УДК 550.834.05

РАЗЛОЖЕНИЕ И ФИЛЬТРАЦИЯ ПРОНИ

Г. М. Митрофанов[1,2,3], С. Н. Смолин[1], Ю. А. Орлов[1], В. Н. Беспечный[4]

[1]Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, [2]Новосибирский государственный университет, [3]Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия; [4]Сибирский НИИ геологии, геофизики и минерального сырья, Новосибирск, Россия

№ 2(42) ♦ 2020

Разложение Прони отличается от хорошо известного разложения Фурье тем, что использует затухающие гармоники. В настоящее время оно успешно применяется во многих областях науки и техники при исследовании сигналов, обладающих затуханием, а также может представлять интерес и при анализе геофизических данных. На его основе создан метод Прони-фильтрации, способный выделять затухающие гармонические компоненты из регистрируемого сейсмического волнового поля, что иллюстрируется модельными импульсами Берлаге. Компоненты, выделенные с помощью фильтрации Прони и представленные в виде образов сейсмических временных разрезов, могут служить основой при анализе частотно-зависимых эффектов волнового поля. Это обеспечивает возможность прямого качественного прогноза целевых объектов при поиске и разведке залежей углеводородов. Такая возможность продемонстрирована на материале, полученном с помощью физического моделирования.

Ключевые слова: *метод Прони, отбор затухающих гармоник, фильтрация, частотно-зависимый отклик среды, сейсмическое волновое поле, физическое моделирование.*

Prony decomposition and filtering

G. M. Mitrofanov[1,2,3], S. N. Smolin[1], Yu. A. Orlov[1], V. N. Bespechnyy[4]

[1]Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, [2]Novosibirsk State University, [3]Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia; [4]Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources, Novosibirsk, Russia

The Prony decomposition differs from the well-known Fourier decomposition in that it uses damped harmonics. Currently, it is successfully used in many fields of science and technology in the study of signals with attenuation. This decomposition may be of interest in the analysis of geophysical data. So, for example, some transformations can be created on its basis for studying frequency-dependent effects in the response of a medium. One of these transformations is the Prony filtering, which provides the separation of damped harmonic components from the recorded seismic wave field, which is shown in the work on the example of several experiments with Berlage model impulses. Components extracted using Prony filtering and presented in the form of seismic time section images can serve as the basis for the analysis of frequency-dependent effects of the wave field, which allows direct qualitative prediction of target objects in the search and exploration of hydrocarbon deposits. In this work, such an opportunity is demonstrated on the results of physical modeling.

Keywords: *Prony method, selection of damped harmonics, filtering, frequency-dependent response of a medium, seismic wave field, physical modeling.*

DOI 10.20403/2078-0575-2020-2-55-67

В различных международных журналах опубликованы сотни научных работ, связанных со многими аспектами разложения Прони, или метода Прони. Они касаются как теоретических, так и прикладных вопросов. Исходное разложение Прони было предложено французским математиком и инженером Гаспаром Рише (бароном де Прони) более двух столетий назад [14]. В отличие от другого метода анализа гармонических составляющих (разложения Фурье, предложенного на 12 лет позже в виде доклада перед Французской академией и опубликованного с еще большей задержкой [12]) разложение Прони обеспечивало представление данных в виде суммы комплексных экспонент. Экспоненты характеризовались четырьмя параметрами (амплитудой, затуханием, частотой и фазой), определение которых было достаточно трудоемким [6]. Вероятно, эта сложность ограничила его применение и послужила причиной забвения. Интерес к использованию гармонического анализа на основе Прони разложения возобновился в 1960-е гг., когда выяснилось множество ограничений разложения Фурье. Одновременно происходило развитие вычислительных методов и вычислительной техники. Все вместе создавало возможность и благоприятные условия для применения более сложных методов гармонического анализа, чем разложение Фурье, включая и нелинейные, к которым относится метод Прони.

Разложение Прони начали активно применять при изучении экспоненциально изменяющихся гармонических колебаний в разных областях науки и техники. В сейсмике его использование инициировалось вследствие понимания важности изучения процессов затухания сейсмических колебаний, распространяющихся в геологической среде. Работа В. П. Ковалева и Г. Ф. Телепнева [3] была, вероятно, одной из первых в мире, где рассматриваемое разложение успешно применялось к анализу данных сейсмического каротажа скважин. В работах Ю. И. Колесникова и А. Ю. Игнатова [4, 5] по результатам физического моделирования изучалось отличие оценок поглощения,

получаемого по первым вступлениям головных продольных волн при акустическом каротаже, от значений поглощения, которым обладают объемные *P*-волны. Наш первый опыт применения разложения Прони относился к задаче определения областей аномально высокого пластового давления (АВПД) по вариациям параметра затухания отраженных сейсмических волн [9, 10]. Задача была связана с исследованиями, проводимыми норвежской нефтяной компанией Norsk Hydro. Дальнейшее практическое применение разложения Прони показало, что выполнение частотно-зависимого динамического анализа волнового поля в узких полосах частот дает возможность осуществлять прямой качественный прогноз залежей флюидов и определять их тип.

Несмотря на успешные результаты, полезность использования этой процедуры долго не находила понимания со стороны специалистов из нефтяной отрасли. Основываясь на личном опыте, укажем несколько причин, которые затрудняли (да и сейчас затрудняют) широкое распространение метода в практических исследованиях.

Во-первых, оно отличается от стандартного спектрального анализа, основанного на разложении Фурье, как количеством параметров, так и их распределением в частотной области. В частности, отсутствует равномерность покрытия частотной области, которая типична для традиционного спектрального анализа. Значения параметров, в том числе частоты, могут быть сгруппированы произвольным образом. Такая особенность в получаемых значениях связана с параметрическим описанием сигналов, что не всегда воспринимается специалистами-практиками.

Во-вторых, часто наблюдается недопонимание важности частотно-зависимого анализа волнового поля с целью изучения различий в реакции целевых объектов поиска и разведки на разные частоты. Только в последнее время частотно-зависимая локализация все более широко применяется в связи с распространением методов современного спектрального анализа, и в частности используемого вейвлет-преобразования [1, 11].

В-третьих, в некоторых нефтяных компаниях отсутствовало понимание значимости изучения параметра затухания. Кроме того, в их арсенале уже имелось несколько десятков параметров, получаемых по результатам сейсмических исследований и используемых на различных этапах интерпретации. Поэтому необходимо было убедить их в полезности и эффективности использования этого параметра при решении практических задач.

В-четвертых, на начальной стадии развития метода отсутствовала наглядность представления результатов разложения Прони, что существенно усложняло увязку частотно-зависимых эффектов волнового поля с целевыми объектами поиска и разведки.

Последняя из указанных причин, возможно, была основной для восприятия и оценки степени полезности предлагаемого метода. Осознание этого и работа над способами восприятия результатов разложения Прони привело в дальнейшем к созданию и развитию технологии Прони-фильтрации. Термин «фильтрация» здесь применялся по аналогии с общепринятой полосовой фильтрацией, когда отбор из значений спектра, полученного на основе разложения Фурье, позволяет представить образ трассы, содержащий только какую-либо часть из общего числа гармонических колебаний. Эта технология оказалась эффективным инструментом для анализа частотно-зависимых особенностей в сейсмическом отклике среды, которые могут быть проинтерпретированы в терминах коллекторских свойств целевых горизонтов и прогноза месторождений углеводородов.

К настоящему времени нами опубликовано более десятка работ по практическому использованию Прони-фильтрации, но метод все еще сложен для восприятия специалистами, которые, в частности, не понимают его основы. Поэтому в рамках предлагаемой статьи объясняется переход от преобразования Прони к соответствующей фильтрации.

Спектр Прони и отбор части его значений

В работе Г. М. Митрофанова и В. И. Прийменко [7] дана общая схема разложения Прони и указано, что к настоящему времени разработаны разнообразные алгоритмы, позволяющие выполнить соответствующее разложение. Поэтому программная реализация самого разложения не представляет трудностей. Основной же вопрос, на который мы попытаемся дать ответ в этом разделе статьи, будет звучать так: «Что дает фильтрация Прони, основанная на отборе (селекции) части параметров спектра Прони?»

Итак, из дискретно представленной сейсмической трассы со значениями $y(t_i)$ берем некоторый интервал длительности *T*, содержащий четное число временных отсчетов *N*, т. е. t_i изменяются от t_1 до t_N. Затем, по набору значений $\{y(t_i);\ i = 1,\ldots,N\}$ выполняется разложение Прони. Тогда для $y(t_i)$, относящихся к выделенному интервалу, имеем следующую формулу:

$$y(t_i) \cong \sum_{k=1}^{L} A_k e^{\alpha_k (i-1)\Delta t} \cos\left(2\pi f_k \left(i-1\right)\Delta t + \theta_k\right), \quad (1)$$

где Δt – шаг дискретизации по времени; *L* – число компонент разложения; *A*, α, *f*, θ – параметры разложения (амплитуда, затухание, частота, фаза соответственно); *k* – номер компоненты разложения.

В результате выполненного преобразования Прони переходим от временного представления участка трассы к его параметрическому описанию, задаваемому набором затухающих синусоид (или косинусоид). Формально эта процедура не отличается от перехода, который выполняется при расчете

обычных спектров с помощью разложения Фурье, когда вычисляются коэффициенты синусоид (или косинусоид), участвующих в разложении. Таким образом, по аналогии с классическим спектральным анализом можно ввести понятие спектра Прони, состоящего из значений параметров разложения. Тогда сам переход из временного представления в спектральное представление Прони представим как

$$y(t) \xrightarrow{P} \Re_{\tau,T}(M) = \left\{A_k, \alpha_k, f_k, \theta_k\right\}_{k=1}^{k=M}, \qquad (2)$$

где $\Re_{\tau,T}(M)$ – спектр, получаемый на основе разложения Прони по одному из существующих алгоритмов (M определяется числом комплексных экспонент, используемых в разложении Прони [6]); T и τ – длительность скользящего временного интервала разложения Прони и его сдвиг по сейсмической трассе соответственно.

В результате, как и при стандартном спектральном анализе, использующем преобразование Фурье, для различных сигналов будем получать различные спектры Прони [7].

При использовании аналогии со стандартным спектральным анализом необходимо помнить о существенных различиях, которые имеются между разложениями Фурье и Прони. Укажем на два из них. Первое состоит в том, что в разложении Прони параметр частоты не фиксирован, а определяется совместно с другими тремя параметрами. Второе относится к числу затухающих гармоник, определяемых величиной L в выражении (1). Она может быть вычислена на основе числа количества комплексных экспонент $M = 2L$, но только в том случае, когда эти экспоненты представляют собой комплексно сопряженные пары [6]. На практике это не всегда выполняется, что приводит к уменьшению значения L. Более того, исходя из практических соображений, формулу (1), как и задачу разложения Прони, лучше рассматривать не с интерполяционной, а с аппроксимационной позиции. В этом случае могут быть уменьшены величины M и L, определяющие число компонент, которые входят в сумму выражения (1). Тогда правая часть этого выражения обеспечивает лишь приближение анализируемых значений $y(t_i)$. Соответствующее приближение обеспечивает задаваемую точность при выполнении разложения Прони.

Несмотря на отмеченные особенности, на практике для произвольного интервала сейсмической трассы может быть обеспечен обобщенный спектр Прони, включающий большое количество параметров, отвечающих локальным спектрам Прони [7]. Так, при обработке реальных сейсмических трасс с временным интервалом до 1000 мс обычно используется от 500 до 800 локальных участков, в каждом из которых определяются значения локальных спектров Прони. При этом для каждого участка может быть использован порядок разложения M от 10 до 40, который, соответственно, будет давать такое же число точек в четырехмерном пространстве. В результате обобщенный спектр Прони, содержащий значения всех локальных спектров, может иметь от нескольких тысяч до десятков тысяч точек в четырехмерном пространстве с осями (амплитуда, частота, затухание, фаза). Это обеспечивает достаточно плотное заполнение требуемой области параметрами Прони по всем четырем осям. Большое количество полученных значений параметров Прони позволяет делать выборки, которые отвечают определенным интервалам изменения заданного параметра или группы параметров, например частоты и затухания, для построения образа трассы по соответствующему набору локальных затухающих синусоид (компонент). Такой образ и является результатом Прони-фильтрации.

Для лучшего понимания процесса селекции затухающих компонент проведем несколько экспериментов с модельными импульсами Берлаге. Они будут состоять из следующих шагов:

1. Построим модельные импульсы Берлаге с добавлением аддитивной помехи, чтобы получить модельные данные для разложения Прони.

2. Выполним аппроксимацию модельных данных рядом затухающих гармоник на основе выражения (1) с требованием высокой точности приближения.

3. Из полученного ряда затухающих гармоник по частоте и затуханию выделим компоненты, обеспечивающие приближение модельного сигнала Берлаге.

Последний шаг завершает процедуру фильтрации Прони.

Используемый импульс Берлаге имеет вид

$$s(t) = A\left|t\right|e^{-\alpha t}\cos(\omega t + \phi),$$

(A – амплитуда, α – затухание, ω – круговая частота, ϕ – фаза), который отличается от общепринятого отсутствием степени у временнóго множителя и наличием фазы.

Отметим, что импульс Берлаге представляет собой промежуточный вариант между затухающей синусоидой и импульсом Рикера, которые использовались в статье [7], а его вид, по нашему мнению, ближе к реальным сейсмическим импульсам. Импульсы Берлаге рассчитывались на базе тестового модуля, имеющегося в разработанной программе Прони-фильтрации. При этом в качестве аддитивной помехи был взят белый шум с уровнем 0,01 от максимальной амплитуды моделируемого импульса.

На рис. 1 показана форма двух импульсов Берлаге и значения соответствующих спектров Прони по трем параметрам: амплитуда (A), затухание (α) и частота (f). Значения спектров приведены в правой части рисунков и потребуются в дальнейшем при разделении компонент Прони-разложения. Для импульса на рис. 1, а принята частота 30 Гц, а на рис. 1, б – 50 Гц. Значения других параметров импульсов совпадали: A = 1, α = 100, ϕ = 0 (фаза). Время вступления импульсов 20 мс.

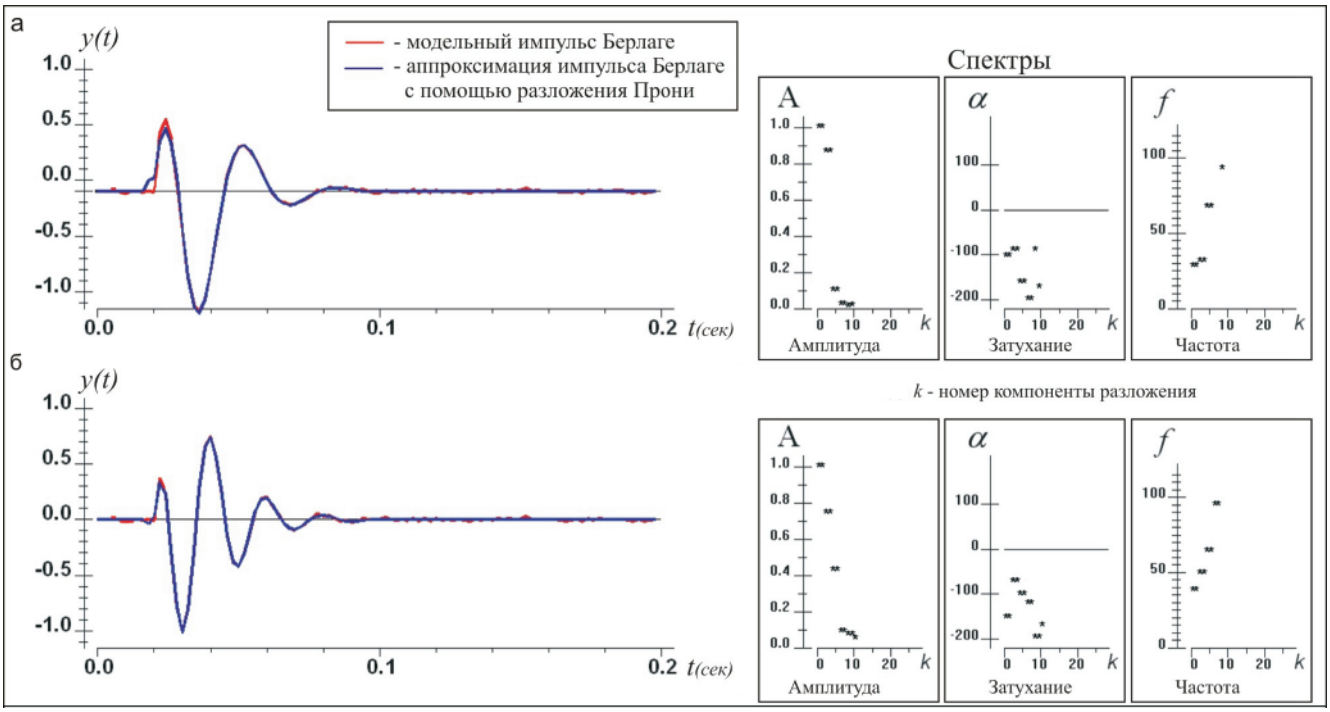

Рис. 1. Модельные импульсы Берлаге с частотой 30 Гц (а) и 50 Гц (б) и их аппроксимация с помощью разложения Прони (слева). Значения спектров Прони (справа) получены при T = 100 мс и τ = 8 м

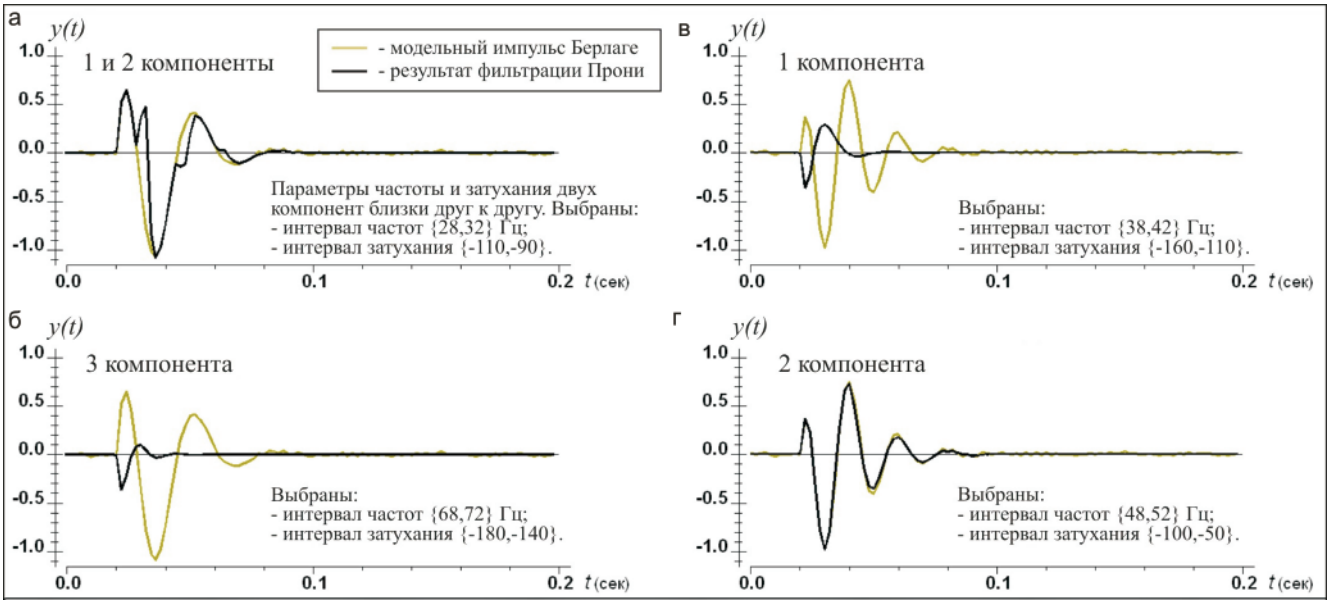

Рис. 2. Результаты отбора части значений спектров Прони по частоте и затуханию для получения фильтрованных образов аппроксимированных импульсов Берлаге с частотой 30 Гц (а, б) и 50 Гц (в, г)

При вычислении значений спектров Прони взяты параметры T = 100 мс и τ = 8 мс, требуемые для преобразования (2). По левой части рис. 1 видно, что построенные аппроксимации обеспечивают почти полное приближение к моделируемым импульсам Берлаге.

В качестве параметров, по которым будет выполняться селекция, возьмем частоту и затухание. Их выбор определяется значимостью для изучения отклика реальной среды на сейсмическое воздействие. Наш опыт показывает, что амплитуда – недостаточно устойчивый критерий для осуществления селекции. Также отметим, что компоненты разложения, приведенные на рис. 1–4, являются нормированными. Это связано с особенностью разработанного алгоритма.

На рис. 2 показаны результаты фильтрации Прони, которые представляют собой отбор части значений спектров, приведенных на рис. 1, и соответствующих им компонент разложения. Такой отбор совпадает с отбором части затухающих гармоник из формулы (1). Для рис. 2 и всех последующих компоненты разложения упорядочены по значениям параметров спектра Прони следующим образом: первая пара значений параметров спектра отвечает первой компоненте, вторая – второй и т. д.

Попытка выделения какой-либо одной компоненты для случая, когда присутствуют две компоненты с близкими значениями частот и затуханий, продемонстрирована на рис. 2, а. В этом случае выделение только одной компоненты невозможно даже при максимально допустимых в расчетном модуле узких интервалах частот {28, 32} Гц и затуханий {–110, –90}. Следующая гармоника (см. рис. 2, б) хорошо отделяется от других, если выбрать интервалы частот от 68 до 72 Гц, затухания от –180 до –140 (см. спектр на рис. 1, а). На рис. 2, г демонстрируется, что в случае импульса Берлаге с частотой 50 Гц фильтрация Прони, выполняемая по интервалам частоты {48, 52} Гц и затухания {–100, –50} (см. спектр на рис. 1, б), позволяет успешно выделить вторую компоненту, которая наиболее точно представляет модельный импульс Берлаге. При этом первая гармоника, обладающая меньшей частотой и бóльшим затуханием (см. рис. 2, в), была удалена фильтрацией, как и другие затухающие гармоники.

В связи с результатом, приведенным на рис. 2, а, важным представляется рассмотрение рис. 3, на котором демонстрируется влияние длительности интервала разложения, т. е. значения параметра *T*, на результат фильтрации Прони. Здесь дан вариант разложения импульса Берлаге с частотой 30 Гц с применением *T* = 188 мс, что отличается от использовавшегося ранее (см. рис. 1, а). Видно, что при этом получаются иные значения спектра Прони (см. рис. 3, б). В результате первая затухающая гармоника (см. рис. 3, в), попадающая в интервал частот {30, 34} Гц и затухания {–160, –140}, не отвечает форме моделируемого импульса, как и вторая (см. рис. 3, г), попадающая в интервал частот {54, 58} Гц и затухания {–100, –60}. Их можно отнести к шуму или к особенностям аппроксимации. При этом третья гармоника (см. рис. 3, д), попадающая в интервал частот {28, 32} Гц и затухания {–110, –90}, точно воспроизводит импульс. Здесь важно отметить близость первой и третьей гармоник по частотам, но различие по затуханиям, что и обеспечило их разделение при фильтрации.

Таким образом, с помощью Прони-фильтрации при корректном подборе параметров можно успешно подавлять волны-помехи и выделять полезный импульс, обладающий определенной частотой и затуханием. Вопросы корректного выбора параметров рассматривались в работе [7].

Результаты выполненного модельного эксперимента демонстрируют еще одну из особенно-

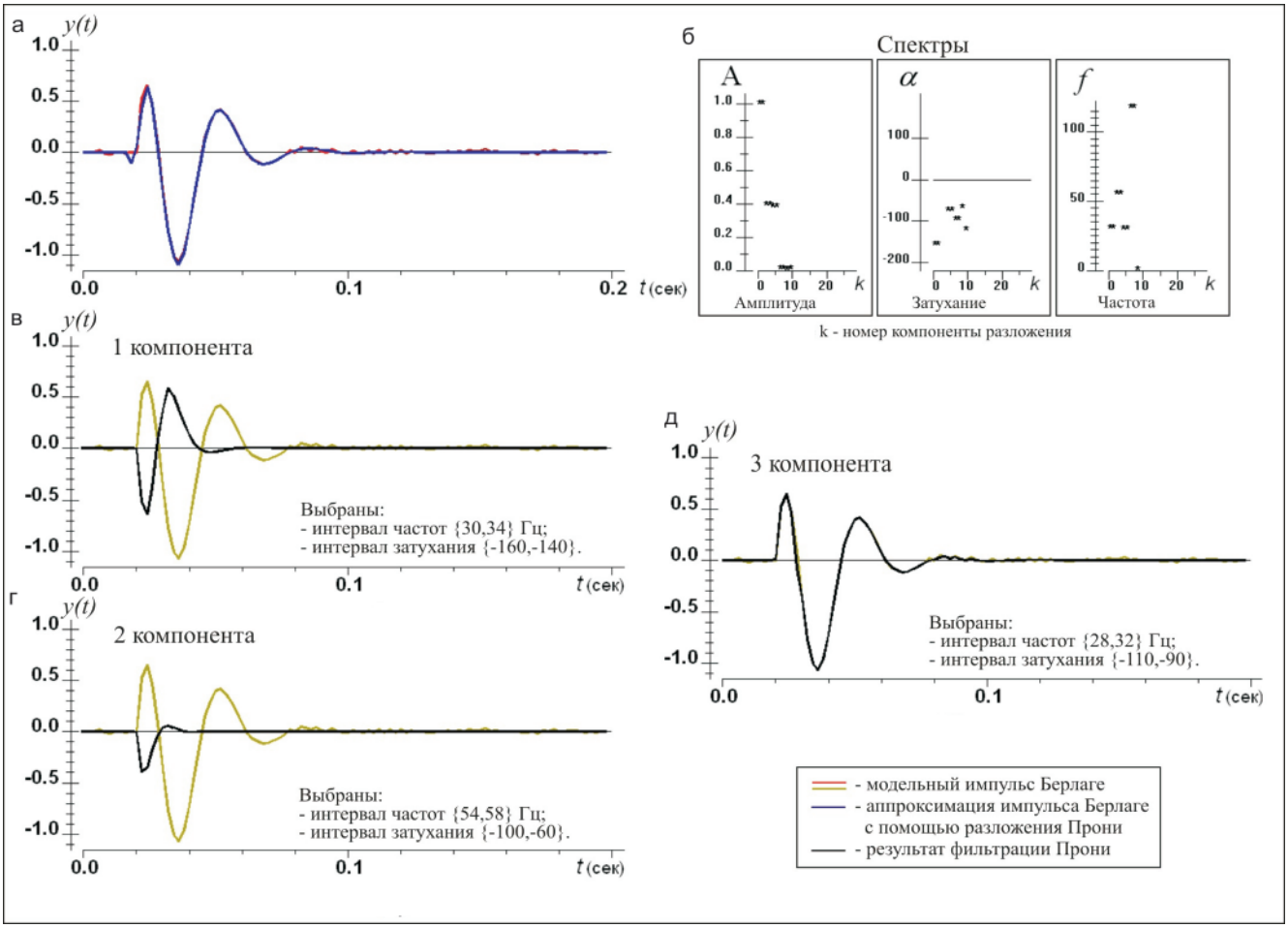

Рис. 3. Модельный импульс Берлаге с частотой 30 Гц и его аппроксимация с помощью разложения Прони (а), со значениями спектров Прони (б), результаты отбора части значений спектров Прони по частоте и затуханию для получения фильтрованных образов аппроксимированных импульсов Берлаге (в, г, д). Значения спектров Прони получены при *T* = 188 мс и τ = 8 мс

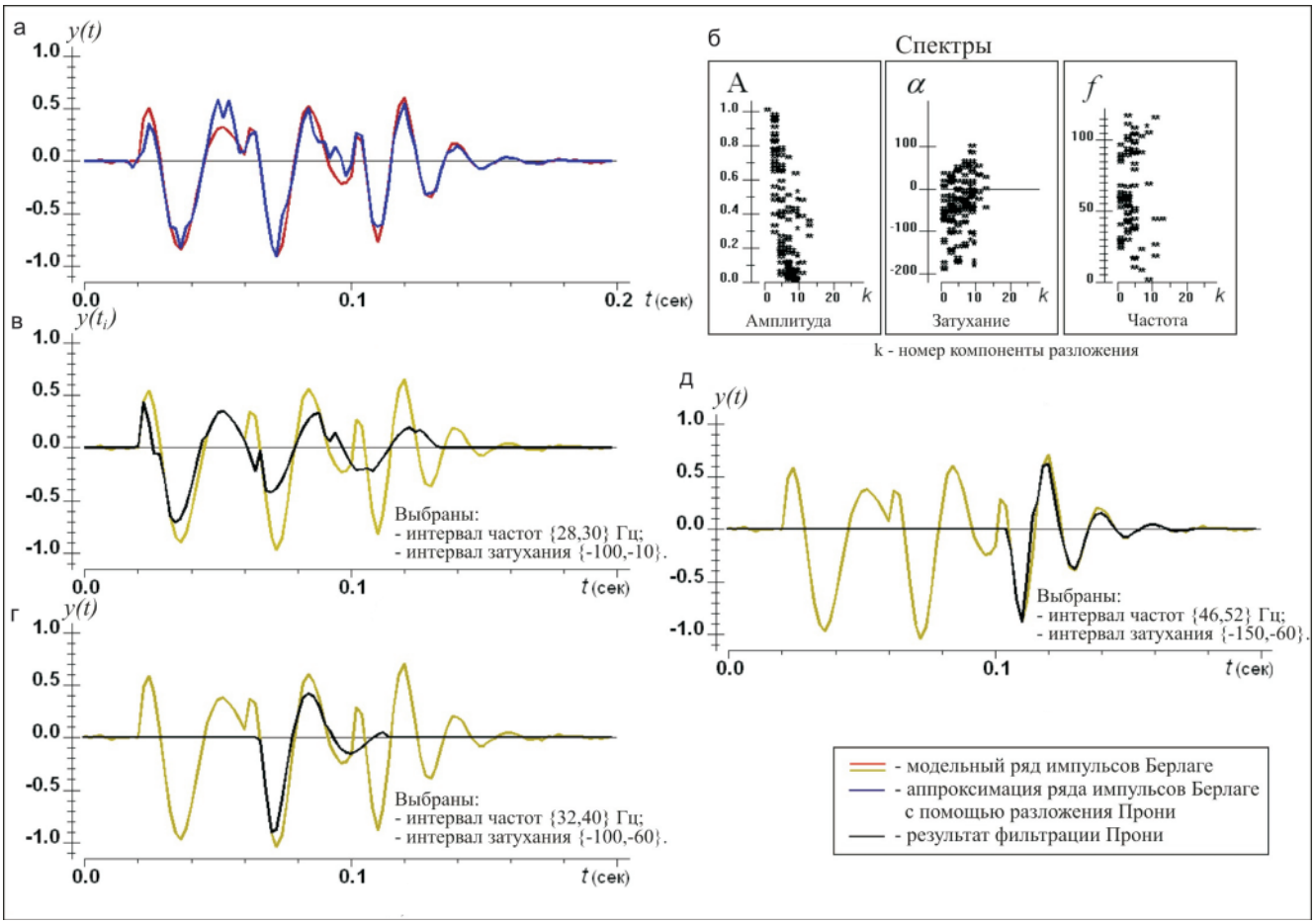

Рис. 4. Модельный ряд импульсов Берлаге с частотами 30, 40, 50 Гц с временами вступления 10, 60, 100 мс соответственно и его аппроксимация с помощью разложения Прони (а), со значениями спектров Прони (б). Результаты отбора части значений спектров Прони по частоте и затуханию для получения фильтрованных образов аппроксимированных импульсов Берлаге (в, г, д)

стей метода Прони-фильтрации, которую пришлось детально изучать при его развитии. На начальном этапе исследований она воспринималась настолько серьезно, что предлагалось кроме перемещаемых интервалов использовать еще и изменяемую длительность интервалов. Но такое двухэтапное оценивание параметров разложения с последующим их анализом и отбором существенно удлиняло работу процедуры. Также сложно было определить критерии качества получаемых значений спектров. Поэтому с учетом направленности фильтрации Прони на анализ частотно-зависимых эффектов было принято решение внутри процедуры использовать только перемещаемые интервалы. Длительность же интервалов выбиралась, исходя из эвристического соотношения $T = 3f^{-1}_{фил}$, где $f_{фил}$ – частота фильтрации Прони. В дальнейшем при оптимальном подборе параметров эта длительность уточнялась [7].

Следующий модельный эксперимент содержал три импульса Берлаге с различными частотами (30, 40, 50 Гц) и временами вступления (20, 60 и 100 мс соответственно). Их вид, а также значения комбинированного спектра Прони, полученного объединением спектров отдельных интервалов, показаны на рис. 4, а. Соответствующие спектры рассчитывались с применением T = 60 мс. Они использовались при выделении импульса с частотой 50 Гц (см. рис. 4, в). При этом были взяты интервалы частот {46, 52} Гц и затухания {–150, –60}. Для выделения импульсов с частотой 30 Гц (см. рис. 4, в) и 40 Гц (см. рис. 4, г) выбирались интервалы другой длительности: 136 и 70 мс соответственно. При их выделении применялись интервалы селекции по частотам {28, 30} и {32, 40} Гц, по затуханию {–100, –10} и {–100, –60} соответственно. Видно, что импульс с частотой 30 Гц выделяется с искажениями, подобными результату, приведенному на рис. 2, а. Причина этого в невозможности разделить компоненты по частоте и затуханию при принятой длительности интервала разложения (параметр T). Как показывают эксперименты, описанные ранее в данной статье (см. рис. 2, а, 3, д), для успешного выделения импульса с частотой 30 Гц, по-видимому, требуется еще большее значение параметра T. Импульс же с частотой 40 Гц выделяется вполне успешно.

Таким образом, эксперимент демонстрирует, что фильтрация Прони на частотах 40 Гц и выше позволяет уверенно выделять из зашумленной трассы компоненты, приближающие истинный сигнал. Для более низкой частоты она обеспечивает выделение компонент с некоторыми искажениями, устранение которых возможно, но требует значительных вре-

менных затрат по подбору длительности интервала разложения.

Применение фильтрации Прони для анализа частотно-зависимых эффектов в отклике среды при физическом моделировании

Сложность реальных сред и их высокая пространственная неоднородность по геологическим, физическим, петрофизическим и многим другим характеристикам определяют сложность и неоднородность получаемой геофизической информации, в частности сейсмической. Следствием этого является изменение отклика среды на сигналы с различной частотой. Кроме того, процессы распространения различных воздействий могут происходить как по линейным, так и по нелинейным законам, что еще значительнее влияет на частотный отклик среды. Таким образом, частотно-зависимые вариации в отклике реальной среды обусловлены самыми различными причинами, связанными и с изменением структурных характеристик среды (слоистостью, разрывными нарушениями и пр.), и с неупругими эффектами, вызывающими поглощение сейсмической энергии.

Изучению частотно-зависимых эффектов большое внимание уделяется уже давно. Первые исследования в этом направлении выполнялись с 1930-х гг. в США и в СССР. Н. Рикер одним из первых обратил внимание на то, что скорость зависит от частоты [13]. Но эти наблюдения и выводы не были одобрены теоретиками, которые не имели еще достаточной базы для их объяснения. Поэтому соответствующие результаты были полностью опубликованы через 30 лет, когда эта база сформировалась. Огромный объем данных, полученных в ходе сейсмических исследований в СССР позволил дать количественное описание основных динамических характеристик сейсмических волн, распространяющихся в реальных средах, только в начале 1960-х гг. [2]. В связи со сложностью объяснения частотно-зависимых эффектов необходимо отметить, что определение динамических характеристик реальных сигналов и их зависимости от частоты требует проведения сложных экспериментальных работ и высокого качества наблюдений. При этом интерпретация получаемых зависимостей и вариаций для динамических характеристик может обладать большей неоднозначностью, чем интерпретация вариаций времен прихода анализируемых сигналов. Это связано с несколькими принципиальными причинами. Укажем только три из них, которые могут играть наиболее существенную роль.

1. В реальном эксперименте достаточно сложно обеспечить высокий контроль условий возбуждения и приема сигналов, существенно влияющих на динамические характеристики сигналов.

2. Удаленность и расположение изучаемого объекта в неоднородной среде, где присутствуют другие объекты, которые могут вносить изменения в динамические характеристики анализируемых сигналов.

3. На разных частотах могут включаться различные механизмы, определяющие изменение динамических характеристик сигналов, но не поддающиеся нашему контролю в силу отсутствия возможности их точного определения.

Физические эксперименты, проводимые с образцами пород или материалов, существенно упрощают различного рода контроль, но, естественно, не отображают всего разнообразия возможных ситуаций в реальной среде. Здесь интересен опыт первых физических экспериментов с образцами пород. Они приводили к противоречивым результатам по зависимости параметра затухания регистрируемого сигнала от частоты [8]. Так, измерения затухания на сухих образцах однородных горных пород (обычно гранитов) не давали изменение этого параметра для широкого диапазона частот. Только использование флюидосодержащих и неоднородных образцов привело к изменению параметра затухания с частотой. Это привело к осознанию значимости влияния микроскопических включений флюидов и трещин на процессы распространения упругих колебаний в реальных средах. Обзор истории определения параметра затухания при физических измерениях на образцах дан в работе [15]. Таким образом, физические эксперименты и наблюдаемые в них эффекты послужили основой для развития теории распространения упругих колебаний в реальных средах, а также позволили оценить влияние частоты на различные параметры, используемые при описании модели среды и процессов распространения в ней упругих колебаний.

Мы также будем опираться на результаты экспериментов физического моделирования. Их целью являлась оценка возможностей метода Прони-фильтрации при выделении в волновом сейсмическом поле динамических аномалий, соответствующих локальным зонам среды с эффектами рассеивания и поглощения энергии. В реальных средах подобные зоны могли быть образованы различного типа коллекторами (открытые трещины, поры, каверны), заполненными флюидами. Эксперименты проводились с двумя типами физических моделей. Первый тип имитировал рассеивающие объекты в виде локальных зон трещин с различной плотностью, второй – поглощающий объект в тонкослоистой среде. Основой для обеих физических моделей служил лист оргстекла. Высокоскоростные слои имитировались наклеиванием на него алюминиевой фольги соответствующей ширины. Нижняя отражающая граница представляла собой свободный край листа. Промежуточный отражающий горизонт в виде тонкого слоя располагался на расстоянии 2/3 от точек наблюдения до свободного края модели. Соответствующие горизонты условно обозначены F и A, между ними расположены целевые объекты.

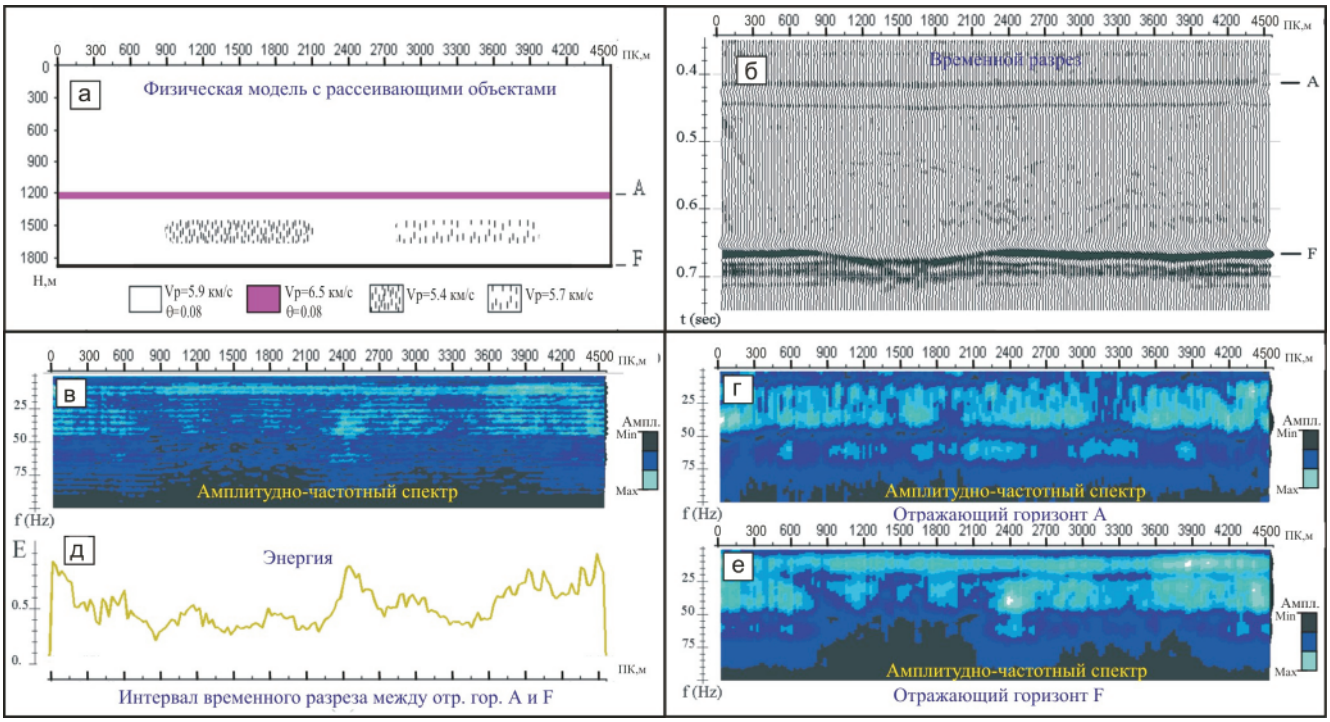

Рис. 5. Физическая модель с рассеивающими объектами (V_p – интервальная скорость, θ – декремент затухания) (а), зарегистрированное волновое поле (временной разрез) (б), амплитудно-частотные спектры Фурье разных временных интервалов временного разреза (в, г, е) и значения энергии между отражающими горизонтами A и F (д)

Промежуточный отражающий горизонт A был введен в модель специально как эталон при анализе эффектов, связанных с целевыми объектами. Параметры физической модели определялись по специально изготовленным эталонным образцам. Работы велись в Институте геофизики СО РАН. Ими, а также получением модельных сейсмических наблюдений занимались Ю. А. Орлов и Б. А. Бобров.

Источники и регистрирующая система располагались на верхнем свободном крае каждой модели. При этом регистрация производилась с группированием приемников (по шесть в группе) и небольшим удалением источника от центра группы, что соответствовало 50 м в сейсморазведке при учете коэффициента масштабирования. Таким образом, полученные в процессе моделирования волновые поля отраженных продольных волн приблизительно отвечают временны́м разрезам, построенным по ближним удалениям без накопления кратности. С учетом масштабирования расстояние между трассами временного разреза соответствует 25 м, а время вступления отраженной волны от горизонта A равно примерно 0,4 с, от горизонта F – 0,66 с.

Модель, имитирующая эффекты рассеивания (рис. 5, а), содержала два объекта с разной степенью трещиноватости, имевших вытянутую форму с овальными краями. Жесткой границы при переходе к зоне трещиноватости не было. Трещины формировались рассечками в заданной области. В левом объекте плотность трещин (рассечек) существенно выше, чем в правом. Ориентация трещин преимущественно субвертикальная (менее 10 % трещин имели угол наклона меньше 60°). Частично они были заполнены пластилином, что уменьшало уровень дифрагированных волн. Декремент затухания (θ) для областей, имитирующих трещиноватость, не определялся.

Исходный временной разрез, представляющий полную зарегистрированную волновую картину, приведен на рис. 5, б. Обработка временно́го разреза, в том числе процедура миграции, не проводилась. Частотно-зависимый анализ временного разреза осуществлялся по технологии Прони-фильтрации [7]. Спектральный анализ временного интервала между отражающими горизонтами A и F на основе разложения Фурье (см. рис. 5, в) позволил выделить наиболее устойчивые частоты, для каждой из которых с помощью тестового модуля определен оптимальный частотный диапазон и подобраны временные интервалы разложения Прони (*T*) и значения затухания (α) [7], указанные в табл. 1. С выбранными параметрами построены временны́е разрезы Прони, которые приведены на рис. 6. Здесь же показаны и результаты стандартной полосовой фильтрации с выбором полосы частот, соответствующей Прони-фильтрации.

Таблица 1

Параметры Прони-фильтрации
для временны́х разрезов с рассеивающими объектами

Частота, Гц	Частотный диапазон, Гц	*T*, с	α
40	36–44	0,07	90
55	49–61	0,07	200
60	53–67	0,07	200
75	68–82	0,056	200

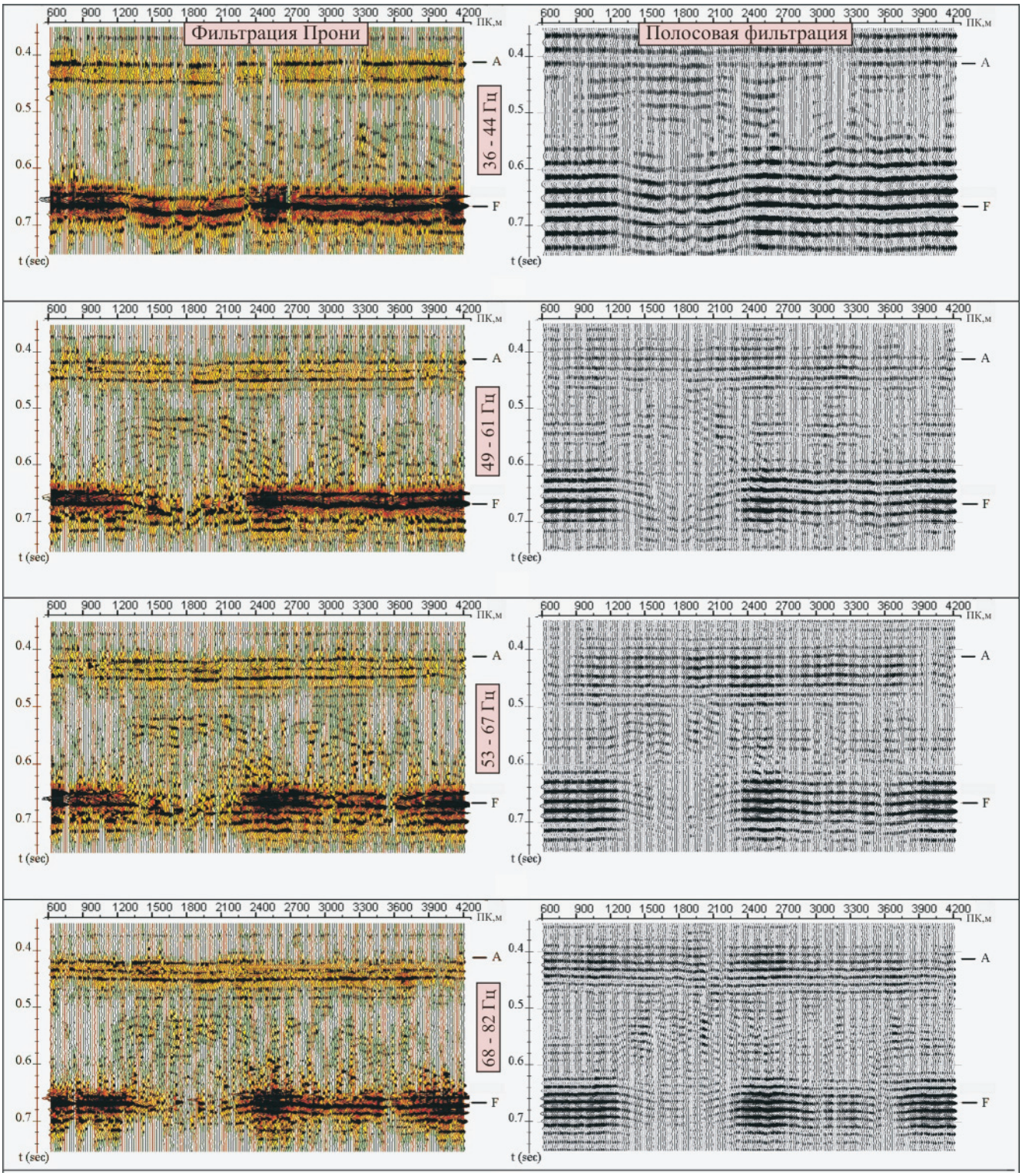

Рис. 6. Временны́е разрезы после Прони (слева) и полосовой (справа) фильтраций в указанных диапазонах частот, полученные по физической модели с рассеивающими объектами

На исходном временном разрезе (см. рис. 5, б) фрагментарно и слабо просматривается кровля левого объекта. Кроме того, на левый объект хорошо реагирует отраженная волна от границы F. Правый объект практически никак не проявляется. После проведения процедуры Прони-фильтрации на частотах 36–44 Гц степень прослеживаемости кровли обоих объектов на одном уровне (см. рис. 6). При повышении частоты фокусировка отражений от кровли правого объекта ухудшается и теряется уже в диапазоне частот 49–61 Гц, а от левого – улучшается вплоть до частот 53–67 Гц. В интервале частот 68–82 Гц степень прослеживания отражений от кровли левого объекта начинает ухудшаться, позволяя предполагать «расфокусировку» отражений. Видно также, что зона развития трещиноватости на временных разрезах проявляется в виде области с повышенным уровнем дифрагированных волн. Таким образом, технология Прони-фильтрации дает возможность выделить локальную зону повышен-

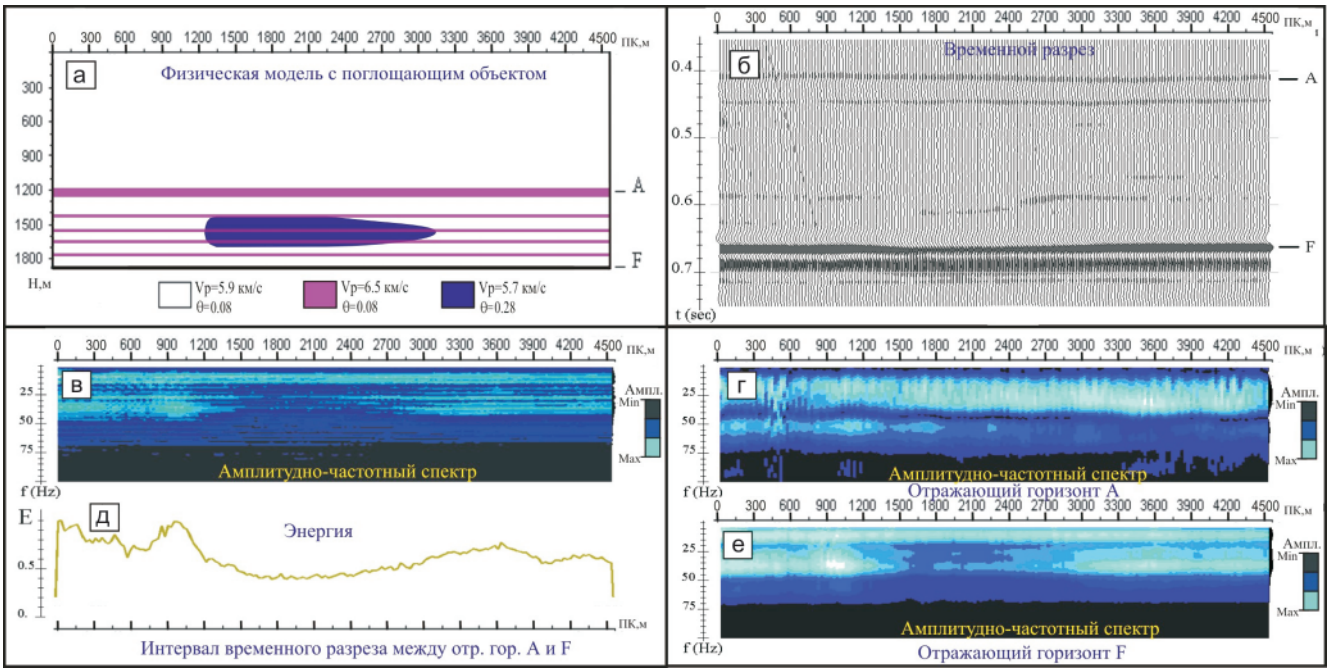

Рис. 7. Физическая модель с поглощающим объектом в тонкослоистой среде (V_p – интервальная скорость, θ – декремент затухания) (а), зарегистрированное волновое поле (временной разрез) (б), амплитудно-частотные спектры Фурье разных временных интервалов временного разреза (в, г, е) и значения энергии между отражающими горизонтами A и F (д)

ной трещиноватости, позволяя судить и о плотности трещин по анализу изменения степени выделения отраженных и дифрагированых волн в зависимости от частоты.

Отражающий горизонт F на всех частотах реагирует на левый объект с повышенной плотностью трещин не только по увеличению времени прихода отраженной волны, но и по интенсивности отражения начиная с частотного интервала 49–61 Гц (см. рис. 6). Это происходит, по-видимому, из-за достаточно резкого снижения интервальной скорости. Реакция на правый объект визуально появляется только в частотном диапазоне 68–82 Гц в виде незначительного увеличения времени прихода отраженной волны и незначительного уменьшения ее интенсивности. Использовать подобный эффект в качестве поискового для зон трещиноватости в практике производственных работ достаточно сложно.

Интересным представляется сравнение результатов двух фильтраций в одной и той же полосе частот: Прони и полосовой (правая часть рис. 6). Видно, что последняя не дает практически никакой информации по целевым объектам, лишь позволяет только достаточно точно определить зону реагирования отражающего горизонта F на левый объект. Но эта зона хорошо выделяется и на исходном временном разрезе.

Вторая модель (рис. 7, а) предназначалась для имитации эффекта поглощения в тонкослоистой среде и изготавливалась из листа органического стекла, на которую наклеивались с одной стороны полиэтиленовая пленка для увеличения поглощения, а с другой – полоски алюминиевой фольги для имитации пластов с увеличенной интервальной скоростью. Поглощающее тело имело несимметричную форму по горизонтальной оси.

Исходный временной разрез с наблюдаемой волновой картиной приведен на рис. 7, б. Промежуточная слоистость на нем видна слабо и фрагментарно. Также слабо проявляется и подошва правой стороны поглощающего объекта. Как и для временного разреза, полученного по первой физической модели с рассеивающими объектами, проведена обработка по технологии Прони-фильтрации [7]. По амплитудно-частотным спектрам Фурье выбраны четыре наиболее устойчивые частоты для временного интервала между отражающими горизонтами A и F. Для каждой из частот с помощью тестового модуля определен оптимальный частотный диапазон и подобраны временные интервалы разложения Прони (*T*) и значения затухания (α) [7], указанные в табл. 2:

С выбранными параметрами построены временные разрезы Прони, которые приведены на рис. 8.

По результатам Прони-фильтрации удается выявить следующие особенности в зарегистрированном волновом поле.

Таблица 2

Параметры Прони-фильтрации для временны́х разрезов с поглощающим объектом в тонкослоистой среде

Частота, Гц	Частотный диапазон, Гц	*T*, м	α
25	21–29	0,09	90
30	26–34	0,09	90
32	27–37	0,07	150
56	68–82	0,05	150

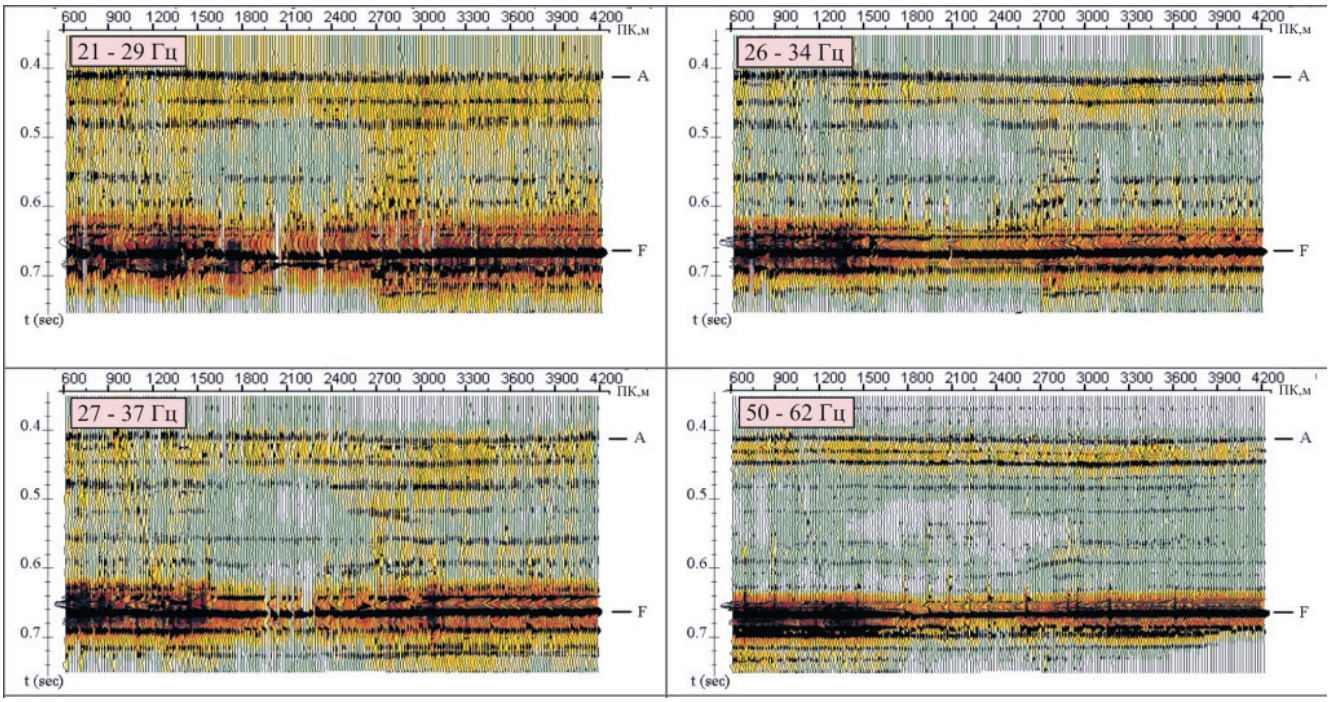

Рис. 8. Временные разрезы после Прони-фильтрации в указанных диапазонах частот, полученные по физической модели с поглощающим объектом в тонкослоистой среде

Поглощающий объект начал проявляться в интервале частот 21–29 Гц в виде слабой динамической аномалии. Оптимальным для исследования целевого интервала разреза можно считать диапазон 27–37 Гц, где отчетливо проявляются слоистая структура разреза и динамическая аномалия, регистрируемая в районе расположения поглощающего объекта. На фоне отраженных волн от промежуточных субгоризонтальных слоев целевого интервала физической модели прослеживаются отражения от кровли и подошвы правой стороны поглощающего объекта, но слабо. В этом и других диапазонах на более низких частотах динамическая аномалия имеет изометричную форму, отличающуюся от формы поглощающего объекта. На более высоких частотах (50–62 Гц) отмечается приближение формы динамической аномалии к форме соответствующего поглощающего объекта.

Таким образом, обработка сейсмических данных, полученных по физическим моделям, показала, что с помощью технологии Прони-фильтрации можно выявлять частотно-зависимые эффекты в отклике исследуемой среды. Эти эффекты соотносятся с объектами, обладающими как рассеивающими, так и поглощающими свойствами.

Выводы

Результаты модельных экспериментов показывают, что разложение Прони и построенная на его основе фильтрация позволяют выделять в волновом поле затухающие гармоники, отвечающие заданным интервалам частот и затуханий. Но переход от разложения Прони к соответствующей фильтрации обладает рядом особенностей, которые необходимо учитывать при решении практических задач: 1) подбор оптимальных параметров фильтрации, 2) изменение формы регистрируемого сигнала. На важность первой указывалось в работе [7]. В рамках выполненных исследований дополнительно была продемонстрирована важность выбора длительности интервала разложения, которая может существенно повлиять на выделение низкочастотных затухающих гармоник. При этом удалось понять появление дополнительных искажений на таких компонентах за счет отбора «сцепленных» гармоник, обладающих близкими значениями частот и затуханий. Вторая особенность определяется возможным отличием формы реального сейсмического сигнала от затухающих гармоник. Поэтому при фильтрации происходит переформирование сигнала, приводящее к появлению более резких вступлений на высоких частотах. Подобные изменения формы могут приводить даже к положительным результатам, в частности к повышению разрешенности записи. Следует четко понимать причину таких эффектов.

Несмотря на указанные особенности, фильтрация Прони обладает большими прикладными возможностями. Так, эксперименты показали, что применение разложения Прони позволяет разделить зашумленный сигнал на ряд компонент, которые обеспечивают хорошее приближение заданному модельному импульсу, содержащему затухающие гармоники. Именно их выделение может быть достигнуто с применением фильтрации Прони. В результате удается проводить частотно-зависимый анализ волнового поля с высокой локализацией затухающих гармоник.

Примеры обработки результатов физического моделирования показывают, что на временных разрезах, полученных в процессе фильтрации Прони,

удается выделять эффекты, связанные с рассеивающими и поглощающими целевыми объектами среды. Так, для трещиноватых объектов устойчиво выделяются кровля и область, заполненная трещинами. Увеличение плотности трещин повышает точность выделения эффектов на высоких частотах. Для поглощающих объектов выделяемые эффекты присутствуют практически на всех частотах в виде динамической аномалии с пониженными амплитудами и повышенным затуханием. С повышением частоты форма динамической аномалии у таких объектов приближается к форме поглощающего тела. Наша практика показывает, что при объединении эффектов рассеивания и поглощения, что характерно для реальных объектов, связанных с углеводородами, локализация их в волновом поле становится более достоверной. Таким образом, технология Прони-фильтрации, о которой было заявлено в работе [7], позволяет осуществлять прямой качественный прогноз целевых объектов при поиске и разведке залежей углеводородов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Астафьева Н. М.** Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физических наук. – 1996. – Т. 166, № 11. – С. 1145–1170.
2. **Динамические** характеристики сейсмических волн в реальных средах / И. С. Берзон, А. М. Епинатьева, Г. Н. Парийская, С. П. Стародубровская. – М.: Изд-во. АН СССР, 1962. – 514 с.
3. **Ковалев В. П., Телепнев Г. Ф.** Применение метода выделения скрытых периодичностей при изучении динамики сейсмических волн // Докл. АН УССР. – 1981. – Вып. 5. – С. 10–14.
4. **Колесников Ю. И., Игнатов А. Ю.** Об одном способе подавления регулярных волн-помех на сейсмических записях // Геология и геофизика – 1993. – Т. 34, № 2. – С 137–140.
5. **Колесников Ю. И., Игнатов А. Ю., Кокшаров В. З.** О точности оценок поглощения Р-волн по данным акустического каротажа. Результаты физического моделирования // Геология и геофизика – 1992. – № 9. – С. 134–141.
6. **Марпл-мл. С. Л.** Цифровой спектральный анализ и его приложения. – М.: Мир, 1990. – 584 с.
7. **Митрофанов Г. М., Прийменко В. И.** Основы и приложения метода Прони-фильтрации // Технология сейсморазведки. – 2011. – № 3. – С. 93–108.
8. **Bruckshaw J. M., Mabanta P. C.** The variation of the elastic constants of rocks with frequency // Petroleum. – 1954. – Vol. 17. – P. 14–18.
9. **Complex** convolution decomposition (CCD) and new possibilities at detail investigation of attenuation / V. P. Kovaliev, A. G. Madatov, G. M. Mitrofanov, et al. // Abstracts of papers, EAEG 54th meeting. – Paris, 1992. – P. 746–747.
10. **Complex** seismic decomposition – application to pore pressure prediction / H. B. Helle, O. H. Inderhaug, V. P. Kovaliev, et al. // Extended Abstracts of papers, EAEG 55th meeting. – Stavanger, 1993. – P. 114–115.
11. **Daubechies I.** Ten lectures on wavelets. – Philadelphia: SIAM, 1992. – 357 p.
12. **Fourier J.** Théorie analytique de la chaleur. – Paris, Chez Firmin Didot, 1822. – 639 p.
13. **Ricker N.** The form and nature of seismic waves and the structure of seismograms // Geophisics. – 1940. – Vol. 5, no. 4. – P. 348–367.
14. **Prony de,** Baron (Gaspard Riche) Essai éxperimental et analytique: sur les lois de la dilatabilité de fluides élastique et sur celles de la force expansive de la vapeur de l'alkool, à différentes températures // Journal de l'École Polytechnique. – 1795. – Vol. 1, cahier 22. – P. 24–76.
15. **Winkler K. W.** The effects of pore fluids and frictional sliding on seismic attenuation. PhD thesis. – Sianford, Stanford University, 1979. – 97 p.

REFERENCES

1. Astafyeva N.M. [Wavelet analysis: the fundamentals of the theory and application examples]. *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 1996, vol. 166, no. 11, pp. 1145–1170. (In Russ.).
2. Berzon I.S., Epinatyev A.M., Pariyskaya G.N., Starodubrovskaya S.P. *Dinamicheskiye kharakteristiki seysmicheskikh voln v real'nykh sredakh* [Dynamic characteristics of seismic waves in real media]. Moscow, AS USSR Publ., 1962, 514 p. (In Russ.).
3. Kovalev V. P., Telepnev G.F. [Application of the method of identifying hidden periodicities in the study of the dynamics of seismic waves]. *Doklady AN USSR*, 1981, issue 5, pp. 10–14. (In Russ.).
4. Kolesnikov Yu.I., Ignatov A.Yu. [About one method of suppressing regular interference waves on seismic records]. *Geologiya i geofizika*, 1993, vol. 34, no. 2, pp. 137–140. (In Russ.).
5. Kolesnikov Yu.I, Ignatov A. Yu.,. Koksharov V.Z. [On the accuracy of estimates of the absorption of P-waves according to acoustic logging. Results of physical modeling]. *Geologiya i geofizika*, 1992, no. 9, pp 34–141. (In Russ.).
6. Marple-Jr S.L. *Tsifrovoy spektralnyy analiz i yego prilozheniya* [Digital spectral analysis and its applications]. Moscow, Mir Publ., 1990. 584 p. (In Russ.).
7. Mitrofanov G.M., Priymenko V.I. [Basics and applications of the Proni-filtration method]. *Tekhnologiya seysmorazvedki,* 2011, no. 3, pp. 93–108. (In Russ.).
8. Bruckshaw J.M., Mabanta P.C. The variation of the elastic constants of rocks with frequency. *Petroleum*, 1954, vol. 17, pp. 14–18.
9. Kovaliev V.P., Madatov A.G., Mitrofanov G.M. Complex Convolution Decomposition (CCD) and new possibilities at detail investigation of attenuation. *Abstracts of papers, EAEG 54th meeting*. Paris, 1992, pp. 746–747.
10. Helle H.B., Inderhaug O.H., Kovaliev V.P., et al. Complex seismic decomposition – application to pore

pressure prediction. *Extended Abstracts of papers, EAEG 55th meeting*, Stavanger, 1993, pp 114–115.

11. Daubechies I. Ten lectures on wavelets. *SIAM*, 1992. 357 p.

12. Fourier J. Théorie analytique de la chaleur. Paris, Chez Firmin Didot, 1822. 639 p.

13. Ricker N. The form and nature of seismic waves and the structure of seismograms. *Geophysics*, 1940, vol. 5, no. 4, pp. 348–367.

14. Prony de, Baron (Gaspard Riche). Essai éxperimental et analytique: sur les lois de la dilatabilité de fluides élastique et sur celles de la force expansive de la vapeur de l'alkool, à différentes températures. *Journal de l'École Polytechnique*, 1795, vol. 1, cahier 22, pp. 24–76.

15. Winkler K.W. The effects of pore fluids and frictional sliding on seismic attenuation. PhD thesis. Stanford, Stanford University, 1979. 97 p.

© Г. М. Митрофанов, С. Н. Смолин,
Ю. А. Орлов, В. Н. Беспечный, 2020