



МЕТОД ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ СКОРОСТНОГО АНАЛИЗА ОБЩЕЙ ГЛУБИННОЙ ТОЧКИ

А.А. Шевченко

*Московский исследовательский центр Шлюмберже,
119285, Москва, ул. Пудовкина, 13, Россия, e-mail: AShevchenko@exchange.slb.com*

Рассмотрена проблема точности определения эффективных скоростей ОГТ по вертикальным и горизонтальным спектрам. В качестве основной идеи анализа используется зависимость формы спектра скорости от частоты сейсмического сигнала и среднеквадратической ошибки аппроксимации годографа. Для определения чувствительности скоростного анализа предлагается применять критерий Марешаля, устанавливающий пороговое значение точности измерений. На основе предложенного подхода исследуется точность определения эффективных скоростей для различных апертур анализа скорости ОГТ по модельной сейсмограмме. Приведенный пример иллюстрирует неоднозначность построения скоростной модели среды.

Спектр скорости, суммирование ОГТ, критерий Марешаля, амплитудно-частотная характеристика

ACCURACY EVALUATION METHOD FOR THE CDP VELOCITY ANALYSIS

A.A. Shevchenko

*Schlumberger Moscow Research,
Pudovkina str., 13, Moscow, 119285, Russia, e-mail: AShevschenko@exchange.slb.com*

A general problem of accuracy evaluation is very important for the CDP velocity analysis made by the vertical or horizontal velocity spectra interpretation. The main idea of the precision estimation is based on dependence between the velocity spectra structure and two parameters: wavelet frequency and dispersion of the arrival time curve approximation. For the aim of the velocity spectrum sensitivity threshold evaluation Marechal criteria was introduced. Based on the introduced strategy the modeled data have been analyzed. Offset dependence of the velocity analysis were investigated. This example is describing the uncertainty of the effective velocity estimation.

Velocity spectrum, CDP stacking, Marechal conditions, amplitude frequency characteristic

ВВЕДЕНИЕ

Скоростной анализ – один из ключевых шагов в графе обработки сейсмических данных. Методика, основанная на построении вертикальных или горизонтальных спектров скоростей, позволяет получить закон суммирования даже при наличии высокого уровня помех. Качество выбранного закона скоростей обычно оценивается субъективно или с помощью количественных оценок, измеряющих отношение сигнал/шум для заданных отражающих горизонтов по суммарным разрезам ОГТ. На практике небольшой уровень полезного сигнала по сравнению с регулярными помехами приводит к ошибке в оценке скоростей суммирования. Но даже для идеального случая полного отсутствия помех скоростной анализ имеет свои ограничения. Существует порог чувствительности суммарной трассы к изменению закона скорости. Иными словами, два различных закона скорости, используемых для суммирования ОГТ, могут приводить к очень близким и практически неразличимым суммарным трассам.

Задача настоящей работы – определение точности анализа скоростей. Основным критерием оценки является амплитуда, наблюдаемая на спектре скоро-

сти или суммарной трассе ОГТ. Если по спектрам определен некоторый оптимальный скоростной закон, то очевидно, что его изменение будет приводить к уменьшению амплитуды отражений на суммарном разрезе. Требуется найти закон изменения энергии сигнала при суммировании в зависимости от вариаций годографа и частоты сейсмического сигнала. Если такая зависимость найдена, то точность скоростного анализа определяется по заданному порогу чувствительности или уровню шумов. Ценность такой оценки в том, что она дает возможность сравнивать точность определения эффективных скоростей для различных систем наблюдения.

Определение параметров годографа, так же как и построение спектров скоростей, базируется на использовании операторов регулируемого направленного анализа (РНА) [1, 2]. Сравнения операторов РНА и анализ точности оценки скоростей ОГТ были выполнены А.А. Маловичко [3], который показал, что дисперсия оценки скоростей пропорциональна дисперсии времен относительно прослеженного по сейсмограмме годографа. В работах Н.Н. Пузырева [4] и А.К. Урупова, А.Н. Левина [1] не рассматривалась за-

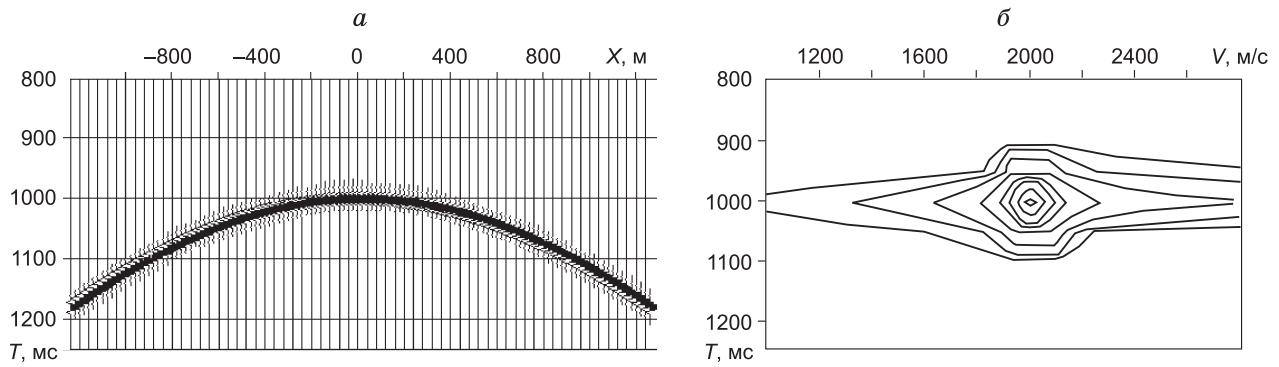


Рис. 1. Спектр скорости, рассчитанный с окном осреднения 0,05 с:

a – модельная сейсмограмма ОГТ, параметры годографа отраженной волны $t_0 = 1000$ мс, $V = 2000$ м/с; *б* – спектр скорости.

висимость амплитуды суммарного сигнала на разрезах ОГТ от вариаций параметров годографа. Как правило, исследования сводились к установлению прямой параметрической зависимости между эффективными скоростями и параметрами системы наблюдений или ошибками определения времен годографов.

В качестве простого примера, поясняющего постановку задачи, используем модельную сейсмограмму с одним отраженным сигналом, имеющим годограф с временем минимума 1 с и скоростью 2000 м/с. На рис. 1 приводится пример построения спектра скорости для идеального случая – полного отсутствия помех. Спектр (см. рис. 1, б) рассчитан с помощью оценки сембланс, имеет хорошо выраженный максимум, соответствующий истинной скорости, заложенной в модель (2000 м/с). Пространственное сглаживание и разрешенность спектра контролируются двумя параметрами – это окно интегрирования по времени и количество трасс, входящих в расчет оператора сембланс. Кроме этого форма спектра скорости зависит от частотного состава записи отраженной волны. Если рассматривать спектр скорости (см. рис. 1, б) как поверхность или функцию, зависящую от двух координат (T, V), то задача выбора оптимальной скорости – это стандартная задача поиска максимума функции. Если изменения поверхности в зависимости от параметра скорости V плавные, то точность измерения невелика, и наличие помех на сейсмограммах может привести к существенным ошибкам. Параметрическая зависимость формы спектра от параметра V достаточно сложная, но в окрестности максимума она может быть аппроксимирована квадратичной функцией, что дает возможность получить оценки точности скоростного анализа.

ОТКЛОНЕНИЕ ВОЛНОВОГО ФРОНТА ОТ ЛИНИИ СУММИРОВАНИЯ

Суммирование сигналов вдоль заданного годографа лежит в основе построения операторов РНА. Для различных операторов РНА [2] форма спектра может быть различной, но общие закономерности определяются интерференционной системой и суммированием сигналов и помех по выбранным скоростным законам. Как правило, годограф отраженной волны t всегда остается неизвестной функцией (рис. 2), а суммирование выполняется вдоль заданной линии S . При этом разностная функция $\Phi = t - S$

определяет искажения, вносимые интерференционной системой в спектр сигнала после суммирования. Если форма сигнала не изменяется в пределах апертуры суммирования, то средний спектр зависит от Φ :

$$U(\omega) = \frac{F(\omega)}{N} \sum_{i=1}^N e^{-j\omega\Phi_i}, \quad (1)$$

где $F(\omega)$ – спектр сейсмического сигнала; индекс суммирования i обозначает номер трассы в сейсмограмме.

Оценим энергию сигнала, получающегося в результате суммирования. Для этого перейдем к рассмотрению энергетического спектра суммарной трассы и разложим экспоненту в уравнении (1) в ряд:

$$U(\omega)U^*(\omega) = \frac{F(\omega)F^*(\omega)}{N^2} \times \left[\sum_{i=1}^N \left(1 + j\omega\Phi_i + \frac{1}{2}(j\omega\Phi_i)^2 + \dots \right) \right] \times \left[\sum_{i=1}^N \left(1 + j\omega\Phi_i + \frac{1}{2}(j\omega\Phi_i)^2 + \dots \right) \right]^*, \quad (2)$$

где $U^*(\omega)$ и $F^*(\omega)$ – сопряженные спектры суммарной трассы и сейсмического сигнала. Обозначим среднее значение степени n функции Φ :

$$\overline{\Phi^n} = \frac{1}{N} \sum_i \Phi_i^n.$$

Для того чтобы изучать амплитудно-частотные характеристики суммирования, предположим, что в пределах апертуры изменяется только функция Φ . Это позволит нам перейти к рассмотрению нормиро-

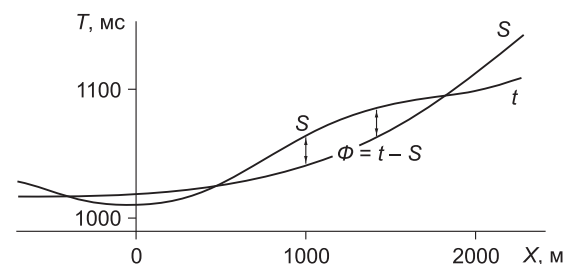


Рис. 2. Сравнение теоретического годографа S и реального годографа t .

ванной характеристики $I(\omega)$. Считая отклонения малыми, можно пренебречь членами с третьей и более высокими степенями от функции Φ :

$$I(\omega) = \frac{U(\omega)U^*(\omega)}{F(\omega)F^*(\omega)} \approx \left(1 + j\omega\bar{\Phi} - \frac{1}{2}\omega^2\bar{\Phi}^2\right) \times \left(1 - j\omega\bar{\Phi} - \frac{1}{2}\omega^2\bar{\Phi}^2\right) = 1 - \omega^2(\bar{\Phi}^2 - \bar{\Phi}^2). \quad (3)$$

Величина $(\Delta\Phi)^2 = (\bar{\Phi}^2 - \bar{\Phi}^2)$ является среднеквадратическим отклонением реального годографа t от годографа, вдоль которого выполнялось суммирование S . С учетом введенного обозначения выражение (3) имеет вид

$$I(\omega) \approx 1 - \omega^2(\Delta\Phi)^2. \quad (4)$$

Формула (4) показывает зависимость энергии суммарной трассы от среднеквадратического отклонения суммируемого сигнала относительно направления суммирования. Значения функции Φ могут быть обусловлены статическими сдвигами трасс или искажениями годографа отраженной волны, в любом случае амплитуда сигнала суммарной трассы определяется только среднеквадратическим значением $(\Delta\Phi)^2$, это дает возможность оценить зависимость амплитудных искажений от величины временных задержек Φ суммируемых сигналов.

КРИТЕРИЙ МАРЕШАЛЯ

В оптике для оценки величины отклонения волновых фронтов от идеальной сферической формы применяется критерий Марешаля [5]. Данный критерий определяет допустимые искажения волнового фронта в оптических приборах. Считается, что если амплитуда максимума на интерференционной картине уменьшается менее чем в 0,9 раза (или интенсивность в 0,8 раза), то такие отклонения фронта волны невелики, т. е. их нельзя измерить и, следовательно, их влиянием можно пренебречь. Можно считать, что в этом критерии заложен 10-процентный уровень от максимума амплитуды в интерференционной картине, что может быть приемлемым для анализа волновых полей с малым уровнем шума. Критерий Марешаля можно выразить в терминах среднеквадратического отклонения волнового фронта. В оптике считается, что для соответствия критерию Марешаля величина среднеквадратического отклонения волнового фронта должна удовлетворять условию

$$|\Delta\Phi| \leq \frac{\lambda}{14}, \quad (5)$$

где λ – определяет длину волны.

Обычно в сейсморазведке при рассмотрении интерференции двух волн считают, что эти волны различимы, если задержка между фронтами интерферирующих волн больше четверти видимой длины волны [6, 7]. Критерий, задаваемый четвертью длины волны, определяет возможность измерения задержки между двумя интерферирующими сигналами или возможности разделения двух сигналов. Более жесткий критерий Марешаля устанавливает нижний порог чувствительности при определении положения максимума в интерференционной картине. Можно сказать, что если отклонение годографа удовлетворяет критерию

(5), значит, изменения амплитуды суммарного сигнала незначительны и величину такого отклонения невозможно определить. Таким образом, критерий Марешаля задает точность измерения параметров годографа по интерференционной картине [8]. В работе [3] при исследовании влияния статических поправок получена аналогичная оценка точности определения скорости при РНА, связывающая дисперсию остаточных статических поправок с погрешностью измерения скоростей.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРОБОВАНИЯ НА МОДЕЛЬНЫХ ДАННЫХ

Цель стандартного двухпараметрического перебора, основанного на анализе спектра скорости, – построение зависимости $V(t_0)$. Точность скоростного анализа определяет качество построения суммарных разрезов. Как правило, для анализа скоростей используются достаточно большие удаления источник–приемник на сейсмограмме ОГТ. Но использование больших удалений источник–приемник оправдано только при отсутствии изменений в скоростной модели среды. Если же скорости изменяются вдоль профиля, то естественно попытаться измерить скорости на меньшей базе. Уменьшение апертуры суммирования дает возможность более дифференцированно, без пространственного сглаживания определять скорости суммирования. Кроме того, в слоистой среде преломление на границах приводит к изменению формы годографа. Чем больше скоростная дифференциация разреза, тем больше годограф отраженной волны отличается от гиперболы [1]. Поэтому отказ от использования больших удалений источник–приемник на сейсмограмме ОГТ дополнительно дает возможность избежать негиперболичности годографа, связанной со слоистостью среды.

Однако уменьшение апертуры построения скоростных спектров приводит к естественному уменьшению точности скоростного анализа. Выполним на модели тест по определению точности анализа скоростей ОГТ по спектрам РНА. На рис. 3, б показана кривая пластовых скоростей, использованная для лучевого моделирования волнового поля в горизонтально-слоистой модели. Скоростная модель построена на основе обработки реальных данных ВСП. В качестве сигнала источника использовался нуль-фазовый оператор полосового фильтра с видимой частотой 20 Гц. На фрагменте рис. 3, а представлена сейсмограмма ОГТ, шаг по удалениям 20 м, максимальные удаления ± 2000 м. В верхней части разреза модель состоит из достаточно толстых слоев, поэтому отраженные волны, приходящие на временах до 1500 мс, не интерферируют друг с другом. Волна, отраженная от первой границы, была исключена из скоростного анализа с помощью мьютинга.

На рис. 4, а приведена сейсмограмма ОГТ, по которой выполнялся скоростной анализ. Спектры скорости (см. рис. 4, б) определялись для полного спектра удалений ± 2000 м. На спектрах нанесены три скоростных закона – V_{\min} , V , V_{\max} . Центральная кривая с индексом V есть результат определения скорости по максимумам энергии на спектрах скоростей. Кривые $V_{\min}(t_0)$ и $V_{\max}(t_0)$ рассчитывались исходя из условия (5). Для каждого выделенного по спектрам скорости отражения находились два значения скорости, при которых среднеквадратическое отклонение годо-

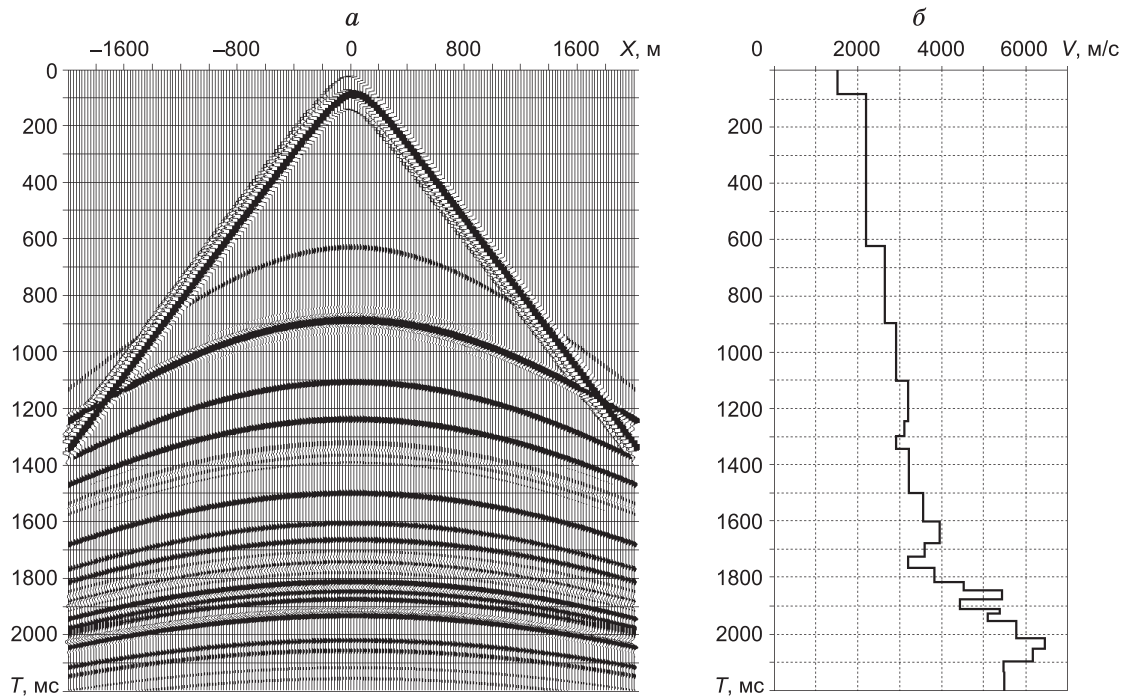


Рис. 3. Модельная сейсмограмма ОГТ (*a*) и скорости, использованные для расчета отраженных волн в горизонтально-слоистой модели среды (*б*).

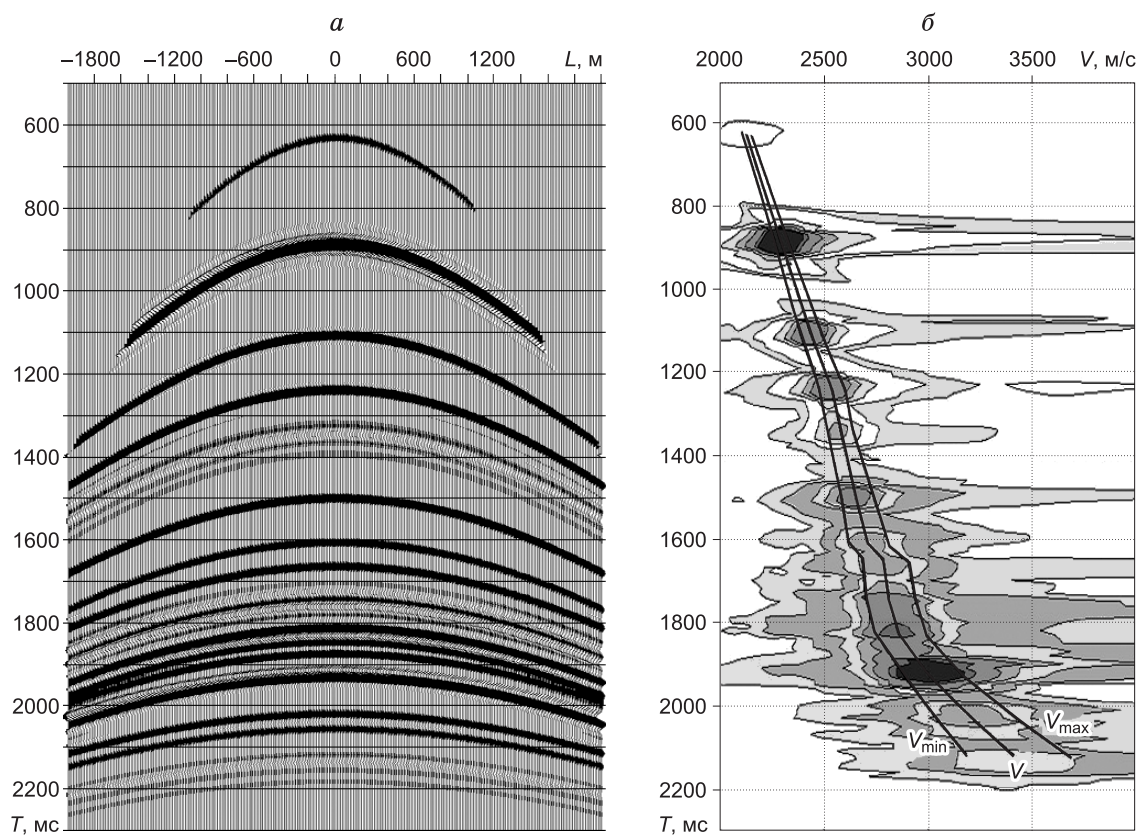


Рис. 4. Анализ точности скоростного анализа для максимальных удалений ± 2000 м: *a* – сейсмограмма ОГТ; *б* – спектр скорости.

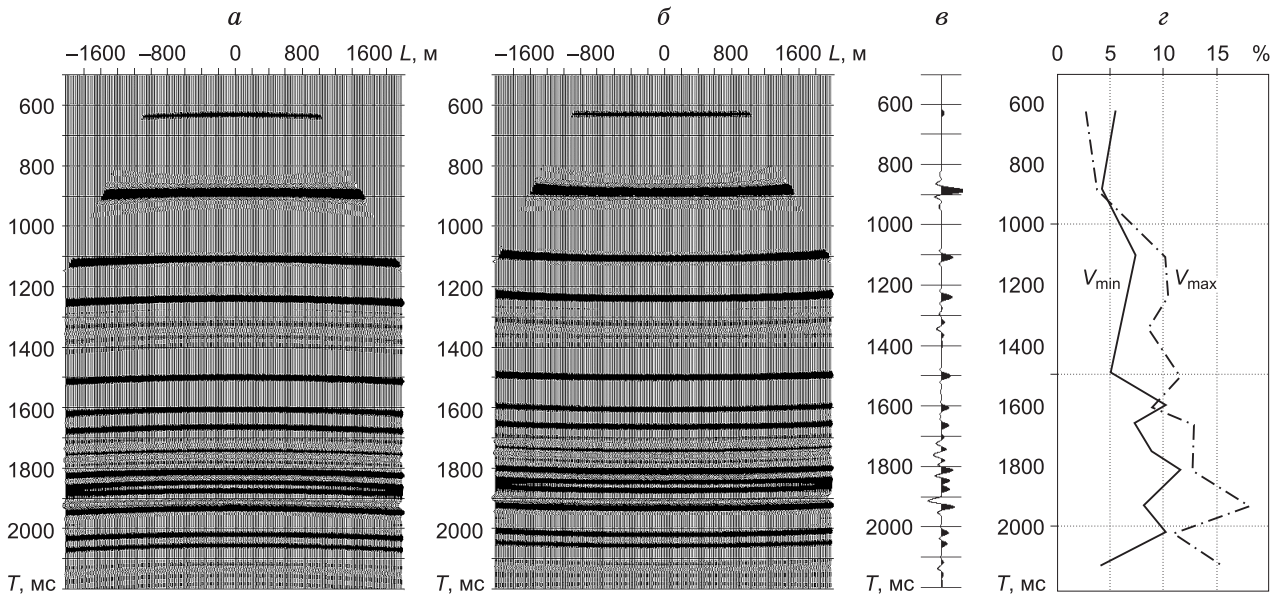


Рис. 5. Анализ искажений амплитуды на суммарной трассе ОГТ при суммировании с максимальными удалениями $L_{\max} = \pm 2000$ м:

a – сейсмограмма ОГТ с введенной кинематикой по закону $V_{\max}(t_0)$; $б$ – сейсмограмма ОГТ с введенной кинематикой по закону $V_{\min}(t_0)$; $в$ – суммарная трасса ОГТ; $з$ – графики амплитудных искажений суммарной трассы ОГТ.

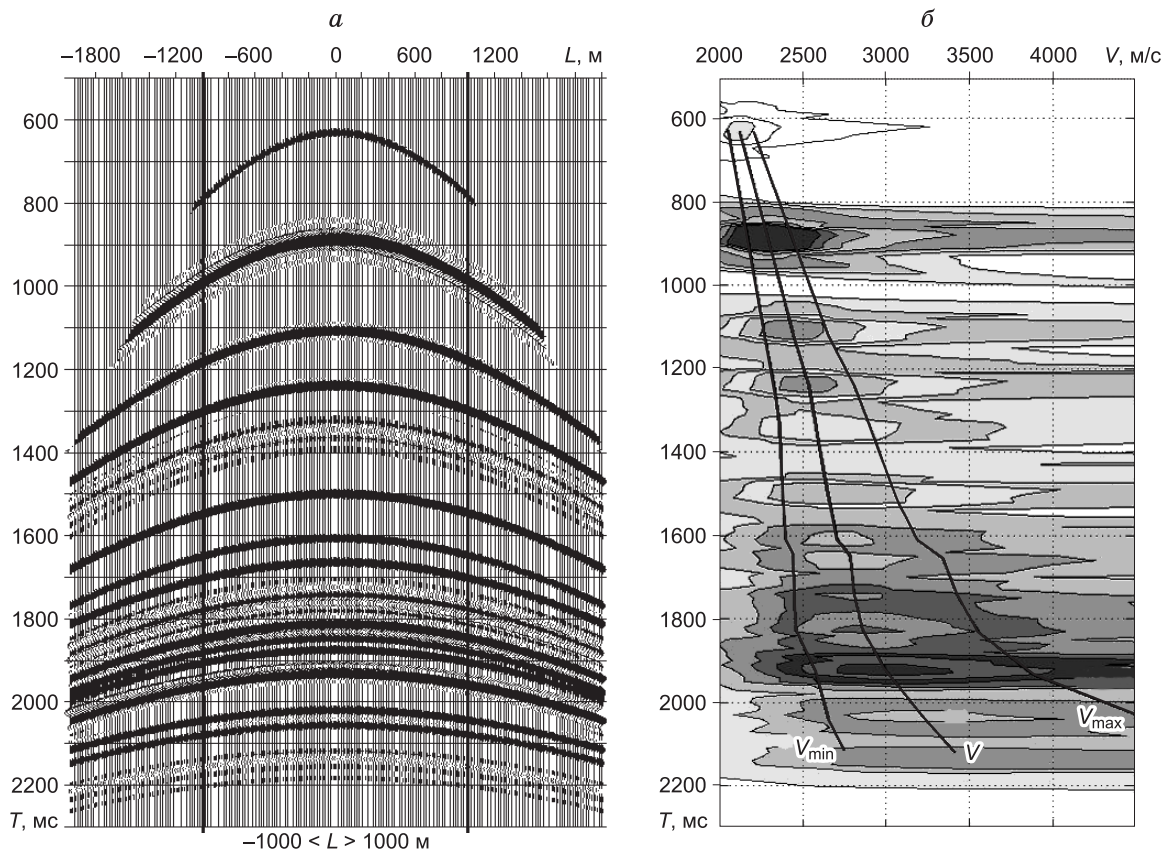


Рис. 6. Анализ точности скоростного анализа для максимальных удалений ± 1000 м:

a – сейсмограмма ОГТ; $б$ – спектр скорости.

графов относительно правильного годографа $V(t_0)$ отвечает знаку равенства в критерии Марешаля (5). Использование рассчитанных таким образом законов $V_{\min}(t_0)$ и $V_{\max}(t_0)$ для суммирования ОГТ приводит к изменению амплитуды суммарной трассы. Анализ амплитудных искажений проиллюстрирован на рис. 5. На фрагменте *a* и *б* приведены сейсмограммы ОГТ с введенной кинематикой по законам $V_{\max}(t_0)$ и $V_{\min}(t_0)$ соответственно. Неточность ввода кинематики заметна визуально, отражения на сейсмограмме имеют остаточную кривизну, но ошибки ввода кинематики на максимальных удалениях существенно меньше видимого периода сейсмического сигнала. Результат суммирования сейсмограмм привел к амплитудным изменениям на суммарной трассе по сравнению с трассой, полученной по точному скоростному закону (см. рис. 5, *в*). Относительное изменение амплитуд (см. рис. 5, *г*) измерялось для отдельных отражений. Причем измерение амплитуды отраженной волны производилось в точке локального экстремума, т. е. принимались во внимание небольшие фазовые подвижки на суммарной трассе, обусловленные неточным вводом кинематики. Относительные амплитудные искажения, обусловленные неточным вводом кинематики, составили около 10 %. Возможный разброс оценок относительно 10-процентного уровня зависит от различных причин – использования мьютинга, растяжки сигналов и интерференции отражений на тонких слоях.

Повторение анализа ошибок измерения скоростей был выполнен по той же самой модели, однако для построения скоростных спектров и суммирования ОГТ выбирались меньшие максимальные удаления ± 1000 м. Диапазон удалений показан на исходной сейсмограмме (рис. 6, *a*). Уменьшение апертуры построения спектров скорости привело к вытянутости по горизонтали всех энергетических максимумов (см. рис. 6, *б*) и, как следствие, потери точности РНА. Для

меньшей апертуры пересчитывались графики $V_{\min}(t_0)$ и $V_{\max}(t_0)$. Их отклонение от оптимального скоростного закона $V(t_0)$ диагностирует уменьшение точности анализа скоростей по сравнению с анализом полной сейсмограммы. Введение в сейсмограмму ОГТ кинематических поправок по законам $V_{\max}(t_0)$ и $V_{\min}(t_0)$ (рис. 7, *a*, *б*) приводит к существенным остаточным кривизнам отражений. Но если ограничить диапазон удалений и рассматривать их только в диапазоне ± 1000 м, то ошибки ввода кинематики будут намного меньше длины видимого периода сейсмического сигнала. Анализ амплитудных искажений по отношению к суммарной трассе ОГТ (см. рис. 7, *в*, *г*) показывает 10-процентный уровень относительной ошибки. При уменьшении апертуры суммирования достаточно большие отклонения (300–500 м/с) от правильного скоростного закона привели к небольшим изменениям суммарной трассы ОГТ.

Приведенный модельный пример показывает, как можно оценивать на практике достижимую точность измерения скоростей суммирования ОГТ по спектрам РНА. Область на спектрах скоростей (см. рис. 4, *б*; 6, *б*) между двумя законами $V_{\min}(t_0)$ и $V_{\max}(t_0)$ характеризует неопределенность скоростного анализа. Любая скоростная кривая, проведенная в выделенной области, может быть использована для ввода кинематических поправок и суммирования. При этом изменение амплитуды суммарной трассы по сравнению с точным решением будет не более 10 %. Следует отметить, что диапазон между минимальной и максимальной скоростями, определенными по критерию Марешаля, характеризует точность скоростного анализа. Сопоставляя спектры скоростей, полученные при различных максимальных удалениях (см. рис. 4, *б*; 6, *б*), наблюдаем, что понижение апертуры анализа приводит к существенному уменьшению точности измерения скорости. Определения скоростей ОГТ и постро-

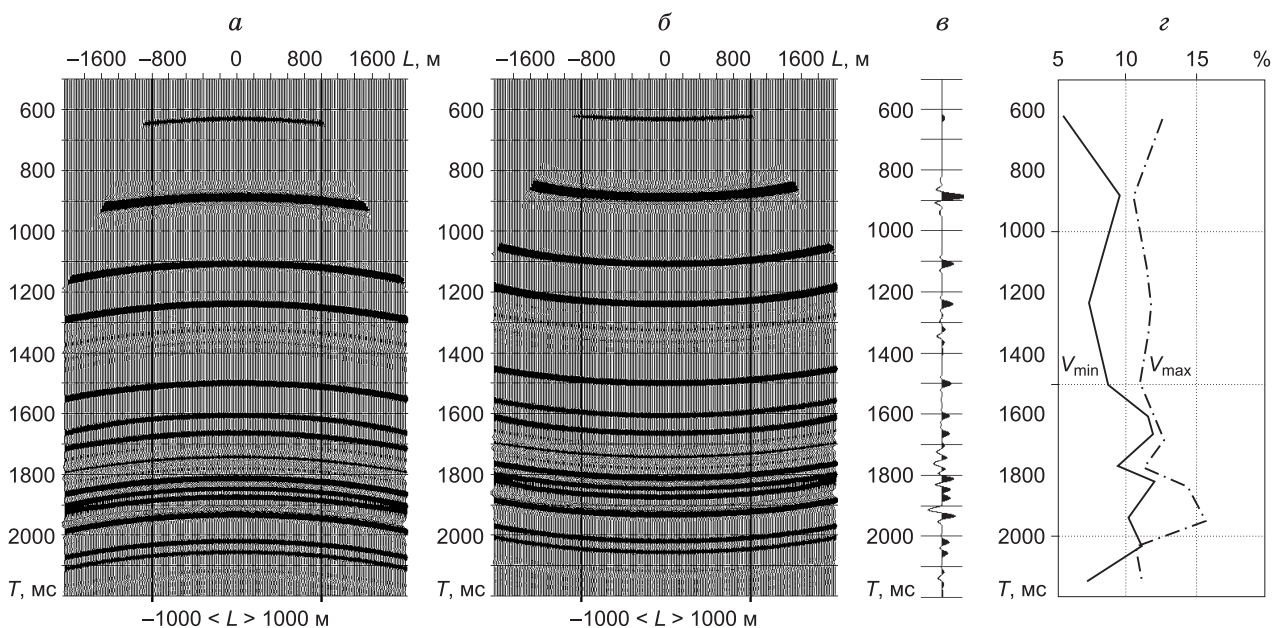


Рис. 7. Анализ искажений амплитуды на суммарной трассе ОГТ при суммировании с максимальными удалениями $L_{\max} = \pm 1000$ м:

a – сейсмограмма ОГТ с введенной кинематикой по закону $V_{\max}(t_0)$; *б* – сейсмограмма ОГТ с введенной кинематикой по закону $V_{\min}(t_0)$; *в* – суммарная трасса ОГТ для удалений $L_{\max} = \pm 1000$ м; *г* – графики амплитудных искажений суммарной трассы ОГТ.

ения разрезов ОГТ с использованием малых удалений не используются на практике в основном из-за того, что теряется помехоустойчивость интерференционной системы по отношению к регулярным волнам-помехам. Точность скоростного анализа имеет принципиальное значение при построении пластовых скоростных моделей и миграции сейсмических данных. При построении скоростной модели среды очень важно соблюдать оптимальное соотношение между величиной апертуры анализа и точностью оценки модели.

ВЫВОДЫ

В настоящей работе обоснована методика оценки точности скоростного анализа. Показано, что оценка точности может базироваться на вычислении среднеквадратического отклонения реального годографа отраженной волны от гиперболического годографа, используемого для переборов и суммирования. В качестве граничного критерия точности предложено использовать критерий Марешаля (5). Выполненные на модельных данных эксперименты подтвердили, что предложенная методика применима на практике и что использование оценки Марешаля действительно ограничивают вариации амплитуд на суммарной трассе на уровне не выше 10 %. Преимущество подхода, основанного на критерии Марешаля, заключается в том, что он позволяет определить порог чувствительности интерференционной системы. Использование на практике предложенной методики позволяет

сравнивать различные подходы к анализу скоростей, давать численную оценку неоднозначности построения пластовой модели среды.

Литература

1. Урупов А.К., Левин А.Н. Определение и интерпретация скоростей в методе отраженных волн. М.: Недра, 1985. 288 с.
2. Урупов А.К. Основы трехмерной сейсморазведки. М.: Изд-во "Нефть и газ" РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2004. 584 с.
3. Маловичко А.А. Погрешности вычисления эффективных и интервальных скоростей при обработке на ЭВМ материалов сейсморазведки МОГТ // Разведочная геофизика: Обзор ВИЭМС. М., 1984. 76 с.
4. Пузырев Н.Н. Интерпретация данных сейсморазведки методом отраженных волн. М.: Гостоптехиздат, 1959. 446 с.
5. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1970. 720 с.
6. Напалков Ю.В., Сердобольский Л.А. Основы теории интерференционных систем в сейсморазведке. Ч. 1. Теория волновой фильтрации. М., 1981. 112 с.
7. Теория и практика сейсмического метода РНП / Л.А. Рябинкин, Ю.В. Напалков, В.В. Знаменский и др. М.: Гостоптехиздат, 1962. 294 с.
8. Шевченко А.А., Трунов Е.А. Точность определения эффективной скорости при регулируемом направленном анализе // Изв. вузов. Геология и разведка. 2009. № 6. С. 59–64.

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

ШЕВЧЕНКО Алексей Александрович в 1981 г. окончил МИНХиГП им. И.М. Губкина, кандидат технических наук. Работал в ЦГЭ МНП (г. Москва) в компаниях МД СЕЙС и ПетроАльянс. С 2006 г. сотрудник научно-исследовательского центра Шлюмберже. Доцент кафедры разведочной геофизики и компьютерных систем РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, член профессиональных обществ SPE, EAPO, EAGE и SEG.
E-mail: AShevchenko@exchange.slb.com