



## ГОМОМОРФНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ И СЛЕПАЯ ДЕКОНВОЛЮЦИЯ

Г.М. Митрофанов

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН  
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия; e-mail: georgymitrofanov@rambler.ru*

В области фильтрации продолжительное время развивается направление, позволяющее разделять форму наблюдаемого сигнала на мультипликативные составляющие. При такой фильтрации не используется или минимально используется информация о природе разделяемых составляющих, а также не требуется полного знания о процессах, которые их формируют. В результате удается воспользоваться эвристическими моделями при определении формы сигнала. Кроме того, определяемые посредством фильтрации составляющие служат основой для изучения процессов, приводящих к наблюдаемым изменениям сигнала. Также в зависимости от используемых моделей эти составляющие применяются для корректировки формы сигнала или являются входными данными для решения обратных задач. В последнем случае можно опираться на известные теоретические решения либо на некоторые эвристические конструкции, служащие основой для изучения процессов формирования регистрируемых сигналов. Таким образом, развиваемое направление обладает большими перспективами в области сейсморазведки, особенно с учетом возрастающей сложности задач и требований к повышению точности прогноза характеристик изучаемой среды. Одним из наиболее известных методов, основанных на идеях гомоморфной фильтрации, является поверхностно-согласованная фильтрация, представляющая собой стандартную процедуру всех современных комплексов обработки сейсмических данных.

*Гомоморфные преобразования, кепстральный анализ, деконволюция, мультипликативные составляющие формы сигнала, объектно-ориентированные обратные задачи*

## HOMOMORPHIC FILTERING AND BLIND DECONVOLUTION

G.M. Mitrofanov

*Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS  
630090, Novosibirsk, prosp. Acad. Koptyug, 3, Russia; e-mail: georgymitrofanov@rambler.ru*

So long time in an area of filtering researches a big stream is development. It provides to separate a form of observed signals on multiplied or convolved components. In the filtering does not use or use minimum information about separated components nature as well as don't need full knowledge about processes which its forming. All give a tripled effect. The first, heuristics models can be applied for a signal form presentation. The second, components are determined by such filtration are the bases for a studying of processes which can available these variations of observed signals form. The third, separated components take account on used models are applied to the signals form correction or entrance data for inverse problems solution. In the last case known theoretical solutions or some heuristic design which are basis for studying of processes of recorded signals formation can be used. Thus, developing the direction has great prospects in seismic exploration especially given the increasing complexity of tasks and requirements to improve the accuracy of features prediction of studied medium. One of the most well-known methods, which is based on the homomorphic filtration ideas, is the surface consistent filtering representing the standard procedure of all modern package of seismic data processing.

*Homomorphic transforms, cepstral analysis, deconvolution, multiplied and convolved signals components, objects inverse problems*

## ВВЕДЕНИЕ

В статье кратко изложена история появления и развития рассматриваемых методов, которые используются в различных областях прикладной науки и техники. Также предпринята попытка с единых позиций проанализировать их главные особенности и свойства. Затем эти методы переносятся на сейсмические исследования. Показано, как развитие различных методов обработки сейсмических данных определялось необходимостью учета определенных мультипликативных составляющих, связанных с особенностями проводимого эксперимента или с моделью изучаемой

среды. Одновременно демонстрируется обобщающий характер мультипликативных моделей, объединяющих вопросы кинематической и динамической обработки сейсмических данных. Подчеркивается значимая роль советских и российских геофизиков в формировании и развитии соответствующих методов декомпозиции регистрируемого волнового поля и формы сигнала.

Наибольшее внимание уделяется вопросам построения многомерных гомоморфных преобразований сейсмических сигналов, которые не столь широко распространены в других областях исследований. Их ос-

нову составляют традиционный переход к логарифмам спектров интервалов трасс и использование мультипликативных факторных моделей, объединяющих совокупности трасс. Такие преобразования позволяют строить методы и технологии нелинейной обработки сейсмических данных, которые дают возможность определять (разделять) характеристики условий возбуждения, приема, прохождения через покрывающую среду и взаимодействия с целевым объектом для различных типов волн. В результате обеспечивается корректировка динамических особенностей реальных наблюдений и улучшается подготовка данных для решения объектно-ориентированных обратных задач сейсмологии, частными случаями которых являются многие методы инверсии, например AVO-инверсия.

Обычно при сейсмических исследованиях модели, служащие основой для построения гомоморфных фильтров, опираются на свертку исходного импульса с импульсной характеристикой среды. Представление наблюдаемого сигнала в виде свертки исходного импульса и некоторой импульсной характеристики среды является достаточным традиционным для сейсмических исследований. Оно использовалось при разработке метода предсказывающей деконволюции (*method of predictive deconvolution*) в США группой геофизического анализа (Geophysical Analysis Group) в 1952–1957 гг. Ярким представителем этого подхода был Е.А. Робинсон [Wadsworth et al., 1953; Robinson, 1954; Сильвиа, Робинсон, 1983]. Затем подход широко применялся при создании различных способов фильтрации и восстановления формы исходного сейсмического сигнала, а также при построении спектральных характеристик локальных объектов среды. Сейчас число теоретических и прикладных работ в области геофизики, основанных на указанном представлении, исчисляется тысячами, а их обзоры имеются в книгах [Гольдин, 1974; Robinson, Treitel, 1980; Yilmaz, 2001]. Обоснованием модели свертки могут служить простые физические рассуждения, используемые при рассмотрении процессов прохождения плоских волн через среду с горизонтальными границами [Гольдин, 1974, с. 21].

Идеи свертки исходного импульса со средой прохождения в рамках понятия сейсмического канала были развиты И.И. Гурвичем в его эвристической модели [Гурвич, 1970], где сложные процессы, определяющие формирование наблюдаемых сейсмических сигналов, аппроксимировались последовательностью линейных фильтров. В отличие от предшествующих работ, в модели Гурвича был один новый и очень принципиальный момент. Он состоял в увязывании выделяемых фильтров с областями среды и сейсмического эксперимента, наиболее значимо влияющими на характеристики регистрируемого сигнала. Каждый из фильтров представлял собой некоторый интегральный эффект процессов, происходящих в значительных областях среды. К ним относились: области возбуждения и приема сейсмических сигналов, области среды, через которые проходит сигнал до отражающего объекта и обратно, а также область формирования отраженного сигнала. В результате форма отраженного сигнала от фиксированной сейсмической границы представлялась мультипликативной сверточной моделью [Там же]. Такая модель позволила даже в рамках небольших совокупностей наблюдений выполнить анализ свойств областей очага, приема и отражения по данным метода отраженных волн [Гурвич, Чыонг, 1971].

Несмотря на феноменологичность указанных мультипликативных моделей, они нашли понимание у геофизиков и оказались удобными для описания основных изменений динамики сейсмических волн, наблюдаемых в полевых условиях. Предложенная модель хорошо “вписалась” в многократные системы наблюдения, которые к тому времени стали широко использоваться в реальных сейсмических экспериментах. Кроме того, она обобщала с точки зрения динамической обработки и интерпретации сейсмических данных существующую модель статических временных поправок, которая использовалась при кинематической интерпретации (см.: [Михальцев, Гогоненков, 1973; Tanner et al., 1974; Глоговский, Хачатрян, 1984; Stein et al., 2009; Сысоев, 2011]).

Важность учета и коррекции поверхностных неоднородностей хорошо известна всем геофизикам-практикам. Различные варианты соответствующих процедур являются важными элементами всех обрабатываемых комплексов [Yilmaz, 2001]. Эта проблема особенно существенна для наземных сейсмических исследований, проводимых в областях со сложными геолого-морфологическими особенностями верхней части среды (ВЧС). Она имеет кардинальный характер для районов Западной и Восточной Сибири. Но даже для относительно простых в этом смысле морских работ вариации формы сигнала, связанные с изменчивостью условий возбуждения и приема, бывают значимыми. Как показывает опыт, уже в амплитуде сигналов они могут составлять десятки процентов. Такая вариабельность данных не только ухудшает качество их обработки относительно простыми линейными процедурами, но и существенно ограничивает использование сложных алгоритмов динамического анализа, в частности, решения обратных задач.

Возможным решением проблемы является постановка специальных работ для детального изучения верхней части разреза (ВЧР) и тщательный контроль всех условий возбуждения и приема сейсмических колебаний. Но это требует огромных затрат, а выполнение такого рода работ сложно реализуется на практике. Кроме того, даже такие работы не могут обеспечить полного учета всех возможных вариаций формы сигналов, связанных с изменением свойств областей возбуждения и приема.

Ниже показывается, как, основываясь на мультипликативных факторных моделях, удается получить достаточное для практических целей решение указанной задачи. Оно позволяет построить обратные фильтры, обеспечивающие корректировку исходных данных, приводя их к более однородным поверхностным условиям. Это составляет суть поверхностно-согласованной деконволюции [Taner, Koehler, 1981; Ronen, Claerbout, 1985; Levin, 1989; Cambois, Stoffa, 1992]. Следует отметить, что патент на поверхностно-согласованную деконволюцию “Surface consistent minimum-phase deconvolution” был получен только в 1992 г., т. е. более чем через 20 лет после начала исследований в соответствующей области.

Рассматриваемый подход к анализу формы наблюдаемого сейсмического сигнала позволяет выделять не только составляющие, характеризующие условия возбуждения и приема. Он дает возможность разделить спектральные или импульсные характеристики наблюдаемых сигналов на совокупность отдельных фильтров, в частности, выделив отражающую характеристику целевого объекта. Последняя может быть исполь-

зована для получения более точного описания целевого объекта при применении различных типов волн (отраженных, головных, дифрагированных). Таким образом, декомпозиция формы наблюдаемых сейсмических сигналов, выполняемая с использованием многомерных гомоморфных преобразований, может представлять значительный интерес для подготовки исходных данных к решению обратных динамических задач. В частности, она открывает возможности перехода от решения трехмерных задач для полной модели среды к локальным одномерным задачам по отношению к целевым объектам. Все вместе способствует развитию методов интерпретационной обработки сейсмических данных.

### ВОЗНИКНОВЕНИЕ ДАННОГО КЛАССА ПРЕОБРАЗОВАНИЙ

В начале 1960-х гг. стали активно развиваться методы дискретного спектрального анализа. Они позволили воспринимать наблюдаемые сигналы не как аналоговые записи, а как дискретную последовательность данных, что сразу же приводило к векторной форме и линейно-алгебраическим понятиям. Вместе с тем многие задачи анализа речи, фотосъемки, эхолокации приводили к моделям сверточного типа или произведениям спектров сигналов, где требовалось производить разделение сверточных или спектральных составляющих. Поэтому возникла потребность в разработке общего подхода к решению таких задач.

В качестве возможного пути была предложена следующая концепция гомоморфных преобразований над сигналами: “the concept of homomorphic (i.e., linear in a generalized sense) mappings between algebraic groups and vector spaces” [Oppenheim, Schafer, 2004, p. 95]. Она была рассмотрена в докторской диссертации А. Оппенгейма [Oppenheim, 1965] и использована при построении одномерной гомоморфной или обобщенной линейной фильтрации [Oppenheim, 1966; Oppenheim et al., 1968]. Вот как автор этой концепции формулировал ее основную идею в 2004 г.: “The essential idea of homomorphic system theory was that many signal processing operations satisfy the same algebraic postulates as addition. Therefore, homomorphic mappings between signal spaces in which these other operations play the role of signal (vector) addition are, in essence, linear mappings in a generalized sense. This suggested a new approach to a variety of problems in separating signals that had been nonadditively combined, such as through convo-

lution or multiplication. Various potential applications of homomorphic signal separation were actively considered, primarily for deconvolution and demultiplication” [Oppenheim, Schafer, 2004, p. 95]. Сам подход достаточно подробно описан в книгах [Голд, Рэйдер, 1973; Оппенгейм, Шафер, 1979]. К настоящему времени он является одним из классических разделов цифровой обработки сигналов и широко применяется при обработке изображений, а также звуковых, оптических и радиотехнических сигналов [Schafer, Rabiner, 1970; Oppenheim et al., 1976; Otis, Smith, 1977; Shi-Chang, Coach, 1998; Prati et al., 2004].

Отметим, что гомоморфизм является линейно-алгебраическим понятием [Мальцев, 1970], которое рассматривает свойства отображений различных математических объектов, в частности операций, определенных над объектами векторных пространств. Для практических приложений в области обработки сигналов, как при появлении гомоморфных преобразований, так и до настоящего времени, наибольший интерес представляют операции  $\otimes$  в виде произведения или свертки сигналов  $s(t)$ . Тогда используются модели:  $s(t) = s_1(t) \cdot s_2(t)$  или  $s(t) = s_1(t) * s_2(t)$ , где сигналы  $s_1(t)$  и  $s_2(t)$  обладают как регулярной, так и стохастической природой.

Каноническое представление одномерных гомоморфных фильтров показано на рис. 1, а. Смысл его состоит в следующем. Если отображения (преобразования)  $D$  и  $D^{-1}$  обеспечивают гомоморфизм при переводе операции  $\otimes$ , которая определена над сигналами  $s(t)$ , в операцию суммы для их образов и обратно, то различные типы соответствующих фильтров будут различаться только линейным преобразованием  $L$ . В этом случае преобразование  $D$  определяется через логарифмирование  $s(t)$  или его спектра. В результате приходим к линейным моделям для соответствующих образов  $s^*(r) = Ds(t)$ , т. е.  $s^*(r) = s_1^*(r) + s_2^*(r)$ . Далее, выполнив некоторое линейное преобразование, получаем функцию  $g^*(r)$ , в качестве которой может выступать оценка  $s_1^*(r)$  или  $s_2^*(r)$ . Затем, осуществив обратное преобразование  $D^{-1}$ , получаем на выходе фильтра сигнал  $g(t) = D^{-1}g^*(r)$ . При этом природа переменных  $t$  и  $r$  не очень важна. Ими, например, могут являться временные или пространственные переменные и различного рода частоты.

Необходимо подчеркнуть, что переход к линеаризованной модели для сигналов с операцией свертки был рассмотрен до исследований по гомоморфной фильтрации и получил название кепстрального анализа [Bogert et al., 1963; Noll, 1964]. К настоящему времени кепстральный анализ хорошо развит и получил широкое распространение [Childers et al., 1977; Satyam et al., 1994; Zheng, Wang, 2001; Oppenheim, Schafer, 2004]. Этому в большой степени способствовало понимание связи кепстрального анализа с гомоморфной фильтрацией [Oppenheim et al., 1976; Оппенгейм, Шафер, 1979]. В последнее время на основе кепстрального анализа развивается метод обратной фильтрации, не требующий знания об исходном импульсе. Метод носит название *Blind deconvolution* [Stockham et al., 1975], и к нему проявляют значительный интерес исследователи в различных областях науки и техники (см., напр.: [Petropulu, Nikias, 1993; Naykin, 1994; Kundur, Hatzinakos, 1996; Sarkar et al., 1998; Kaprzak, Okazaki, 2003; Douglas et al., 2007; Tria et al., 2007; van Vossen, Trampert, 2007]).

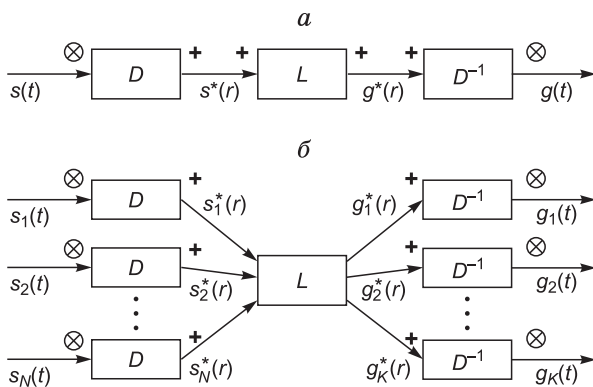


Рис. 1. Схематическое представление канонической формы: одномерных (а) и многомерных или многоканальных (б) гомоморфных фильтров.

Гомоморфные преобразования, как и гомоморфная фильтрация, обладают большей общностью, чем кепстральный анализ. В частности, при кепстральном анализе обеспечивается отображение сигналов в те же переменные, что и исходные данные, т. е.  $s^*(t) = Ds(t)$ . Но этого совершенно не требуется при гомоморфном преобразовании, что дает дополнительную свободу и возможности при создании методов анализа и обработки данных.

При рассмотрении прикладных вопросов важным представляется соотношение свойств одно- и многомерной гомоморфной фильтрации. Необходимо заметить, что одномерная гомоморфная фильтрация достаточно давно начала использоваться при обработке сейсмической информации, особенно в области сейсмологии [Ulrych, 1971; Stoffa et al., 1974; Buhl et al., 1974; Tribolet, 1979; Jin, Rogers, 1983]. Но к началу исследований (1971–1972 гг.) в отечественной научной литературе отсутствовали публикации по применению гомоморфных преобразований при обработке сигналов. Первые сведения об этом направлении появились в книге [Голд, Рэйдер, 1973]. Поэтому пришлось пользоваться достаточно ограниченным числом зарубежных публикаций, в частности работой [Ulrych, 1971], непосредственно относящейся к обработке сейсмических данных в одноканальном варианте. Последнее ограничивало возможности гомоморфной фильтрации только восстановлением исходного сейсмического сигнала. В работе отмечалась одна важная особенность такого подхода: “The unique point about this approach is that it does not require the usual assumptions of a minimum-phase wavelet and a random distribution of impulses” [там же, р. 650].

Ограничения возможностей подхода заключались не только в объеме публикаций, но и в широте рассмотрения вопросов, возникающих при практическом использовании гомоморфных преобразований. Даже для одномерного варианта имелась только принципиальная схема его реализации. Поэтому, несмотря на понимание важности единственного определения фазового спектра, который задает мнимую составляющую входных данных преобразования, отсутствовали эффективные алгоритмы, обеспечивающие такое определение для произвольных реальных данных. Также отсутствовало достаточно полное теоретическое и практическое исследование влияния помех на результаты преобразования. Например, в указанной работе Т.Дж. Улрича такого рода исследования выполнялись лишь в рамках модельных данных. Следует заметить, что результаты по теоретическому изучению влияния помех только для двух крайних случаев отношения сигнал / помеха (малого и большого) при кепстральном анализе были представлены гораздо позднее [Tribolet, 1979].

Отмеченные моменты усложняли переход от одномерных к многомерным (или многоканальным) гомоморфным преобразованиям (фильтрациям), которые требовались при рассмотрении многофакторных сейсмических моделей с многократными свертками. Принципиально на возможность появления такого типа фильтраций указывалось в докторской диссертации А. Оппенгейма [Oppenheim, 1965]. Но их практическая реализация в случае мультипликативных факторных моделей, в виде спектрально-статистического метода обработки сейсмических данных, впервые была выполнена только в работе [Гольдин, Митрофанов, 1975]. Предложенный авторами метод предшествовал

поверхностно согласованной деконволюции [Taner, Koehler, 1981; Levin, 1989]. Он также на 30 лет опередил использование слепой деконволюции (*blind deconvolution*) в задачах коррекции характеристик источников и приемников при наземных сейсмических исследованиях [van Vossen, 2005].

Схематическое представление многомерной гомоморфной фильтрации дано на рис. 1, б. Как и при одномерной фильтрации, в ней присутствуют преобразования  $D$  и  $D^{-1}$ , обеспечивающие гомоморфизм при переводе операции  $\otimes$  в операцию суммы и обратно. Но имеются и достаточно существенные отличия. Они состоят в объединении всех образов входных сигналов линейным преобразованием  $L$  при многомерной фильтрации и в возможном различии числа входных образов  $N$  от числа выходных образов  $K$ . Различия между  $N$  и  $K$  могут быть значительными, как в сторону уменьшения, так и в сторону увеличения. Это определяется исходной моделью и задачей, для решения которой используется гомоморфная фильтрация.

Развитие методов многомерной гомоморфной фильтрации потребовало решения большого числа задач, связанных с построением преобразований  $D$ ,  $D^{-1}$  и  $L$ . Например, многоканальность и возможная неединственность многомерной гомоморфной фильтрации требуют проведения исследований как строящегося преобразования  $L$ , так и всего многоканального фильтра в целом. Исходя из формальных соображений, такое исследование должно выполняться при реализации любого фильтра, строящегося в рамках модели, представляющей совокупность сигналов  $\{s_i(t), i = 1, \dots, N\}$ , форма которых определяется многократными произведениями или свертками. В общем случае задачи изучения свойств нелинейных операторов обладают высокой сложностью [Макс, 1983; Брандт, 2003; Гонсалес, Вудс, 2005]. Однако при рассмотрении мультипликативных факторных моделей сложность удается понизить за счет перехода к аддитивным факторным моделям посредством преобразования  $D$ . Это позволяет при построении преобразования  $L$  воспользоваться результатами, полученными при анализе особенностей таких моделей. Для определенных же в линеаризованной форме решений может быть выполнен обратный переход во временную область и построено окончательное решение исходной нелинейной задачи. Указанная схема составляет суть многомерной гомоморфной фильтрации. Примеры ее реализации при рассмотрении некоторых моделей, возникающих при сейсмических исследованиях, приводятся ниже.

#### МУЛЬТИПЛИКАТИВНЫЕ ФАКТОРНЫЕ МОДЕЛИ И МНОГОМЕРНАЯ ГОМОМОРФНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ

Во введении отмечалось, что впервые многофакторные мультипликативные модели были использованы И.И. Гурвичем при анализе формы сейсмических отраженных сигналов. Его работа, опубликованная в 1970 г., давала эвристическое описание процесса распространения сейсмического сигнала в среде как прохождения через некоторый фильтрующий сейсмический канал, где имеется несколько последовательных фильтров. Выделение соответствующих фильтров позволило представить сейсмический сигнал, распространяющийся в среде от произвольно расположенного  $i$ -го источника к  $j$ -му приемнику, в виде

$$W(p_i, p_j, t) = s(p_i, t) * r(p_j, t) * G(p_R, t) * O(p_l, t), \quad (1)$$

где параметры  $p_i, p_j, p_R, p_l$  определяют координаты точек соответственно источника, приемника, отражения и удаление источника от приемника. Импульсные характеристики  $s(p_i, t), r(p_j, t), G(p_R, t), O(p_l, t)$  относятся к указанным областям. При этом  $O(p_l, t)$  является характеристикой, включающей все промежуточные воздействия, которые среда оказывает на сигнал по мере его прохождения. Параметры  $p_i, p_j, p_R, p_l$  могут зависеть от трех пространственных координат или от локальной координаты профиля.

С учетом того, что координаты точек  $p_i, p_j$ , а также проекция точки  $p_R$  на плоскость наблюдений (для горизонтальной границы) и расстояние источник-приемник однозначно определяются своими номерами, представление (1) может иметь вид

$$W_{ij}(t) = s_i(t) * r_j(t) * G_k(t) * O_l(t), \quad (2)$$

где значения индексов  $k, l$  совпадают с номерами общей центральной точки (ОЦТ) и линии равноудаленных наблюдений (РУН) в многократной системе наблюдений и связаны со значениями  $i, j$  простыми соотношениями:  $k = (i + j)/2$  и  $l = (i - j)/2$ . Последние обеспечивают поворот обобщенной плоскости наблюдений на  $45^\circ$ .

Выделение указанных областей условно. Но их фиксирование, как основных элементов, определяющих форму реального сигнала, основывалось на большом практическом опыте, полученном при исследовании влияния различных параметров на регистрируемый сигнал. Например, исследуя формы сигнала, который формируется при взрывном источнике, И.И. Гурвич пришел к следующему выводу [1966, 1967]: несмотря на большое количество таких параметров и сложную зависимость от них формы сигнала, главным являлось то, что все параметры относятся к достаточно локальной области, составляющей несколько метров. То же характерно и для областей приема, свойства которых могут определяться большим количеством параметров, но все эти параметры носят локальный характер [Полшков, 1971].

Локальность областей возбуждения и приема сейсмических колебаний, а также допущение о незначительной направленности характеристик источника и приемника сразу приводят к мультипликативным факторным моделям, аналогичным представлению (2). Здесь и далее под термином “фактор” понимается некоторая составляющая (особенность) формы сигнала или волнового поля, которая постоянна при некоторых сочетаниях индексов  $i$  и  $j$ , определяющих положение сейсмической трассы в системе наблюдений. Таким образом, рассматриваемые факторы имеют геометрический характер, связанный с особенностями структуры наблюдений.

Главное преимущество введенной модели, по сравнению с общей моделью свертки исходного сигнала и импульсной характеристикой среды, состояло в следующем. Она давала возможность оценить и проанализировать вариации характеристик различных областей, в частности источника и приемника. При этом характеристики целевых областей, к которым относится и область отражения, могут быть очищены от вариаций, связанных с остальными областями. Кроме того, свойство локальности позволяло строить эти характеристики для отдельных областей или условных точек профиля наблюдений, что повышало детальность и разрешенность получаемых оценок.

Именно при рассмотрении задачи оценивания спектральных характеристик отдельных областей,

сейсмического канала, произошло развитие подхода. Первоначально предложенная модель применялась для определения амплитудных вариаций сигналов [Гурвич, Чьонг, 1971], относящихся к областям источника, приемника и ОЦТ, которая связывалась с общей глубинной точкой отражения (ОГТ). Полученные амплитудные вариации позволяли анализировать динамические особенности сигналов, а их использование переводило нелинейную модель сверточного типа в более простую модель произведения соответствующих амплитуд. Пренебрегая случайными вариациями, модель для амплитуд наблюдаемых сигналов записывалась в форме

$$A_{ij} = A_i^S \cdot A_j^R \cdot A_k^G, \quad (3)$$

где  $A_i^S, A_j^R, A_k^G$  определяют амплитуды сигналов соответственно в источнике, приемнике и точке отражения.

При рассмотрении многократных систем сейсмических наблюдений, когда имеются различные сочетания  $i$  и  $j$ , модель (3) позволяла строить некоторые отношения между амплитудами сигналов, которые наблюдаются для различных источников и приемников. Такие отношения устраняли часть нежелательных вариаций, выделяя заданную характеристику сигнала. Например, построив отношения амплитуд

$$\frac{A_{12} \cdot A_{23}}{A_{13} \cdot A_{22}} = \frac{A_1^G \cdot A_3^G}{A_2^G \cdot A_2^G} \quad \text{или} \quad \frac{A_{12} \cdot A_{31}}{A_{22} \cdot A_{21}} = \frac{A_1^S \cdot A_3^S}{A_2^S \cdot A_2^S},$$

можно исследовать вариабельность амплитуды отражения или источника и сделать выводы о значимости таких изменений для анализируемых сигналов. Указанные построения приводили к интересным следствиям. Во-первых, для оценивания вариаций заданной характеристики сигнала требовалось использовать не одно, а нескольких определенных наблюдений. И.И. Гурвич называл такие совокупности наблюдений “ансамблями”. Во-вторых, в процессе такого оценивания можно было определять только соотношения вариаций параметра, а не его абсолютную величину. Для определения абсолютных величин анализируемого параметра требовалось использование априорной информации. Так, при известном значении амплитуды отраженного сигнала  $A_2^G$  (например, в точке скважины) и его отношения к амплитуде первого отражения можно было определить амплитуду отраженного сигнала в третьей точке. Это позволяло использовать последующие комбинации наблюдений для определения значений амплитуды отраженного сигнала во всех последующих точках профиля.

Хотя предлагаемый подход к анализу вариаций амплитуд сигналов, наблюдаемых в реальном эксперименте сигналов, давал результаты, он имел и ряд недостатков. Так, малые совокупности наблюдений, используемые при построении соотношений амплитуд, обладали малой помехоустойчивостью и не позволяли в полной мере воспользоваться многократностью систем наблюдений (уже в то время она могла достигать 24). Кроме того, он не позволял глубоко исследовать свойства получаемых оценок параметров.

Одним из способов, устраняющим эти ограничения, является линеаризация исходной модели. Первоначально такая линеаризация была предпринята на основе классического разложения в ряд по малым вариациям параметров модели (1) [Гурвич, Яновский, 1971], что обеспечивает переход к статистическим

факторным моделям [Шеффе, 1980]. Вместе с тем было очевидно, что подобная линеаризация используется формально и не является наилучшей, в частности, она приводит к комбинированным произведениям мультипликативных составляющих. Поэтому был предложен другой способ линеаризации, основанный на переходе к логарифмам амплитуд или спектральных характеристик наблюдаемых сигналов [Гольдин, Митрофанов, 1973]. Тогда представление (2) в лог-спектральной области записывается в форме

$$z_{ij}(\omega) = \alpha_i(\omega) + \beta_j(\omega) + \gamma_k(\omega) + \lambda_l(\omega), \quad (4)$$

где параметр  $\omega$  является круговой частотой, а  $z_{ij}(\omega)$ ,  $\alpha_i(\omega)$ ,  $\beta_j(\omega)$ ,  $\gamma_k(\omega)$ ,  $\lambda_l(\omega)$  будут логарифмами комплексных спектров от функций  $W_{ij}(t)$ ,  $s_i(t)$ ,  $r_j(t)$ ,  $G_k(t)$ ,  $O_l(t)$ .

Линеаризация модели обеспечивала три важные вещи.

1. Она объединила модели коррекции динамических особенностей сигналов с моделями коррекции временных статических поправок (нужно учесть, что временная поправка, определяемая при коррекции статики, входит в фазовый спектр сигнала).

2. На ее основе мог реализовываться линейно-алгебраический подход при решении задач оценивания параметров модели для полной совокупности рассматриваемых наблюдений.

3. Такое представление позволяло проводить достаточно полное исследование свойств получаемых решений и оценок параметров. Кроме того, способ линеаризации модели, основанный на логарифмировании амплитуд или спектральных характеристик исходных наблюдений, приводил к многомерной гомоморфной фильтрации.

В многомерности преобразования заключались две существенные особенности. Первая из них была связана с необходимостью разработки простых и эффективных способов однозначного определения фазовых спектров наблюдаемых сигналов, участвующих в совместном оценивании параметров. Вторая определялась взаимодействием двух возможных компонент модели: полезной и мешающей (аддитивной помехи).

Особенности исходной нелинейной модели и способ ее линеаризации потребовали выполнения большого объема новых исследований. Новизна была вызвана отсутствием в то время классических результатов по проблеме коррекции временных статических поправок [Taner et al., 1974], которые сформировали к ней отношение как к линейно-алгебраической задаче [Wiggins et al., 1976], а также работ по многомерной гомоморфной фильтрации и слепой деконволюции [Stockham et al., 1975]. Поэтому на начальном этапе развития подхода к декомпозиции формы сейсмического сигнала, основанного на мультипликативных факторных моделях, пришлось рассматривать разнообразные вопросы. Они относились к проблемам:

– формирования мультипликативных моделей, обеспечивающих эффективное описание вариаций формы сейсмического сигнала для разных типов волн;

– определения устойчивых спектральных характеристик наблюдаемых сейсмических сигналов с учетом их локальности и однозначного определения фазового спектра;

– построения оптимального линейного оператора, обеспечивающего единственное определение параметров линеаризованной модели;

– исследования свойств получаемых значений параметров при произвольном отношении сигнал / помеха в области наблюдения целевого сигнала.

При рассмотрении указанных вопросов удалось получить ряд новых результатов. Так, независимо от работ М.Т. Танера и Р.А. Виггинса, было показано, что задачи коррекции статики разделения плоских волн, как и общие задачи декомпозиции мультипликативных факторных моделей, могут быть исследованы с использованием линейно-алгебраических и графоаналитических подходов [Митрофанов, 1975]. Также были построены вероятностные и статистические характеристики, получаемые при решении задач в лог-спектральной области [Гольдин, 1976], опередившие работу [Tibolet, 1979], и исследовано влияние окон на спектральные характеристики сейсмических сигналов [Митрофанов, 1979]. Данные исследования создали основу спектрально-статистического метода (ССМ) обработки сейсмограмм. Он позволил выполнить разложение формы сейсмического сигнала, наблюдаемого в системах многократного перекрытия с произвольной кратностью, на мультипликативные составляющие, включающие характеристики источников, приемников и отражения. Такое разложение привело к разработке процедур коррекции формы сейсмических сигналов для реальных данных [Сысоев, Евдокимов, 1986].

Очевидно, что допущение о малом изменении характеристик направленности источников и приемников, которое использовал И.И. Гурвич, выполняется только при рассмотрении отраженных сигналов от достаточно глубоких горизонтов и для относительно небольшой базы наблюдения. Данное ограничение сразу ориентировало модель на анализ сигналов, удовлетворяющих определенным условиям по соотношению удаления источник–приемник и глубины до отражающей границы. Поэтому переход к другому типу сигналов потребовал изменения модели. Такое изменение началось с расширения модельных представлений для фильтрующей характеристики среды  $u^M(p_i, p_j, t|\vartheta)$ . Дело в том, что в исходной модели Гурвича (1) свертку двух функций  $-G(p_R, t)$  и  $O(p_i, t)$  – можно воспринимать как некоторую аппроксимацию для такой характеристики в форме

$$u^M(p_i, p_j, t|\vartheta) \cong G(p_R, t) * O(p_i, t), \quad (5)$$

или в компактной форме  $u_{ij}^M(t|\vartheta) \cong G_k(t) * O_l(t)$ , где  $\vartheta$  – набор параметров, определяющих модель среды.

Тогда модель для аппроксимации формы регистрируемого сигнала с учетом помех  $\xi(p_i, p_j, t)$ , присутствующих в области сигнала, приобретает вид

$$y(p_i, p_j, t|\vartheta) \cong \quad (6)$$

Она определяется выделяемыми факторами, параметрами модели среды и отношением сигнал / помеха.

Приближение (5) для формы отраженных сигналов может считаться хорошим в случае очень небольшого класса моделей сред. Например, когда покрывающая среда представляет собой однородный линейно-неупругий слой. Очевидно, что такие ситуации для реальных сред бывают крайне редкими. Тем более, такое представление будет грубым для отдельных сигналов. Чтобы лучше осознать его грубость, достаточно представить себе аппроксимацию времен прихода отраженной волны в форме  $t_{ij} = t_k^0 + V_{зф}^{-1} \Delta x_{i-j}$ , где  $t_k^0$  – двойное время распространения по нормальному лучу

( $t_{\text{ОГТ}}^0$ );  $V_{\text{эф}}$  – некая постоянная эффективная скорость, относящаяся ко всей покрывающей среде, а  $\Delta x_{i-j}$  – расстояние источник–приемник. В представлении (5) также не использовался принцип взаимности, который должен выполняться для уравнений теории упругости [Бабич, 1962].

Рассмотрение аппроксимационных задач в лог-спектральной области и применение принципа взаимности позволило ввести эффективное представление для описания фильтрующей характеристики среды в случае монотипных волн [Митрофанов, 1980]. В компактной, индексной форме оно выглядит как

$$u_{ij}^M(t|\vartheta) = g_k^{(0)}(t|\vartheta) * g_{k,i}^{(2)}(t|\vartheta) * \dots * g_{k,l}^{(2N)}(t|\vartheta), \quad (7)$$

где  $g_{k,l}^{(2m)}(t|\vartheta)$  являются некоторыми эффективными фильтрами, описывающими процессы распространения и отражения сейсмических сигналов для монотипных волн при разных удалениях источник–приемник. Данное представление, с учетом мультипликативных факторов, характеризующих неоднородность условий возбуждения и приема, позволило впервые на практике подтвердить выполнение принципа взаимности для реальных сигналов [Гольдин и др., 1981]. Оно также полностью объединяло модели коррекции временных статических поправок с моделями коррекции динамических особенностей сигналов и моделями декомпозиции формы сигналов. Так, в предположении о неизменности формы исходного сигнала при его распространении в среде и параболической аппроксимации годографа отраженной волны для ОЦТ выражение (6) в индексной форме при использовании представления (7) принимает вид

$$y_{ij}(t|\vartheta) \equiv s(t) * \delta(t - \Delta t_i) * \delta(t - \Delta t_j) * \\ * \delta(t - c_k^{(0)}(\vartheta)) * \delta(t - c_k^{(2)}(\vartheta)(i - j)^2) + \xi_{ij}(t),$$

где  $\Delta t_i, \Delta t_j$  – временные статические поправки за источник и приемник,  $c_k^{(0)}(\vartheta), c_k^{(2)}(\vartheta)$  – эффективные параметры годографа, а к  $\delta$ -функциям применимы преобразования Фурье.

Для прикладных аспектов существенным будет в виде свертки некоторых эффективных фильтров зависимость этих фильтров от параметров модели среды  $\vartheta$  не прописывается в явном виде, она всегда подразумевается. При решении конкретных задач такая зависимость позволяет использовать оценки соответствующих фильтров или их спектральных характеристик, которые получают в процессе многомерной гомоморфной фильтрации, для уточнения или нахождения значений неизвестных параметров  $\vartheta$ , т. е. для решения обратных задач.

Введение эффективного представления (7) показало возможность использования различных мультипликативных факторных моделей в зависимости от рассматриваемых типов волн и решаемых задач. Поэтому при рассмотрении вопросов обработки головных волн, наблюдаемых в многократных системах КМПВ [Митрофанов, Сергеев, 1986], было предложено использовать другое описание для полезной компоненты:

$$u_{ij}^M(t|\vartheta) = H_i^{(1)}(t) * H_j^{(3)}(t) * H^{(2)}(t, l_{ij}), \quad (8)$$

где  $H_i^{(1)}(t)$  и  $H_j^{(3)}(t)$  представляют собой импульсные характеристики среды прохождения от источника до точки возникновения головной волны и от точки отрыва головной волны от границы до приемника, соответственно, а  $H^{(2)}(t, l_{ij})$  описывает процесс распро-

странения соответствующей головной волны вдоль границы. Идея этого представления предложена в работе [Крылов, Сергеев, 1985] при определении связи колебаний головной волны, наблюдаемых в четырех точках, которые определенным образом расположены на обобщенной плоскости. Использование таких моделей и построенных на их основе процедур пересчета позволило существенно продвинуться в области разработки новых методов выделения головных волн [Селезнев, Еманов, 1998].

Еще одним примером мультипликативного представления  $u_{ij}^M(t|\vartheta)$  служила эффективная лучевая модель [Мадатов и др., 1991], имеющая форму

$$u_{ij}^M(t|\vartheta) = A(\gamma_{ij}, \tau_{ij}) * T(\gamma_{ij}, t) * R(\gamma_{ij}, t). \quad (9)$$

Здесь  $A(\gamma_{ij}, \tau_{ij})$  отвечает лучевому оператору, связанному с фиксированным лучом  $\gamma_{ij}$ , который определяется типом волны,  $T(\gamma_{ij}, t)$  объединяют характеристики прохождения в толстослойной модели, а  $R(\gamma_{ij}, t)$  является импульсной характеристикой области отражения.

Все приведенные представления объединяют в рамках общей модели некоторые совокупности наблюдений. Для реальных сейсмических данных такие совокупности очень значительны (десятки и сотни тысяч). Поэтому построение оператора  $L$ , реализующего многомерную гомоморфную фильтрацию рис. 1, б, является отдельной нетривиальной задачей, что видно на примере исследований проблемы коррекции временных статических поправок (см., напр.: [Сысоев, 2011]). Одновременно в случае эффективной реализации такого типа фильтрации удается получать как отдельные характеристики сигналов, отвечающие определенным мультипликативным составляющим, так и их комбинации, характеризующие, например, целевой объект или всю полезную компоненту сигнала. Одним из наиболее очевидных приложений многомерной гомоморфной фильтрации является построение корректирующего оператора  $C_{ij}^{ms}(t) = s_i^{-1}(t) * r_j^{-1}(t)$ , устраняющего неоднородность в условиях возбуждения и приема сейсмических колебаний. Такой оператор может быть построен при ориентации на определенный тип сигнала (волны) или для совокупности сигналов, которые отвечают большой длительности наблюдения и обладают различной природой. Это полностью определяется используемой мультипликативной моделью.

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МНОГОМЕРНОЙ ГОМОМОРФНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ПРИ РЕШЕНИИ ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ

Модель (6) обладает большой общностью и в рамках многомерной гомоморфной фильтрации применима для решения различных задач. К ним относятся задачи обработки, иллюстрируемые способами поверхностно-согласованной и слепой деконволюции [Yilmaz, 2001; van Vossen et al., 2006; van Vossen, Trampert, 2007]. Но, возможно, одно из наиболее перспективных приложений многомерных гомоморфных преобразований сейсмических сигналов находится в области решения объектно-ориентированных обратных динамических задач. В этом случае локальность изучаемого объекта среды и требование высокой точности определения его характеристик хорошо согласуются с возможностями декомпозиции формы сигнала, которая позволяет выделить очищенную инфор-

мацию об объекте. При таком использовании преобразование выступает одновременно как очищающее устройство и как микроскоп, позволяющий сконцентрироваться на определенных особенностях волнового поля, связанных с анализируемыми элементами среды.

Однако необходимо учитывать, что получаемые таким образом оценки относятся к выделяемому сигналу и его особенностям. В частности, указанный в конце предыдущего раздела корректирующий оператор  $C_{ij}^{ms}(t)$  будет наиболее эффективен по отношению к сигналам той природы, для которой выбиралось соответствующее представление, например, продольным отраженным волнам. Относительно других типов сигналов данный оператор может быть малоэффективен или даже вреден. Поэтому требуется настройка оператора на заданный тип сигнала.

Тем не менее, подход к декомпозиции формы сигнала посредством гомоморфных преобразований с применением мультипликативных факторных моделей является достаточно конструктивным и перспективным. Важной особенностью всех представленных выше моделей является их полная или частичная линеаризация путем перехода к логарифмам спектральных характеристик интервалов трасс  $y_{ij}(t)$ , содержащих выделенные волны. Такой способ линеаризации позволяет представить любую мультипликативную модель в обычной линейно-алгебраической форме

$$\bar{z}(\omega) = A\bar{\theta}(\omega) + \bar{\epsilon}(\omega), \quad (10)$$

где  $\bar{z}(\omega)$  – вектор исходных данных, которые являются логарифмами спектральных характеристик  $Y_n(\omega)$  интервалов трасс  $y_{ij}(t)$ ,  $\bar{\theta}(\omega)$  – вектор неизвестных параметров, обычно состоящий из логарифмов спектральных характеристик мультипликативных факторов,  $\bar{\epsilon}(\omega)$  – вектор помехи,  $A$  – матрица, вид которой определяется видом модели и структурой системы наблюдений и не зависит от частоты.

Свойства линеаризованных моделей могут быть исследованы методами линейной алгебры. Существующие способы определения параметров систем линейных уравнений позволяют построить эффективные алгоритмы нахождения любой из компонент вектора  $\bar{\theta}(\omega)$  или некоторой их совокупности вне зависимости от свойств помех. Соответствующие алгоритмы имеют форму линейного оператора, а получаемые на его основе оценки представимы в виде

$$\bar{\theta}^*(\omega) = H\bar{z}(\omega), \quad (11)$$

где  $H$  – определенная некоторым образом матрица. Тогда интересующая нас составляющая линеаризованной модели (или фиксированная  $m$ -я компонента вектора  $\bar{\theta}(\omega)$ ) может быть представлена как

$$\theta_m^*(\omega) = \sum_{n=1}^N h_{mn} \cdot z_n(\omega), \quad (12)$$

где  $h_{mn}$  – элементы матрицы  $H$ , а  $z_n(\omega) = \ln\{Y_n(\omega)\}$  – компоненты вектора  $\bar{z}(\omega)$ .

Выражение (12) позволяет представить получаемую в результате декомпозиции оценку спектральной характеристики любого мультипликативного фактора, входящего в соответствующую модель, в форме

$$F_m^*(\omega) = \exp\{\theta_m^*(\omega)\} = \prod_{n=1}^N \exp\{h_{mn} \cdot z_n(\omega)\} = \prod_{n=1}^N (Y_n(\omega))^{h_{mn}}. \quad (13)$$

Здесь индексы  $m$  и  $n$  задают соответствующие компоненты векторов  $\bar{\theta}(\omega)$  и  $\bar{z}(\omega)$ .

Соотношения (13) говорят о том, что свойства получаемых в процессе декомпозиции составляющих сигнала полностью определяются двумя моментами: построенной матрицей  $H$  и рассчитанными спектрами интервалов трасс. Понимание этого факта способствовало углубленному исследованию указанных моментов. Здесь потребовалось изучение структуры ядра матрицы  $A$  для различных представлений  $u_{ij}^m(t|\vartheta)$ , влияния системы наблюдений и априорной информации на свойства матрицы  $H$ . В результате были предложены эффективные методы использования априорной информации в задачах декомпозиции формы сигнала и, в частности, в задаче коррекции частотно-зависимой статики [Митрофанов, 1988; Митрофанов, Рачковская, 1996]. Также были выполнены исследования по проблеме совместной обработки больших совокупностей фазовых спектров [Митрофанов, 1986] и изучена проблема совместной обработки логарифмов амплитудных спектров при различных отношениях сигнал / помеха [Митрофанов, 1987]. Следует отметить важный аспект, связанный с изменением характеристик помехи  $\epsilon(\omega)$  в линеаризованной модели (10) по отношению к характеристикам помехи  $\xi(t)$  в исходной модели (6).

Изучение указанных моментов фактически исчерпывает проблему декомпозиции формы сигнала с использованием мультипликативных факторных моделей. Однако остается вопрос: как данная декомпозиция может быть соотнесена с общей проблемой анализа наблюдаемого волнового поля и решением обратных задач? Учитывая отмеченную в предыдущем разделе зависимость мультипликативных составляющих сигнала от параметров модели среды  $\vartheta$ , можно предложить различные способы их применения при определении целевых параметров. Приведем два возможных способа.

Первый способ предполагает, что получаемые в результате декомпозиции мультипликативные составляющие используются как входные данные при решении обратных задач. Например, составляющая  $G_k(t)$  или ее аналог  $g_k^{(0)}(t|\vartheta)$  могут быть использованы при рассмотрении обратных динамических задач для нормального падения волны на целевой объект. В качестве целевого объекта могут выступать тонкослоистая пачка, малоамплитудный сброс и пр. Такое простое использование оцениваемых составляющих мультипликативных моделей является актуальным для практической сейсморазведки до настоящего времени, так как большинство реализуемых на практике инверсных алгоритмов работает в рамках предположения о нормальном падении волны на изучаемую среду. Более сложной реализацией указанного способа использования составляющих мультипликативных моделей при решении обратных задач является формирование различных комбинаций этих составляющих. В частности, может быть взята свертка  $g_k^{(0)}(t|\vartheta) * g_{k,l}^{(2)}(t|\vartheta)$ , или  $R(\gamma_{ij}, t)$ , очищенная от влияния промежуточной среды и характеризующая изменение отклика тонкослоистого объекта от угла падения фронта волны на целевой объект. Такие комбинации могут строиться по результатам обработки как одного, так и нескольких типов волн. В работах [Митрофанов, 1980; Мадатов и др., 1991] показано, как параметры мультипликативных факторных моделей связаны с параметрами некоторых сейсмических моделей среды.



Второй способ основан на использовании мультипликативной факторной декомпозиции непосредственно в процессе решения обратной задачи. Тогда объединяются две процедуры: 1) учет вариаций динамических особенностей сигнала, связанных с условиями проведения эксперимента и промежуточной средой, 2) оценивание параметров целевого объекта среды. В этом случае указанная линеаризация модели позволяет свести общую нелинейную задачу, куда входят и мультипликативные факторные составляющие и параметры модели среды, к частично линейной модели. В результате происходит существенное понижение нелинейности модели, что является принципиальным моментом при решении обратных задач с использованием методов нелинейной оптимизации. Для реальных данных, содержащих десятки тысяч наблюдений, такое понижение может составлять сотни раз, так как размерность факторных составляющих даже для фиксированной частоты будет измеряться сотнями и тысячами, а размерность модельных параметров среды, особенно для локальных объектов, не превышает несколько десятков. Впервые данный подход был реализован при оценивании параметров малоамплитудного разрывного нарушения в работе [Ланда, Митрофанов, 1979].

Отметим еще один аспект частично линейных моделей, являющийся существенным при решении обратных задач. Он состоит в том, что общий вектор параметров исходной нелинейной обратной задачи разбивается на два подвектора, т. е.  $\bar{\theta}(\omega) = \{\bar{\theta}_1(\omega), \bar{\theta}_2(\omega)\}^T$ , где компоненты  $\bar{\theta}_1(\omega)$  включают факторные составляющие модели, опосредованно зависящие от модельных параметров среды  $\vartheta$ , а компоненты  $\bar{\theta}_2(\omega)$  представляют собой непосредственно параметры целевого объекта. Тогда после линеаризации будем иметь следующую модель:

$$\bar{z}(\omega) = A\bar{\theta}_1(\omega) + M(\bar{\theta}_2(\omega)) + \bar{\varepsilon}(\omega), \quad (14)$$

где  $M(\bar{\theta}_2(\omega))$  – нелинейная составляющая модели. Учитывая результаты, которые приводились выше, по отношению к компоненте  $\bar{\theta}_1(\omega)$  может быть построен оператор  $\mathbf{H}$ , обеспечивающий оценку этой компоненты. Данный оператор может быть построен таким образом, чтобы давать несмещенность линейной составляющей модели. Тогда в процессе нелинейного оценивания параметров модели среды могут использоваться модифицированные наблюдения  $\bar{z}^*(\omega) = (\mathbf{I} - \mathbf{A}\mathbf{H}) \cdot \bar{z}(\omega)$ , для которых справедлива упрощенная модель

$$\bar{z}^*(\omega) = M(\bar{\theta}_2(\omega)) + \bar{\varepsilon}(\omega), \quad (15)$$

зависящая только от параметров целевого объекта.

Оба представленных способа применения многомерной гомоморфной фильтрации при решении обратных динамических задач сейсмологии опираются на выделенный сигнал, связанный с некоторым локальным объектом среды. Поэтому при их реализации требуется выделение сигналов, наблюдаемых в исходном волновом поле и связанных с анализируемым объектом. Такое выделение может быть осуществлено на основе априорной модели среды через построение соответствующих лучевых схем. Таким образом, в настоящем подходе реализуются результаты кинематической интерпретации, получаемые с использованием факторной декомпозиции решения объектно-ориентированных обратных задач, а эти решения, в свою

очередь, выступают в роли последующего уточнения общей трехмерной модели среды.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитие методов многомерной гомоморфной фильтрации и слепой деконволюции оказалось полезным в области сейсмических исследований. В частности, они служат основой для разработки технологии углубленной многоуровневой декомпозиции волнового поля и формы сейсмического сигнала. Технология использует мультипликативные факторные модели при описании элементов волнового поля, а также априорную информацию о строении среды. Априорная модель среды позволяет идентифицировать в наблюдаемом волновом поле сигналы, относящиеся к заданным типам волн и связанные с определенными локальными объектами среды. Также она позволяет провести трансформацию имеющихся данных, что, в свою очередь, способствует переходу от сложнопостроенной трехмерной модели среды к квазиодномерной модели по отношению к исследуемому объекту. Особенности реального эксперимента учитываются путем описания условий возбуждения и приема импульсными характеристиками соответствующих зон, а изменение формы сигнала, связанное с прохождением через среду, представляется на основе лучевого метода и разложения формы сигнала по нескольким эффективным фильтрам. В результате приходим к мультипликативной факторной модели, структура которой зависит от вводимых аппроксимирующих функций и имеющейся системы наблюдений. Такая технология позволяет свести глобальную обратную задачу к ряду локальных обратных задач и использовать общий аппарат факторных моделей для выделения целевых мультипликативных составляющих, которые могут выступать в роли корректирующих фильтров или являться входными данными для решения объектно-ориентированных обратных задач. При этом технология позволяет конструктивно учитывать информацию о среде, полученную на предшествующих этапах обработки и интерпретации сейсмических материалов современными программными комплексами. Тогда решения обратных задач, получаемые при ее применении и относящиеся к локальным объектам среды, являются уточнением исходной глобальной модели и могут рассматриваться как последующая итерация в общей схеме решения обратной задачи для трехмерной модели среды. Разные уровни технологии применимы как на этапах предварительной обработки данных с целью корректировки формы сейсмических сигналов, чтобы устранить ее вариации, вызванные неоднородностью условий возбуждения и приема, так и на этапах решения обратных задач.

## Литература

- Бабич В.М.** Принцип взаимности для динамических уравнений теории упругости // Вопросы динамической теории распространения сейсмических волн. Л.: Изд-во ЛГУ, 1962. Вып. VI. С. 60–74.
- Брандт З.** Анализ данных. М.: Мир, 2003. 688 с.
- Глоговский В.М., Хачатрян А.Р.** Коррекция статических поправок без искажения кинематических параметров отраженных волн // Геология и геофизика. 1984. № 10. С. 54–63.
- Голд Б., Рэйдер Ч.** Цифровая обработка сигналов. М.: Сов. радио, 1973. 368 с.

- Гольдин С.В.** Линейные преобразования сейсмических сигналов. М.: Недра, 1974. 352 с.
- Гольдин С.В.** К теории спектрально-статистического метода обработки сейсмограмм // Геология и геофизика. 1976. № 1. С. 138–149.
- Гольдин С.В., Митрофанов Г.М.** Восстановление формы сигнала при наличии поверхностных неоднородностей // Сейсмические методы поиска и разведки полезных ископаемых. Киев: Знание, 1973. С. 6–8.
- Гольдин С.В., Митрофанов Г.М.** Спектрально-статистический метод учета поверхностных неоднородностей в системах многократного прослеживания отраженных волн // Геология и геофизика. 1975. № 6. С. 102–112.
- Гольдин С.В., Оболенцева И.Р., Никольский Э.В. и др.** Развитие методов интерпретации данных сейсморазведки // Развитие сейсмических методов исследований земной коры и верхней мантии в Сибири. Новосибирск: Изд-во ИГиГ СО АН СССР, 1981. С. 136–153.
- Гонсалес Р., Вудс Р.** Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005. 1072 с.
- Гурвич И.И.** Определение спектра сейсмического импульса взрыва вблизи очага по экспериментальным данным // Изв. АН СССР. Сер.: Физика Земли. 1966. № 11. С. 36–44.
- Гурвич И.И.** Зависимость спектров сейсмических волн в поглощающей среде от веса заряда // Изв. АН СССР. Сер.: Физика Земли. 1967. № 1. С. 76–85.
- Гурвич И.И.** О теоретических основах динамических измерений в сейсморазведке // Изв. вузов. Сер.: Геология и разведка. 1970. № 6. С. 108–113.
- Гурвич И.И., Чыонг Минь.** Опыт применения сейсмических ансамблей для определения свойств областей очага, приема и отражения по данным МОВ // Изв. вузов. Сер.: Геология и разведка. 1971. № 7. С. 99–104.
- Гурвич И.И., Яновский А.К.** О количественном аппарате динамических измерений в сейсморазведке // Изв. АН СССР. Сер.: Физика Земли. 1971. № 4. С. 41–47.
- Крылов С.В., Сергеев В.Н.** Свойства головных волн и новые возможности автоматизации их обработки // Геология и геофизика. 1985. № 4. С. 92–102.
- Ланда Е.И., Митрофанов Г.М.** Оценка параметров малоамплитудного сброса по сейсмограммам ОГТ // Изв. АН СССР. Сер.: Физика Земли. 1979. № 7. С. 34–41.
- Мадатов А.Г., Митрофанов Г.М., Серeda В.-А.И.** Аппроксимационный подход при динамическом анализе многоканальных сейсмограмм. 1: Модельные представления // Геология и геофизика. 1991. № 10. С. 97–106.
- Макс Ж.** Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях: в 2 т. М.: Мир, 1983. Т. 1. 312 с.
- Мальцев А.И.** Основы линейной алгебры. М.: Наука, 1970. 402 с.
- Митрофанов Г.М.** Совместная оценка линейных факторов в системах наблюдений метода ОГТ // Применение методов вычислительной математики и математической статистики при цифровой обработке данных сейсморазведки. Новосибирск: Изд-во ИГиГ СО АН СССР, 1975. С. 166–186.
- Митрофанов Г.М.** Использование сглаживающих окон при спектральном анализе сейсмических трасс // Геология и геофизика. 1979. № 1. С. 110–123.
- Митрофанов Г.М.** Эффективное представление волнового поля в сейсморазведке // Геология и геофизика. 1980. № 4. С. 135–145.
- Митрофанов Г.М.** Обработка фазовых спектров многоканальных сейсмограмм // Геология и геофизика. 1986. № 10. С. 99–109.
- Митрофанов Г.М.** Обработка логарифмов амплитудных спектров многоканальных сейсмограмм // Алгоритмические проблемы обработки данных сейсморазведки. Новосибирск: Наука, 1987. С. 53–65.
- Митрофанов Г.М.** Псевдоаприорная информация в задаче коррекции частотно-зависимой статистики // Математические проблемы интерпретации данных сейсморазведки. Новосибирск: Наука, 1988. С. 149–168.
- Митрофанов Г.М., Рачковская Н.А.** Формирование априорной информации при анализе и коррекции данных сейсмического метода отраженных волн // Геология и геофизика. 1996. № 3. С. 74–84.
- Митрофанов Г.М., Сергеев В.Н.** Исследование линеаризованной модели для головной волны в связи с задачей обработки данных КМПВ // Геология и геофизика. 1986. № 8. С. 98–108.
- Михальцев А.В., Гогоненков Г.Н.** Коррекция статических поправок при цифровой обработке данных метода общей глубинной точки // Прикладная геофизика. М.: Недра, 1973. Вып. 72. С. 16–47.
- Оппенгейм А., Шафер Р.** Цифровая обработка сигналов. М.: Мир, 1979. 416 с.
- Полшков М.К.** Реакция сейсморегистрирующего канала на единичный толчок в случае гранично-периодического режима во всех его узлах // Прикладная геофизика. М.: Недра, 1971. Вып. 63. С. 3–6.
- Селезнев В.С., Еманов А.Ф.** Пересчет волновых полей головных волн фильтрами Винера // Геология и геофизика. 1998. № 4. С. 536–546.
- Сильвия М.Т., Робинсон Э.А.** Обратная фильтрация геофизических временных рядов при разведке на нефть и газ. М.: Недра, 1983. 247 с.
- Сысоев А.П.** Прикладные задачи компенсации неоднородности верхней части разреза при обработке и интерпретации сейсмических данных. Новосибирск: Изд-во ИНГГ СО РАН, 2011. 90 с.
- Сысоев А.П., Евдокимов А.А.** Коррекция формы сейсмического сигнала в МОВ на основе спектрально-статистического метода (ССМ) // Геология и геофизика. 1986. № 5. С. 94–103.
- Шеффе Г.** Дисперсионный анализ. М.: Наука, 1980. 512 с.
- Bogert V.P., Healy M.J., Tukey J.W.** The quefrency analysis of time series for echoes: cepstrum, pseudo-autocovariance, cross-cepstrum, and saphe cracking // Time Series Analysis / M. Rosenblatt (ed.). N. Y.: Wiley, 1963. P. 209–243.
- Buhl P., Stoffa P.L., Bryan G.M.** The application of homomorphic deconvolution to shallow-water marine seismology. Part II: Real data // Geophysics. 1974. V. 39, N 4. P. 417–426.
- Cambois G., Stoffa P.L.** Surface-consistent deconvolution in the log/Fourier domain // Geophysics. 1992. V. 57, N 6. P. 823–840.
- Childers D.G., Skinner D.P., Kemerait R.C.** The Cepstrum: A Guide to Processing // Proc. IEEE. 1977. V. 65, N 10. P. 1428–1443.
- Douglas S.C., Gupta M., Sawada H., Makino S.** Spatio-temporal fast ICA algorithms for the blind separation of convolutive mixtures // IEEE Trans., Audio, Speech, Language Processing. 2007. V. 15, N 5. P. 1511–1520.
- Haykin S. (ed.)** Blind deconvolution. Prentice Hall: Englewood Cliffs, N. J., 1994. 289 p.
- Jin D.J., Rogers J.R.** Homomorphic deconvolution // Geophysics. 1983. V. 48, N 7. P. 1014–1016.
- Kaprzak W., Okazaki A.** Blind deconvolution of timely-correlated sources by homomorphic filters in Fourier space // Extended abstract of 4<sup>th</sup> Intern. Symposium on Independent Component Analysis and Blind Signal Separation (ICA 2003). Nara: ICA, 2003. 5 p.
- Kundur D., Hatzinakos D.** Blind image deconvolution // IEEE Signal Processing Magazine. 1996. V. 13, N 5. P. 43–64.

- Levin S.A.** Surface-consistent deconvolution // *Geophysics*. 1989. V. 54, N 9. P. 1123–1133.
- Noll A.M.** Short-time spectrum and “cepstrum” techniques for vocal-pitch detection // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1964. V. 36, N 2. P. 296–302.
- Oppenheim A.V.** Superposition in a class of nonlinear systems // M.I.T. Res. Lab. of Electronics, Cambridge, MA, Tech. Rep. 432 (Ph.D. dissertation). 1965. Mar. 31. 62 p.
- Oppenheim A.V.** Non-linear filtering of convolved signals // *Mass. Inst. Technol., Res. Lab. Electron Quart. Progr. Rept.* 80. 1966. P. 168–175.
- Oppenheim A.V., Kopec G.E., Tribolet J.M.** Signal analysis by homomorphic prediction // *IEEE Trans. Acoust., Speech and Signal Processing*. 1976. V. ASSP-24. P. 327–332.
- Oppenheim A.V., Schafer R.W.** From frequency to quefrency: a history of the cepstrum // *IEEE Signal Processing Magazine*. 2004. V. 21, N 9, Is. 5. P. 95–106.
- Oppenheim A.V., Schafer R.W., Stockham T.G.** Nonlinear filtering of multiplied and convolved signals // *Proc. IEEE*. 1968. V. 56, N 8. P. 1264–1291.
- Otis R.M., Smith R.B.** Homomorphic deconvolution by log spectral averaging // *Geophysics*. 1977. V. 42, N 10. P. 1146–1157.
- Petropulu A., Nikias C.** Blind deconvolution using signal reconstruction from partial higher order cepstral information // *IEEE Trans. Signal Process.* 1993. V. 41, N 6. P. 2088–2095.
- Prati A., Mikic C., Trivedi M.M., Cucchiara R.** Detecting moving shadows: algorithms and evaluation // *IEEE Transact. Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2004. V. 25, N 7. P. 918–923.
- Robinson E.A.** Predictive Deconvolution of time series with applications to seismic exploration // MIT Geophys. Anal. Group Report. 1954. N 7.
- Robinson E.A., Treitel S.** *Geophysical signal analysis*. Prentice-Hall, Inc.: Englewood Cliffs, N. J., 1980. 466 p.
- Ronen J.W., Claerbout J.F.** Surface-consistent residual statics estimation by stack-power maximization // *Geophysics*. 1985. V. 50. P. 2759–2767.
- Sarkar S., Dutta P.K., Roy N.C.** A blind-deconvolution approach for chromatographic and spectroscopic peak restoration // *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 1998. V. 47, N 4. P. 558–562.
- Satyam M., Rao V.S., Devy C.G.** Cepstrum analysis – an advanced technique in vibration analysis of defects in rotating machinery // *Defence Science J.* 1994. V. 44, N 1. P. 53–60.
- Schafer R., Rabiner L.R.** System for automatic formant analysis of voiced speech // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1970. V. 47, N 2. P. 634–648.
- Shi-Chang Wooh, Coach Wei.** A homomorphic deconvolution technique for improved ultrasonic imaging of thin composite laminates // *Rev. of Progressive Quantative Nondestructive Testing*, Tompson D.O. and Chimenti D.E. (eds.). N. Y.: Plenum, 1998. V. 17. P. 807–814.
- Stein J.A., Langston T., Larson S.E.** A successful statics methodology for land data // *The Lead. Edge*. 2009. V. 28, N 2. P. 222–226.
- Stockham T.G., Cannon T.M., Ingebretsen R.B.** Blind deconvolution through digital signal processing // *Proc. IEEE*. 1975. V. 63. P. 678–692.
- Stoffa P.L., Buhl P., Bryan G.M.** The application of homomorphic deconvolution to shallow-water marine seismology. Part I: Models // *Geophysics*. 1974. V. 39, N 4. P. 401–416.
- Taner M.T., Koehler F.** Surface consistent corrections // *Geophysics*. 1981. V. 46, N 1. P. 17–22.
- Taner M.T., Koehler F., Alhilali K.A.** Estimation and correction of near-surface time anomalies // *Geophysics*. 1974. V. 39, N 4. P. 441–463.
- Tria M., van der Baan M., Larue A., Mars J.** Wavelet estimation and blind deconvolution of realistic synthetic seismic data by log spectral averaging // *SEG Technical Program Expanded Abstracts*. 2007. V. 26, N 1. P. 1982–1986.
- Tribolet J.M.** *Seismic applications of homomorphic signal processing* // *Signal Processing Series / A.V. Oppenheim (ed.)*. Prentice-Hall, Inc.: Englewood Cliffs, N. J., 1979. 195 p.
- Ulrych T.J.** Application of homomorphic deconvolution to seismology // *Geophysics*. 1971. V. 36, N 4. P. 650–660.
- van Vossen R.** Deconvolution of land seismic data for source and receiver characteristics and near-surface structure: Ph.D. thesis. Utrecht: Utrecht Univ., The Netherlands, 2005. 122 p.
- van Vossen R., Curtis A., Laake A., Trampert J.** Surface-consistent deconvolution using reciprocity and waveform inversion // *Geophysics*. 2006. V. 71, N 2. P. V19–V30.
- van Vossen R., Trampert J.** Full-waveform static corrections using blind channel identification // *Geophysics*. 2007. V. 72, N 4. P. U55–U66.
- Wadsworth G.P., Robinson E.A., Bryan J.G., Hurley P.M.** Detection of reflections on seismic records by linear operators // *Geophysics*. 1953. V. 18, N 3. P. 539–586.
- Wiggins R.A., Lerner K.L., Wisecup R.D.** Residual analysis as a general linear inverse problem // *Geophysics*. 1976. V. 41, N 5. P. 922–938.
- Yilmaz O.** *Seismic Data Analysis: Processing, Inversion and Interpretation of Seismic Data (V. 1, 2)* // *Society of Exploration Geophysicists*. Tulsa, Oklahoma, 2001. 2027 p.
- Zheng G.T., Wang W.J.** A new cepstral analysis procedure of recovering excitations for transient components of vibration signals and applications to rotating machinery condition monitoring // *J. Vibration and Acoustics-Transactions of the ASME*. 2001. V. 123, N 2. P. 222–229.

*Поступила 17 марта 2015 г.,  
в окончательном варианте – 30 марта 2015 г.*

#### КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

*МИТРОФАНОВ Георгий Михайлович* – кандидат физико-математических наук, доцент Новосибирского государственного университета, ведущий научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.  
Тел.: +7 (383) 333 45 56, e-mail: georgymitrofanov@rambler.ru