



## ОЦЕНКА ВКЛАДА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ГРАНИЦ И ТОЛЩ В СЕЙСМИЧЕСКОЕ ВОЛНОВОЕ ПОЛЕ ДЛЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ПОГЛОЩАЮЩИХ СРЕД

Ф.Ф. Хазиев, В.Л. Трофимов, В.А. Милашин

ООО “Мегацентр-Плюс”, 123298, Москва, ул. Народного Ополчения, д. 40, корп. 3, Россия,  
e-mail: trofimvl@gmail.com, hrsgeo@mail.ru, milashin@pcntr.msk.ru

Разработан и опробован на акустических моделях реальной среды комплекс программ расчета теоретических сейсмограмм для многослойных поглощающих сред с оценкой вклада элементарных границ и толщ. Выполнен анализ материала, свидетельствующий о механизме формирования интерференционного волнового поля. Рассмотрено понятие элементарной границы (элементарного пласта), характеризующее максимально возможную детализацию модели реальной среды, ее тонкослоистую структуру в классе кусочно-постоянных функций на интервале шага квантования сейсмозаписи по времени. Без учета вклада элементарных границ и толщ в интерференционное волновое поле сложно ориентироваться в элементах структуры волнового поля, а также в информативности связанных с ними акустических неоднородностей изучаемого разреза. При этом поглощение сейсмических волн может существенно изменять интерференционную картину волнового поля относительно поля, отвечающего модели среды без поглощения.

*Сейсмическое моделирование отраженных волн, элементарная граница, вклад границ и толщ, коэффициенты отражения и поглощения упругих волн, интерференция волн, нефтенасыщенный интервал геологического разреза*

### ASSESSMENT OF CONTRIBUTION MADE BY ELEMENTARY BOUNDARIES AND SEQUENCES TO SEISMIC WAVEFIELD OF MULTI-LAYER ABSORPTIVE SUBSURFACE

F.F. Khaziev, V.L. Trofimov, V.A. Milashin

Megacenter-Plus Ltd., Narodnogo Opolcheniya str., 40, Bldg., 3, 123298, Moscow, Russia,  
e-mail: trofimvl@gmail.com, hrsgeo@mail.ru, milashin@pcntr.msk.ru

A software suite to compute theoretical seismograms for multi-layer absorptive subsurface along with assessing contribution made by elementary boundaries and sequences was tested on real-subsurface models. The data characterizing the mechanism that forms interference wavefield are analyzed. The elementary boundary (elementary layer) concept is considered that characterizes maximum possible degree of detail of the real subsurface and the subsurface thin-layered structure within the step function class and time sampling interval of seismic record. Disregard of contribution made by elementary boundaries and sequences would make it highly difficult to sort out wavefield structure elements and informativity of acoustic heterogeneities associated with those elements. Seismic absorption may substantially alter the wavefield interference pattern as compared with a wavefield corresponding to a non-absorptive-subsurface model.

*Seismic modeling of the reflected waves, elementary border, the contribution of borders and thicknesses, factors of reflection and absorption of elastic waves, interference of waves, the petrosated interval of a geological cut*

Изучение влияния геологических параметров разреза на его акустические характеристики и динамику сейсмической записи непосредственно затрагивает вопрос об определении вклада элементарных отражающих границ и толщ в теоретическое суммарное волновое поле [1]. В указанной работе это рассмотрено на основе применения подсистемы (ПС) “Вклад” [2]. В [1], а также в [3, 4] было введено понятие “элементарная граница (элементарный пласт)” как элемент восстановленной тонкослоистой модели реальной среды, эквивалентной некоторой кривой акустической жесткости в вертикальном сечении разреза, аппроксимирующей ее в интервале шага квантования сейсмической записи по времени. В развитие этого понятия можно дополнить его следующим определе-

нием: “Элементарную границу можно представить некоторой составляющей равновременной акустической модели, полученной при моделировании волнового поля как элемент осредняющей исходную кривую акустической скорости значениями элементарных слоев минимальной толщины, заключенной в единичном шаге квантования сейсмической записи по времени” [1, с. 23]. В то же время элементарная граница – это идеализация модели реальной среды с шагом квантования, т. е. параметризация модели реальной среды путем осреднения ее акустических неоднородностей во временном интервале, равном шагу квантования (в свою очередь параметризация акустических неоднородностей влечет за собой параметризацию состава и свойств геологического разреза).

В целом понятие элементарной границы (элементарного пласта) характеризует максимально возможную детализацию модели реальной среды (ее тонкослоистую структуру) при заданных параметрах регистрации возбужденных источником сейсмических колебаний, т. е. детализацию, которая определяет модель среды в классе кусочно-постоянных функций в интервале шага квантования сейсмозаписи по времени. Применение к анализу динамики сейсмической записи такого определения дает заметное преимущество перед другими, использующими известные способы одномерного сейсмического моделирования волнового поля.

В свою очередь элементарные границы ограничивают (в частном случае) сверху и снизу элементарный пласт. Очевидно, что этот пласт является некоторой интегральной, а элементарная граница – дифференциальной характеристикой реальной среды. Причем совокупность элементарной границы и элементарного пласта означает невозможность разложения (дробления) модели реальной среды на более “элементарные” ее составляющие акустической неоднородности.

Следует отметить, что продемонстрировать процесс формирования сейсмической записи на физических моделях с учетом вклада элементарных границ и толщ практически невозможно. Но это сравнительно легко можно сделать на основе решения прямой и обратной задач одномерного (или двумерного) математического моделирования, как это показано, например, в работах [3, 4]. Используя результаты такого моделирования с оценкой вклада элементарных границ и толщ в интерференционную сейсмограмму, можно показать, что информация от элементарного пласта (элементарной границы раздела) на зарегистрированной интерференционной сейсмической записи распределяется (точнее “растягивается”) по временной координате на довольно значительную величину. Эта временная величина состоит из длины зондирующего сейсмического импульса плюс временная толщина самого элементарного пласта (или толщи) [1, 3, 4]. Последняя (толщина элементарного пласта или толщи, состоящая из некоторой конечной суммы элементарных пластов) определяется либо только одним шагом квантования сейсмозаписи по времени (для элементарного пласта), либо некоторой конкретной совокупностью шагов квантования сейсмозаписи по времени (для толщи) в зависимости от конкретно изучаемого пласта или пропластка, который может охватываться сразу несколькими шагами дискретизации. Явление (эффект) интерференции как результат суперпозиции указанных элементарных сейсмических сигналов в любой исходной или результирующей сейсмической записи является обязательно присутствием для каждой конкретной записи [3, 4].

Необходимость в изучении и оценке аномалий волнового поля и его параметров (точнее, соответствующих вкладов элементарных границ и толщ реальной среды в суммарное интерференционное волновое поле), обусловленных наличием в разрезе соответствующих физико-геологических неоднородностей, появилась по мере усложнения решаемых с помощью сейсморазведки задач. Последние направлены на выявление нефтеперспективных объектов в целевых продуктивных отложениях (чаще всего сложно по-

строенных в виде зон выклинивания, литологического замещения, наличия тонкослоистых структурных неоднородностей и т. п.).

Для некоторого частного решения такого рода задач была разработана ПС “Вклад”, которая использовалась для выделения информативных динамических параметров отраженных волн и изучения влияния геологических характеристик разреза на акустические параметры и динамику сейсмической записи [2]. В этой системе используется известный способ расчета теоретических сейсмограмм во временной области – алгоритм Баранова–Кюнеца и изучается влияние особенностей геологического строения разреза на процесс формирования волнового поля. Выполняется это следующим образом.

В исследуемом интервале разреза (покрывающая толща–объект исследования–подстилающая толща) по исходным значениям акустических скоростей и плотностей строится тонкослоистая модель среды, в которой мощность слоя соответствует шагу дискретизации сейсмической записи по времени. Так, шагу дискретизации по времени 2 мс при скоростях 4–6 км/с будет соответствовать мощность 4–6 м. На основе использования этой модели отдельно рассчитываются теоретические сейсмограммы для покрывающей, подстилающей толщ и толщи, являющейся объектом исследования. Оценивается вклад объекта исследования в интерференционное волновое поле на основе сопоставления полученных трех сейсмограмм, а также вклад каждой из элементарных отражающих границ (под элементарной границей в данном случае понимается граница между двумя тонкими слоями мощностью 4–6 м) путем последовательного исключения их из процесса формирования волнового поля.

Однако при работе с ПС “Вклад” появилась необходимость в улучшении ее характеристик. В частности, было выяснено, что:

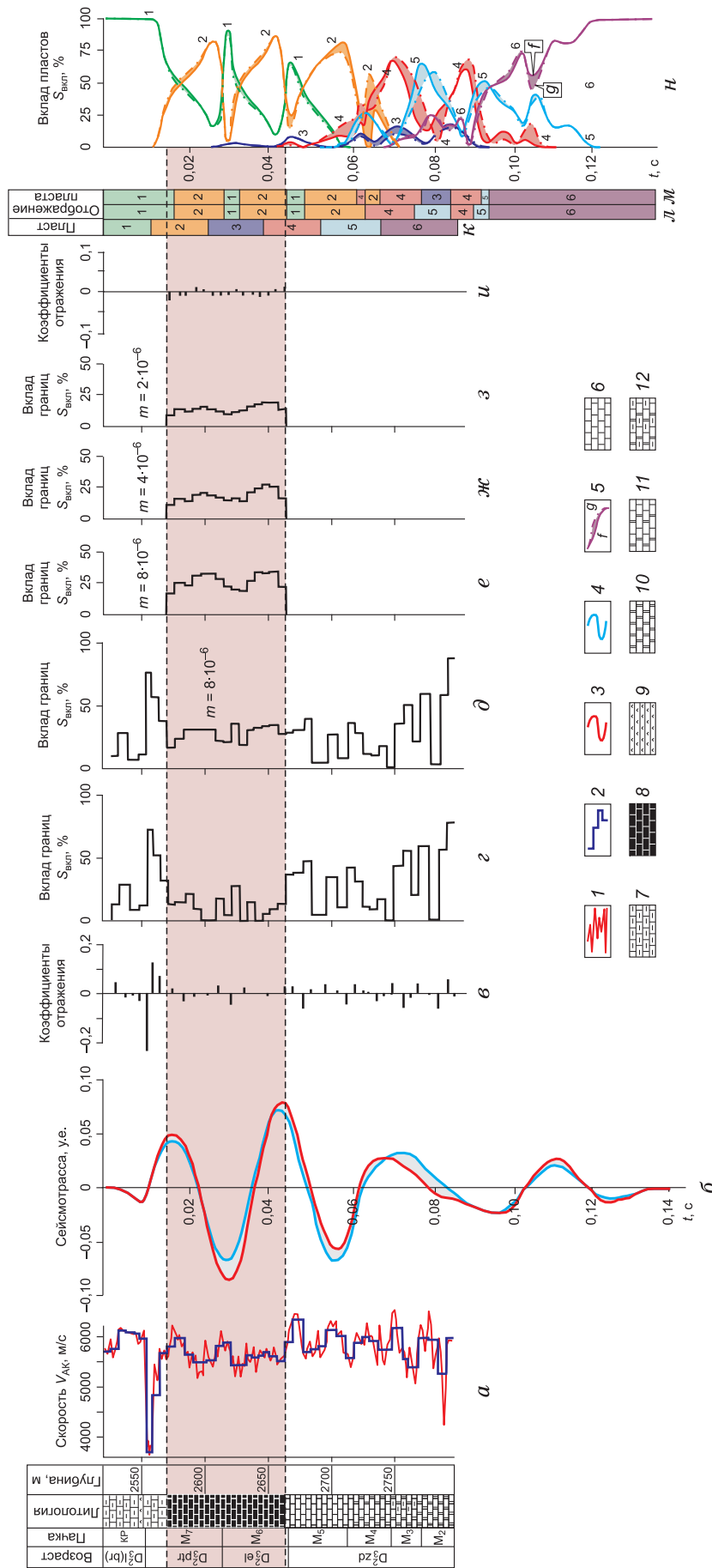
⇒ ПС преобразует исходную акустическую модель скоростей в равновременную тонкослоистую модель только с точностью шага задания точек акустической скорости, что приводит к погрешности (иногда существенной) в построении теоретических сейсмограмм, а также коэффициентов отражения, вкладов границ и толщ и т. п.;

⇒ разбиение изучаемого интервала разреза можно сделать только на три толщи (покрывающую, подстилающую и объект исследования), что ограничивает область использования подсистемы в решении тех задач, где требуется оценивать влияние на суммарное волновое поле большего, чем три, числа задаваемых толщ;

⇒ расчеты синтетических сейсмограмм, как отмечалось выше, осуществляются ПС только во временной области, что исключает возможность учитывать при моделировании неупругое частотно-зависимое поглощение сейсмических волн;

⇒ отдельные параметры по определению вклада элементарных границ и толщ в интерференционное волновое поле ПС либо не рассчитываются, либо выдаются на печать только в символьном изображении (а не в виде соответствующих кривых вклада толщ или элементарных границ).

Перечисленные технологические характеристики полностью учтены при разработке нами комплекса программ VKSYNT, в основу которого для расчета



**Рис. 1.** Оценка влияния поглощения сейсмических волн, а также элементарных границ и толщ на процесс формирования волнового поля с использованием комплекса программ VKSYNT по данным скв. Давыдовская-2:

*а* – кривые акустической скорости; *1* – исходная кривая  $V_{AK}$ ; *2* – равновременная модель  $V_{AK}$  для шага дискретизации 0,001 с;

*б* – теоретические суммарные сейсмограммы; *3* – сейсмограмма, рассчитанная для равновременной модели  $V_{AK}$ ; *4* – сейсмограмма, рассчитанная для той же модели, но с поглощением волн в нефтяной части сейсмограммы; *5* – сейсмограмма, рассчитанная для равновременной модели  $V_{AK}$ ; *6* – сейсмограмма, рассчитанная для той же модели, но с поглощением волн в нефтяной части сейсмограммы – действительная составляющая;

*в* – коэффициенты отражения – действительная составляющая;

*г* – суммарный вклад элементарных границ в интерференционное волновое поле для модели  $V_{AK}$  без поглощения волн в нефтяной части разреза;

*д* – то же, с поглощением волн в нефтяной части разреза;

*е* – вклад элементарных границ только за счет поглощения волн в нефтяной части разреза с  $m = 8 \cdot 10^{-6}$ ;

*ж* – то же, с  $m = 4 \cdot 10^{-6}$ ;

*з* – то же, с  $m = 2 \cdot 10^{-6}$ ;

*и* – коэффициенты отражения только за счет поглощения волн ( $m = 8 \cdot 10^{-6}$ ) – мнимая составляющая;

*л* – разбиение исследуемого интервала разреза на 6 толщ;

*м* – распределение интервалов заданных 6 толщ на сейсмограмме согласно распределению кривых суммарного вклада толщ без поглощения волн в нефтяной части разреза;

*н* – то же, с поглощением волн в нефтяной части разреза ( $m = 8 \cdot 10^{-6}$ );

*о* – кривые вклада 6 толщ в интерференционное волновое поле (параметр кривой – номер толщи); *5* – кривые вклада толщ без поглощения волн в нефтяной части разреза;

*п* – то же, с поглощением волн в нефтяной части разреза ( $m = 8 \cdot 10^{-6}$ ); *6* – известняк; *7* – глинистый известняк; *8* – нефтенасыщенный известняк; *9* – ангидрит; *10* – доломит; *11* – известняк доломитовый; *12* – известняк глинистый (доломитовый).

сейсмических трасс в частотной области положен алгоритм Л.М. Бреховских [5].

На основе этого алгоритма рассчитывается сейсмограмма для сложных сред с переменным по частоте и вертикальной координате разреза неупругим поглощением волн. Оценивается вклад как равноновременных, так и неравноновременных границ (слоев минимальной мощности, определяемой шагом дискретизации по времени или по глубине соответственно), суммарный вклад элементарных границ, вклады произвольно задаваемого количества толщ и средние значения вкладов этих толщ в суммарное волновое поле. Поскольку алгоритм программы предусматривает наличие коэффициентов отражения как за счет разности акустических жесткостей на границах раздела, так и за счет дифференциации коэффициентов поглощения волн тонкослоистых пачек и толщ, то в нем реализована возможность определять вклады границ и толщ толщ с учетом поглощения волн в соответствующих интервалах изучаемого разреза.

В алгоритме VKSYNT импульсная реакция многослойной плоскопараллельной модели среды  $I(t)$  на  $\delta$ -функцию Дирака представляется как обратное преобразование комплексного спектра коэффициента отражения  $n$ -слойной среды  $R_{n+1}(w)$ :

$$I(t) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} R_{n+1}(w) e^{jw t} dw.$$

Комплексный спектр коэффициентов отражения  $R_{n+1}(w)$  определяется через входной импеданс системы  $n$  слоев:

$$R_{n+1}(w) = \frac{Z_{\text{вх}}^{(n)} - Z_{n+1}}{Z_{\text{вх}}^{(n)} + Z_{n+1}},$$

где  $Z_{\text{вх}}^{(n)}$  – входной акустический импеданс  $n$  слоев;  $Z_{n+1}$  – акустический импеданс  $(n+1)$ -го слоя.

Акустический импеданс, введенный Л.М. Бреховских, рассчитывается по формуле

$$Z_{\text{вх}}^{(n)}(jw) = \frac{Z_{\text{вх}}(jw) - jZ_n \operatorname{tg} \varphi_n(jw)}{Z_n - jZ_{\text{вх}}^{(n-1)}(jw) \operatorname{tg} \varphi_n(jw)} Z_n,$$

где  $\varphi_n(jw)$  – набег фазы в слое;  $Z_n(jw)$  – акустическая жесткость  $n$ -го слоя.

Зависимость коэффициента поглощения сейсмических волн аппроксимируется линейным законом  $\alpha = \beta w$ .

Дисперсия скорости для сейсмического диапазона частот задается в соответствии с известной формулой Футтермана:

$$V(f_k) = V(f_0) \left[ 1 - \frac{2\beta V(f_0)}{\pi} \ln \frac{f_k}{f_0} \right]^{-1},$$

где  $V(f_k)$  – скорость на частоте  $f_k$ ;  $V(f_0)$  – скорость на частоте  $f_0$ .

Теоретическая сейсмограмма  $S(t)$  для заданного сигнала  $U(t)$  при этом рассчитывается как интеграл свертки:

$$S(t) = U(t) \cdot I(t).$$

Для опробования комплекса программ VKSYNT в качестве исходных данных нами использована акустическая модель по скв. Давыдовская-2, которой вскрыто одноименное нефтяное месторождение в елецких и петриковских отложениях межсолевой тол-

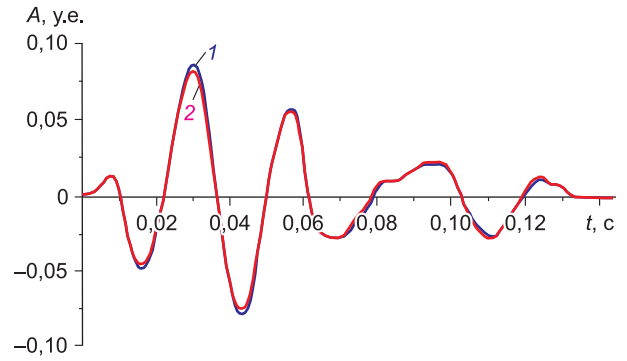


Рис. 2. Сравнение теоретических сейсмограмм, рассчитанных по алгоритмам ПС “Вклад” и VKSYNT:

1 – расчет во временной области (по Баранову–Кюнецу); 2 – расчет в частотной области (по Л.М. Бреховских).

щи (рис. 1, а). Скоростная характеристика этих отложений практически мало отличается от таковой для вмещающих пород. При этом покрывающая их верхняя часть пачки  $M_7$  межсолевых отложений, представленная в разрезе низкоскоростными породами покрывки, вносит существенный вклад (более 70 %) в формирование поля (см. рис. 1, з). Элементарные границы с сильным (до 70–80 %) влиянием на процесс формирования поля хорошо видны и в подстилающих нефтяную залежь породах. Однако реальная часть (действительная составляющая) комплексных коэффициентов отражения ( $K_{\text{отр}}$ ) показывает несколько иную картину. Так, из рис. 1, в видно, что покрывающая нефтяную залежь верхняя часть пачки  $M_7$  характеризуется относительно высокими значениями  $K_{\text{отр}}$  ( $-0,234 \div 0,133$ ), что соответствует и высоким значениям вклада границ, связанных с этой частью разреза. Подстилающие же залежь границы характеризуются относительно низкими значениями  $K_{\text{отр}}$  ( $-0,060 \div 0,059$ ), но влияние их на процесс формирования поля, как указано выше, весьма велико (см. рис. 1, з).

Непосредственно перед вычислением вклада границ и толщ сделано сопоставление теоретических сейсмограмм, рассчитанных по алгоритмам ПС “Вклад” и VKSYNT. Причем для второго из алгоритмов задан нулевой параметр поглощения волн по всему интервалу разреза (рис. 2). В целом наблюдается хорошее совпадение трасс, что указывает на достоверность сравниваемых результатов, полученных от использования разных алгоритмов вычислений, для одних и тех же исходных параметров акустической модели.

Проведен также численный эксперимент с различными параметрами поглощения волн в объекте исследования ( $\alpha_{30}^n$ ) и во вмещающей среде ( $\alpha_{30}^{\text{вм}}$ ) (рис. 3, 4). Так, на рис. 3 представлены трассы, рассчитанные при разных значениях коэффициента поглощения на частоте 30 Гц в нефтенасыщенном интервале (объекте исследования)  $\alpha_{30}^n = 0,38 \cdot 10^{-3}$ ;  $0,75 \cdot 10^{-3}$  и  $1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$ , откуда видно, что изменение коэффициента поглощения волн в объекте исследования ведет к изменению формы всей сейсмограммы. При этом наблюдается уменьшение амплитуд у второй, третьей и четвертой фаз и увеличение у пятой фазы сейсмической записи.

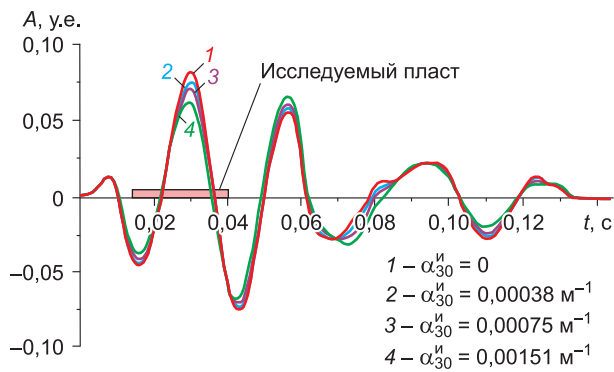


Рис. 3. Сравнение результатов моделирования сейсмограмм при различных значениях коэффициента поглощения волн в нефтяной части разреза.

На рис. 4 дается сравнение трассы, рассчитанной с одинаковыми значениями коэффициента поглощения для всех трех толщ (покрывающей, подстилающей и объекта исследования) разреза ( $\alpha_{30}^И = \alpha_{30}^{ВМ} = 0,75 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$ ), с трассами, полученными без поглощения ( $\alpha_{30}^И = \alpha_{30}^{ВМ} = 0$ ) и с поглощением волн только в исследуемом объекте ( $\alpha_{30}^И = 0,75 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$ ;  $\alpha_{30}^{ВМ} = 0$ ). Можно наблюдать уменьшение амплитуд по всем фазам трассы с поглощением, одинаковым для всех трех толщ. В интервале времен 0,062–0,080 с наблюдается смещение фазы. Участки сеймотрасс с поглощением, начиная со времени 0,062 с, по своей форме наиболее сложные.

Результаты показывают, что влияние поглощения волн на форму сейсмической трассы оказывается достаточно сложным в рамках рассматриваемой модели.

Возвращаясь к оценке вкладов границ и толщ в интерференционное волновое поле, графики которых представлены на рис. 1, можно отметить следующее.

При сравнении суммарных вкладов элементарных границ для моделей разреза без поглощения (см. рис. 1, з) и с поглощением (см. рис. 1, д) волн в нефтенасыщенном интервале ( $\alpha_{30}^И = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$ ) видно их отличие в диапазоне проявления объекта исследования. Поглощение волн обуславливает здесь достаточно существенное повышение суммарного вклада элементарных границ в волновое поле непосредственно в нефтенасыщенном интервале изучаемого разреза.

На рис. 1, е–з приводятся суммарные вклады элементарных границ в волновое поле только за счет наличия поглощения волн в нефтенасыщенном интервале разреза при разных значениях параметра коэффициента поглощения. Из сравнения этих графиков видно не только уменьшение значений вкладов за счет уменьшения параметра поглощения  $m = \beta$ , но также и за счет изменения формы этих кривых при понижении коэффициента поглощения с  $\alpha_{30} = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$  до  $\alpha_{30} = 0,37 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$ , что, очевидно, происходит вследствие нелинейного влияния поглощения на форму импульсной трассы.

На рис. 1, и представлено распределение мнимой части (составляющей) комплексных коэффициентов

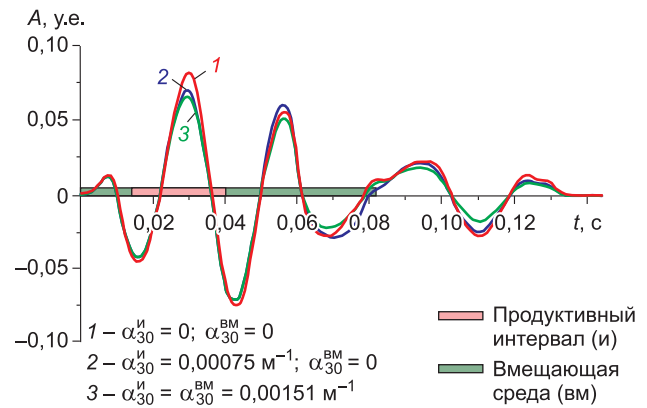


Рис. 4. Сравнение сейсмограмм, рассчитанных при разном поглощении волн в продуктивном интервале (и) и во вмещающей (вм) среде.

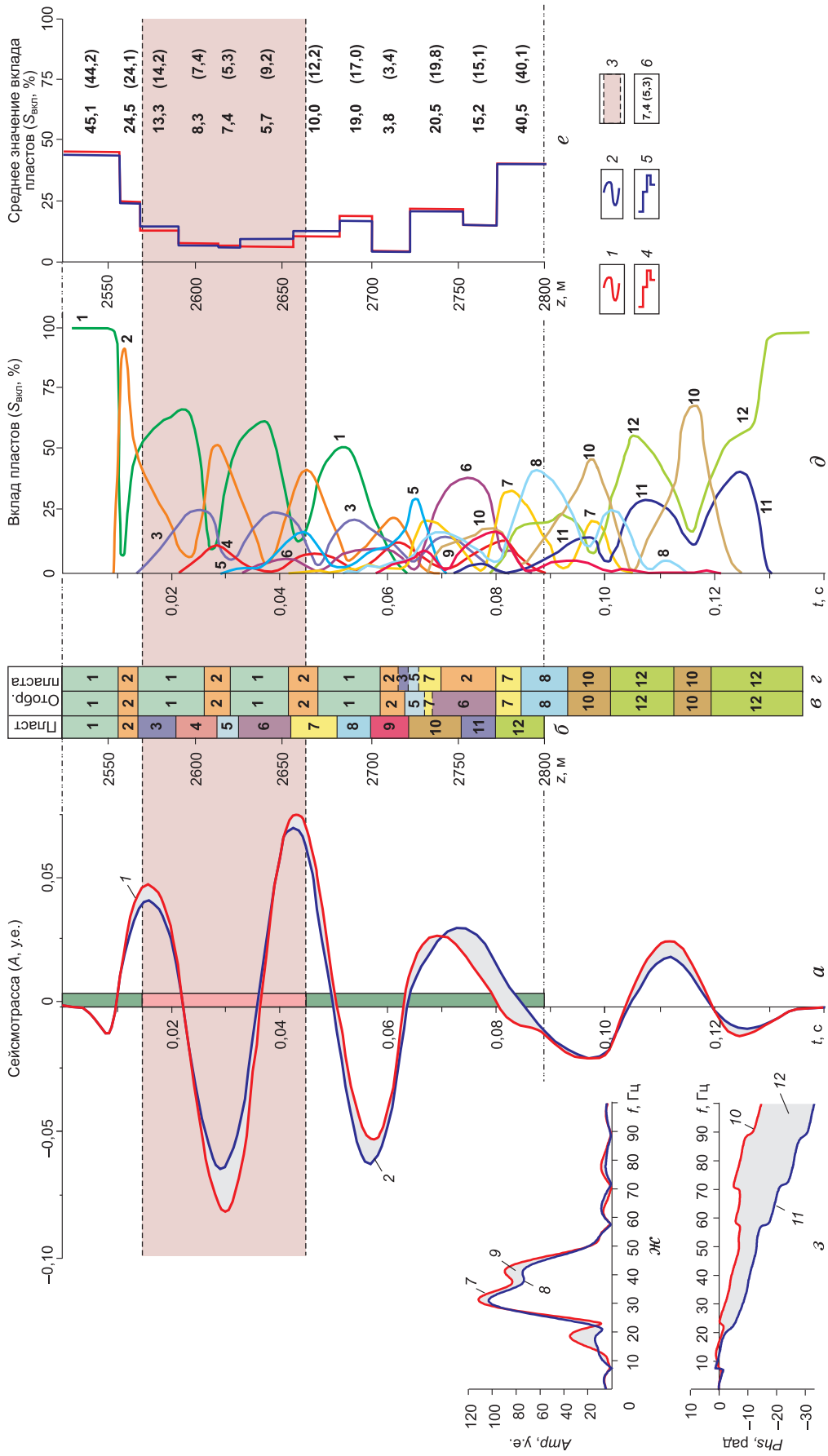
отражения в случае только поглощения волн  $\alpha_{30} = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$  в нефтенасыщенном интервале разреза.

Результаты оценки вклада толщ в суммарное волновое поле для произвольного разбиения модели разреза на толщи демонстрируется на рис. 1, к–н и рис. 5. Так, на рис. 1, к приведены произвольно заданные толщи (в частности, задано 6 толщ, что в 2 раза больше, чем можно было задавать при работе с ПС “Вклад”). На рис. 1, л представлен результат распределения интервалов заданных 6 толщ на сейсмической трассе согласно распределением кривых вклада этих толщ без поглощения волн в нефтенасыщенной части разреза (см. рис. 1, н). На рис. 1, м показано такое же распределение вклада 6 толщ на сеймотрассе, но с поглощением волн в нефтяной части разреза ( $\alpha_{30} = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$ ).

Отличие кривых распределения вкладов 6 толщ в формирование поля при наличии и отсутствии поглощения волн в нефтенасыщенной части разреза показано на рис. 1, н цветной заливкой.

Результат оценки вклада толщ для еще большего их числа, – произвольно заданных 12 толщ, изображен на рис. 5. Принцип распределения интервалов этих толщ на сеймотрассе аналогичен описанному на рис. 1. Дополнительно к этому на рис. 5, е представлены графики средних значений вкладов толщ в суммарное волновое поле с поглощением и без поглощения волн в нефтенасыщенном интервале. Видно, что учет поглощения приводит к перераспределению вкладов толщ: в одних случаях это уменьшение, а в других – увеличение их средних значений. Причем такое перераспределение вкладов относится ко всему исследуемому интервалу, а не только к нефтенасыщенному интервалу разреза.

Отметим, что на рис. 5, а представлены две сеймотрассы: сеймотрасса № 1, рассчитанная с использованием равномерной скоростной модели  $V_{AK}$  разреза; сеймотрасса № 2, рассчитанная для такой же равномерной скоростной модели, но с поглощением волн в нефтяной части разреза (а именно, с параметром поглощения  $m = \beta = 8 \cdot 10^{-6}$ ). Соответствующие им амплитудно-частотные (кривые 7 и 8) и фазовые (кривые 10 и 11) характеристики и области (зоны 9 и 12) и результат их отличия продемон-



**Рис. 5.** Оценка влияния произвольно задаваемых толщ на суммарную сейсмограмму с использованием алгоритма VKSYNT по данным скв. Давыдовская-2:

*a* – теоретические сейсмограммы: *1* – сейсмограмма, рассчитанная для равновременной модели  $V_{\text{АК}}$  (см. рис. 1, *a*); *2* – то же, но с поглощением волн в нефтяной части разреза (параметр поглощения  $m = 8 \cdot 10^{-6}$ ); *3* – нефтяная часть разреза, в которой задается поглощение; *4* – разбиение исследуемого интервала разреза на 12 толщ; *5* – распределение интервалов заданных 12 толщ согласно распределению кривых суммарного вклада толщ без поглощения волн в нефтяной части разреза; *6* – то же, но с поглощением волн в нефтяной части разреза ( $m = 8 \cdot 10^{-6}$ ); *7* – кривые вклада толщ в интерференционное волновое поле (параметр кривой – номер толщ); *8* – функция вклада толщ без поглощения волн в нефтяной части разреза; *9* – амплитудно-частотные характеристики волн; *10* – АЧХ зондирующего реального сейсмического сигнала; *11* – АЧХ без поглощения волн в нефтяной части разреза; *12* – АЧХ с поглощением волн в нефтяной части разреза; *1/1* – то же, с поглощением ( $m = 8 \cdot 10^{-6}$ ); *1/2* – разница в фазовых характеристиках без поглощения (*1/0*) и с поглощением (*1/1*) волн в нефтяной части разреза.

рованы на рис. 5, ж, з. При этом распределение интервалов изучаемого разреза на выбранные 12 толщ показано на рис. 5, б, а отображение этих толщ в максимальном их проявлении на сейсмических трассах без поглощения и с поглощением волн – на рис. 5, в и г соответственно. Кривые вклада от каждой из выбранных для анализа 12 толщ представлены на рис. 5, д. Можно мысленно экстраполировать столь сложную интерференцию сейсмической информации (зафиксированную от 12 толщ) на существенно большее количество пластов при распределении всего рассматриваемого интервала разреза. Например, это можно сделать на случай представления разреза на все имеющиеся элементарные одновременные пласты, получаемые с шагом квантования сейсмической записи по времени. При этом можно легко представить необычайно сложную интерференцию информации от всех элементарных пластов, которую мы будем иметь на трассах сейсмической записи. Такая интерференция, естественно, отобразится как на модельной, так и на реальной сеймотрассах.

Для расширения географии применения рассмотренной выше системы моделирования, а также дальнейшего развития способов решения прямых (а также и обратных) динамических задач сейсморазведки авторы воспользовались геолого-геофизическими материалами по одной из скважин Шаимского региона Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции. Использовались результаты ГИС по одной из скважин Сыморьяхско-Шушминской площади (данные акустического и гамма-гамма-каротажа), а также сейсмические данные 3D съемки, полученные на указанной площади. Представленные на рис. 6 и 7 результаты моделирования являются непосредственно продолжением один другого. Отличительная особенность этого модельного эксперимента от рассмотренных выше заключается в применении одновременной модели с шагом квантования по времени, равным 1 мс (именно с таким шагом квантования здесь обрабатывались, обрабатывались и интерпретировались сейсмические данные 3D съемки МОГТ) [6–8].

Исследуемый интервал разреза был при этом разделен на 10 пластов (см. рис. 6, а). Причем кровли каждого из пластов имеют отношение к определенным отражающим границам. Они обозначены в соответствии с их литолого-стратиграфической приуроченностью. Так, кровля пласта 1 с индексом П – это кровля отложений нижнеданиловской подсвиты келловей-оксфорд-кимеридж-волжского яруса ( $J_3k-v$ ) верхней юры; кровли с индексами  $T_1$ ,  $T_2$  и  $T_3$  у пластов 2, 3 и 4 – это кровли нефтеперспективных отложений горизонтов  $T_1(Ю_2)$ ,  $T_2(Ю_3 + 4)$  и  $T_3(Ю_5)$  тюменской свиты байосс-батского возраста ( $J_2b-bt$ ) средней юры; кровля с индексом “кв” у пласта 5 – это поверхность отложений коры выветривания доюрского основания; кровли с индексами  $A$ ,  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  и  $A_4$  у пластов 6–10 – это границы в образованиях доюрского основания (состоящего в рассматриваемом интервале разреза главным образом из эффузивных, эффузивно-осадочных и метаморфизованных горных пород) (см. рис. 6, а).

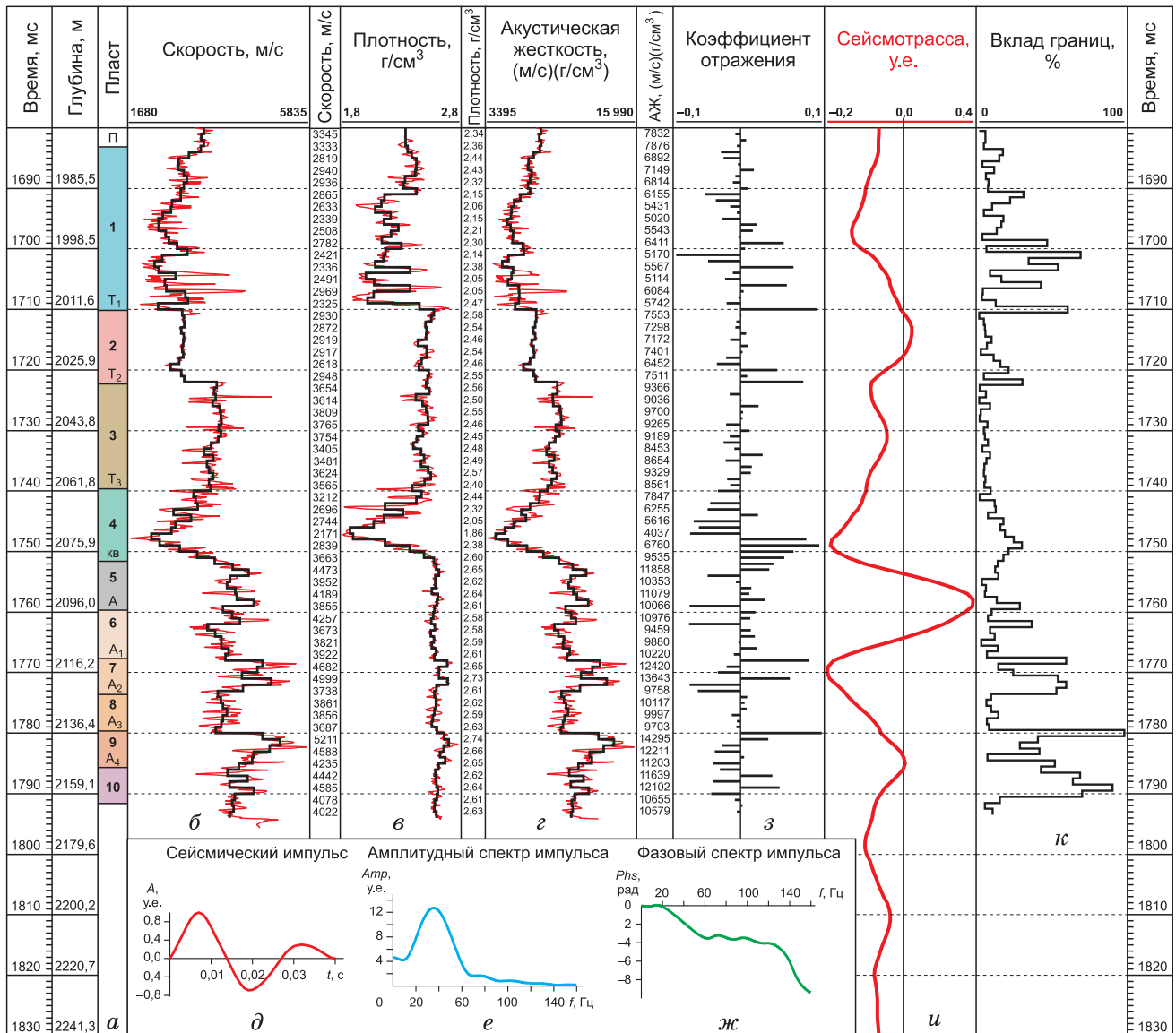
На первых трех графиках (см. рис. 6, б–г) приведены исходные кривые акустического каротажа, рас-

пределения плотности пород и акустической жесткости (произведения скорости на плотность  $V\rho$ ) и соответствующие им одновременные модели скорости, плотности и акустической жесткости. Зондирующий реальную геологическую среду минимально-фазовый сейсмический импульс представлен совместно со своими амплитудно-частотным и фазовым спектрами (см. рис. 6, д–ж). Этот сейсмический импульс извлечен из реальных сейсмических трасс, расположенных вблизи вертикального сечения разреза, приуроченного к стволу рассматриваемой скважины. На следующих трех графиках представлены: распределение коэффициентов отражения, модельная сейсмическая трасса и суммарный вклад каждой из элементарных границ (элементарных пластов) в интерференционное волновое поле (см. рис. 6, з–к).

Следует отметить характер проявления интерференции сейсмических волн, отраженных от каждого из выделенных 10 пластов, который при этом отражен на кривых вклада каждого из этих пластов (см. рис. 7, а). В численном виде (те же кривые вклада в числах) интерференция волн изображена на рис. 7, б. Процесс интерференции волн, естественно, представляется поточечно с шагом квантования сейсмической записи по времени. При этом хорошо видно, что каждая из амплитуд модельной сейсмической трассы содержит информацию от некоторой (вполне конкретной) совокупности вышележающих пластов.

Поскольку нами при моделировании использовались фактические данные по одной из поисково-разведочных скважин Западной Сибири, то следует отметить, что продуктивными интервалами в рассматриваемом разрезе являются пласты 2 и 3 (см. рис. 6, а и рис. 7, е). К центральной части каждого из этих пластов приурочено по одному проницаемому нефтенасыщенному пропластку. Эти пропластки имеют нефтенасыщенную толщину, равную  $\approx 1-2$  м. Судя по представленным кривым вклада толщ в интерференционное волновое поле (см. рис. 7, а), можно легко убедиться в том, что кривая вклада от пласта 2 интерферирует с кривой вклада от покрывающего пласта 1, а также с кривыми вклада от подстилающих пластов с номерами 3, 4 и 5 (см. рис. 7, б). Кривая вклада от пласта 3 при этом интерферирует с кривыми вклада от покрывающих пластов 1 и 2, а также с кривыми вклада от подстилающих пластов с номерами 4–7 и даже с пластом, имеющим номер 8 в самой начальной его части (см. рис. 7, б). Каждая из амплитуд сейсмической записи на каждом из ее дискретов характеризуется уникальной интерференцией вкладов от рассматриваемых пластов, отличающей ее от всех остальных амплитуд, проявляющихся на других дискретах сейсмической записи. При этом каждая из этих амплитуд имеет различное соотношение вкладов заданных толщ, но один из них доминирует над всеми.

Учитывая вышеизложенное, следует еще раз подчеркнуть, что интерференция волн “реализуется” через кривые вклада элементарных границ и толщ за счет прохождения с сейсмической скоростью довольно длительного по времени ( $\approx 40$  мс) зондирующего сейсмического импульса (см. рис. 6, д) через каждую акустическую неоднородность (см. рис. 6, г), представленную в виде равномерной акустической



**Рис. 6.** Результаты сейсмического моделирования по одной из скважин Шаимского нефтегазоносного региона:

- а – разбиение исследуемого интервала разреза на 10 толщ в соответствии с их литолого-стратиграфической приуроченностью;
- б – кривые акустической скорости  $V_{AK}$  (исходная кривая и равновременная модель);
- в – кривые распределения плотности по данным ГГК (исходная кривая и равновременная модель);
- г – кривые распределения акустической жесткости – произведение  $\rho \cdot V_{AK}$  (исходная кривая и равновременная модель);
- д – минимально-фазовый сейсмический импульс, извлеченный из совокупности реальных 3D-куба сейсмических записей;
- е, ж – амплитудно-частотный и фазовый спектры соответственно;
- з – распределение коэффициентов отражения;
- и – модельная сейсмическая трасса, рассчитанная по алгоритму VKSYNT;
- к – суммарный вклад элементарных границ в интерференционное волновое поле.





модели изучаемого разреза. На сейсмической трассе (см. рис. 6, *и*) при этом нет ни одного участка, ни одной ее амплитуды, которые были бы не интерференционными. На кривых вклада толщ (см. рис. 7, *а*), а также в числах этих кривых вкладов от каждой из толщ (см. рис. 7, *б*) отмечается значительное временное распределение (“растяжение” информации по временной координате), как это уже указывалось выше. На каждом из дискретов сейсмической записи можно наблюдать и явное преобладание доли информации какой-то одной из толщ над всеми другими толщами.

На рис. 7, *в* представлены локальные сейсмические записи–отклики, образующиеся в результате прохождения через акустические неоднородности каждого из рассматриваемых пластов зондирующего сейсмического импульса. В соответствии с особенностями распределения коэффициентов отражения (см. рис. 6, *з*) и акустических жесткостей (см. рис. 6, *е*) в каждом из 10 пластов интенсивность локальных сейсмических записей – откликов, знак их вступления и длительность сугубо индивидуальны (см. рис. 7, *в*). Наиболее интенсивными по амплитуде являются отклики, характерные для 1-го и 4-го пластов, а отклики, связанные с продуктивными пластами 2 и 3, при этом оказываются не столь интенсивными – относительно слабыми.

Нормировка каждой из представленных локальных сейсмических записей–откликов относительно суммарной интерференционной сейсмической записи представлена на рис. 7, *г*. При этом видно, что каждая из фаз суммарной сейсмограммы, за исключением самой первой фазы, характеризуется присущей явлению интерференции суперпозицией вкладов толщ. Распределение по вертикальной координате самых интенсивных значений вкладов толщ среди всех остальных показано на рис. 7, *д*. Видно, что от продуктивных пластов 2 и 3 оно формируется только на двух сравнительно непротяженных (равных 6 и 8 мс соответственно) участках сейсмотрассы (на временах  $t_0$   $1728 \div 1734$  и  $1734 \div 1742$  мс). Следует отметить, что указанные временные интервалы приурочены к тем участкам сейсмотрассы, на которых фиксируются относительно низкие амплитуды сейсмической записи (см. рис. 7, *е*).

Сопоставление колонки “Отображение пластов” (см. рис. 7, *д*) с колонкой “Исходное расположение пластов” (см. рис. 7, *е*) показывает на существенное отличие исходного распределения пластов по разрезу (последовательной их нумерацией сверху вниз) от расположения информации этих пластов на сейсмической трассе (сформированного в весьма смешанном порядке в результате свертки сейсмического импульса с коэффициентами отражения). Последнее обусловлено последовательным сложным соотношением кривых вклада рассматриваемых толщ (см. рис. 7, *а, б*), кривых попластового разложения локальных сейсмических записей–откликов (см. рис. 7, *в*) и отмеченным выше “растяжением” информации по временной координате.

Информация, представленная на рис. 7, *ж*, показывает, что наибольшими средними значениями вклада каждого из рассматриваемых пластов в интер-

ференционное волновое поле обладают пласты с номерами 1, 4 и 9. Продуктивные пласты 2 и 3 характеризуются некоторыми промежуточными средними значениями вклада толщ.

Таким образом, использование способа математического сейсмо моделирования с оценкой вклада элементарных границ и толщ позволяет однозначно увязать важные для геологической интерпретации сейсмических данных особенности разреза – элементарные границы и толщи с параметрами интерференционного волнового поля. Основные выводы по представленным выше результатам можно свести к следующему:

1. Использование сейсмических данных с присущей им интерференционной структурой и с заранее непредсказуемым характером суперпозиции локальных сейсмических сигналов при интерпретации может приводить к значительным погрешностям. При этом без учета вклада элементарных границ и толщ в интерференционное волновое поле весьма сложно ориентироваться в информативности тех акустических неоднородностей изучаемого разреза и связанных с ними элементов структуры волнового поля, с которыми так или иначе связаны целевые нефтеперспективные объекты.

2. Поглощение волн может существенно изменять интерференционную картину волнового поля относительно поля, отвечающего модели среды без поглощения, в зависимости от поглощающих свойств изучаемого объекта с глубиной.

3. Если при интерпретации сейсмических данных (особенно при прогнозировании по сейсмическим данным различных геологических показателей) приходится работать с интерференционными записями, то следует выполнить предварительную оценку вклада элементарных границ и толщ в интерференционное волновое поле. Это необходимо для того, чтобы правильно выбрать тот интервал изучаемого временного разреза, в котором расположена максимально возможная информация (вклад) от целевого объекта.

4. Идеальным средством учета эффекта интерференции волн и построения в классе кусочно-постоянных тонкослоистых моделей реальной среды является решение обратной динамической задачи сейсмики на основе применения достаточно корректной процедуры инверсии (обращения) сейсмических записей, как это делается нами в последние годы при интерпретации сейсмических данных [6–8; и др.].

Представляется, что в процессе сейсмической интерпретации, особенно при обосновании выбора динамических параметров отраженных волн и повышении на этой основе эффективности прогноза акустических неоднородностей, состава и свойств геологического разреза, целесообразно выполнять детальную оценку вклада в сейсмическое волновое поле этих неоднородностей (а также состава и свойств) исследуемого разреза.

## Литература

1. Трофимов В.Л., Хазиев Ф.Ф. Изучение влияния состава и свойств пород на геолого-геофизические параметры нефтеперспективных отложений // Технологии сейсморазведки. 2011. № 1. С. 22–33.

2. Тальвирский Д.Б., Галаган Е.А., Кальченко А.М. Методика оценки погрешности стратиграфической привязки отраженных волн в тонкослоистых средах // Геофиз. журн. 1990. № 2. С. 78–85.
3. Трофимов В.Л., Хазиев Ф.Ф. Моделирование волновых полей для многослойных поглощающих сред с оценкой вклада элементарных границ и толщ // Изучение глубинного строения Припятского прогиба методами разведочной геофизики: Сб. науч. тр. Минск: БелНИГРИ, 1991. С. 3–14.
4. Хазиев Ф.Ф., Трофимов В.Л. Модельные исследования результатов решения обратной динамической задачи сейсмики. Геофизика // Технологии сейсморазведки – II (спец. выпуск). 2003. С. 27–37.
5. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973. 343 с.
6. Милашин В.А., Трофимов В.Л., Хазиев Ф.Ф., Качкин А.А., Тимонин А.Б., Мальцев Г.А. Прогнозирование состава и свойств юрских и доюрских отложений по 3D-сейсморазведке, ГИС и бурению // Технологии сейсморазведки. 2009. № 1. С. 70–82.
7. Трофимов В.Л., Милашин В.А., Хазиев Ф.Ф., Качкин А.А., Тимонин А.Б., Мальцев Г.А. Изучение строения и оценка условий осадконакопления тонкослоистой среды методами ВРС-Гео и ГИС // Технологии сейсморазведки. 2008. № 3. С. 57–67.
8. Хазиев Ф.Ф., Трофимов В.Л., Милашин В.А. Определение геолого-геофизических параметров реальной среды методом высокоразрешающей сейсмики // Технологии сейсморазведки. 2008. № 2. С. 25–30.