсморазведка: Учебник для вузов // Тверь: АИС, 2006. 744 с.

Bancroft J.C. A practical understanding of pre- and poststack migrations. V. 2 (Prestack) // SEG. 1998.

Berkovich A., Belfer I., Landa E. Multifocusing as a method of improving subsurface imaging // The Leading Edge. 2008. V. 27, N 2. P. 212–256.

Berkovich A., Belfer I., Hassin Y., Landa E. Diffraction imaging by multifocusing // Geophysics. 2009. V. 74. P. WCA75–WCA81.

Berkovitch A., Deev K., Landa E. Multifocusing-based multiple attenuation // The Leading Edge. 2012a. V. 31, N 10. P. 1146–1152.

Berkovitch A., Deev K., Pelman D., Rauch-Davies M. Multifocusing 3D diffraction imaging // 74th EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC. Copenhagen, Denmark, 2012b.

Gelchinsky B., Berkovitch A., Keydar S. Multifocusing homeomorphic imaging. Part 2: Multifold data set and multifocusing // J. Appl. Geophys. 1999. V. 42. P. 243–260.

Hill R. Gaussian beam migration // Geophysics. 1990. V. 55. P. 1416–1428.

Hill R. Prestack gaussian-beam depth migration // Geophysics. 2001. V. 66. P. 1240–1250.

Landa E., Gurevich B., Keydar S., Trachtman P. Application of multifocusing method for subsurface imaging // J. Appl. Geophys. 1999. V. 42. P. 283–300.

Landa E. Improved seismic imaging using multifocusing technology // DEW J. 2011. September. P. 59–63.

Landa E., Berkovich A., Deev K. Multifocusing-based multiple attenuation // The Leading Edge. 2012. V. 31. P. 1146–1154.

Robein E. Velocities, time-imaging and depth-imaging in reflection seismics. Principles and methods // EAGE Publications Bv. 2003. 464 p.

Sheriff R.E. Encyclopedic dictionary of applied geophysics // SEG. 2002. V. 13: Geophysical references.

Yilmaz O. Seismic data analysis: processing, inversion and interpretation of seismic data // Society of Exploration Geophysicists. 2001. V. 1. 1000 p.

Поступила 23 января 2014 г.,
в окончательном варианте – 29 марта 2015 г.

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

СЫДЫКОВ Кайрат Журмбекович – кандидат геолого-минералогических наук, заведующий отделом проектирования и комплексного сопровождения. Тел.: +7 905 742 86 79, e-mail: kairat.sydykov@gmail.com