



СОВМЕЩЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ С РЕАЛЬНЫМИ СЕЙСМИЧЕСКИМИ НАБЛЮДЕНИЯМИ

Г.М. Митрофанов

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

Принципиальным для эффективной реализации теоретических решений на практике представляется рассмотрение возможностей их оптимального совмещения с данными, получаемыми в реальном эксперименте. Подобные исследования желательнее проводить с двух позиций: преобразования наблюдений с целью их лучшего соответствия модельным построениям и анализ влияния характерных свойств реального эксперимента на теоретическое решение. В качестве преобразования, обеспечивающего лучшее соответствие исходных данных моделям, положенным в основу решения обратных задач, предлагается использовать структурную декомпозицию среды и наблюдаемого волнового поля. Она позволяет трансформировать волновое поле, отвечающее сложно построенной трехмерной модели, к набору локальных квазиодномерных моделей целевых объектов с идеальными условиями возбуждения и приема сейсмических колебаний. Данный подход был положен в основу спектрально-статистического метода, а затем развивался при разработке технологии сложной сейсмической декомпозиции. В результате происходит формирование новых выборок наблюдений в форме “псевдосейсмограмм”, отвечающих локальным объектам среды. Эти сейсмограммы используются при реализации решения обратной задачи в спектральной или временной области. В процессе подготовки “псевдосейсмограмм” осуществляется декомпозиция сигналов, позволяющая устранить вариации формы сигнала, связанные с изменениями условий возбуждения и приема, а также их прохождением через покрывающую среду.

Преобразование сейсмических наблюдений, декомпозиция среды и волнового поля, лучевое трассирование, многомерная гомоморфная фильтрация, “псевдосейсмограмма”, объектно-ориентированные обратные задачи

THEORETICAL SOLUTIONS COMBINATION WITH REAL SEISMIC OBSERVATIONS

G.M. Mitrofanov

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

It is fundamental for the effective application of theoretical solutions in practice to consider the way of their optimal compatibility with the data obtained in a real experiment. There are two promising ways to carry out such a research: to transform the observations to enhance their compatibility with the model assumptions and to analyse the influence of a real experiment properties on the theoretical solution. As the transformation that provides the best match of initial data to models, which are used for inverse problems solutions, it is proposed to use the structural decomposition of the investigated medium and the observed wave field, corresponding to a complicated three-dimensional model, into the set of local quasi-one-dimensional models of target objects with ideal conditions for seismic source and receiver. This approach was used as a basis for the spectral-statistical method, and after that was developed with the creation of complex seismic decomposition technology. The result is the formation of new sets of observations in the form of “pseudo seismograms”, corresponding to the local objects of the medium. These seismograms are used in the implementation of the inverse problem solution in spectral or time domain. In the process of preparing a “pseudo seismograms” the decomposition of signals to eliminate variations in the waveform associated with changes in the conditions of excitation and reception of seismic signal as well as their transmission through the medium is carried out.

The transformation of seismic observations, decomposition of the medium and wave field, ray tracing, multi-dimensional homomorphic filtering, “pseudo seismogram”, objects inverse problems

ВВЕДЕНИЕ

За последние десятилетия в области теоретических решений прямых и обратных задач сейсмики достигнут значительный прогресс, который слабо реализуется на практике. Исследованию некоторых аспектов этой проблемы с точки зрения учета особенностей реального эксперимента в теоретическом решении задачи была посвящена работа [Митрофанов, Приймченко, 2012]. В ней рассматривалась проблема совмещения спектров, которые строятся на основе теоретического реше-

ния прямой задачи, со спектрами, рассчитываемыми по наблюдаемым сейсмограммам. Вопросы, относящиеся к этой проблеме, являются основополагающими для практической реализации алгоритмов решения обратной задачи в спектральной области. Однако имеется еще несколько серьезных моментов, обуславливающих значительное отличие реального эксперимента от предлагаемого теоретического решения. Так, в теоретическом решении прямой задачи предполагается

однородность покрывающей среды и неизменность условий возбуждения и регистрации сигналов, что совершенно невыполнимо в реальном эксперименте. Можно даже утверждать, что практически невозможно проведение контролируемых натуральных экспериментов, сохраняющих в полном объеме форму входного сейсмического сигнала. Кроме того, реальная среда не является горизонтально-слоистой, как того требует теоретическая модель, даже в таких идеальных седиментационных бассейнах как Западно-Сибирская платформа. Наличие указанных несоответствий теоретических моделей реальной среде обуславливает резкую неустойчивость решения обратной задачи в полной постановке по реальным данным. Поэтому появляется необходимость в предварительной обработке сейсмограмм, которая устраняет указанные отличия.

Специалистам, занимающимся обработкой реальных наблюдений, хорошо известна необходимость использования различных преобразований, обеспечивающих приемлемые для интерпретации результаты. Однако в большинстве случаев процесс обработки не согласуется с моделями, заложенными в решение прямой теоретической задачи и используемыми в рафинированных постановках обратных задач. Как правило, теоретические модели ориентированы на определенные, выделенные сложности в строении среды. Реальные же данные включают в себя всю сложность среды и наблюдаемых процессов распространения в ней упругих колебаний. Эта сложность не позволяет до настоящего времени строить теоретические решения обратных задач для моделей, обеспечивающих определение параметров всей исследуемой среды с требуемой точностью. В то же время большое количество практических задач и не требуют изучения всей среды. Часто эти задачи ориентированы на целевые объекты, которыми могут являться продуктивные горизонты, очаговые зоны и т. п., что существенно упрощает и постановку рафинированной математической задачи.

Таким образом, возникает серьезная проблема согласования процесса обработки данных с моделями, положенными в основу теоретических решений. При этом требуется, минимально искажая особенности наблюдений, которые являются важными для теоретического решения, максимально устранить те неоднородности данных, которые не учитываются теоретическими модельными предположениями. Такая позиция сразу ограничивает использование упрощенных схем обработки при исследовании сложнопостроенных сред и выполнении работ с многокомпонентными наблюдениями, когда требуется рассматривать упругие модели. В настоящей статье предлагается некоторая общая схема, позволяющая улучшить обработку сейсмических данных, с целью подготовки входной информации для решения обратных динамических задач, ориентированных на целевые объекты среды, в частности, тонкослоистые пачки.

Одна из главных идей схемы является традиционной для сейсморазведки. Она состоит в том, что контрастные элементы среды дают наиболее значимый для интерпретации вклад в волновое поле. Это соображение носит явный эвристический характер и связано с принципом локальности вторичных источников. Однако оно позволяет изучать характеристики контрастных элементов среды, выделив в волновом поле связанные с ними составляющие, например наборы отраженных волн монотипного и немонотипного видов. Такие идеи составляют основу почти всех способов

обработки, нацеленных на выделение фиксированных отражений и способов кинематической интерпретации, включая решение обратных кинематических задач.

В результате процедуры структурной декомпозиции среды и волнового поля дают возможность выделить из общей структуры регистрируемых колебаний отраженные волны требуемых типов (к примеру *PP* и *PS*). Также они позволяют учитывать изменения формы выделяемых отраженных сигналов, связанные с неоднородностью как областей возбуждения и приема, так и среды прохождения до отражающего целевого объекта. Одновременно удается приблизить модель среды для изучаемого локального объекта к теоретической модели, в частности, к одномерной, как это было реализовано в технологии сложной сейсмической декомпозиции (CSD) [Mitrofanov et al., 1993]. В некотором смысле такая декомпозиция отвечает преобразованию исходного волнового поля, отвечающего сложной упругой 3D модели, к набору локальных 1D моделей с идеальными условиями возбуждения и приема сейсмических колебаний. Подобное преобразование можно считать развитием идей изменения структуры выборки при анализе и обработке многократных систем наблюдений. Простейшим примером таких преобразований является переход от выборки с общей точкой источника к выборке с общей центральной точкой или формирование “косых” выборок при обработке обменных волн. При этом в случае структурной декомпозиции обеспечивается переход к выборке наблюдений, отвечающей точке отражения от локальной области среды и набору углов подхода отраженных волн для этой же области среды.

СТРУКТУРНАЯ ДЕКОМПОЗИЦИЯ ВОЛНОВОГО ПОЛЯ И СРЕДЫ

Во введении указывалось, что в основе декомпозиции среды и наблюдаемого волнового поля на составляющие, отвечающие контрастным локальным особенностям строения среды, лежат эвристические соображения, позволяющие детально изучать характеристики выделяемых локальных объектов в рамках решения различных обратных задач. Развитию этой идеи большое внимание уделял Сергей Васильевич Гольдин. При этом обратная динамическая задача для целевых объектов среды может быть сведена к следующему многоуровневому процессу, использующему полные совокупности наблюдений как профильного, так и площадного вида, а также априорную информацию о строении среды.

Первый уровень представляет собой декомпозицию наблюдаемого волнового поля с выделением в нем составляющих, связанных с целевыми объектами. Он содержит построение каркасной макромодели среды на основе имеющейся априорной геологической и сейсмической информации. Это позволяет использовать лучевой метод для идентификации и выделения требуемых волновых объектов. При этом обеспечивается учет геометрии лучей на участках между изучаемыми объектами, а также основных динамических характеристик, связанных с изменением сейсмической энергии в процессе распространения выделяемых волн за счет расхождения фронта, кривизны границ и т. п.

Второй уровень является декомпозицией формы сейсмических сигналов на мультипликативные составляющие, отвечающие влиянию поверхностных неоднородностей, а также среды прохождения сигнала и локального отражающего объекта. В результате такой

декомпозиции оцениваются: форма падающего сейсмического импульса и спектральная (импульсная) характеристика отражающего целевого объекта. При этом может быть построен и оператор учета влияния верхней части среды, который включает в себя особенности, связанные как с неоднородностью условий возбуждения и приема сейсмических колебаний, так и со средой прохождения. Он может выступать в роле корректирующего оператора по отношению к форме сигналов для выделяемых волн.

Третий уровень заключается в непосредственном решении локальной обратной динамической задачи для той или иной структуризации отражающего объекта, включая различные теоретические модели (упругие, упругопластичные, локально-разрывные и др.). При этом более обосновано может быть использовано квазиодномерное описание для целевого объекта и применено соответствующее решение обратной задачи в линеаризованной или полной постановке. Получаемые в результате уточнения локальных объектов параметры могут рассматриваться и как последующая итерация в решении глобальной обратной задачи по отношению к макромоделю среды.

Термин *структурная декомпозиция* отображает суть предлагаемого процесса преобразования исходных данных при их подготовке для решения объектно-ориентированных обратных задач сейсмологии, к которым, в частности, относятся и задачи по определению параметров локально одномерных тонкослоистых пачек. При реализации этого процесса используются структура макромоделей и структура наблюдений для построения лучевых схем. Затем лучевые схемы используются для отбора наблюдений, содержащих информацию о локальной области среды. В результате модифицируется структура наблюдений с целью обеспечения наибольшей направленности на локальный объект. Это может быть представлено как разложение наблюдаемого волнового поля $U(X_s, X_r, t)$ в сумму волн, отвечающих фиксированным элементам среды и лучевому параметру $W(Z_e, p, t)$. При этом X_s, X_r, Z_e определяют,

соответственно, положение источника, приемника и локального элемента среды, p является лучевым параметром для соответствующего типа волны, а t – временная переменная. Результаты декомпозиции, представленные в виде новых наборов наблюдений или обобщенных сейсмограмм, могут быть использованы для решения обратных задач. Например, путем интерполяции и формирования “псевдосейсмограмм”, отвечающих фиксированной области отражения, определяемой нормальным лучом, и углами падения, которые однозначно связываются с удалениями от точки выхода нормального луча на поверхность наблюдений. Это позволяет перейти к решению локальной одномерной задачи во временной или спектральной области.

Одна из первых реализаций общей идеи предлагаемого многоуровневого процесса решения обратных динамических задач для локальных целевых объектов по реальным сейсмическим данным представлена на рис. 1. Она использовалась в аппроксимационном подходе при динамическом анализе многоканальных сейсмограмм [Мадатов и др., 1991] и привела к созданию CSD-технологии [Mitrofanov et al., 1993]. Здесь структурная макромоделю, определяющая “каркасную” часть среды, задается посредством опорных границ, которые выделяют значимые блоки (толстые слои) с параметрами m_n , где n определяется номером блока. В векторе m могут содержаться акустические или упругие параметры. На рисунке видно, что использование структурной макромоделю среды и лучевых схем, построенных на базе этой модели для заданных типов волн и имеющейся многократной системы наблюдений, позволяет свести общую обратную задачу к нескольким обратным задачам по отношению к целевым тонкослоистым локальным объектам. Одновременно удаётся трансформировать процесс распространения волн в сложно построенной модели среды для отдельных наблюдений (см. рис. 1, а) в процесс распространения волн в локально одномерных моделях при выборе соответствующих наблюдений из общей системы, отвечающих требуемым углам падения и точкам от-

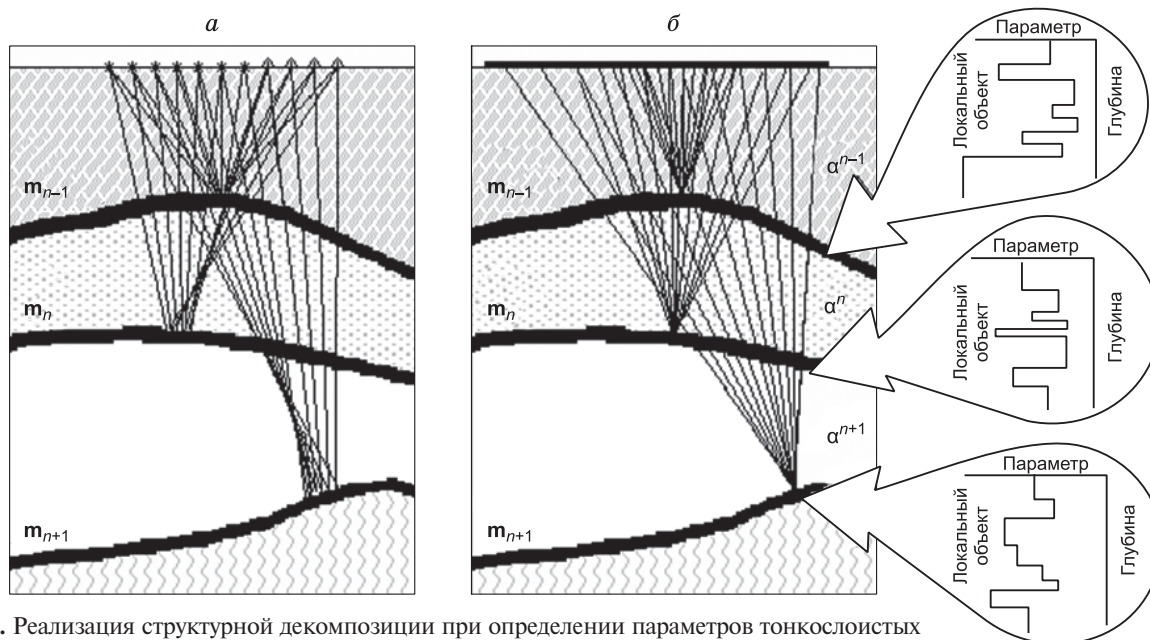


Рис. 1. Реализация структурной декомпозиции при определении параметров тонкослоистых объектов: макромоделю среды и лучевые схемы, отвечающие фиксированным наблюдениям (а); отбор наблюдений для целевых объектов по точкам отражения и углу падения (б).

ражения (см. рис. 1, б). При таком подходе эффективно используется вся информация, которая была получена на предыдущих этапах обработки и интерпретации многокомпонентных данных. Также удается получать информацию о среднелучевом параметре затухания α^n внутри блоков макромодели. Кроме того, обеспечивается разделение и дополнение двух основных подходов в сейсмическом методе исследований: кинематическом и динамическом.

Остановимся на главных моментах рассматриваемого процесса. На первом уровне ключевую роль играют методы кинематической интерпретации и лучевого трассирования. Их развитию в теории и практике сейсмического метода уделялось большое внимание на протяжении значительного времени [Алексеев, Гельчинский, 1959; Пузырев, 1959, 1979; Гольдин, 1979; Cerveny, 2001; Yilmaz, 2001]. Следует подчеркнуть, что в развитии этих методов основополагающую роль сыграли школы советских геофизиков.

Таким образом, при обработке любого реального сейсмического материала в рамках современных обрабатывающих комплексов всегда существует достаточно информации, позволяющей задать структуру среды в некотором приближении и построить соответствующую макромодель. При таких построениях существенным будет описание и построение блочных моделей сред с возможностями для автоматического формирования кода луча и анализа петлевых ситуаций, возникающих при трассировке лучей в моделях такого типа. Указанные задачи удалось решить в процессе развития рассматриваемого подхода [Курдюкова и др., 2004] путем построения соответствующих алгоритмов и программ, позволяющих задавать требуемые модели и осуществлять в них трассировку лучей для различных типов волн и систем наблюдений.

На рис. 2 показано использование этих программ для идентификации и отбора волн: *PP* (рис. 2, а), *PS* (рис. 2, б) при обработке профильной системы наблю-

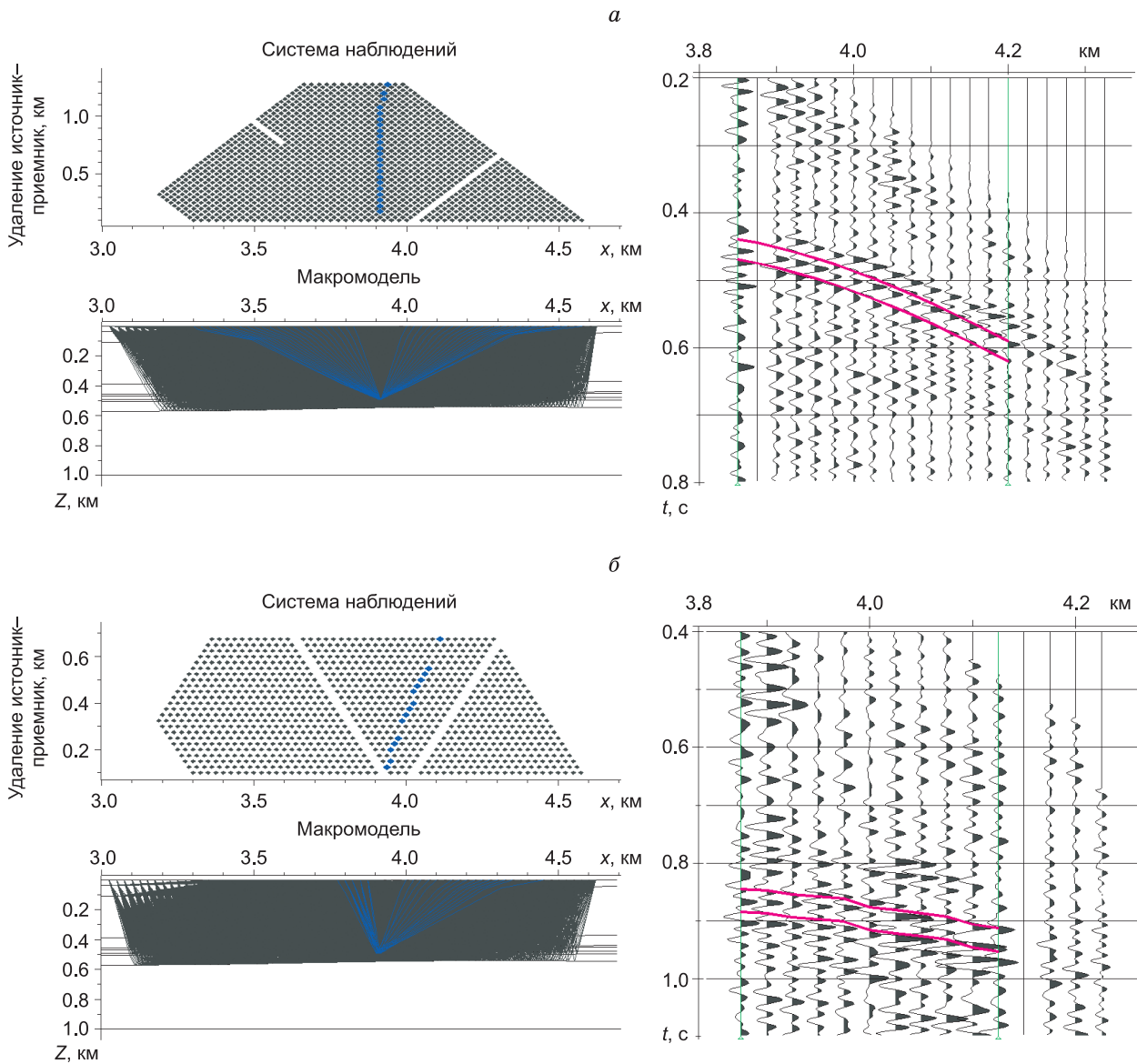


Рис. 2. Отбор волн заданного типа: *PP* (а) и *PS* (б) из исходных сейсмограмм на основе разработанных процедур, использующих лучевой метод и каркасную макромодель среды. На каждом из рисунков показана система наблюдений с отбираемыми трассами, макромодель с лучевыми схемами и “псевдосейсмограмма” сформированная на основе отобранных трасс.

дений. Здесь отчетливо проявляется существенное различие в отборе указанных типов волн как по структуре исходных наблюдений, так и исходного волнового поля на реальных сейсмограммах, из которых отбираются соответствующие трассы для формирования “псевдосейсмограммы”. На формируемых сейсмограммах отмечены временные интервалы, где содержатся отраженные сигналы от локальных областей среды, отвечающих точкам отражения, указываемых лучами синего цвета.

Отбор интервалов трасс, содержащих отраженные сигналы от целевых объектов среды, играет важную роль в процессе преобразования данных, выполняемом на втором уровне декомпозиции. Здесь ключевыми являются методы многомерной гомоморфной фильтрации. Подробный обзор этих методов и возможности их применения в сейсморазведке дан в работе [Митрофанов, 2015]. Отметим, что методы пока не нашли широкого распространения в стандартных пакетах обработки (исключая упрощенный вариант поверхностно-согласованной деконволюции). Только в последнее время к ним начали проявлять повышенный интерес, осознавая важность детального динамического анализа регистрируемых сейсмических сигналов. Указанные методы преобразуют форму сейсмических сигналов, которые отвечают целевым объектам и относятся к отобраным временным интервалам, позволяя определить сигнальные составляющие, связанные с локальными объектами среды. При этом устраняются составляющие, обусловленные изменениями условий возбуждения и приема сейсмических колебаний и влиянием промежуточной среды до и после акта отражения. Также в процессе определения целевой сигнальной составляющей дополнительно подавляются различного рода аддитивные помехи, которые могут присутствовать в отобраных интервалах. В результате получаем модифицированную форму сигналов, падающих на целевой локальный объект, относительно которого, с хорошим приближением, можно считать, что он помещен в однородную среду. Эти сигналы или их спектры используются как входные данные при решении объектно-ориентированной обратной задачи. Впервые указанная декомпозиция формы сигнала использовалась в спектрально-статистическом методе учета поверхностных неоднородностей [Гольдин, Митрофанов, 1975].

Одной из простейших модификаций оператора, устраняющего влияние верхней части среды (ВЧС) и получаемого на втором уровне декомпозиции, является $R_{ij}^{up-1}(t) = \hat{s}_i^{-1}(t) * \hat{r}_j^{-1}(t)$, где $\hat{s}_i(t)$, $\hat{r}_j(t)$ представляют собой построенные по имеющимся наблюдениям $y_{ij}(t)$ оценки факторов в источниках и приемниках. В качестве наблюдений $y_{ij}(t)$ выступают уже не исходные трассы, а отобраные интервалы, содержащие отраженные сигналы от фиксированных границ макромодели. Требуемые оценки $\hat{s}_i(t)$, $\hat{r}_j(t)$ могут быть получены в рамках простейшей модели отраженного сигнала или несколько усложненной четырехфакторной модели [Митрофанов, 2015]. Воздействие этого оператора на заданное наблюдение $y_{ij}(t)$ обеспечивает нам получение информации о целевом объекте среды в фиксированной точке отражения с номером k : $G_k(t) = R_{ij}^{up-1}(t) * y_{ij}(t)$, которая может быть использована при решении соответствующей обратной задачи. Очевидно, что для реальных моделей сред и возникающих обратных задач структура мультипликативной

факторной модели будет существенно сложнее, поэтому и оператор, устраняющий влияние ВЧС, требует более сложного построения.

Выбор алгоритма решения обратной задачи для третьего уровня схемы определяется интерпретационной задачей, а также имеющимися возможностями рафинированных постановок. Так, уровень соответствующих разработок начала 90-х гг. позволил использовать только методы частотного AVO-анализа и параметрического обращения матричного метода [Мадатов и др., 1992]. Ниже приведены примеры, использующие современные решения, отвечающие полной системе упругости для тонкослоистой модели среды.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПАРАМЕТРОВ ТОНКОСЛОИСТЫХ ОБЪЕКТОВ

Модельные эксперименты были проведены для демонстрации важности структурной декомпозиции даже на уровне синтетических данных. Они показывают, насколько определяющим является такое преобразование при подготовке исходной информации для решения обратной задачи. При моделировании в качестве базовой бралась макромодель среды, построенная по реальным сейсмическим данным, полученным по одному из профилей в районе работ фирмы “Петробраз” на шельфе Бразилии. Часть соответствующей макромодели показана на рис. 3. На ней изображены основные отражающие горизонты, а также представлены значения упругих параметров для толстых слоев макромодели среды. Здесь же показано положение двух разведочных скважин, которые использовались для выбора моделей тонкослоистых объектов по целевым горизонтам. Положение трех объектов выделено на рисунке красными овалами с соответствующими номерами. Внутри выделенных областей для каждого из рассматриваемых объектов показаны вариации упругих параметров: V_p , V_s , ρ , которые отвечали соответствующим тонкослоистым объектам (синим цветом изображены вариации V_p , красным – V_s и фиолетовым – ρ). Модели объектов по своей структуре отвечали типам тонкослоистых моделей, которые использовались в работе [Митрофанов, Приймак, 2012].

Представленная макромодель среды и модели локальных объектов использовались для построения модельных сейсмограмм. При этом применялся эффективный метод решения прямой задачи, описание которого приведено в указанной работе. С целью структурной декомпозиции модельного волнового поля на базе макромодели среды также выполнялось построение лучевых схем, используемых в дальнейшем при идентификации и отборе отраженных волн, отвечающих целевым объектам среды. Пример таких схем для целевого объекта I, который был связан со второй границей (горизонт Albacoga) и располагался по профилю в районе координат X (23.0–23.5 км), приведен на рис. 4, б. Схемы рассчитывались для двух типов волн (PP , PSP) и отвечали 48-канальной многократной системе наблюдений, содержащей 21 источник. При этом первый источник был расположен в точке профиля с координатой $X = 22.0$ км, а расстояние между источниками составляло 100 м. Расстояние между приемниками равнялось 25 м. Таким образом, данная система наблюдений покрывала всю возможную область целевого объекта, как показано на рис. 4, а.

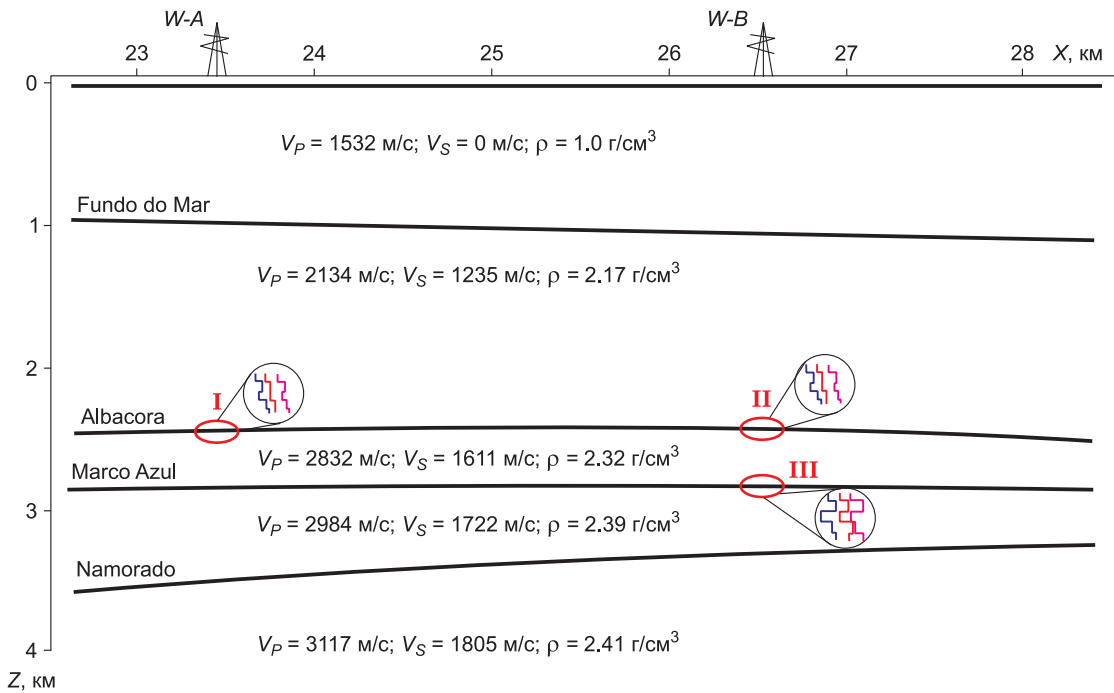


Рис. 3. Часть макромодели среды с выделенными тремя целевыми тонкослоистыми объектами, отвечающими исследуемым горизонтам и положениям разведочных скважин.

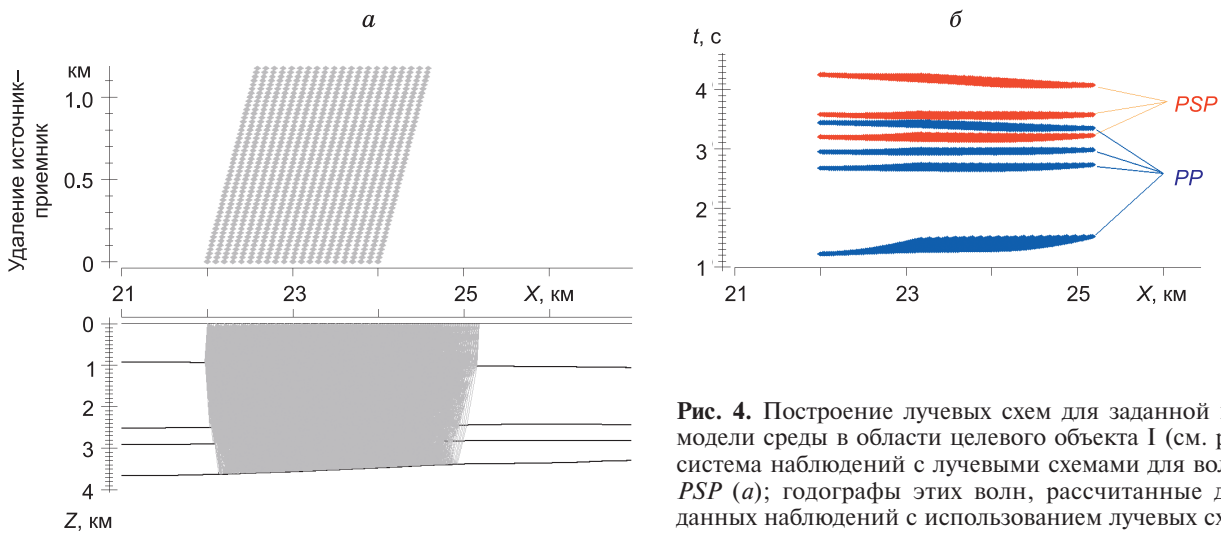


Рис. 4. Построение лучевых схем для заданной макромодели среды в области целевого объекта I (см. рис. 3): система наблюдений с лучевыми схемами для волн: PP, PSP (а); годографы этих волн, рассчитанные для заданных наблюдений с использованием лучевых схем (б).

Построенные лучевые схемы дают возможность определить времена прихода рассматриваемых волн, которые представлены на рис. 4, б. Они не только обеспечивают точную идентификацию каждого типа волны, что показано на данном рисунке, но и определяют возможные интервалы анализа данных волн. Также они позволяют уточнить скоростные характеристики этих волн, что может быть использовано на этапах выделения волн, в частности, при проведении оптимальной ФК-фильтрации.

Еще одним важным прикладным аспектом построенных лучевых схем является использование характеристик лучей для расчета модельных сейсмограмм, которые дают возможность лучше понять особенности выделяемых волн.

На рис. 5 приведены примеры модельных сейсмограмм, которые отвечали указанной системе наблюдений. Использование информации о временах прихода волн позволяет точно идентифицировать все наблюдаемые сигналы на этих сейсмограммах. При этом можно проанализировать амплитуды и динамические особенности этих сигналов. В частности, соотношение амплитуд различных типов волн. Например, приведенные сейсмограммы показывают, начиная с каких удалений амплитуды сигналов, которые отвечают целевой обменной волне PSP_2 , будут сопоставимы с монотипными отраженными волнами, имеющими близкие времена прихода. Последнее может оказать существенное влияние на отбор исходных сейсмических трасс из общей системы наблюдений.

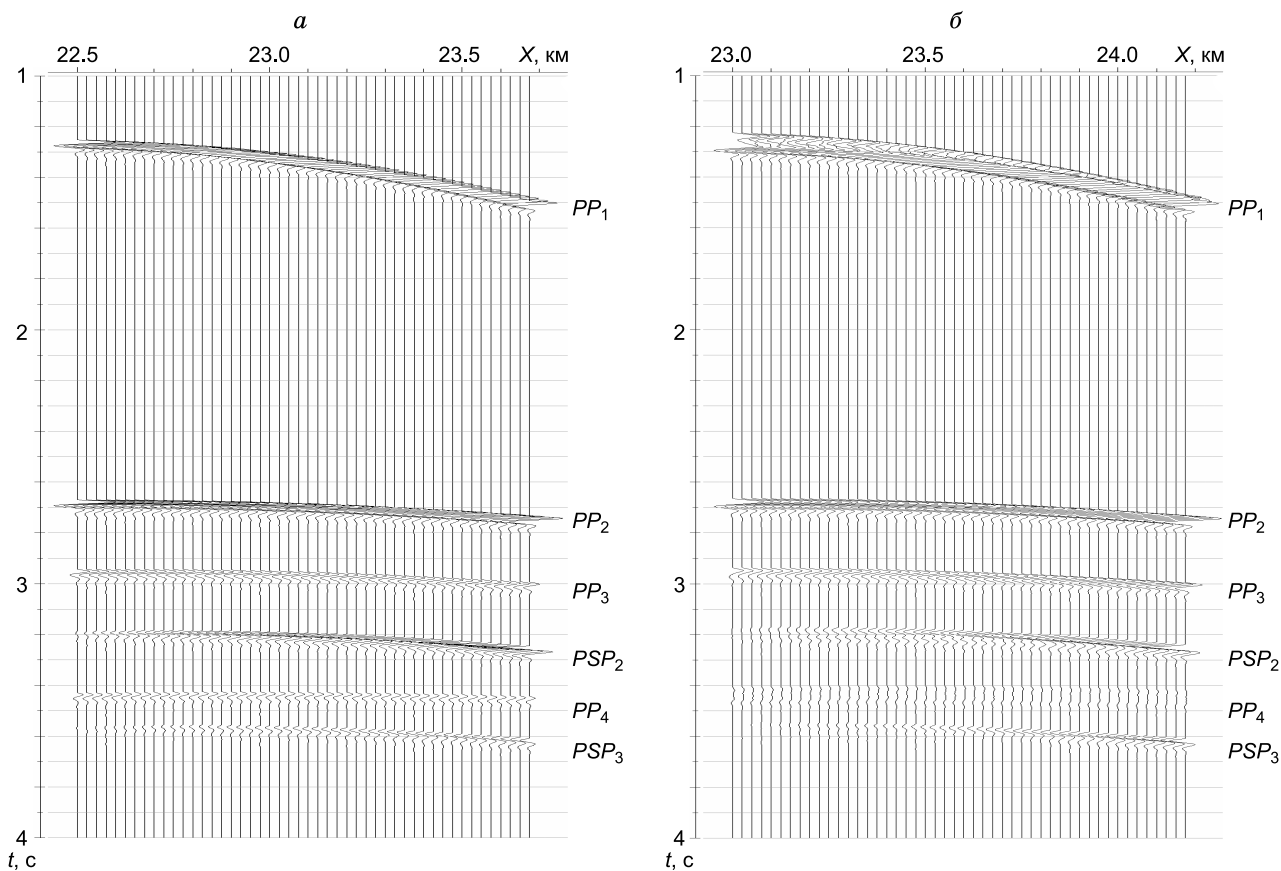


Рис. 5. Примеры сейсмограмм, рассчитанных для многократной системы наблюдений на основе лучевого метода и содержащих только два типа отраженных волн PP и PSP . Сейсмограммы отвечали источникам, расположенным в точках профиля наблюдений с координатами $X = 22.5$ (а) и 23 км (б).

Лучевые схемы дают возможность рассмотреть особенности самого отбора целевых временных интервалов, содержащих отраженные сигналы от области объекта. Например, если предполагаемый объект, относящийся ко второй границе (горизонт *Albasoga*, см. рис. 3), расположен в точке профиля с координатой $X = 23.2$ км, то мы можем проанализировать, какая будет структура отбираемых наблюдений для заданного типа волн.

Так, для заданной системы наблюдений при возможном изменении точки отражения вдоль линии горизонта ± 2 м от координаты $X = 23.2$ км нам требуется отобрать 16 сейсмотрасс, где должны наблюдаться соответствующие сигналы. Отбираемые наблюдения показаны на рис. 6, а слева. Здесь отчетливо проявляется конус отбора наблюдений, связанный с несимметричностью годографа обменной волны, а сигналы, отвечающие двум типам волн (PP , PSP), будут относиться к различным наблюдениям. При этом в отбираемых наблюдениях (сейсмических трассах) имеем только шесть сигналов, относящихся к отраженной PP -волне (левая часть рис. 6, б). Для обменной волны PSP_2 мы можем иметь несколько большее число целевых сигналов (левая часть рис. 6, в).

Однако, отмеченная выше малая амплитуда обменной волны на ближних каналах скорее всего не позволит получить хорошее качество этих сигналов для реальных данных. Поэтому для обменной волны число реально используемых сигналов также будет очень незначительным. Такая особенность отбора данных мо-

жет оказать существенно влияние на устойчивость решения, как в задаче декомпозиции формы сигналов, так и в обратной задаче в целом.

Существенным моментом в отборе данных может оказаться расширение области отражения целевого объекта, куда могут относиться соответствующие лучи. В правой части рис. 6 показана структура отбираемых наблюдений, когда соответствующая область имеет вариации ± 100 м от точной координаты объекта. Видно, насколько существенно в этом случае увеличивается число отбираемых сигналов по каждому типу волн (общее число возможных сигналов превышает 100), которые могут войти в формируемую “псевдо-сейсмограмму”. При этом расширение области может быть обосновано с учетом зоны Френеля, влияющей на формирование отраженного сигнала. Однако в реальных ситуациях ширина области отбора может быть ограничена априорными сведениями о возможных значительных латеральных изменениях свойств отражающего горизонта. Поэтому при наличии такой информации построенные лучевые схемы могут быть использованы для нахождения оптимальной ширины области отбора отраженных сигналов, которая позволяет обеспечить наибольшее количество наблюдений при возможных вариациях пространственной координаты вдоль границы.

Отобранные наблюдения, совместно с характеристиками лучей, позволяют достаточно просто осуществить отбор требуемых временных интервалов, содержащих соответствующие сигналы. На рис. 7 приведены

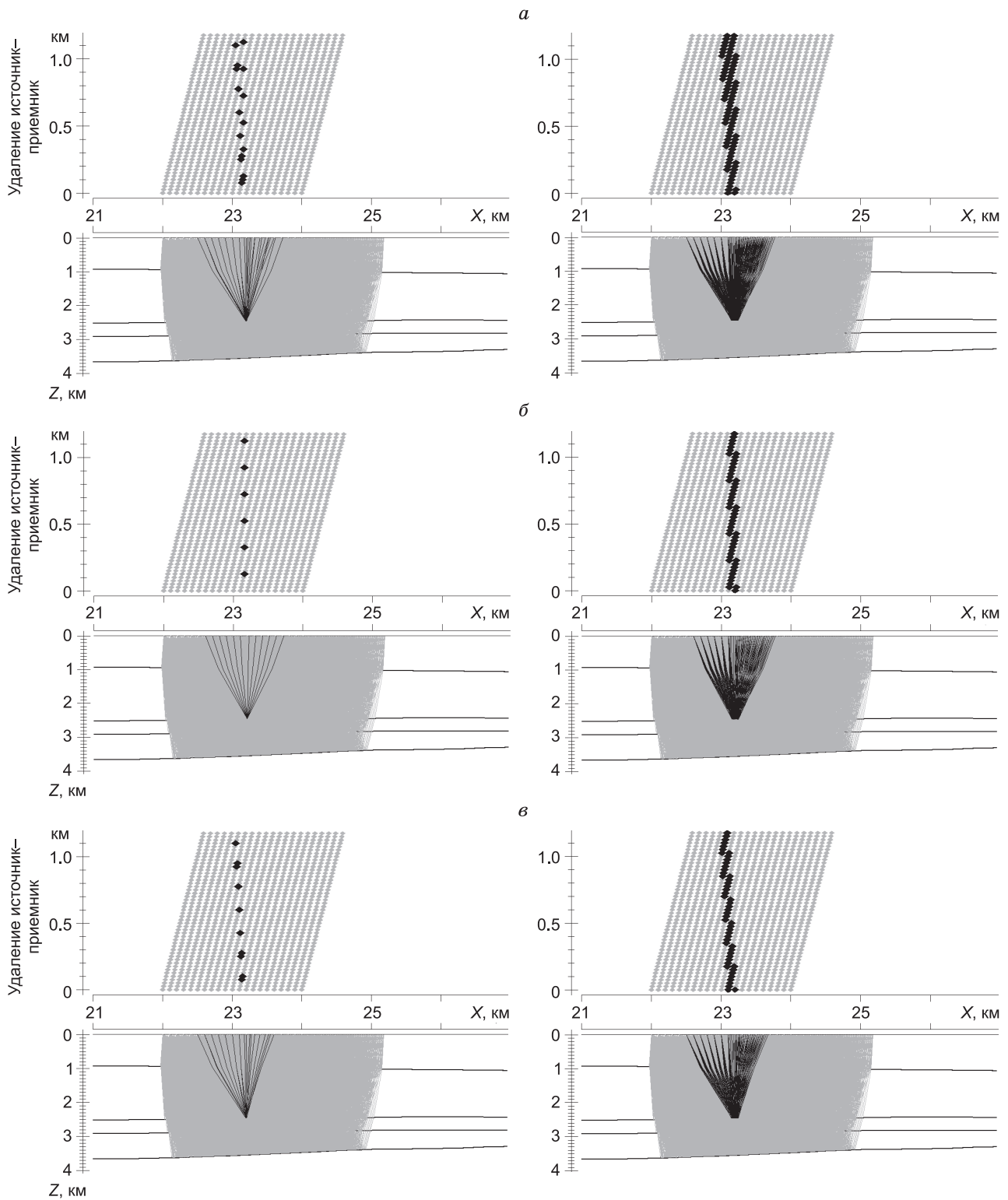


Рис. 6. Отбор лучей и наблюдений, отвечающих целевому объекту I (см. рис. 3) в точке с координатой $X = 23.2$ км (слева) и по области 200 м с центром $X = 23.2$ км (справа) для комплекса отраженных волн PP и PSP (а), а также отдельно для PP (б) и PSP (в) волн.

примеры отобранных интервалов для рассматриваемого модельного эксперимента, когда использовалась широкая область анализа отраженных лучей для целевого объекта. Здесь отчетливо видно, что для сейсмограммы, отвечающей источнику с координатой $X =$

$= 22.5$ км (см. рис. 7, а), сигналы обменной волны PSP_2 имеют высокую амплитуду, что должно обеспечить и высокое соотношение сигнал/помеха на реальных трассах. Поэтому они могут быть включены в исходную информацию. Для сейсмограммы, отвечаю-

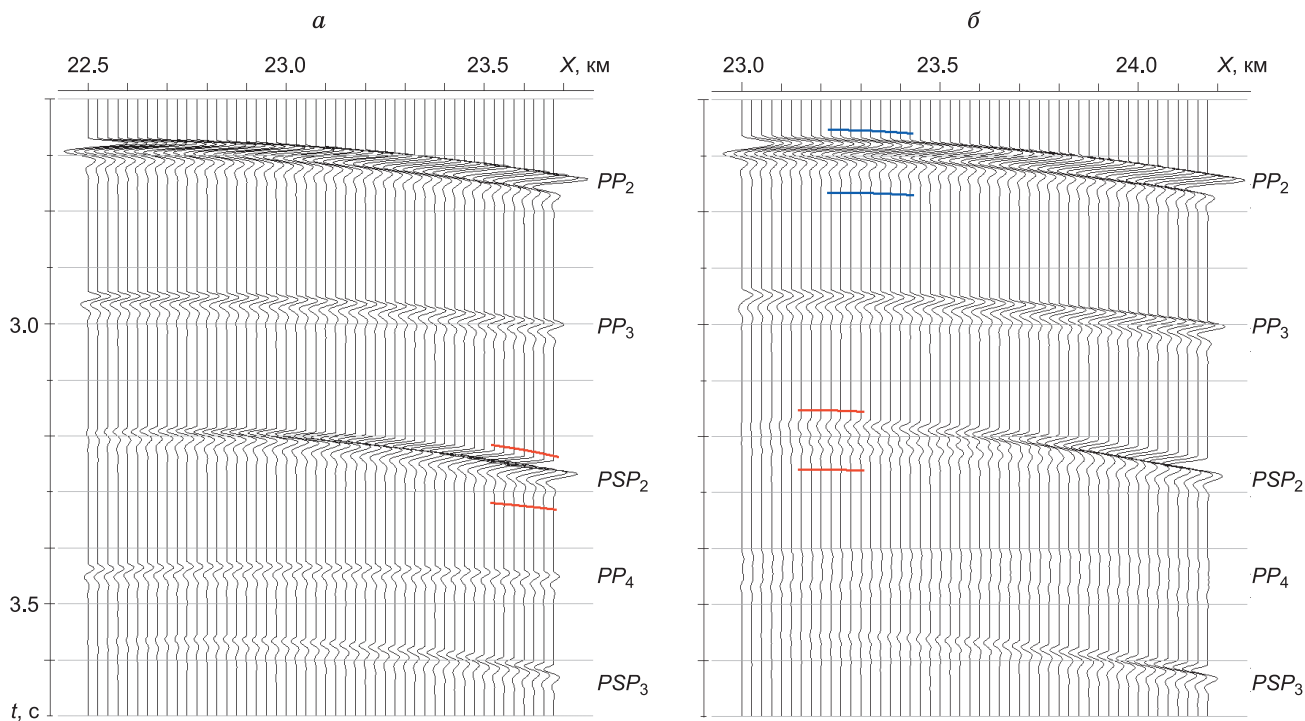


Рис. 7. Примеры выделения интервалов, отвечающих целевому объекту I (см. рис. 3), по области 200 м с центром $X = 23.2$ км для комплекса отраженных волн PP и PSP на модельных сейсмограммах. Выделяемые интервалы относились к сейсмограммам с источниками, расположенными в точках профиля наблюдений с координатами $X = 22.5$ (а) и 23 км (б).

щей источнику с координатой $X = 23.0$ км (рис. 7, б), ситуация будет совершенно иная. Здесь имеет смысл проводить отбор сигналов только для PP -волн.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАПРАВЛЕННОСТИ ИСТОЧНИКА

В рамках представленных модельных экспериментов также были проведены исследования по учету формы падающего импульса и характеристики направленности источника при решении обратных задач. В экспериментах использовались сейсмограммы, рассчитанные для моделей всех трех локальных объектов, которые показаны на рис. 3. Расчет сейсмограмм осуществлялся на основе эффективного метода решения прямой задачи для тонкослоистой упругой модели среды [Mitrofanov et al., 2009]. Выполненные эксперименты показывают, что неучет соответствующих характеристик в рассчитываемых спектрах формируемых сейсмограмм и отдельных отраженных сигналов может приводить к неточному или даже неверному решению обратной задачи в спектральной области. Это в первую очередь связано со значительным различием сопоставляемых теоретических и рассчитываемых спектров, что существенно ухудшает свойства минимизируемого целевого функционала, как демонстрировалось в работе [Митрофанов, Прийменко, 2012].

Проводимые эксперименты выполнялись следующим образом. На основе модели целевого объекта рассчитывалась модельная сейсмограмма с использованием полного решения прямой динамической задачи в спектральной области для заглуженного источника в виде центра расширения. Затем построенные сейсмограммы использовались для отбора сигналов, отвечающих определенным целевым объектам и типам

волн. Отобранные сигналы выступали в качестве входных данных для определения спектральных характеристик. Такой подход полностью отвечает широко используемой на практике динамической инверсии и может быть рассмотрен с точки зрения линейаризованного решения обратной динамической задачи, которое предлагалось в предыдущем проекте. Существенным здесь являлось то, что при расчете синтетических сейсмограмм использовалось полное решение, учитывающее все особенности формируемого волнового поля, а при сопоставлении рассчитываемых и теоретических спектров применялось линейаризованное решение, построенное на основе потенциалов для определенного типа волн. Для такого линейаризованного решения важным является знание формы импульса, падающего на локальный тонкослоистый объект. Таким образом, в рамках модельного эксперимента удавалось проанализировать некоторые особенности, которые могут возникать при обработке реальных многокомпонентных данных.

При построении модельных сейсмограмм во всех рассматриваемых экспериментах использовалась 24-канальная левофланговая расстановка. При этом первый прибор находился непосредственно над источником. Расстояние между приборами составляло 50 м. Таким образом, максимальное удаление равнялось 1150 м. В качестве исходного сигнала всегда брался импульс Берлаге, который наилучшим образом соответствовал сигналам, наблюдаемым на реальных сейсмограммах. Форма этого импульса видна на рис. 7. Отбор требуемых отраженных сигналов из мультикомпонентных модельных сейсмограмм, отвечающих Z - и X -компонентам, осуществлялся с использованием алгоритмов

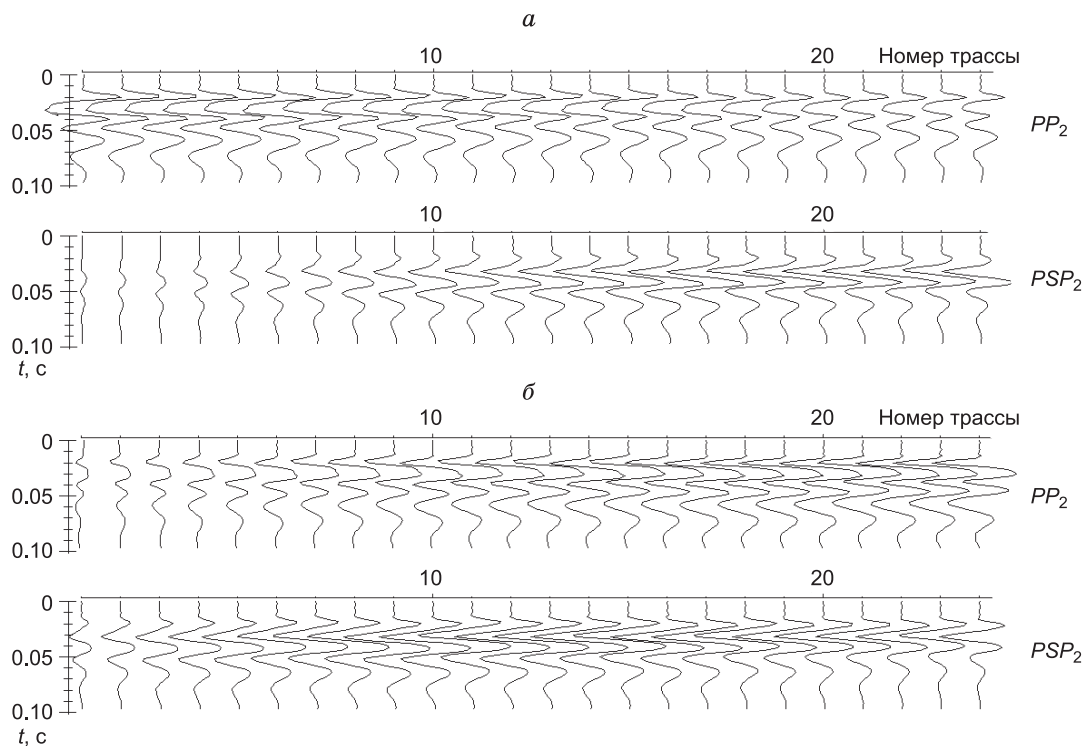


Рис. 8. Временные интервалы, отобранные по модельным сейсмограммам для Z - (*a*) и X -компонент (*б*), которые содержали отраженные сигналы от области целевого объекта П (см. рис. 3).

трассировки лучей. Как правило, начало отбираемого интервала, где располагался анализируемый сигнал, имело несколько меньшее значение, чем время по трассируемому лучу, как это показано на рис. 7. Пример отобранных интервалов, содержащих отраженные сигналы PP и PSP волн от области П объекта (см. рис. 3), приведен на рис. 8. Такие интервалы использовались для расчета спектров, которые затем сопоставлялись с теоретическими значениями.

При расчете спектров для отобранных интервалов трасс, содержащих отраженные сигналы определенных типов, использовались оптимальные сглаживающие окна, которые обеспечивали достаточную точность оцениваемых спектральных характеристик. Поэтому все получаемые отклонения рассчитываемых спектров от теоретических значений могли быть отнесены на счет несоответствий модельных предположений и наблюдаемых сигналов. Здесь важно отметить, что согласно результатам наших предыдущих исследований [Митрофанов, Прийменко, 2012] построенное линеаризованное представление спектральной характеристики тонкослойной пачки для фиксированного типа отражения дает ошибку не более 2–3 % при относительно небольших углах падения волны на объект. В представленных экспериментах последнее условие, в силу сравнительно небольшой величины расстановки приборов, было заведомо обеспечено.

На рис. 9, 10 представлены некоторые результаты проведенных исследований. Они относились к анализу амплитудных спектральных характеристик отраженных сигналов для продольных волн. Обладая наибольшей простотой, они дают ясное понимание тех особенностей, которые могут существенно влиять на спектральную характеристику наблюдаемого сигнала в реальном эксперименте.

Рассмотрим результаты, представленные на рис. 9, *a*. Верхние амплитудные спектры являются результатом соответствующего расчета, выполненного по отобранным интервалам одной из модельных сейсмограмм. При этом моделирование выполнялось для случая модели объекта П (см. рис. 3). Следующие спектры (см. рис. 9, *б*) представляют собой теоретическую спектральную характеристику соответствующей тонкослойного объекта, которая была домножена на спектр среднего сглаженного сигнала, выступающего в роли некоторой оценки исходного импульса, падающего на заданный объект. Подобные оценки исходного импульса обычно применяются при реальной обработке данных. Третий ряд спектров (см. рис. 9, *в*) представляет собой разность двух первых спектров.

Видно, что разность между двумя спектрами может достигать существенных величин (в некоторых 58 %), а значение целевого функционала, построенного на основе указанных спектров, равняется 0.31245. Это является совершенно не приемлемой величиной функционала, так как подобные же значения получаются при ошибочном задании модели объекта [Митрофанов, Прийменко, 2012]. О том, что подобные различия между теоретическими и рассчитанными спектрами связаны с неточным заданием формы падающего импульса, свидетельствуют результаты, представленные на рис. 9, *б*. Здесь верхний ряд спектров представляет собой отношения между рассчитанными или наблюдаемыми спектрами и теоретическими спектральными характеристиками для заданного объекта. По определению они должны отвечать спектральной характеристике исходного импульса (она показана в средней части данного рисунка). Однако на практике мы имеем значительное различие между этим отношением и спектром исходного импульса. Величина и структура этого различия показаны на нижней части рисунка.

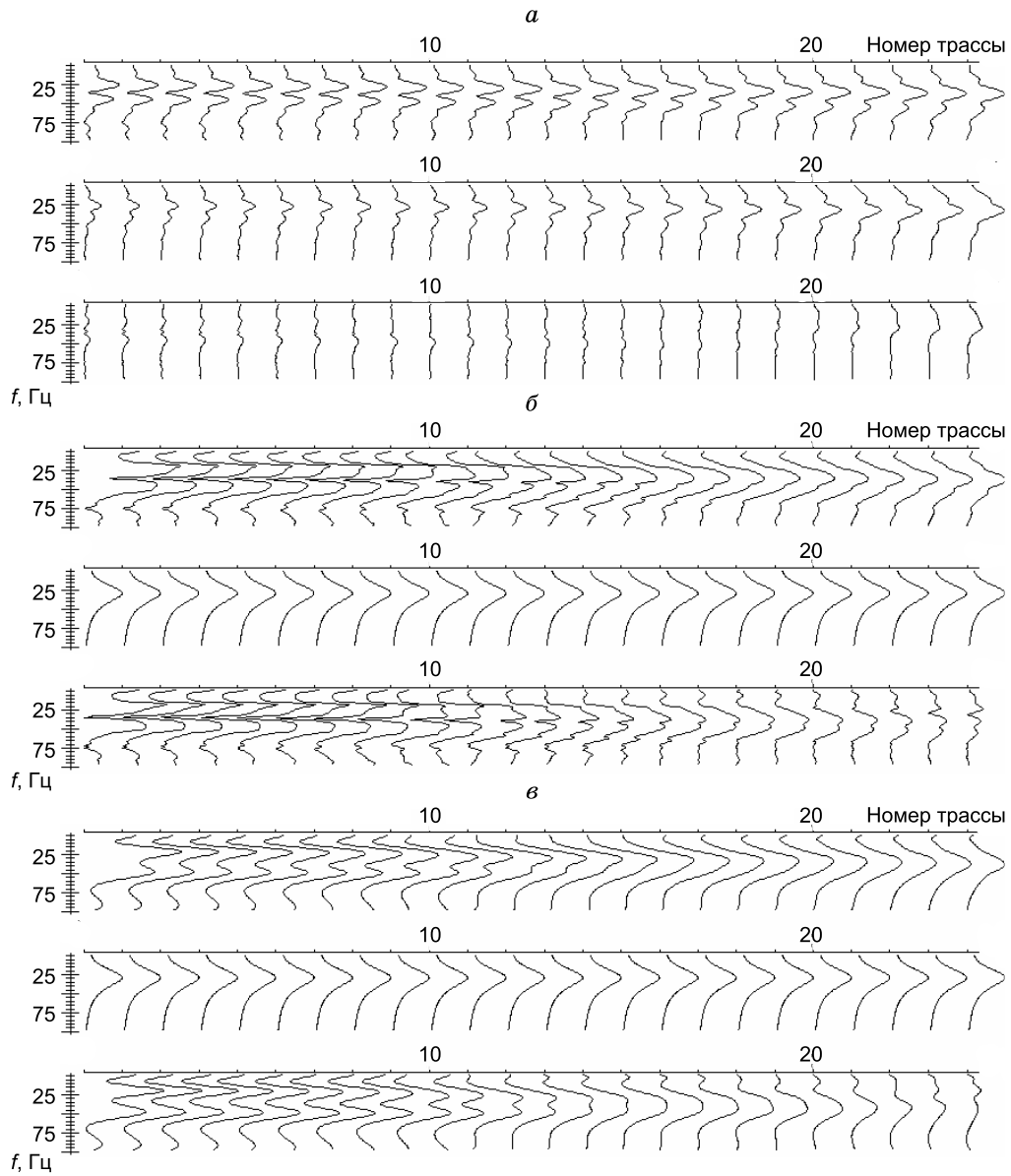


Рис. 9. Сопоставление спектров и их отношений для сигналов отраженных *PP*-волн в случае модели объекта II (см. рис. 3): рассчитываемые и теоретические спектры (*а*); отношение со спектром исходного импульса без корректировки формы исходного сигнала (*б*) и то же после корректировки (*в*).

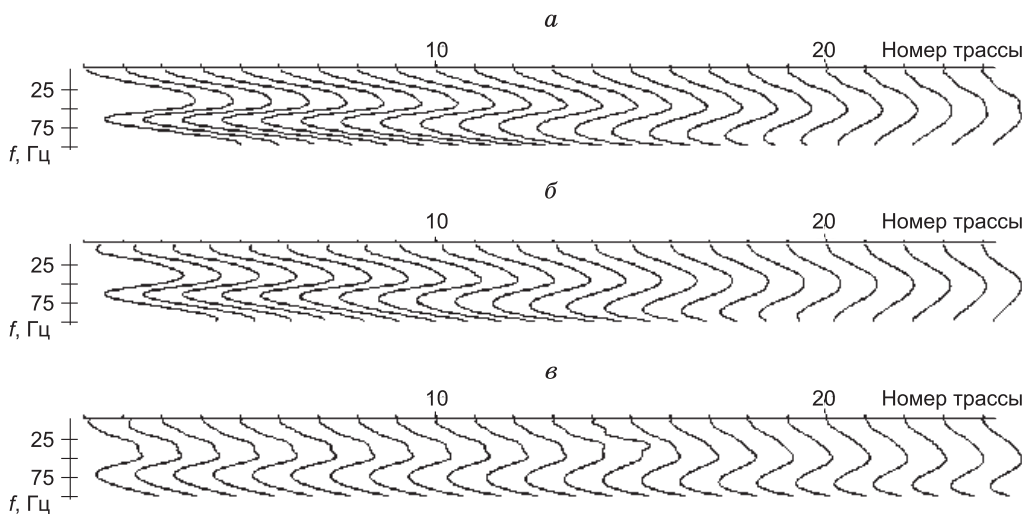


Рис. 10. Вид остаточной составляющей в спектрах сигналов отраженных *PP*-волн в случае моделей объектов: I (*а*), II (*б*) и III (*в*).

Использование упрощенных процедур декомпозиции, которые уточняют форму исходного импульса, который непосредственно падает на тонкослоистый объект, позволяют улучшить качество рассчитываемых спектров. Об этом свидетельствуют результаты, представленные на рис. 9, в. Такая процедура учитывает форму регистрируемого интерференционного сигнала. В результате, нам удастся точнее определить гладкий спектр исходного импульса. Однако, несмотря на повышение качества оценок спектральных характеристик, в них остается некоторая регулярная составляющая, которая изменяет форму падающего на объект импульса в зависимости от удаления источник–приемник или от угла падения соответствующей волны на целевой объект.

Природа этих изменений в форме и спектре падающего импульса связана с характеристикой направленности источника, который используется при построении полного решения задачи (заглубленный источник типа центра расширения). Она совершенно очевидна по физическим соображениям, а ее проявление в модельных данных требует использования более сложных моделей декомпозиции, которые могут учитывать такие изменения. В случае проведенных экспериментов вполне подошла четырехфакторная модель [Митрофанов, 2015], в которой импульсная характеристика $L_{i-j}(t)$ или фактор $\lambda_{i-j}(\omega)$ позволяют определять изменения формы сигнала, связанные с различным удалением источник–приемник.

На рис. 10 показаны изменения, которые проявились за счет указанной характеристики направленности источника, в различных рассчитываемых сейсмограммах. Видно, что для объектов I и II, которые были связаны с одним и тем же целевым горизонтом Albacora (см. рис. 3) и были расположены на близких глубинах, данные характеристики имеют очень близкую структуру. При изменении же целевого горизонта и его глубины, что мы имеем для модели объекта III (см. рис. 3), происходит изменение соответствующей характеристики направленности. Таким образом, в реальном эксперименте, когда характеристики направленности источника неизвестна и может меняться для различных источников, требуется ее учет в процедурах декомпозиции. Отметим, что в проведенных нами экспериментах учет данной характеристики позволял обеспечивать близкое к идеальному совпадение рассчитываемых и теоретических спектров, а величина функционала при этом равнялась 0.01427.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлена структурная декомпозиция наблюдаемых волновых полей и формы сейсмических сигналов, которая позволяет трансформировать исходные сейсмические данные в исходную информацию для решения обратной задачи по отношению к локальным целевым объектам реальной среды. Такое преобразование является исключительно важным для практической реализации обратных динамических задач. Оно фактически формирует некоторую идеологию построения решения этих задач в случае упругих моделей среды, когда невозможно построение инверсных алгоритмов для всей модели среды и полного волнового поля. Его использование позволяет для этих случаев произвести трансформацию сейсмических наблюдений, которые были получены в рамках слож-

ных моделей сред к наблюдениям, отвечающим локально горизонтально-слоистым моделям по отношению к целевым объектам среды. Важно, что при этом удается учитывать и особенности реального эксперимента, связанные с неоднородностью областей возбуждения и приема сейсмических колебаний, и определять форму сигнала, непосредственно падающего на целевой объект. Необходимо отметить, что такая трансформация осуществляется путем приведения характеристик отражения к точкам нормальных лучей, поэтому она может быть осуществлена, как с использованием лучевых схем, так и на основе миграционных преобразований. Таким образом, она опирается на хорошо развитый современный аппарат обрабатываемых комплексов.

Настоящее преобразование определяет и методику решения обратных динамических задач для современных многокомпонентных наблюдений. На первом этапе выделяются локальные элементы волнового поля (отраженные сейсмические сигналы), присутствующие в различных наблюдаемых компонентах, но относящиеся к одному и тому же целевому объекту. Затем на основе этих элементов поля (отраженных сигналов), которые являются увязанными по сути своего выделения и отношения к одному и тому же элементу среды, строится решение обратной задачи для целевого объекта. Таким образом, здесь достигается несколько целей. Первая – увязывание (согласование) различных наблюдаемых компонент. Вторая – использование дополнительной информации о форме сигнала для уточнения уже имеющейся модели среды с целью более полного описания целевых объектов.

Принципиально предлагаемое преобразование может быть реализовано для произвольных частей среды, которые могут быть назначены как целевые, т. е. ее реализация может быть унифицирована для создания общей технологии решения обратных задач по элементам волнового поля. При этом ничего не мешает при достаточных вычислительных возможностях реализовать данную схему для любых элементарных частей среды, которые могут быть указаны как целевые и имеют достаточно выраженные отражающие элементы в волновом поле. Возможно, последнее условие может быть учтено не в полном объеме или полностью игнорировано, но такие выводы могут быть сделаны только исходя из результатов использования этой схемы на практике.

Литература

- Алексеев А.С., Гельчинский Б.Я. О лучевом методе вычисления полей волн в случае неоднородных сред с криволинейными границами раздела // Вопросы динамической теории распространения сейсмических волн. Вып. III. Л.: Изд-во ЛГУ, 1959. С. 107–160.
- 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. Интерпретация данных сейсмического метода отраженных волн. М.: Недра, 1979. 344 с.
- Курдюкова Т.В., Гольдин С.В., Митрофанов Г.М. Лучевое трассирование в блоковых средах: проблемы и их решения // Сб. науч. докл. междунар. науч. конф. “Сейсмические исследования земной коры”. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004. С. 142–148.

- 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.
- Мадатов А.Г., Митрофанов Г.М., Серeda В.-А.И.** Аппроксимационный подход при динамическом анализе многоканальных сейсмограмм. 3. Прикладные аспекты // Геология и геофизика. 1992. № 3. С. 112–122.
- Митрофанов Г.М., Приименко В.И.** Проблема вложения теоретического решения в сейсмические наблюдения // Технологии сейсморазведки. 2012. № 3. С. 5–26.
- Митрофанов Г.М.** Гомоморфная фильтрация и слепая деконволюция // Технологии сейсморазведки. 2015. № 1. С. 46–56.
- Пузырев Н.Н.** Интерпретация данных сейсморазведки методом отраженных волн. М.: Гостоптехиздат, 1959. 451 с.
- Пузырев Н.Н.** Временные поля отраженных волн и метод эффективных параметров. Новосибирск: Наука, 1979. 288 с.
- Cervený V.** Seismic Ray Theory. Cambridge Univ. Press, 2001. 722 p.
- Mitrofanov G.M., Helle H.B., Kovaliev V.P., Madatov A.G.** Complex seismic decomposition – theoretical aspects // 55th EAEG Mtg. Expanded Abstracts. Extended, Stavanger. 1993. P. 112–113.
- Mitrofanov G., Priimenko V., Misságia R., Amaral L.** Utilização das transformadas de Laplace e Fourier-Bessel na modelagem de meios elásticos delgados // Revista Brasileira de Geofísica. 2009. V. 27 (2). P. 205–224.
- Yilmaz O.** Seismic Data Analysis: Processing, Inversion and Interpretation of Seismic Data (V. 1, 2) // Soc. Explor. Geophys. Tulsa, Oklahoma, 2001. P. 2027.

*Статья поступила в редакцию 30 марта 2016 г.,
в окончательном варианте – 18 мая 2016 г.*

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

МИТРОФАНОВ Георгий Михайлович – в 1972 г. окончил геолого-геофизический факультет Новосибирского государственного университета, в 1984 г. получил степень кандидата физико-математических наук, с 1989 г. – доцент Новосибирского государственного университета, в 2015 г. получил степень доктора физико-математических наук. С 1989 по 2008 гг. являлся заведующим лаборатории Института геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, а с 2006 по 2013 гг. был титулярным визит-профессором Университета северного флюминенса штата Рио де Жанейро (Бразилия). В настоящее время – ведущий научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. Область интересов: развитие методов обработки и интерпретации сейсмических данных, решение прямых и обратных задач геофизики, характеристика и прогноз свойств резервуаров нефти и газа.
E-mail: georgymitrofanov@rambler.ru