

## ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СПОСОБ УЧЕТА НЕОДНОРОДНОСТИ ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ РАЗРЕЗА ПРИ ОБРАБОТКЕ ДАННЫХ МОГТ

А.П. Сысоев, Г.Д. Горелик

*Санкт-Петербургский горный университет, 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия, 2, Россия*

Компенсация неоднородности верхней части разреза является важной составляющей обработки данных метода отраженных волн. Проблема решается пересчетом наблюдаемого волнового поля на горизонтальную линию приведения. Традиционно две системы годографов отраженных волн, определенных от линий наблюдения и приведения, связаны статическими поправками. В работе решается задача пересчета, в которой зависимость кинематических параметров наблюдаемого и пересчитанного волнового поля определена уравнением среднеквадратичной скорости для двухслойной модели среды. Выполнен сравнительный анализ двух способов компенсации поверхностной неоднородности, представленной переменной альтитудой дневной поверхности.

*Метод отраженных волн, верхняя часть разреза, переменный рельеф дневной поверхности, эффективные скорости.*

## PARAMETRIC METHOD OF COMPENSATION FOR NEAR-SURFACE HETEROGENEITY IN PROCESSING CDP DATA

A.P. Sysoev and G.D. Gorelik

Compensation for near-surface heterogeneity is an important part of the seismic reflection method. The problem is solved by continuing the observed wavefield to a horizontal datum. Traditionally, two reflection traveltimes determined from survey and datum lines are related by static shift corrections. In this paper, we solve a continuation problem in which the relation between the traveltimes of the observed and continued wavefields is given by the root-mean-square velocity equation for a two-layer earth model. A comparative analysis is made for the two methods of compensation for surface heterogeneity due to the variable altitude of the ground surface.

*Seismic reflection method, near-surface heterogeneity, variable ground surface topography, root-mean-square velocity*

### ВВЕДЕНИЕ

В статье, опубликованной С.В. Гольдиным в 1961 г., задача определения глубины отражающего горизонта описана следующим образом [Гольдин, 1961, 2011].

Пусть  $D$  — область исследования в плоскости  $(x, y)$ . Будем считать, что в любой точке  $M(x, y)$  определены параметры:  $t_0(M)$ ,  $v_s(M)$  — вертикальное время и эффективная скорость отраженной волны, являющиеся однозначными функциями переменной  $M$ . Глубина горизонта определяется уравнением:

$$h(M) = t_0(M)\bar{v}(M) / 2,$$

где  $\bar{v}(M)$  — средняя скорость до отражающей границы. Для определения неизвестного параметра  $\bar{v}(M)$  можно сделать два предположения. Соотнесем значение средней скорости в точке  $M$  к значению: а) вертикального времени  $\bar{v} = f(t_0)$ ; б) эффективной скорости (скорости суммирования)  $\bar{v} = f(v_s)$ .

Задача прогноза глубины отражающего горизонта сводится к определению зависимости, описывающей среднюю скорость либо непосредственно глубину горизонта через измеряемые в процессе сейсмических исследований кинематические параметры волнового поля. В результате получаем две постановки задачи структурных построений. В первом случае прогноз выполняется только по вертикальным временам отраженных волн, во втором — исходными данными являются вертикальные времена и эффективные скорости отраженных волн.

Оценка кинематических параметров отраженных волн реализуется на основе уравнения нормального годографа ОГТ для локально-однородной модели среды и горизонтальной линии приведения. В этой модели отсутствуют составляющие, описывающие неоднородность верхней части разреза (ВЧР), в частности, переменный рельеф дневной поверхности и зона малых скоростей. В силу этого кинема-

тические составляющие волнового поля, связанные с латеральной неоднородностью ВЧР, должны быть исключены в процессе обработки. В общем случае возникает задача пересчета волнового поля, заданного на поверхности наблюдения на плоскую горизонтальную линию приведения. Частные варианты задачи возникают при пересчете «вниз» с исключением зоны неоднородности, «вверх» — с заданной скоростью фиктивного слоя и комбинированные варианты замещения слоя.

Если принять, что в области, ограниченной двумя поверхностями (линиями для профильных данных), лучи распространяются вертикально, то пересчет поля выполняется стандартным способом статических поправок — временных сдвигов волнового поля, постоянных для каждой трассы. Значения поправок определяются временной мощностью области пересчета в точках возбуждения и приема. Этот способ корректно учитывает влияние ВЧР для субвертикальных лучей и, соответственно, обеспечивает правильный пересчет вертикальных времен отраженных волн на линию приведения.

При обработке сейсмических данных используются отраженные сигналы, зарегистрированные на удалениях приемник—источник до ~1.6 глубины отражающего горизонта. В этом случае предположение о вертикальности лучей справедливо, если область пересчета определяется только зоной малых скоростей (ЗМС). Если условие малости скорости не выполняется, то отклонение реальной геометрии лучей от вертикали является существенным фактором искажения годографов и, соответственно, эффективной скорости отраженных волн.

В практике обработки сейсмических данных способ статических поправок является единственным способом компенсации любых типов неоднородности ВЧР. Как уже отмечено, этот способ корректно пересчитывает вертикальные времена отраженных волн, поэтому при решении задач структурной интерпретации доминируют способы подбора зависимостей глубины или средней скорости от вертикальных времен. Для более широкого использования эффективных скоростей требуется разработка новых способов компенсации, более корректно учитывающих геометрию распространения лучей в ВЧР.

В работах [Berryhill, 1979, 1984; Bevc, 1997] для решения задачи пересчета поля с линии наблюдения на горизонтальную линию приведения предлагается способ «Wave-equation datuming», реализуемый на основе миграционного преобразования Кирхгоффа. В работе [Черняк, Гриценко, 2009] рассмотрен способ ввода статических поправок с учетом эффективного угла отклонения лучей от вертикали. Способ предложен для компенсации влияния многолетних мерзлых пород, но может быть без изменения адаптирован к задаче пересчета волнового поля.

## МОДЕЛЬ СРЕДЫ

В настоящей работе задача преобразования времен отражений рассматривается как задача пересчета кинематических параметров отраженных волн. Совокупность границ, включающая линию приведения, линию наблюдения и отражающую границу, определяет двухслойную модель среды (рис. 1). Пусть для определенности линия приведения расположена ниже дневной поверхности, тогда верхний слой ограничен линией наблюдения и линией приведения (ЛП). Нижний слой своими границами имеет ЛП и отражающую границу.

Модель среды определяется следующими параметрами:

1)  $h_1, v_1$  — мощность и скорость первого слоя, соответственно,  $h_1 / v_1$  — значение статической поправки для пункта взрыва (ПВ) и приема (ПП),  $\tau = 2h_1 / v_1$  определяет значение суммарной статической поправки, постоянное для всех трасс выборки;

2)  $t_0, v_0$  — параметры второго слоя, представляющие вертикальное время и эффективную скорость отраженной волны, определяемые от линии приведения (ЛП);

3)  $(t_0 + \tau), v_r$  — вертикальное время и скорость отраженной волны, определяемые от линии наблюдения.

Значения кинематических параметров отраженных волн, регистрируемых на линии наблюдения, можно объединить уравнением среднеквадратичной скорости Урупова—Дикса [Интерпретация..., 1990]:

$$v_r^2(t_0 + \tau) = v_0^2 t_0 + v_1^2 \tau. \quad (1)$$

В этом уравнении параметры  $v_1, \tau$ , описывающие ВЧР, будем считать известными, а  $v_0, t_0$  — являются целевыми параметрами отраженной волны.

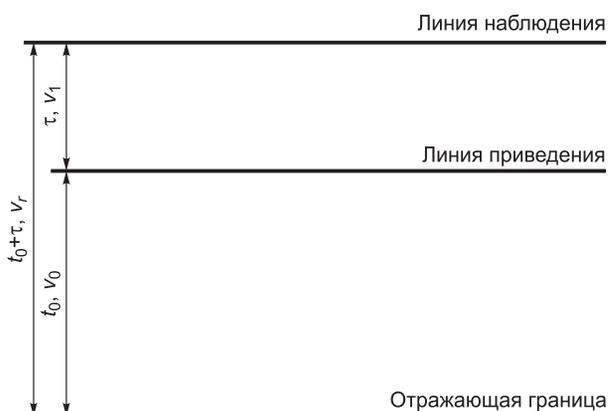


Рис. 1. Параметрическая модель среды.

## КОМПЕНСАЦИЯ ВЧР СТАТИЧЕСКИМИ ПОПРАВКАМИ

При компенсации рельефа статическими поправками времена годографов отраженных волн  $t_r(l)$ , зарегистрированных на линии наблюдения, описываются двумя аддитивными составляющими — уравнением нормального годографа ОГТ, определенного от линии приведения, и статической поправки:

$$t_r(l) = \sqrt{t_0^2 + l^2 / v_s^2} + \tau, \quad (2)$$

где  $v_s$  — скорость суммирования. Статические поправки не связаны с параметрами отраженных волн и после ввода поправок приходим к уравнению нормального годографа ОГТ.

Статические поправки не изменяют кривизну годографа ОГТ, поэтому, следуя результатам работы [Сысоев, 2008], значения кинематических параметров отраженных волн до и после пересчета можно объединить уравнением:

$$v_r^2(t_0 + \tau) = v_s^2 t_0. \quad (3)$$

В работе [Горелик, Сысоев, 2015] отмечено, что формула (3) является формальным аналогом уравнения среднеквадратичной скорости (1) при условии, что первый слой определяется интервальным временем  $\tau$  при нулевом значении скорости:

$$v_r^2(t_0 + \tau) = v_s^2 t_0 + 0 \cdot \tau.$$

Условие  $v_1 = 0$  соответствует предположению о вертикальности лучей в ВЧР, реализуемое статическими поправками при пересчете поля на линию приведения.

Уравнения (1) и (3) позволяют выразить скорость суммирования через кинематические параметры двухслойной модели среды:

$$v_s^2 t_0 = v_0^2 t_0 + v_1^2 \tau, \quad \Rightarrow \quad v_s^2 = v_0^2 + v_1^2 \tau / t_0 = v_0^2 + v_1 \frac{2h_1}{t_0}.$$

Отсюда следует, что после ввода статических поправок скорость суммирования по годографу ОГТ является функцией альтитуды дневной поверхности.

## ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СПОСОБ КОМПЕНСАЦИИ ВЧР

Общий принцип решения задачи компенсации неоднородности ВЧР на основе уравнения среднеквадратичной скорости (1) представлен в работе [Сысоев, 2011]. Кинематические параметры второго слоя модели  $t_0$ ,  $v_0$  описывают годограф ОГТ от линии приведения, а параметры  $(t_0 + \tau)$ ,  $v_r$  — годограф этой же отраженной волны, зарегистрированной на линии наблюдения:

$$t_r(l) = \sqrt{(t_0 + \tau)^2 + l^2 / v_r^2} = \sqrt{(t_0 + \tau)^2 + l^2 \frac{(t_0 + \tau)}{v_0^2 t_0 + v_1^2 \tau}}. \quad (4)$$

Здесь значение  $v_r$  определено из уравнения (1) через параметры скоростной модели среды. Поправка пересчета волнового поля на линию приведения выражается разностью времен наблюдаемого и нормального годографа:

$$\Delta(l, t_0, v_0, \tau) = \sqrt{(t_0 + \tau)^2 + l^2 \frac{(t_0 + \tau)}{v_0^2 t_0 + v_1^2 \tau}} - \sqrt{t_0^2 + l^2 / v_0^2}. \quad (5)$$

В задаче суммирования по ОГТ принимается, что графиком скоростного закона  $v_0(t_0)$  для каждого значения вертикального времени определено значение скорости суммирования. В этом случае уравнение (4) позволяет выполнять суммирование по ОГТ, учитывающее влияние ВЧР без предварительного ввода поправок, а формула (5) определяет способ пересчета волнового поля на линию приведения.

Решение задачи скоростного анализа (оценка функции  $v_0(t_0)$ ) выполняется по формуле (4) перебором значений скорости суммирования при фиксированном значении вертикального времени.

Уравнение среднеквадратичной скорости получено в результате предельного представления параметрического способа описания годографа отраженных волн для многослойной среды. Поэтому преобразование, описываемое этим уравнением, будем называть параметрическим способом учета влияния ВЧР.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТИРОВАНИЯ

Для оценки эффективности параметрического способа учета ВЧР выполнено тестирование на математических моделях волнового поля, рассчитанных для горизонтально-слоистой среды с постоянной скоростью пластов и переменной альтитудой дневной поверхности. Результатами моделирования требуется верифицировать два теоретических допущения:

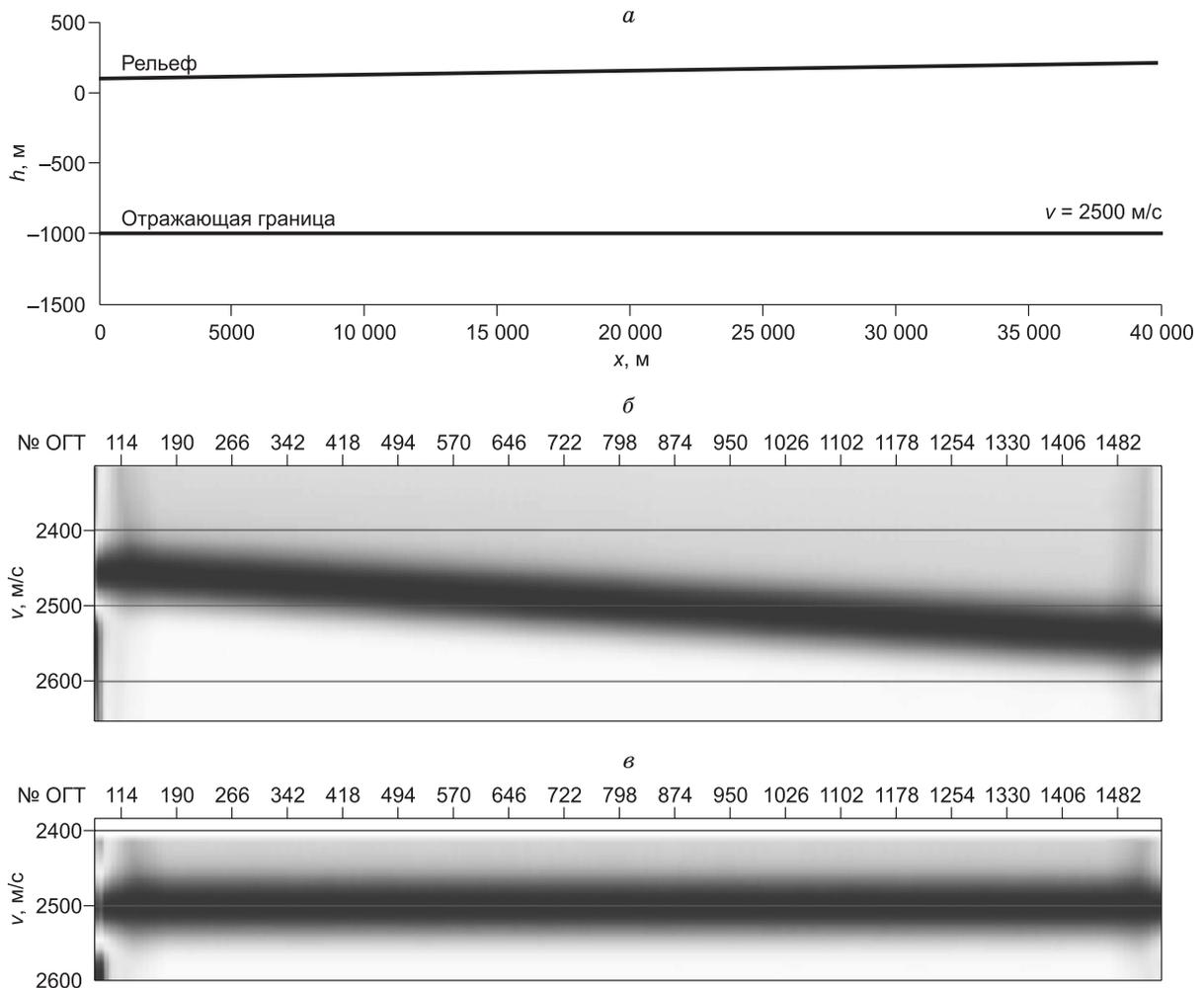
а) корректность преобразования географов отраженных волн с использованием уравнения среднеквадратичной скорости для применяемых при обработке удалений ПП-ПВ;

б) допустимость применения формул параметрического преобразования, полученных для постоянного рельефа дневной поверхности, для поверхности произвольной сложности.

По материалам моделирования решалась задача горизонтального скоростного анализа с компенсацией влияния ВЧР статическими поправками и параметрическим способом. Скоростной анализ выполнялся для удалений приемник—источник, диапазон изменения которых при вводе кинематических поправок ограничен растяжением сигнала 30 %, что составляет ~1.6 глубины отражающего горизонта. Для модели латерально однородной среды критерием эффективности преобразования является постоянное значение оценки скорости суммирования отраженной волны вдоль линии профиля.

**Модель 1.** Рельеф линии наблюдения задан наклонной линией с перепадом высот 100—200 м (рис. 2, а). Модель среды определена слоем на полупространстве с горизонтальной отражающей границей и постоянной скоростью пласта 2500 м/с, альтитуда ЛП составляет 150 м.

На рис. 2, б представлен планшет горизонтального скоростного анализа после ввода статических поправок. Здесь и далее горизонтальная шкала спектров скоростей градуирована номерами точек ОГТ с расстоянием между точками 25 м. Скорость суммирования по горизонту линейно изменяется вдоль про-



**Рис. 2. Модель 1.**

Глубинная модель среды (а); горизонтальные спектры скоростей после: ввода статических поправок (б), параметрического способа описания ВЧР (в).

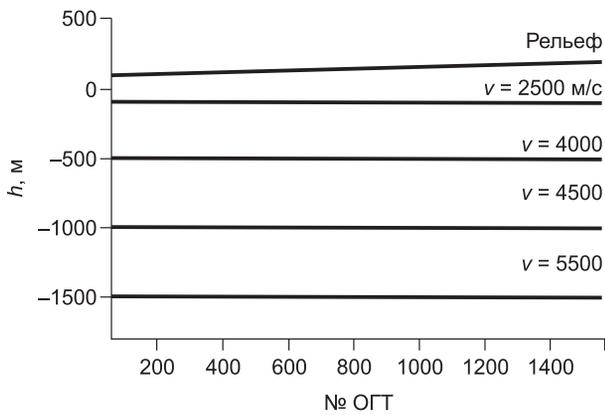


Рис. 3. Глубинная модель среды.

фия в диапазоне 2455—2545 м/с. На рис. 2, в представлены горизонтальные спектры скоростей, рассчитанные на основе параметрического способа учета неоднородности ВЧР. Ось синфазности спектров скоростей строго горизонтальна, и для всех точек ОГТ профиля получено постоянное значение скорости, равное 2500 м/с, что точно соответствует заданному параметру модели среды.

Дальнейшие эксперименты выполнены для вертикально неоднородной (горизонтально-слоистой) модели среды с постоянными значениями пластовых скоростей (рис. 3). Расчеты спектра скоростей представлены для третьего отражающего горизонта, расположенного на глубине 1000 м.

**Модель 2.** Рельеф линии наблюдений, как и в предыдущем примере, представляет собой наклонную линию с перепадом высот 100—200 м, альтитуда ЛП равна 150 м. Диапазон изменения скорости при компенсации влияния ВЧР статическими поправками (рис. 4, а) составляет 98 (3748—3844) м/с. При параметрическом способе учета ВЧР (см. рис. 4, б) ось синфазности спектров скоростей строго горизонтальна, что свидетельствует о полной компенсации влияния переменного рельефа на оценку эффективной скорости.

**Модель 3.** В предыдущих примерах решение задачи рассматривалось для линейного рельефа дневной поверхности. В этом случае все трассы фиксированной выборки ОГТ характеризуются постоянным значением суммарной статической поправки  $\tau$ . Для рассматриваемой модели задан резко изменчивый рельеф одного из профилей Восточной Сибири (рис. 5, а) с перепадом высот более 300 (100—440) м, пересчет выполнялся на горизонтальную ЛП с альтитудой 200 м.

По результатам скоростного анализа (см. рис. 5, б) показано, что диапазон изменения эффективной скорости при компенсации рельефа статическими поправками составляет 230 (3662—3893) м/с. Масштабированием оси скорости на множитель  $t_0 / 2$  спектр скоростей пересчитан в спектр эффективных глубин. Диапазон изменения этого параметра (см. рис. 5, б) по профилю составляет 76 (1214—1291) м.

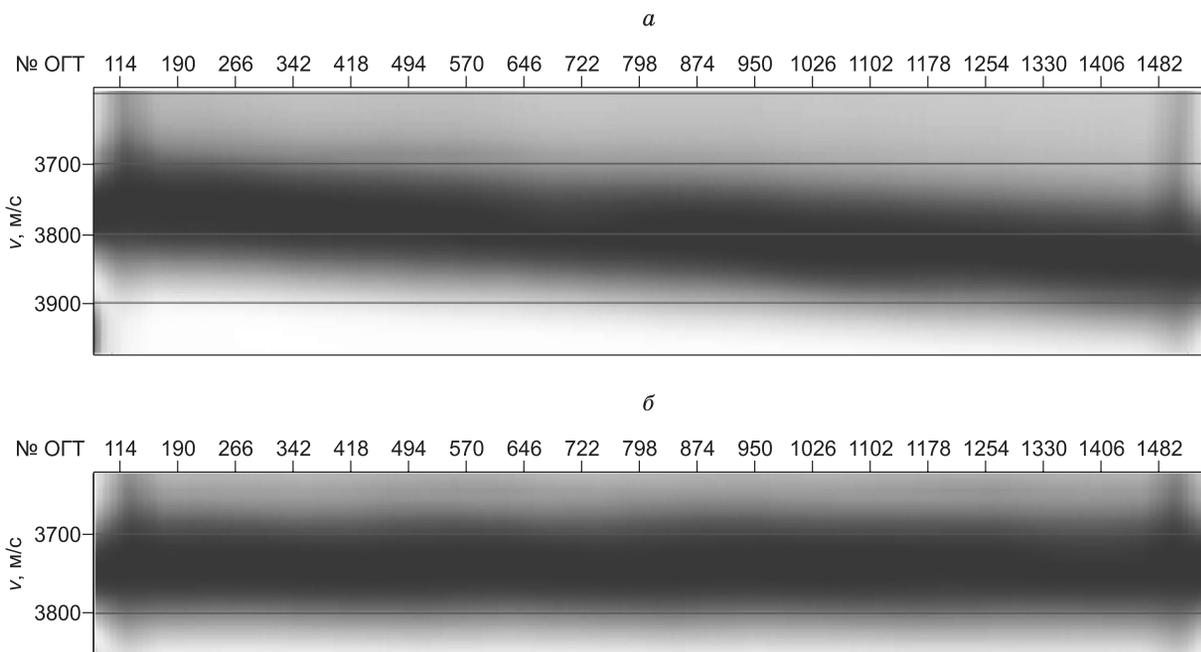
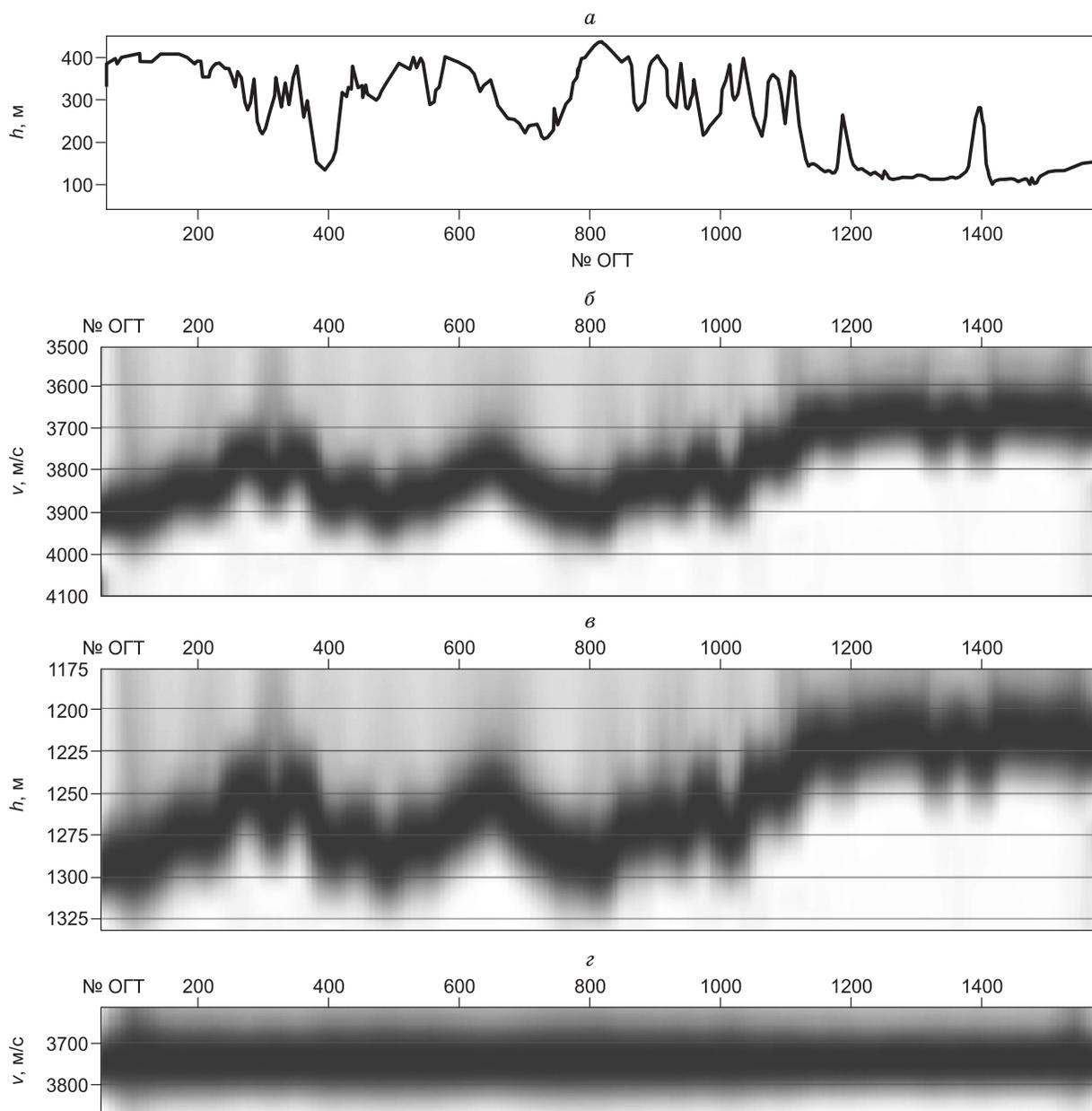


Рис. 4. Модель 2.

Горизонтальные спектры скоростей после ввода статических поправок (а), параметрического способа описания ВЧР (б).



**Рис. 5. Модель 3.**

Рельеф дневной поверхности (а); горизонтальные спектры скоростей (б) и эффективных глубин (в) после ввода статических поправок и параметрическом способе компенсации ВЧР (г).

При учете ВЧР параметрическим способом (см. рис. 5, г) горизонтальность оси спектров скоростей определяет постоянное значение эффективной скорости отражающего горизонта.

### ВЫВОДЫ

Рассмотрен результат программной реализации параметрического способа компенсации неоднородности ВЧР, доминирующим фактором которой является переменный рельеф дневной поверхности. Задача компенсации этого вида неоднородности сводится к пересчету волнового поля отраженных волн с линии наблюдения на горизонтальную линию приведения. Исходные данные для задачи определяются амплитудой рельефа поверхности наблюдения и значениями скорости ВЧР в точках ПВ и ПП, что определяет возможность применения модели с латеральным изменением скорости верхней части разреза.

На численных моделях проведен сравнительный анализ оценок эффективной скорости отраженных волн для двух вариантов решения — параметрическим способом и статическими поправками. Ре-

зультатами тестирования доказана высокая эффективность параметрического способа компенсации структурной неоднородности ВЧР. Полученный результат важен для решения прикладных задач кинематической интерпретации с использованием скоростей отраженных волн.

При компенсации переменного рельефа статическими поправками смещение в оценке глубин с использованием эффективных скоростей отраженных волн составляет  $\sim 1/4$  перепада альтитуды дневной поверхности. Этот критерий определяет, что применение параметрического способа целесообразно выполнять для районов работ с перепадом высот на площади исследования, измеряемым первыми десятками метров. Последнее является обычным событием даже для районов Западной Сибири.

Дополнительного изучения требуют задачи компенсации для моделей с вертикальной скоростной неоднородностью ВЧР. Классическим вариантом такой модели является двухслойное строение верхней части разреза, включающее ЗМС и подстилающее коренные отложения. Также в работе не исследованы вопросы устойчивости преобразования к ошибкам в априорных значениях скоростной модели ВЧР.

Практическая эффективность параметрического способа ограничивается возможностью надежной оценки параметров структурно-скоростной модели ВЧР. Известно, что при планировании полевых работ вопросы получения системы данных, достаточных для однозначного решения этой задачи, как правило, не рассматриваются.

#### ЛИТЕРАТУРА

**Гольдин С.В.** Об изучении изменения средней скорости до опорного отражающего горизонта // Прикладная геофизика, 1961, № 30, с. 50—62.

**Гольдин С.В.** Теория интерпретации в сейсморазведке и сейсмологии. Новосибирск, ИНГГ СО РАН, 2011, 357 с.

**Горелик Г.Д., Сысоев А.П.** Применение двухслойной модели среды для коррекции кинематики отраженных волн в задаче учета поверхностных неоднородностей // Технологии сейсморазведки, 2015, № 3, с. 75—79.

**Интерпретация** данных сейсморазведки. Справочник / Ред. О.А. Потапова. М., Недра, 1990, 448 с.

**Сысоев А.П.** Коррекция кинематики отраженных волн с целью компенсации влияния переменного рельефа поверхности наблюдений // Технологии сейсморазведки, 2008, № 1, с. 39—45.

**Сысоев А.П.** Прикладные задачи компенсации неоднородности верхней части разреза при обработке и интерпретации сейсмических данных. Новосибирск, ИНГГ СО РАН, 2011, 90 с.

**Черняк В.С., Гриценко С.А.** Скоростной анализ в условиях неоднородной части разреза, минимизирующий остаточные аномалии  $V_{сдр}$  // Технологии сейсморазведки, 2009, № 1, с. 53—55.

**Berryhill J.R.** Wave-equation datuming // Geophysics, 1979, v. 44, p. 1329—1344.

**Berryhill J.R.** Wave-equation datuming before stack // Geophysics, 1984, v. 49, p. 2064—2067

**Bevc D.** Flooding the topography: Wave-equation datuming of land data with rugged acquisition topography // Geophysics, 1997, v. 62, p. 1558—1569.

Рекомендована к печати 6 июля 2016 г.,  
М.И. Эповым

Поступила в редакцию  
5 февраля 2016 г.