



ВЕРИФИКАЦИЯ ФОРМУЛЫ ГАРДНЕРА В ЗАДАЧЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВОЛНОВОГО ПОЛЯ

С.А. Зайцев¹, А.П. Сысоев²

¹Федеральное государственное унитарное предприятие
Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского (ФГУП ВСЕГЕИ),
199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, Средний просп., 74, Россия, e-mail: zaitcev_sa@outlook.com

²Национальный минерально-сырьевой университет “Горный” (НМСУ “Горный”),
199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2, Россия, e-mail: Sysoev-50@mail.ru

На примере обработки реальных данных выполнена проверка эмпирической формулы Гарднера, применяемой для восстановления кривой плотности горных пород по данным акустического каротажа. Анализ достоверности прогноза выполнен с использованием аддитивного представления уравнения для коэффициентов отражения. Показано, что одномерное моделирование волнового поля с прогнозом плотности по формуле Гарднера эквивалентно условию постоянной плотности среды.

Акустический каротаж, плотностной каротаж, одномерное моделирование волнового поля, формула Гарднера

VERIFICATION OF THE GARDNER'S FORMULA USED IN THE PROBLEM OF MODELING WAVE FIELD

S.A. Zaytsev¹, A.P. Sysoev²

¹Federal State Unitary Enterprise A.P. Karpinsky Russian Geological Research Institute (FGUP VSEGEI),
Sredny prosp., 74, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199106, Russia, e-mail: zaitcev_sa@outlook.com

²National Mineral Resources University (University of mines),
Line 21, 2, Vasilyevsky Island, Saint-Petersburg, 199106, Russia, e-mail: Sysoev-50@mail.ru

We used real data to check the empirical Gardner's formula, which applied for the prediction of rocks density according acoustic logging. To analyze the accuracy of the prediction additive representation of the equation for reflection coefficients was used. It shows that one-dimensional modeling of wave field with predicted Gardner's formula density is equivalent to the constant medium density.

Acoustic logging, density log, one-dimensional modeling, Gardner's relation

ВВЕДЕНИЕ

Совместная интерпретация сейсмических и скважинных данных представляет собой реализацию системного подхода к решению задачи прогнозирования параметров геологической среды. В частном случае две системы данных: волновое поле и скважинные параметры связаны между собой уравнением свертки. Синтетическая трасса $f(t)$, описывающая поле однократно отраженных волн нормального падения, определяется как результат свертки импульсной характеристики $h(t)$ среды (ИХС) с формой сейсмического сигнала $s(t)$:

$$f(t) = s(t) * h(t), \quad (1)$$

где отличные от нуля значения импульсной характеристики среды определяются значениями коэффициентов отражения:

$$k_i = (v_{i+1}\rho_{i+1} - v_i\rho_i) / (v_{i+1}\rho_{i+1} + v_i\rho_i), \quad (2)$$

здесь v_i , ρ_i — значения скорости и плотности в слое с индексом i .

Формулы (1), (2) являются основой для решения задач стратиграфической привязки отражений, оценки формы сейсмического сигнала, акустической инверсии временных разрезов и прогноза фильтрационно-ем-

костных параметров резервуаров. Необходимым условием решения этого типа задач является соответствие синтетических трасс, рассчитанных по данным акустических разрезов глубоких скважин и реальных трасс, расположенных в их близкой окрестности. Соответствие модельной и синтетической трасс определяет соответствие реального волнового поля геологической модели среды, определенной по данным геофизического исследования скважин (ГИС).

ОПИСАНИЕ ЗАДАЧИ

Получение сейсмического изображения среды, как и моделирование, основано на обработке реальных данных. В силу этого как трассы реального временного разреза, так и синтетические трассы содержат погрешности, которые определяются помехой исходных наблюдений и модельными допущениями, использованными при получении суммарных и синтетических трасс.

Будем считать, что трассы реального сейсмического разреза отображают поле однократно отраженных волн и, кроме того, волновое поле нормально отраженных волн корректно описывается уравнением свертки

(1). В этом случае плохое соответствие реальных и синтетических трасс объясняется погрешностью определения акустических параметров разрезов скважин.

Для расчета импульсной характеристики среды в скважинах должны быть определены плотностные и скоростные характеристики разреза, определяемые методами акустического и плотностного каротажа. Как отмечено в работе [Базылев и др., 2001], измерения методами АК и ГКП часто отсутствуют либо выполнены в недостаточном объеме, либо не свободны от различного рода погрешностей. Но поскольку геологические задания формулируются независимо от обеспеченности необходимой и достоверной скважинной информацией, то при отсутствии прямых измерений акустических параметров возникает необходимость прогнозировать параметры разреза по данным других методов.

Вероятно, что такие подходы являются достаточными с практической точки зрения. Возможно также, что “отсутствие надежных данных о плотности не является серьезной помехой, поскольку плотность обычно изменяется таким же образом, как и скорость и использование одних только данных о скорости позволяет получить хорошее начальное приближение” [Сейсмическая стратиграфия, 1982, с. 27].

На практике используется широкий набор методов прогнозирования параметров разреза, применение которых обосновывается статистическими критериями соответствия прогнозных и фактических значений параметров разреза.

В работе [Базылев и др., 2001] предложены эмпирические региональные зависимости для восстановления: а) пластовых скоростей по данным электрометрии; б) объемной плотности по скорости продольной волны. Для решения задач восстановления акустических параметров среды также применяется метод многомерной линейной регрессии. Для прогноза кривой плотности широко применяется эмпирическая формула Гарднера, для скорости поперечной волны – формула Кастаньи и т. п. [Хилтерман, 2010].

Для того чтобы оценивать погрешности прогноза и допустимость применения эмпирических зависимостей, последние необходимо верифицировать в каждом конкретном случае. В настоящей работе рассматривается методика верификации формулы Гарднера, наиболее популярной при восстановлении графика изменения плотности по стволу скважины.

Задача прогнозирования кривой плотности возникает в случае, если в скважине определен только график акустического каротажа. Требуется выполнить одномерное моделирование при отсутствии информации о второй необходимой составляющей акустической модели – графика плотностного каротажа.

Для восстановления импульсной характеристики среды, согласно (2) требуется ввести дополнительные данные, описывающие функцию плотности. Можно предложить только два способа представления априорной информации.

Предположить, что плотность является постоянной величиной.

Выполнить прогноз плотности. В качестве инструмента прогноза используем формулу Гарднера:

$$\rho = av^{0.25}. \quad (3)$$

Привлекательность этой формулы определяется простотой реализации и технологичностью, поскольку это решение имеется практически в каждом интерпре-

тационном пакете. Понятно, что предположение о постоянной плотности является примитивным, поэтому можно ожидать, что применение формулы Гарднера, является лучшим из двух условий.

Для оценки эффективности двух способов учета дополнительной информации необходимо выполнить моделирование для трех вариантов акустических моделей скважин: а) реальные значения скорости и плотности; б) реальная скорость и постоянное значение плотности; в) реальная скорость и плотность, восстановленная по формуле Гарднера. Сравнивая коэффициенты корреляции частных решений с полным, можно сделать вывод о сравнительной эффективности способов доопределения акустических моделей. Для выполнения этого анализа необходимо использовать данные по скважинам, обеспеченным полным набором измерений акустических параметров.

ФОРМУЛА ПУЗЫРЕВА

Для выполнения сравнительного анализа используем результат, полученный Н.Н. Пузыревым [1977]. Здесь формула (2) представлена в виде суммы двух составляющих:

$$k_i \approx \frac{v_{i+1} - v_i}{v_{i+1} + v_i} + \frac{\rho_{i+1} - \rho_i}{\rho_{i+1} + \rho_i} = k_{v_i} + k_{\rho_i}, \quad (4)$$

которые описывают раздельное влияние скоростей и плотностей на величину коэффициента отражения. Приведенное выражение получено в предположении малости отношения $(\rho_{i+1} - \rho_i) / \rho_i$, но, как показывают оценки, полученное приближение описывает коэффициент отражения с высокой точностью для большого диапазона отношения плотностей.

Основываясь на представлении (4), импульсную характеристику среды и синтетическую трассу можно представить суммой двух компонент, описывающих импульсные характеристики разрезов скорости и плотности:

$$h_s(t_i) = h_v(t_i) + h_\rho(t_i), \quad (5)$$

$$f_s(t) = s(t) * (h_v(t_i) + h_\rho(t_i)) = f_v(t_i) + f_\rho(t_i).$$

С точки зрения решения задачи моделирования аддитивная модель не представляет интереса, но позволяет получить интересные результаты в задачах, связанных с восстановлением акустических кривых. Для иллюстрации возможностей аддитивной модели выполним расчеты волнового поля для двух различных типов геологической среды, представленных данными ГИС по скважинам Восточной и Западной Сибири.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Исходные данные представлены кривыми каротажа АК и ГКП. По данным АК выполним расчет вертикального годографа $h(t)$ с разбиением исследуемого интервала разреза на пласты с постоянной временной мощностью 2 мс, равной шагу дискретизации исходных трасс. Для каждого пласта определяются средние значения скорости и плотности, затем на кровле выделенных пластов рассчитываются четыре временные последовательности коэффициентов отражения:

- а) $h(t)$ рассчитывается по полной формуле (2),
- б) $h_v(t)$ – по разрезу скорости,
- в) $h_\rho(t)$ – по разрезу плотности,
- г) $h_s(t)$ – как сумму двух последовательностей (5).

Моделирование по скв. 1 (Восточная Сибирь) выполнено в интервале глубин от 460 до 1600 м (рис. 1).

Соотношение коэффициентов отражения, рассчитанных по точной (2) и приближенной (4) формулам, представлено на рис. 2. Две последовательности связаны линейным уравнением $k_a = 1.01k$. Коэффициент детерминации R^2 между значениями, полученными по точной и приближенной формулам практически равен 1, что подтверждает выводы, сделанные в работе [Пузырев, 1977] о допустимости аддитивного представления импульсной характеристики среды реальных

разрезов. Очевидно, что из равенства импульсных характеристик $h_s(t)$ и $h(t)$ следует равенство синтетических трасс, полученных по приближенной и точной формулам.

На рис. 3 представлены две аддитивные составляющие сверточной модели: трассы “скорости” и “плотности”, где:

$f_v(t) = s(t) * h_v(t)$ – трасса, соответствующая скоростной модели среды ($\rho = \text{const}$);

$f_p(t) = s(t) * h_p(t)$ – трасса, соответствующая плотностной модели среды ($v = \text{const}$).

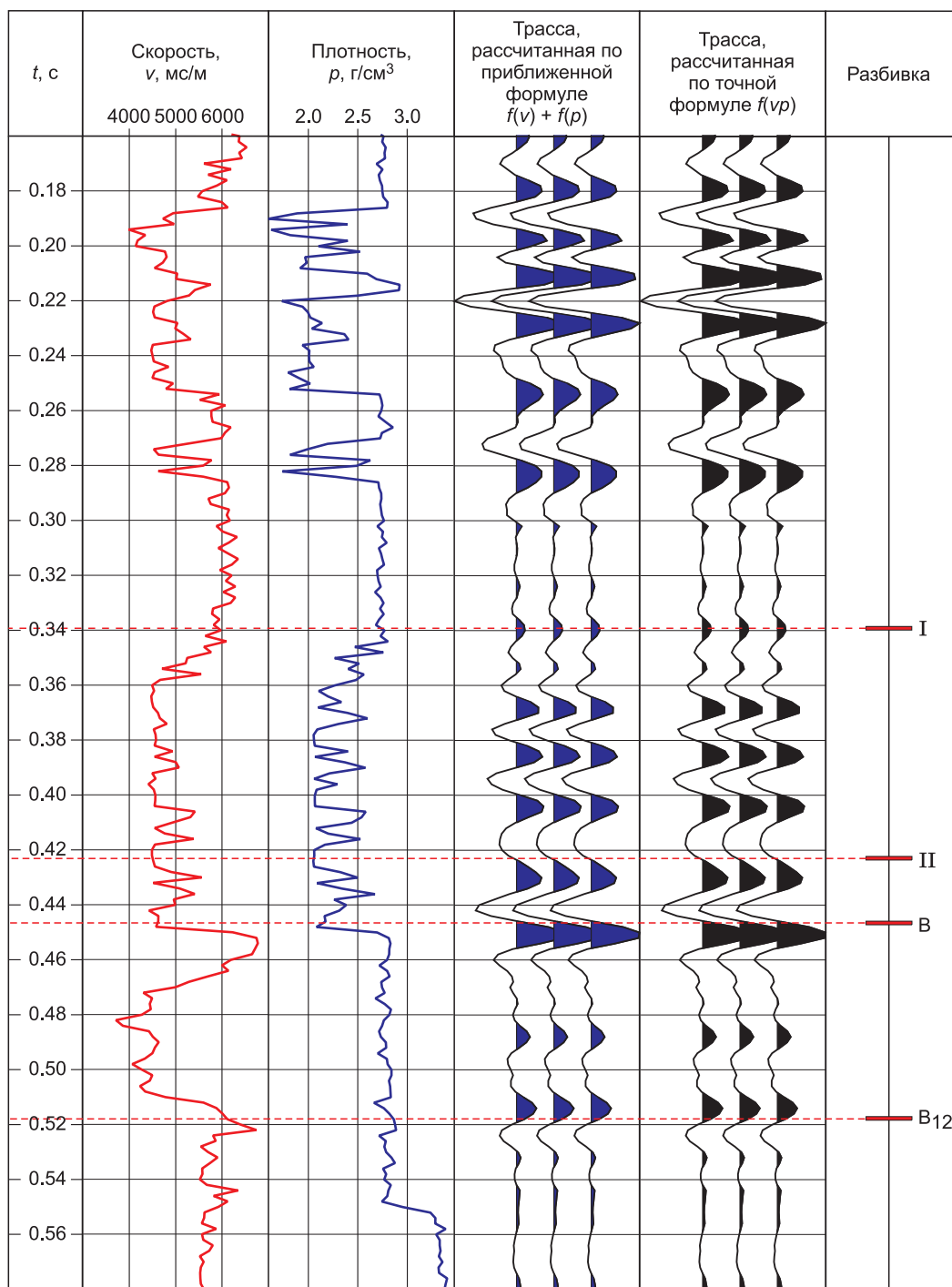


Рис. 1. Результат одномерного моделирования по скважине 1.

В интервале разреза от 0.2 до 0.3 с волновое поле двух составляющих характеризуется высоким подобием, причем из сравнения амплитуд следует, что фактор плотности здесь доминирует. Для интервала 0.44–0.56 с корреляция двух составляющих поля практически отсутствует и доминирует составляющая скоростного разреза.

На рис. 4 представлены трассы, соответствующие разрезу скорости и плотности, восстановленной по формуле Гарднера (3). Между амплитудами этих трасс определяется строго линейная зависимость: $f_g(t) = 0.25f_v(t)$, представленная на рис. 5. Поэтому синтетическую трассу, рассчитанную по реальной скорости и прогнозной плотности, можно описать выражением

$$f_s(t) = f_v(t)(1 + 0.25) = 1.25f_v(t). \quad (6)$$

Формула (6) свидетельствует о том, что различие между синтетическими трассами, рассчитанными с постоянной плотностью и плотностью, восстановленной по формуле Гарднера, определяется постоянным множителем (рис. 6). Поэтому применение этой формулы в задаче моделирования можно определить не более как наукообразие.

В заключение этого эксперимента рассмотрим две трассы, полученные с полным набором параметров разреза и постоянной плотностью (рис. 7).

Между трассами отмечается высокое фазовое соответствие. Условие постоянной плотности отражается

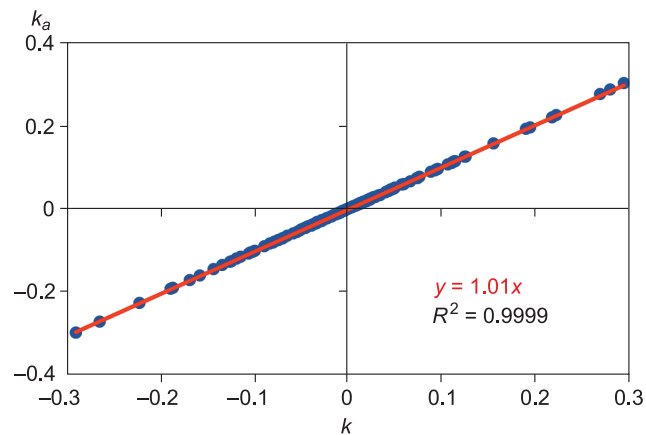


Рис. 2. Соотношение коэффициентов отражения, рассчитанных по точной и приближенной формулам.

только в соотношении амплитуд в интервале 0.15–0.32 с. Здесь, как показано на рис. 3, разрез плотности вносит существенный, но согласованный со скоростью, вклад в амплитуду волнового поля, поэтому отсутствие этой составляющей занижает амплитуды. В интервале 0.46–0.55 с волновое поле полностью определяется параметрами скоростного разреза.

Материалы по скв. 2 представляют разрез Западной Сибири. На рис. 8 представлены синтетические

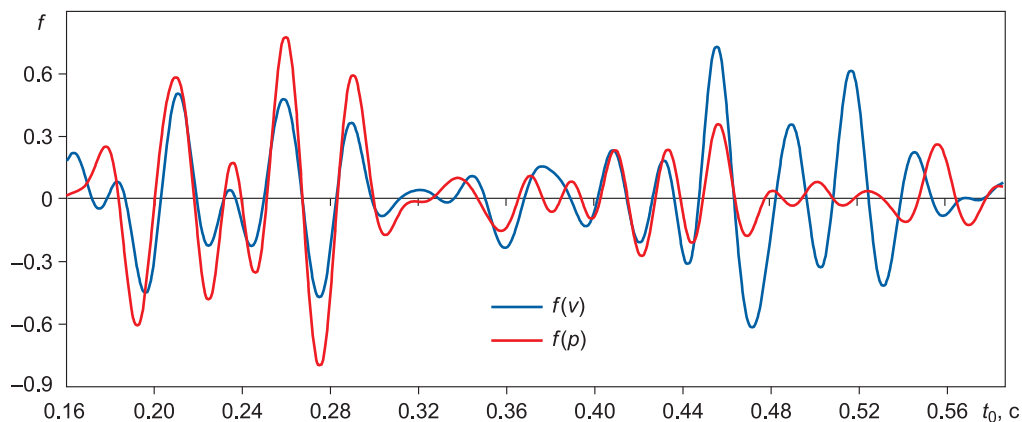


Рис. 3. Синтетические трассы разрезов скорости $f(v)$ и плотности $f(p)$.

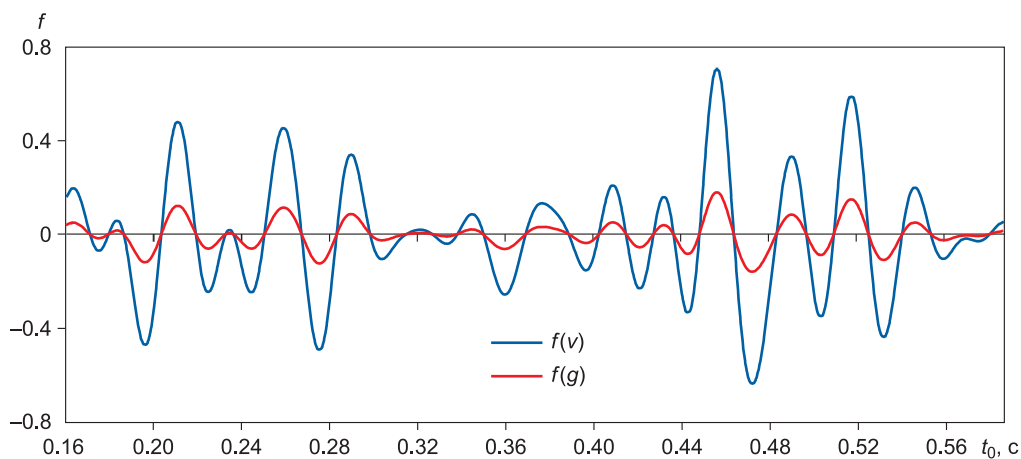


Рис. 4. Трассы разрезов скорости $f(v)$ и плотности, восстановленной по формуле Гарднера $f(g)$.

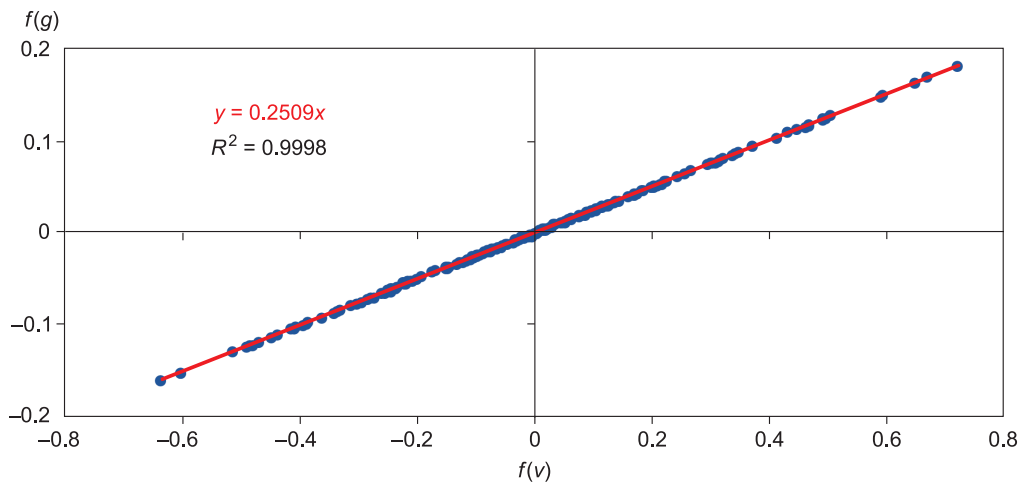


Рис. 5. Зависимость между амплитудами трасс разрезов скорости $f(v)$ и плотности, рассчитанной по формуле Гарднера $f(g)$.

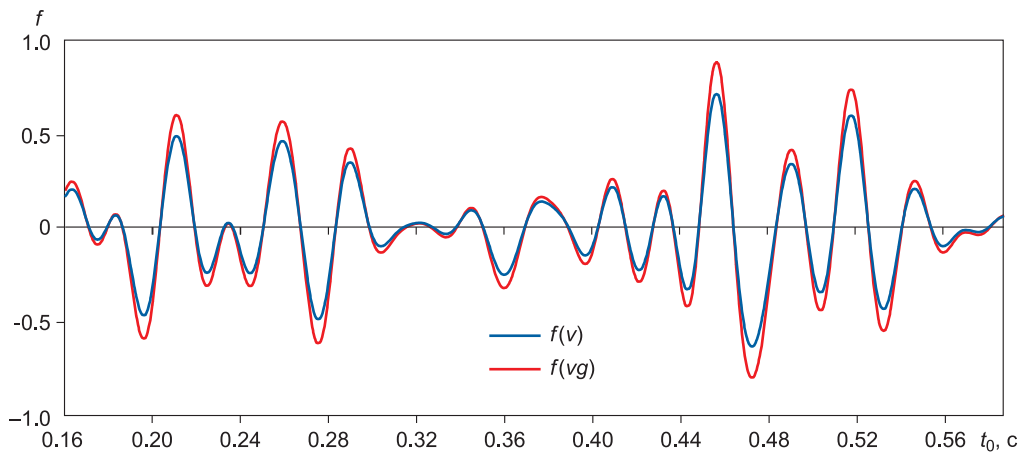


Рис. 6. Трассы с постоянной плотностью $f(v)$ и плотностью, восстановленной по формуле Гарднера $f(vg)$.

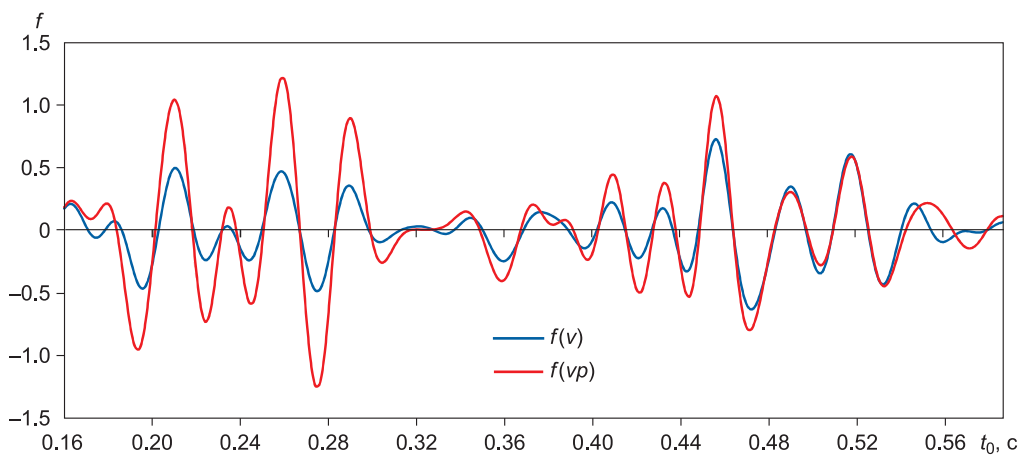


Рис. 7. Синтетические трассы с постоянной $f(v)$ и фактической $f(vp)$ плотностями.

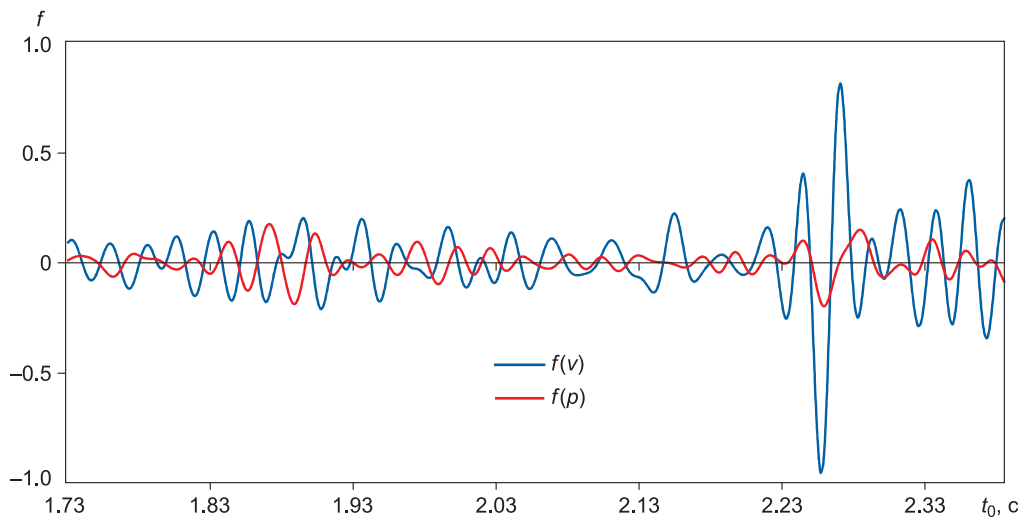


Рис. 8. Синтетические трассы “скорости” $f(v)$ и “плотности” $f(p)$.

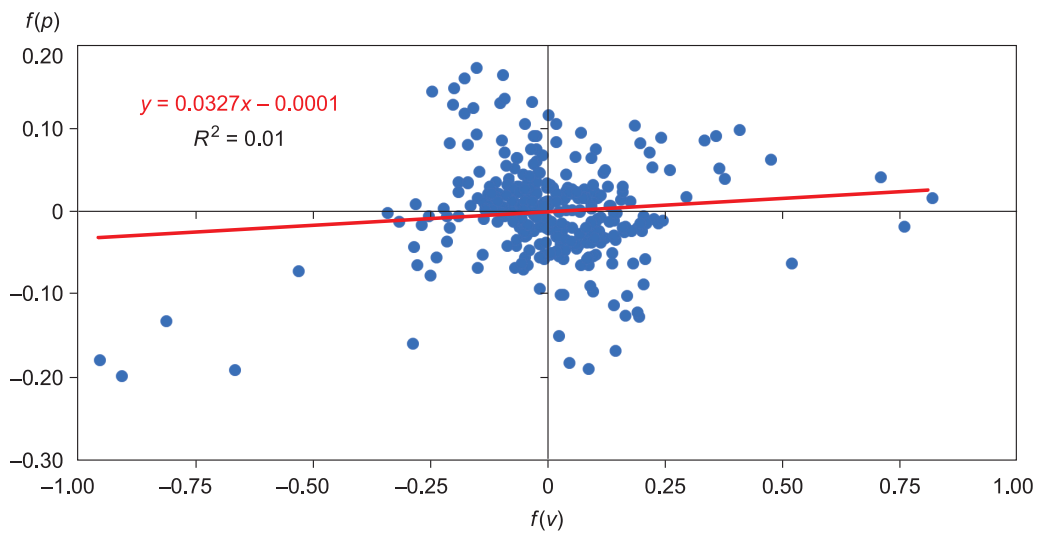


Рис. 9. График распределения амплитуд трасс “плотности” $f(p)$ от “скорости” $f(v)$.

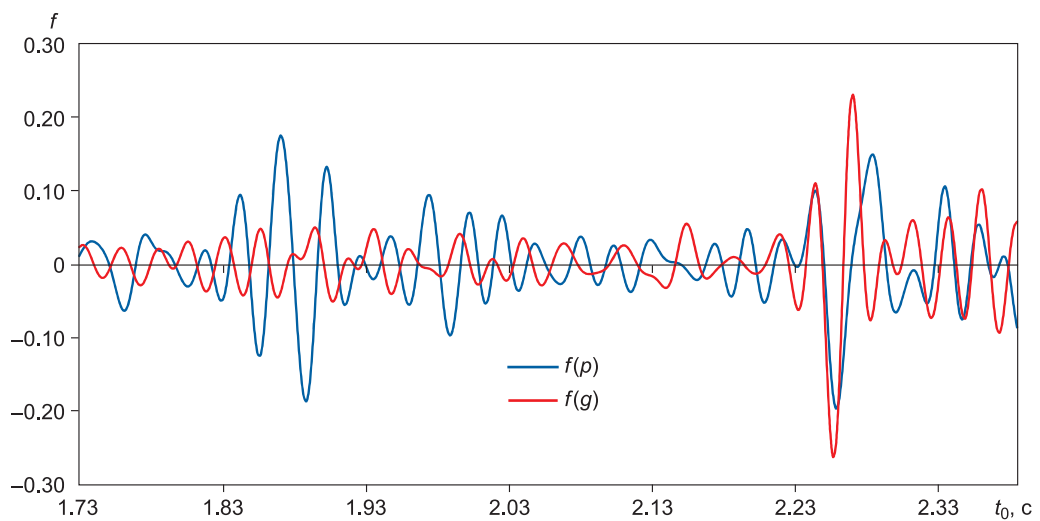


Рис. 10. Трассы разрезов плотности: истинной $f(p)$ и восстановленной по формуле Гарднера $f(g)$.

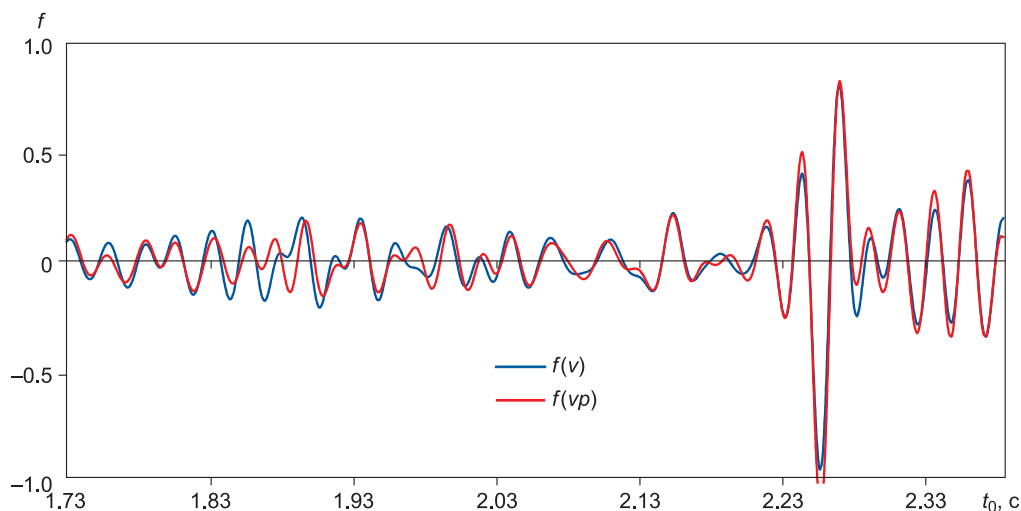


Рис. 11. Синтетические трассы с постоянной $f(v)$ и фактической $f(vp)$ плотностями.

трассы, характеризующие волновое поле разрезов скорости и плотности. Отмечается почти полное отсутствие корреляции этих трасс, что подтверждается на рис. 9, на котором представлен кроссплот амплитуд трасс анализируемых составляющих. На рис. 10 представлены синтетические трассы, описывающие составляющие реальной и восстановленной плотности, подтверждающие неудовлетворительные результаты восстановления кривой плотности.

Результат моделирования с постоянной плотностью (рис. 11) показывает удовлетворительную сходимость с трассой, рассчитанной с реальной плотностью. Этот результат определяется тем, что диапазон изменения амплитуд трассы скорости в два раза превышает диапазон амплитуд второй составляющей – трассы плотности (см. рис. 8).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Одна из основных целей настоящей работы состоит в том, чтобы представить малоизвестную формулу аддитивного представления коэффициентов отражения для нормального падения, полученную (по свидетельству д.ф.-м.н. Б.П. Сибирякова) Н.Н. Пузыревым примерно в 1957 г.

Приложение этой формулы к задачам одномерного моделирования позволяет реализовать эффективный способ оценки корректности способов восстановления

акустических параметров разреза в приложении к задаче моделирования волнового поля.

В статье показано, что в задаче одномерного моделирования восстановление кривой плотности с использованием уравнения Гарднера эквивалентно моделированию с постоянной плотностью среды.

На примере обработки реальных данных продемонстрировано, что необходимо критически относиться к эмпирическим зависимостям, описывающим связь независимых физических параметров геологического разреза.

Литература

Базылев А.П., Сургучева В.Н., Снопкова Т.К. Восстановление акустических характеристик разрезов в отложениях Западной Сибири // Геофизика, специальный выпуск. 2001. С. 73–76.

Пузырев Н.Н. Методы и объекты сейсмических исследований. Введение в общую сейсмологию. Новосибирск: Издательство СО РАН НИЦ ОИГМ, 1997. 301 с.

Сейсмическая стратиграфия / Под ред. Ч. Пейтона. М.: Мир, 1982. 374 с.

Хилтерман Ф.Дж. Интерпретация амплитуд в сейсморазведке. Тверь: ООО “Издательство Герс”, 2010. 256 с.

*Статья поступила в редакцию 20 августа 2015 г.,
в окончательном варианте – 20 октября 2015 г.*

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

ЗАЙЦЕВ Семен Александрович – выпускник НМСУ “Горный”, инженер I категории ФГУП ВСЕГЕИ.
E-mail: zaicev_sa@outlook.com.

СЫСОЕВ Анатолий Петрович – выпускник НГУ, доктор технических наук, профессор Национального минерально-сырьевого университета “Горный”.
E-mail: Sysoev-50@mail.ru.