



ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СКОРОСТНОЙ МОДЕЛИ ПО ДАННЫМ ГИС

С.А. Зайцев¹, А.П. Сысоев²

¹Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского, 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, Средний пр., 74, Россия, e-mail: zaitcev_sa@outlook.com

²Санкт-Петербургский горный университет, 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2, Россия, e-mail: sysoev-50@mail.ru

В статье на примере реальных разрезов скважин, характерных для Восточной и Западной Сибири, выполнена верификация формулы Фауста, применяемой для прогнозирования данных акустического каротажа (АК). По результатам одномерного моделирования волнового поля показано, что применение этой формулы допустимо только для ограниченного интервала разреза Западной Сибири. В качестве альтернативного решения рассмотрен способ восстановления кривой АК по уравнению множественной линейной регрессии. Для всех рассмотренных типов разрезов этот способ решения приводит к удовлетворительным результатам восстановления кривой акустического каротажа.

Акустический каротаж, формула Фауста, одномерное моделирование волнового поля, многомерная линейная регрессия

LOG DATA BASED VELOCITY MODEL PROGNOSIS

S.A. Zaytsev¹, A.P. Sysoev²

¹A.P. Karpinsky Russian Geological Research Institute, Sredny prosp., 74, St. Petersburg, 199106, Russia, e-mail: zaitcev_sa@outlook.com

²St. Petersburg Mining University, 21st line, 2, Vasilyevsky Island, Saint-Petersburg, 199106, Russia, e-mail: Sysoev-50@mail.ru

In the paper Faust's equation for the acoustic velocities prognosis from the log data was verified with typical logging data from East and West Siberia. It was shown that the application of the equation is acceptable only for limited part of the West Siberian sedimentary cross section. As an alternative decision of velocity estimation multivariate linear regression method was used. The later approach provided us with satisfactory solutions of acoustic logging curve recovery for the considered sections.

Acoustic logging, Faust's equation, one-dimensional modeling of wave field, multivariate regression

ВВЕДЕНИЕ

Одномерное акустическое моделирование волнового поля применяется для решения ряда задач, возникающих в процессе совместной интерпретации сейсмических временных разрезов и скважинных данных, в частности: стратиграфической привязки отражений, оценки формы сейсмического сигнала, акустической инверсии временных разрезов.

Модель сейсмических трасс центровых лучей $f(t)$ описывается уравнением свертки

$$f(t) = s(t) * h(t),$$

где $s(t)$ — форма сейсмического сигнала, $h(t)$ — импульсная характеристика среды (ИХС). Скважинные данные, которые используются для расчета ИХС, представляются в виде цифровых последовательностей акустического и плотностного (ГГКп) каротажа.

Измерения методами АК и ГГКп в ряде случаев совсем не выполняются либо проводятся в ограниченном интервале разреза [Базылев и др., 2001]. В случае отсутствия необходимой скважинной информации задача одномерного моделирования волнового поля не доопределена и общим принципом решения таких задач является учет измерений других геофизических методов с целью восстановления недостающих данных.

В качестве примера можно привести широко известные эмпирические зависимости: Гарднера, используемую для восстановления значений плотности; Фауста и Кастаньи, применяемые для оценки скорости продольных и поперечных волн [Хилтерман, 2010]. Благодаря представлению в популярной геофизической литературе и реализациям в распространенных интерпретационных пакетах отмеченные эмпирические зависимости широко применяются на практике.

Менее известны формулы восстановления акустических параметров, описанные в работе [Базылев и др., 2001], и адаптивные способы восстановления акустической жесткости [Кожевников и др., 2011].

В работе [Базылева и др., 2001] задача прогноза скорости распространения упругих волн и плотности горных пород решается подбором коэффициентов уравнения линейной регрессии, где структура уравнения определяется на основе территориального районирования и разбиения разреза на литологические разности. Это порождает множество вариантов уравнений и задача прогноза становится практически не формализуемой. Результаты этой работы ставят под сомнение возможность получения универсальных зависимостей, удовлетворительно решающих задачи

прогноза акустических параметров. В подтверждение этого предположения в работе [Зайцев, Сысоев, 2015] приводится верификация формулы Гарднера как наиболее популярной при восстановлении графика плотности горных пород. Установлено, что результаты моделирования волнового поля с восстановлением кривой плотности по данной формуле с точностью до постоянного множителя совпадают с результатами моделирования с постоянной плотностью.

В настоящей работе на примере результатов обработки данных трех скважин, представляющих разрезы осадочного чехла Западной и Восточной Сибири, выполнена верификация формулы Фауста и рассмотрен вариант решения задачи прогноза, основанный на уравнении множественной линейной регрессии.

1. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Одномерное моделирование сейсмических трасс описывается уравнением свертки импульсной характеристики среды с функцией сейсмического сигнала. Спектр сигнала ограничен по частоте снизу, поэтому трендовая составляющая функций плотности и скорости $\rho(h)$, $v(h)$, характеризующая изменение этих параметров с глубиной и обеспечивающая высокий коэффициент корреляции реальных и восстановленных кривых, не участвует в формировании волнового поля. Импульсная характеристика среды определяется дифференциальной составляющей указанных функций, в которой доминирует высокочастотная составляющая. Поэтому для оценки качества восстановления кривой каротажа будем использовать меру сходства синтетических трасс, полученных с реальными и восстановленными параметрами разреза.

Общепринято считать, что количественная мера подобия трасс определяется коэффициентом корреляции этих последовательностей. Важно оценить степень подобия трасс в каждом временном интервале разреза, поэтому целесообразно рассчитывать корреляцию в скользящем временном окне, длительность которого согласована с длиной сигнала.

Линеаризованная модель ИХС

Качество восстановления функции скорости будем оценивать с помощью коэффициента корреляции двух синтетических трасс, полученных с фактическими и прогнозными значениями скорости. Основываясь на результатах, полученных Н.Н. Пузыревым [1997], коэффициенты отражения и, соответственно ИХС, можно представить в виде суммы двух составляющих, описывающих разрезы скорости и плотности:

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

$$h_s(t_i) = h_v(t_i) + h_\rho(t_i).$$

Отметим, что разложение коэффициентов отражения для нормального отражения на две аддитивные составляющие присутствует также в аппроксимации Шуи [Хилтерман, 2010]. Соответственно, синтетическая трасса представляется суммой двух трасс, условно назовем их трассами скорости $f_v(t_i)$ и плотности $f_\rho(t_i)$ [Зайцев, Сысоев, 2015]:

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

Трассы плотности сравниваемых моделей равны, поэтому для исключения маскирующего эффекта кор-

релируемой составляющей моделей результат восстановления функции скорости будем сопоставлять только по одной компоненте — трассе скорости.

2. ВЕРИФИКАЦИЯ ФОРМУЛЫ ФАУСТА

В 1951 г. Л. Фауст приводит в своей статье [Faust, 1951] статистическую зависимость для расчета скорости продольных сейсмических волн по данным ГИС. Актуальность работы обуславливалась необходимостью расчета карт средних скоростей продольных сейсмических волн для решения задачи структурных построений. В качестве фактического материала были использованы данные геофизических исследований скважин, принадлежащие компании “Amerada Petroleum Corporation”, в объеме 500 км практически со всей территории США. В расчетах использовалась толстослойная модель среды, так как измерения времен сейсмических волн производились с интервалом 300 м.

В результате подбора параметров модели была получена следующая эмпирическая зависимость:

$$v = \alpha(ZT)^{\frac{1}{6}},$$

где α — константа, Z — глубина залегания, T — возраст пород изучаемого разреза. По данным, приведенным в работе, погрешность вычислений скорости продольных сейсмических волн по приведенной выше зависимости составила 2–5 %.

В 1953 г. Л. Фауст описывает результаты вычислений скорости уже с учетом влияния литологической составляющей [Faust, 1953]. Для учета литологии использовались данные электрического каротажа. В ходе экспериментов сопоставлялись значения скорости продольных волн, полученных по данным сейсмического каротажа, и значения удельного сопротивления горной породы. В результате анализа была получена формула

$$v = \alpha(ZR)^{\frac{1}{6}}, \quad (1)$$

где R — удельное сопротивление пласта (Ом/м). Оценка погрешности прогноза скорости по уравнению (1) составила 1–2.5 %.

Результаты моделирования

Верификация формулы Фауста выполнена по данным ГИС трех скважин с различными типами разрезов: Широкого Приобья (скв. 1), зоны сочленения Западной и Восточной Сибири (скв. 2), Восточной Сибири (скв. 3). Исходные данные для выполнения эксперимента включали кривые АК и БК (боковой каротажа).

По материалам каждой скважины рассчитывались две синтетические трассы скорости с фактической $f_v(t)$ и восстановленной $f_F(t)$ по формуле Фауста кривыми АК, а также функция $\kappa(t)$, определяющая корреляцию модельных трасс в скользящем временном окне 100 мс (рис. 1). При моделировании использован нуль-фазовый импульс с преобладающей частотой 40 Гц. Для более наглядного представления интервала исследования синтетические трассы представлены в глубинном масштабе.

В скв. 1, характеризующей разрез Западной Сибири, в меловом (преимущественно песчано-глинистом) интервале разреза отмечается удовлетворительное совпадение трасс, полученных с истинной и восстановленной скоростями. В юрском интервале разреза коэффициент корреляции отрицателен (см. рис. 1, а).

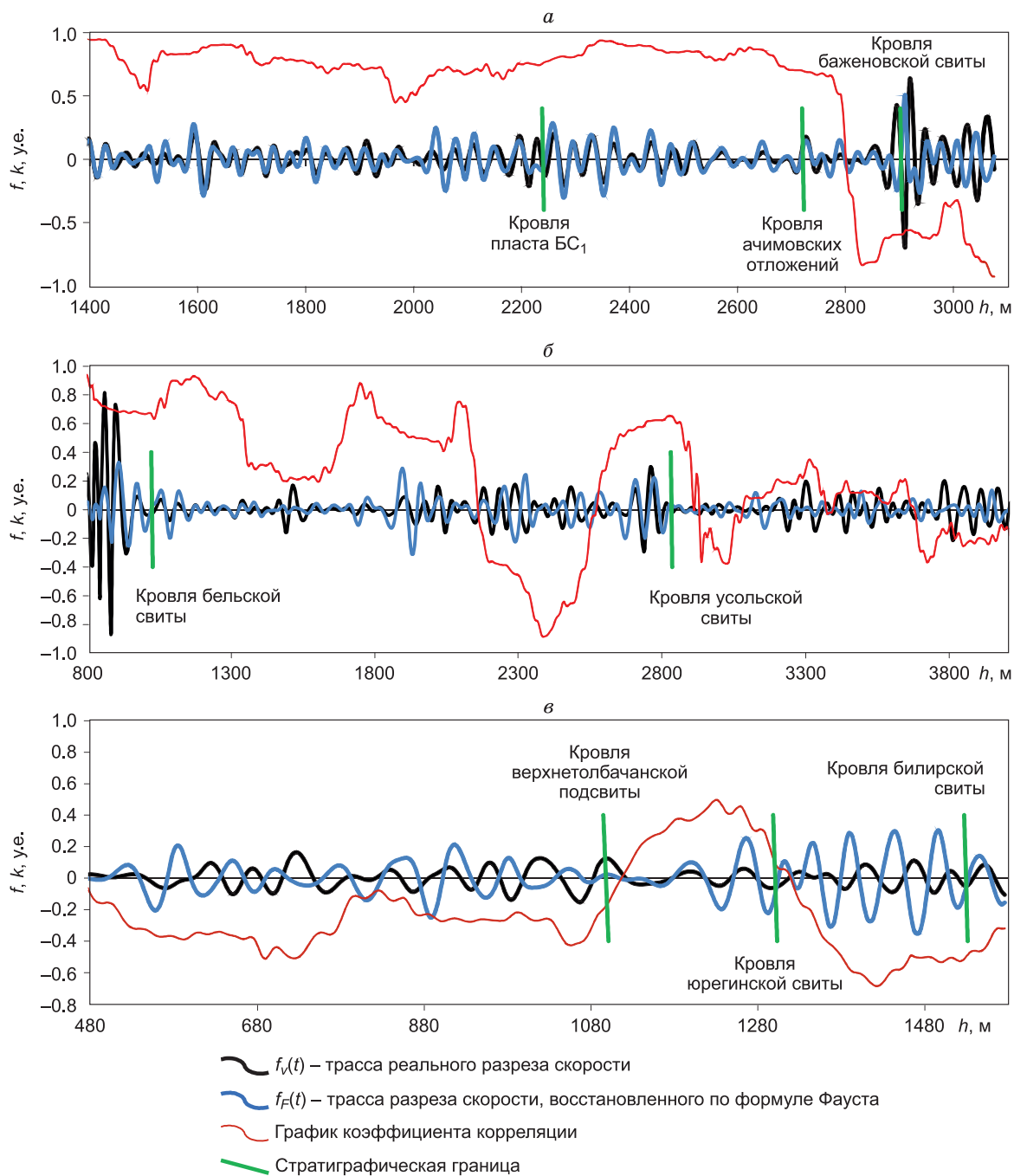


Рис. 1. Результат моделирования “трасс скорости” для реального скоростного разреза $f_v(h)$ и восстановленного по формуле Фауста $f_F(h)$: скв. 1 (а); скв. 2 (б); скв. 3 (в).

Из графика коэффициента корреляции трасс в скв. 2 следует, что по формуле Фауста получены удовлетворительные результаты прогноза лишь в отдельных фрагментах разреза (см. рис. 1, б). Это может быть связано с появлением в исследуемом разрезе литологических разностей, например солей, которые отличаются по своим физическим свойствам от песчаников и сланцев.

В разрезе Восточной Сибири соли и карбонаты представляют существенную часть разреза, поэтому по результатам моделирования в скв. 3 отмечается в целом отрицательное значение коэффициента корреляции трасс, рассчитанных с фактической и восстановленной скоростями (см. рис. 1, в).

3. УРАВНЕНИЕ ЛИНЕЙНОЙ РЕГРЕССИИ

Логарифмированием уравнение Фауста (1) приводится к виду многомерной линейной регрессии:

$$\ln v = \ln \alpha + \ln Z / 6 + \ln R / 6 = \ln \alpha + (\ln Z + \ln R) / 6.$$

Фактически прогноз по формуле Фауста выполняется по уравнению парной линейной регрессии, где в качестве объясняющей переменной используется сумма двух факторов — глубины и сопротивления $(\ln Z + \ln R)$. Нетрудно показать, что применение простого уравнения линейной регрессии с независимой оценкой параметров каждого фактора приводит к лучшему результату прогноза.

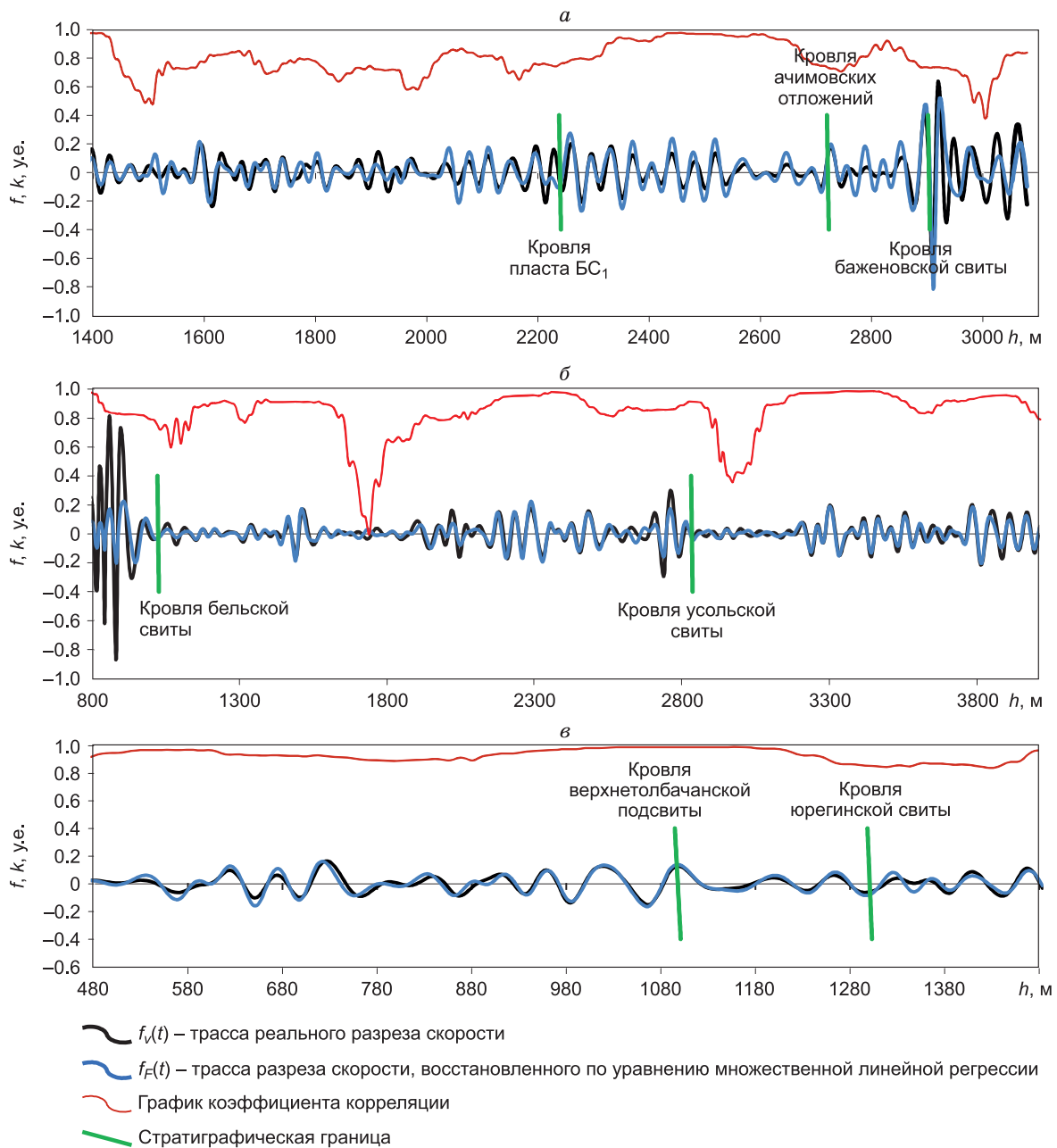


Рис. 2. Результат моделирования “трасс скорости” для реального скоростного разреза $f_v(h)$ и восстановленного по уравнению множественной регрессии $f_r(h)$: скв. 1 (а); скв. 2 (б); скв. 3 (в).

В качестве функции, описывающей искомую кривую, используем уравнение множественной регрессии:

$$v = \sum_i a_i x_i + e, \quad (2)$$

где a_i – коэффициенты регрессии, x_i – объясняющие переменные (данные ГИС), e – случайная составляющая.

В рассматриваемой задаче нас интересуют не значения параметров линейной модели, а сумма факторов, определяемая уравнением (2), поэтому проявление линейной зависимости объясняющих переменных является несущественным. При увеличении числа значимых переменных результат решения либо сходится к заданной кривой, либо не изменяется, если включаемые в модель переменные линейно не связаны с про-

гнозируемой функцией [Доугерти, 1999]. Также следует отметить, что поскольку измерения ГИС выполняются с шагом 10–20 см по стволу скважины, а интервал исследования охватывает первые сотни метров, то система уравнений (2) характеризуется высокой избыточностью данных, обеспечивающих статистическую устойчивость оценок параметров.

Результаты верификации уравнения линейной регрессии в задаче восстановления функции скорости по данным трех скважин, рассмотренных ранее, представлены на рис. 2. Типы объясняющих переменных, используемых для расчетов, представлены в таблице.

По представленным на рис. 2 результатам можно отметить, что высокая степень сходимости синтетических трасс наблюдается для всех типов разрезов и

Список параметров множественной регрессии

Номер скважины \ Тип ГИС	Глубина замера	Боковой каротаж	Каротаж градиент-зондом	Каротаж само-произвольной поляризации	Индукционный каротаж	Гамма- каротаж	ГГ Кп (гамма- гамма-каротаж плотностной)	Нейтронный каротаж по тепловым нейтронам
Скв. 1	Z	+	–	+	+	+	–	+
Скв. 2	Z	+	–	–	–	+	+	+
Скв. 3	Z	–	+	–	+	+	+	+

практически на всем интервале исследований. Уменьшение коэффициента корреляции наблюдается фрагментарно, среднее значение этого параметра по всем скважинам не ниже 0.8.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Практически в каждом производственном отчете по системной интерпретации сейсмических и скважинных данных можно встретить результаты восстановления акустических параметров разрезов скважин с использованием эмпирических уравнений Фауста или Гарднера. С одной стороны, это свидетельствует о практической важности задачи восстановления акустических параметров разреза скважин, а с другой – определяет необходимость контроля решений, получаемых на основе общих статистических зависимостей.

Эмпирическая формула Фауста была получена в 1953 г. по глобальной выборке скважин, захватывающей большую территорию США на основе измерений сейсмического каротажа и кажущегося сопротивления горных пород. В ходе нашей работы экспериментально показано, что удовлетворительное восстановление графика скорости в сейсмическом диапазоне частот получено только для песчано-глинистого интервала разреза скважины центральной части Западно-Сибирской плиты. В юрском интервале разреза и для территории Восточной Сибири применение этой формулы неприемлемо. Можно заключить, что формула Фауста представляет собой паллиатив, появившийся на раннем этапе развития геофизических методов исследования скважин.

Акустические параметры горных пород определяются физическими свойствами двух составляющих – скелета и флюида, и структурой горных пород, характеристики которых определяются различными геофизическими методами исследования скважин. Поэтому корреляционная зависимость между измерениями различных методов и акустическими параметрами физически допустима и вероятна. Следуя этой парадигме, в работе реализован стандартный способ прогноза целевого параметра, определяемого в пространстве многих переменных, с помощью уравнения многомерной линейной регрессии, где переменными являются данные стандартного комплекса каротажа. По результатам тестирования на реальных данных получен удовлетво-

рительный результат прогноза функции скорости, определяемой в сейсмическом диапазоне частот. Результат внушает сдержанный оптимизм, поскольку этот подход имеет резервы развития при оценке параметров уравнения отдельно для стратиграфических интервалов и использовании в решении результатов стратиграфической привязки, устанавливающей взаимное соответствие вертикального времени и глубины отражающих границ.

В заключение выражаем благодарность кандидату физико-математических наук К.Н. Зверинскому (ПАО “Сибнефтегеофизика”), результаты работы которого по восстановлению кривых акустического каротажа с использованием уравнения многомерной регрессии были известны авторам из неопубликованных данных.

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.
- Доугерти К.** Введение в эконометрику. М.: ИНФРА-М, 1999. 402 с.
- Зайцев С.А., Сысоев А.П.** Верификация формулы Гарднера в задаче моделирования волнового поля // Технологии сейсморазведки. 2015. № 4. С. 74–80.
- Жоженников Д.А., Коваленко К.В., Дешененков И.С.** Определение акустической жесткости на основе адаптивной интерпретации данных ГИС // НТВ АИС Каротажник. 2011. № 208. С. 34–46.
- Пузырев Н.Н.** Методы и объекты сейсмических исследований. Новосибирск: Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГМ, 1997. 299 с.
- Сейсмическая стратиграфия** / Под ред. Ч. Пейтона. М.: Мир, 1982. 374 с.
- Хилтерман Ф.Дж.** Интерпретация амплитуд в сейсморазведке. Тверь: ООО Изд-во “Герс”, 2010. 256 с.
- Faust L.Y.** Seismic velocity as a function of depth and geologic time // Geophysics. 1951. V. 16, N 2. P. 192–206.
- Faust L.Y.** A velocity function including lithologic variation // Geophysics. 1953. V. 18, N 2. P. 271–288.

*Статья поступила в редакцию 2 сентября 2016 г.,
в окончательном варианте – 21 сентября 2016 г.*

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

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

СЫСОЕВ Анатолий Петрович – выпускник НГУ, доктор технических наук, профессор Санкт-Петербургского горного университета. E-mail: sysoev-50@mail.ru