



Проект реализуется участником проекта «Сколково»
при грантовой поддержке Фонда «Сколково»

О задачах деконволюции сейсмических записей и возможностях контроля искажений формы сигнала

■ Кунченко Д.С., Овчинников К.Р., Фиников Д.Б., ООО «Сейсмотек», г. Москва

Введение

К обработке сейсмических данных предъявляют всё более жесткие требования в отношении сохранения динамики полезных волн. Это касается как амплитуд, так и формы сигналов отраженных волн (эти параметры, конечно, взаимосвязаны). Искажения амплитуд в ходе подавления помех обычно контролируют, рассматривая отдельно поля вычтенных помех, наблюдая не «просочились ли» в них полезные отражения. После коррекции амплитуд изучают карты корректирующих множителей. А вот на что смотреть при коррекции формы сигнала не очень понятно.

Труднее всего контролировать искажения, возникающие в ходе адаптивной обработки. Здесь под подозрение попадают, в первую очередь, процедуры деконволюции и корректирующей фильтрации. Этим объясняется тот факт, что при проведении обработки с сохранением динамики процедуры деконволюции вообще исключают из графа обработки, оставляя только т.н. факторные деконволюции.

Факторные деконволюции – это процедуры коррекции формы записи за влияние конкретных физически обоснованных факторов. На море – это сигнатурная деконволюция, подавление пульсации газового пузыря, часто с этой точки зрения рассматривают и подавление спутника. На суше – это коррекция за поверхностные условия (поверхностно-согласованная деконволюция), при обработке вибросейсмических данных – различные манипуляции с импульсом

Клаудера. К факторным деконволюциям относят и коррекцию частотно-зависимого поглощения.

Полноценную деконволюцию за форму сигнала относят уже к интерпретационному этапу, сопряженному с инверсионными преобразованиями и с привлечением скважинной информации (т.н. «стратиграфическая деконволюция»).

Аппарат многие десятилетия развиваемых в сейсморазведке методов «слепой деконволюции» стараются не использовать. Эти процедуры себя сильно сомпрометировали в обработке с сохранением динамики. С другой стороны, без них обработка не обходится, но их используют в крайне завуалированной форме. В сущности, когда факторные деконволюции делают адаптивными (а это почти неизбежно), то опираются на те же предположения, что и в традиционных методах коррекции формы сигнала.

Почему многие методы деконволюции не используются в процессе обработки? Практически все они основаны на статистической модели свёрточной сейсмической трассы, т.е. описании записи, как реализации случайного процесса определенной структуры (образуют Пуассоновский поток сигналов). Основные теоретические факты, касающиеся обобщённой свёрточной модели [1,3,5, 6, 8, 10, 11]. Обобщение статистической свёрточной модели на нестационарный случай сводится к параметрическому описанию изменчивости динамических параметров во времени.

Реальные наблюдения, конечно, не удовлетворяют статистическим предпо-

ложениям. Собственно, мы даже не можем судить об этом, т. к. не имеем соответствующих объемов выборок, не можем соблюсти условия эксперимента необходимые для обоснованности статистических выводов и т. д. Статистические соображения привлекаются за неимением другого аппарата описания столь сложных явлений.

Суть задачи деконволюции тесно связана с задачей оценивания формы сигнала на которую и строится обратный фильтр. Для этого из записей извлекаются статистики, которые связаны со смешанными моментами сигнала, чаще всего вторыми моментами, т.е. корреляционными функциями [10]. Все они содержат определенные погрешности, которые можно интерпретировать и как следствие невыполнения статистических предположений, ограниченности объема данных, наличия разного рода помех.

Это может приводить к тому, что результаты обработки могут содержать артефакты, плохо поддающиеся контролю. Это и привело к тому, что сложилось мнение, что для обработки с сохранением динамики арсенал средств деконволюции следует ограничить коррекцией за физически обоснованные характеристики сигнала. Однако, как уже было отмечено, эти методы, хотя и используют более жесткую параметризацию формы сигнала – не могут считаться свободными от недостатков традиционных решений.

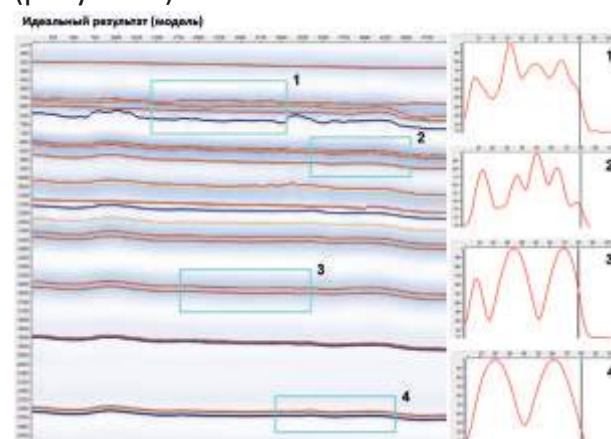
Как сделать деконволюцию более безопасной и контролируемой процедурой? Универсального рецепта нет. В работе говорится о некоторых приемах, которые носят скорее методический, нежели, алгоритмический характер и применимы ко всем способам адаптивной деконволюции, используемым на практике.

Пример с модельными данными

Реальные примеры при всей их содер-

жательности, могут увести в сторону от существа процедуры и плохи недостаточными возможностями верификации результатов. Тщательная подборка таких примеров – дело будущего. Однако предлагаемую методику авторы уже сейчас применяют на практике. Поскольку методику можно использовать в любой системе и комплексе программ, то, если она покажется интересной, каждый читатель может попробовать её на своих реальных или модельных данных.

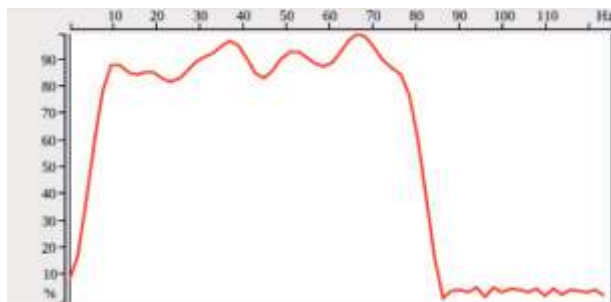
Модель на которой будем демонстрировать метод состоит из нескольких пачек отражений. Конечно, эти трассы трудно назвать реализациями случайного процесса. При этом каждая пачка имеет свой спектр, который отнюдь не равномерен (рисунок 1).



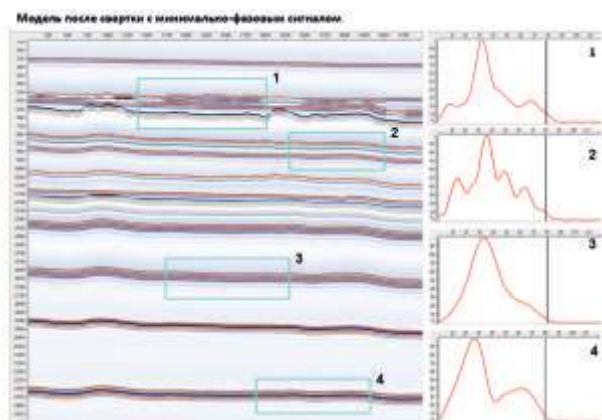
▲ Рис. 1. Идеальный результат (модель).

Однако все вместе они обеспечивают вполне близкий к равномерному спектр (рисунок 2) и этот пример неплохо иллюстрирует суть теоремы Кэмпбела для случайного импульсного процесса (вывод теоремы для пуассоновского потока сигналов можно найти в монографии [2]).

Чем больше разнообразных фрагментов трассы участвует в формировании спектра, тем он ближе к равномерному. Это значит, что если форма сигнала выдержана (стационарна) по времени, то лучше использовать при расчёте оператора обратного фильтра как можно большие окна.



▲ Рис. 2. Амплитудный спектр, полученный по всему временному разрезу модели.

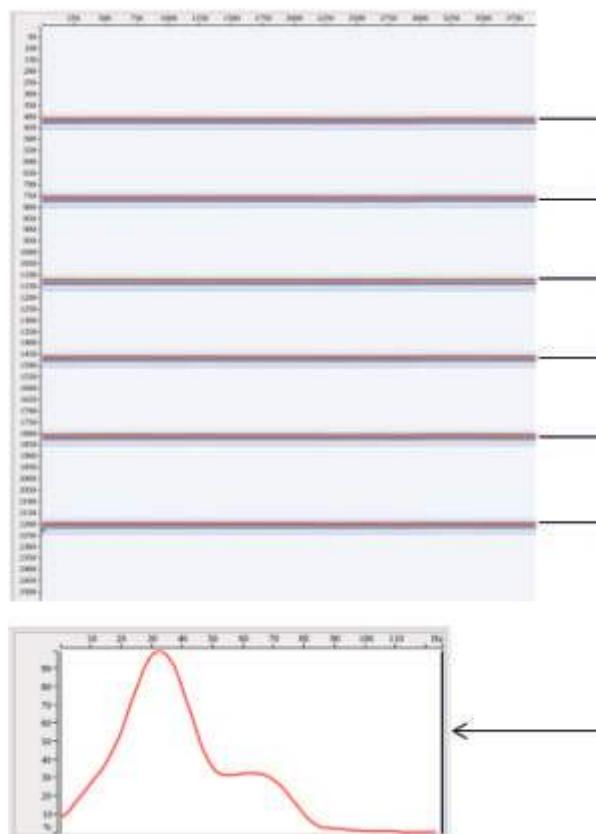


▲ Рис. 3. Модель после свёртки с минимально-фазовым сигналом.

На следующем рисунке показан тот же разрез, свернутый со стационарным сигналом (рисунок 3). Сигнал минимально-фазовый в диапазоне частот 5-75 Гц.

Итак, мы имеем практически идеальные условия для обратной фильтрации. Спектр импульсной трассы почти равномерен, помехи отсутствуют, форма сигнала постоянна, сигнал минимально-фазовый в диапазоне частот. Стационарная предсказывающая деконволюция вполне справляется с задачей.

Предлагается смотреть на оценку формы сигнала на основе которой строится обратный фильтр. На рисунке 4 показаны шесть искусственно сгенерированных синфазностей, представляющих собой оценённую форму сигнала. Она получена путем свёртки нуль-фазовых сигналов (с равномерным спектром) с формой импульса, извлеченной из результата деконволюции и исходного поля.



▲ Рис. 4. Оцененный сигнал и его спектр при стационарной деконволюции.

Для получения этих оценок используется процедура **matching**. Схема на рисунке 5 иллюстрирует методику.

Подбирается линейный (стационарный или нестационарный) фильтр, который наилучшим образом обеспечивает вычитание деконволированного поля из исходного. Этот же фильтр применяется к модельным сигналам. Получаем оценки формы сигнала, которые были неявно использованы при деконволюции. Это можно сделать для любых алгоритмов обратной фильтрации.

По этим оценкам можно судить насколько обоснованы способы деконволюции, насколько они обеспечены данными, насколько выдержаны оценки по пространственным координатам. В данном случае оценки почти идеальны. И все же и здесь оценки показаны после небольшого усечения во временной области, в результате которого были



◀ Рис. 5. Схема получения оценки формы сигнала

устранены некоторые осцилляции. Поэтому, основываясь на этих оценках, можно улучшить и результат деконволюции. Очевидный ход – применить еще раз **matching**: найти оператор, переводящий полученные оценки в заданные сигналы (например, дельта-функцию в диапазоне частот) и применить его к исходному полю.

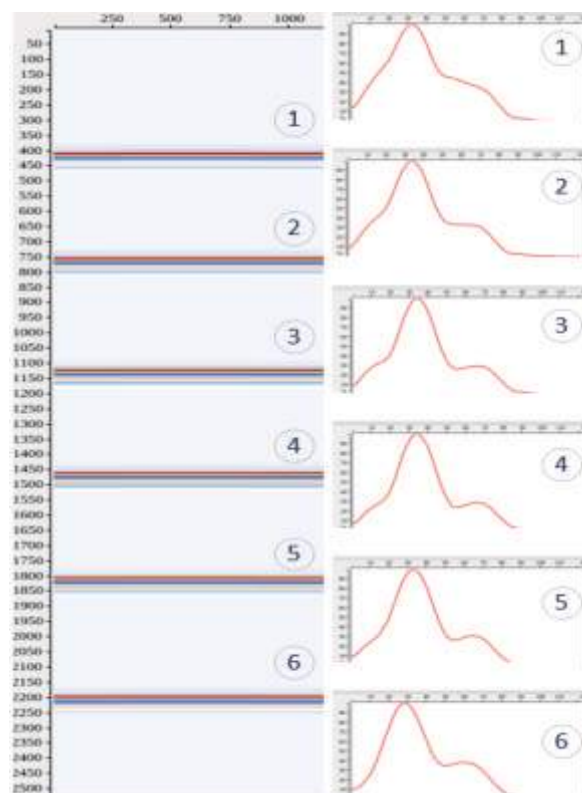
Можно предложить множество способов деконволюции и корректирующей фильтрации с использованием этих оценок. Можно обсуждать их применимость для решения инверсионных задач. Важно, что при этом мы можем контролировать искажения амплитуд в любой интересующей нас норме. Авторы часто используют **matching** так, как это было описано. Далее обсудим и некоторые другие возможности.

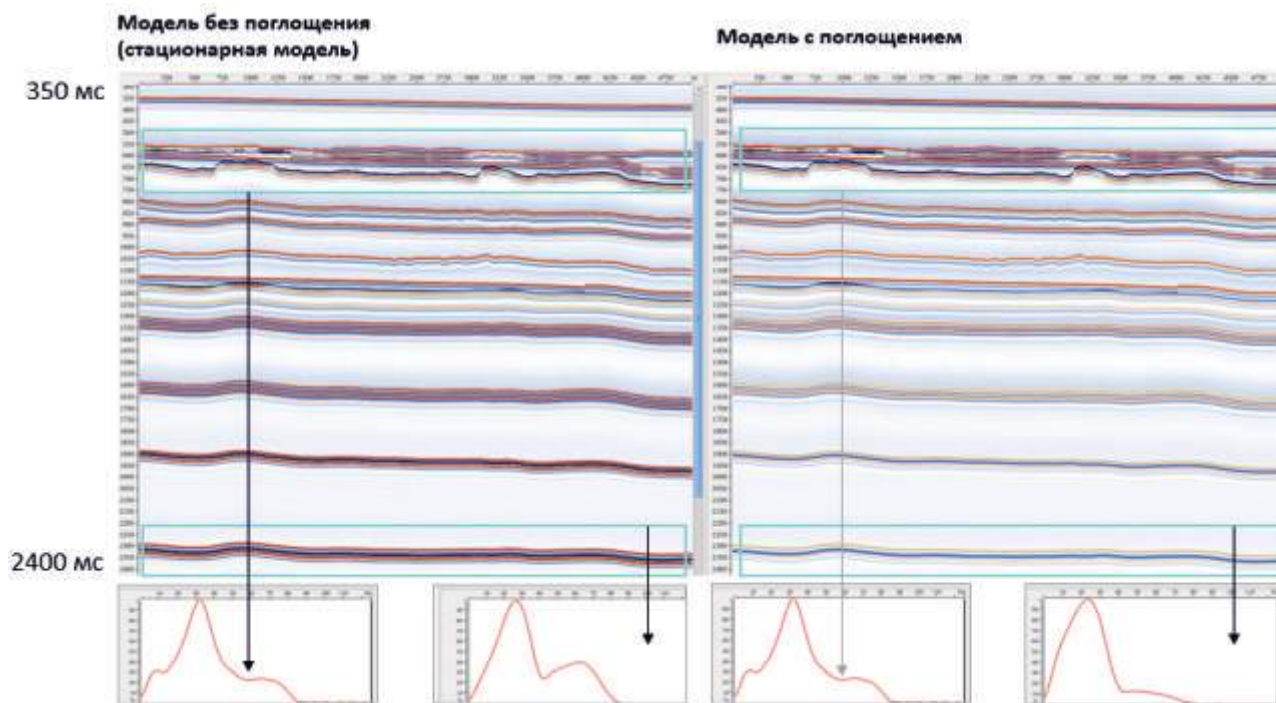
В этой технике есть некоторые особенности. Так деконволюция для оценки формы сигнала может быть выполнена с более жесткими параметрами, чем та, что обычно применяется для обработки. Подбор параметров процедуры **matching** контролируется остатком от вычитания адаптированного поля из исходного. Выбор параметров осреднения на всех этапах определяется поставленной задачей обработки (требуется ли устранить или идентифицировать быстрые флуктуации формы сигнала или речь идет о гладких компонентах). Методи-

ческие особенности подхода могут быть разнообразны.

Теперь рассмотрим результаты нестационарной деконволюции в стационарной модели. В самом деле, в реальной жизни мы не знаем априори – стационарна запись или нет (точнее знаем, что она всегда нестационарна, но меру этой нестационарности не знаем). Ясно, что оценки статистик будут хуже и оценки сигналов нам это покажут. На рисунке 6 показаны такие оценки.

▼ Рис. 6. Оцененный сигнал и его спектр при нестационарной деконволюции стационарной модели.





▲ Рис. 7. Слева – модель без поглощения (стационарная модель), справа – модель с поглощением.

Видно, что они изменчивы по времени, хотя дисперсия и не очень велика. Результат деконволюции будет хуже (хотя он всё равно неплохой, когда используется описанная технология с применением процедуры **matching**). Не будем рассматривать результаты стационарной деконволюции, чтобы не перегружать статью подробностями, а отметим, что по флуктуациям оценок мы можем видеть, что они не обусловлены каким-либо физически обоснованным эффектом и, глядя на них, можно понять, что разумно использовать стационарный режим фильтрации.

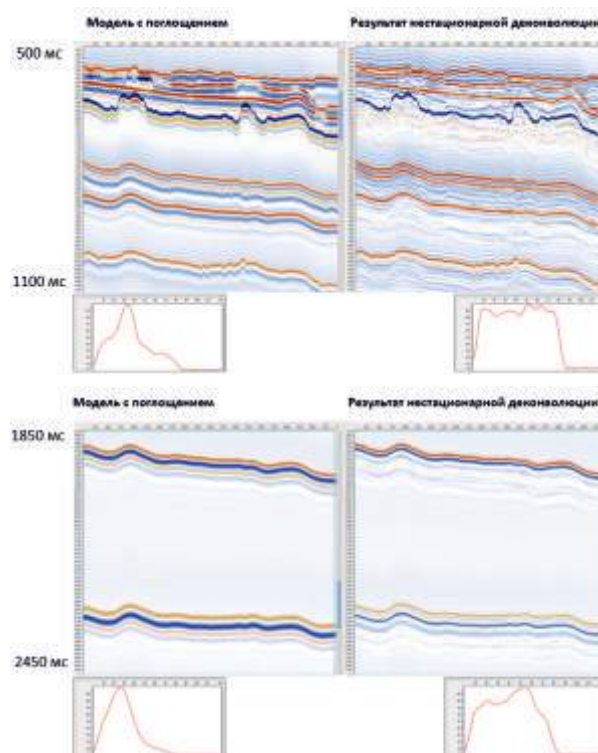
Перейдем к нестационарной модели сейсмической трассы. Для этого введем в запись поглощение. На рисунке 7 показаны модели сейсмической трассы без поглощения и с поглощением. Спектры показывают, как изменился частотный состав записи. Видно, что и амплитуды стали затухать со временем.

Результат стационарной деконволюции этих данных также приводить не будем, он вполне ожидаемый. На рисун-

ке 8 показан результат нестационарной деконволюции.

Сверху – модельный разрез с поглощением, снизу – полученный в результате деконволюции. Прежде всего мы видим,

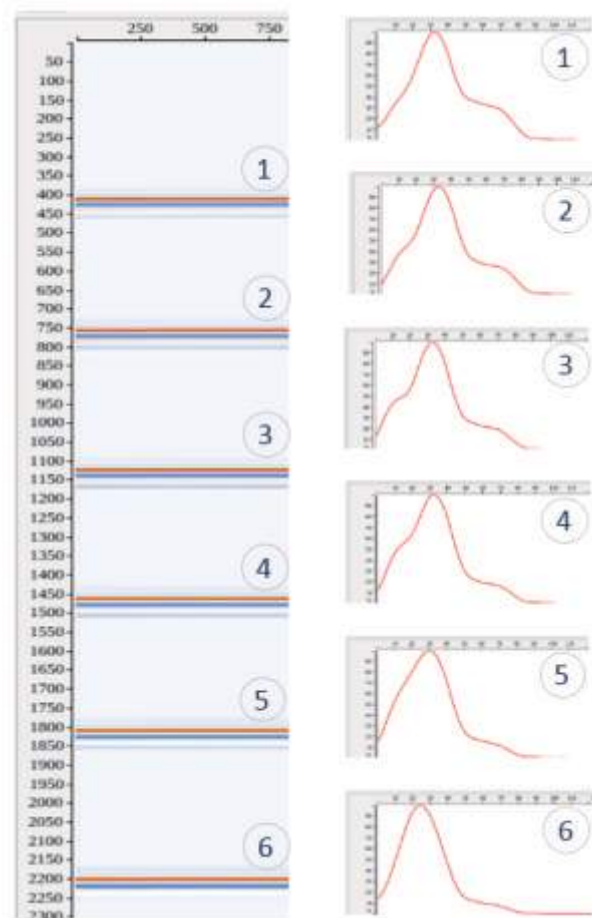
▼ Рис. 8. Сверху – модель без поглощения (стационарная модель), снизу – модель с поглощением.



что результат деконволюции сильно отличается амплитудами. Это и понятно – деконволюция выравнивает амплитудный спектр сигналов, но амплитуды не восстанавливает. Здесь, правда, фрагменты в окнах выровнены по средним энергиям для визуализации, поэтому эффект не столь заметен, но он всем хорошо известен и не нуждается в подробном иллюстрировании. Более того, после деконволюции падение амплитуд, обусловленное поглощением, только усиливается. В этом один из главных упреков к обратной фильтрации. Сейчас, однако, обратим внимание на то что уровень артефактов деконволюции тоже возрос. К влиянию импульсной трассы (невыполнению статистических предположений) – нестационарная деконволюция более чувствительна. В самом деле, наиболее простой и очевидный способ нестационарной деконволюции – многооконная. На нем особенно очевидна ущербность процедуры, обусловленная недостаточностью статистики. В самом деле, если бы мы назначили семь окон вокруг пачек отражений, то получили бы семь фильтров, компенсирующих не изменчивость формы импульса, а эффекты интерференции, что недопустимо. Мы, конечно, применяем здесь алгоритм, основанный на разумных моделях нестационарности, а именно нестационарную предсказывающую деконволюцию с параметризацией нестационарности гладкими функциями времени [9], но и эту процедуру нельзя считать вполне безобидной, хотя в данном случае результат выглядит не плохо.

Посмотрим на оценки формы сигнала, полученные по изложенной выше методике. Они показаны на рисунке 9.

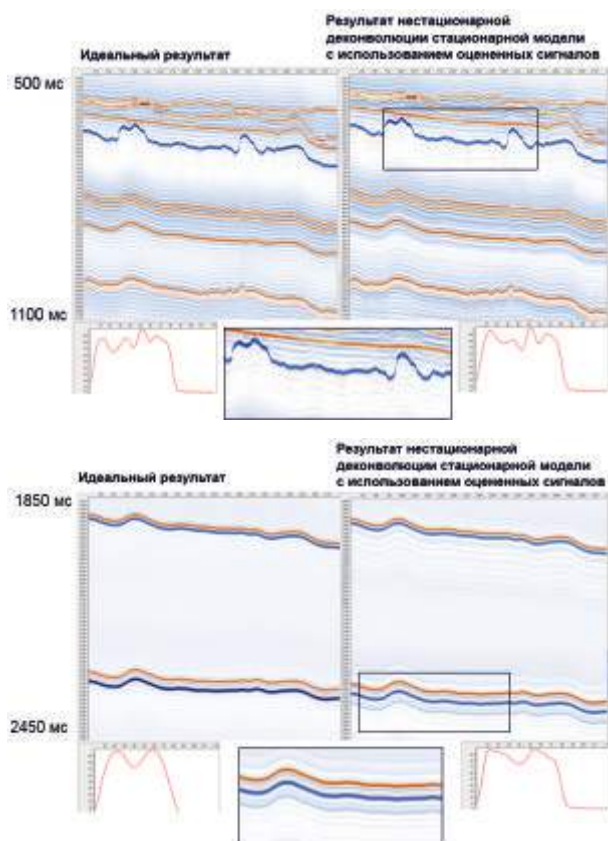
Из этих оценок убраны некоторые осцилляции (простым «усечением» с помощью весовой функции). Оценки



▲ Рис. 9. Оцененный сигнал при нестационарной деконволюции модели с поглощением.

вполне похожи на идеальные, хотя и с точностью до неизвестного пока множителя. На следующем рисунке 10 показаны результаты обработки посредством **matching**-деконволюции. Видно, что артефакты деконволюции существенно меньше.

И вот теперь мы переходим к наиболее важному тезису работы. Как мы видим, деконволюция приводит к вполне закономерному и понятному изменению амплитуд сигналов. В данном случае оно носит нестационарный характер и обусловлено эффектом поглощения. Мы имеем оценки формы сигнала, полученные с точностью до множителя. Их можно выравнивать по амплитуде и, применив к ним тот же оператор деконволюции, скомпенсировать искажения амплитуд. Этот прием очевиден и его иллюстра-



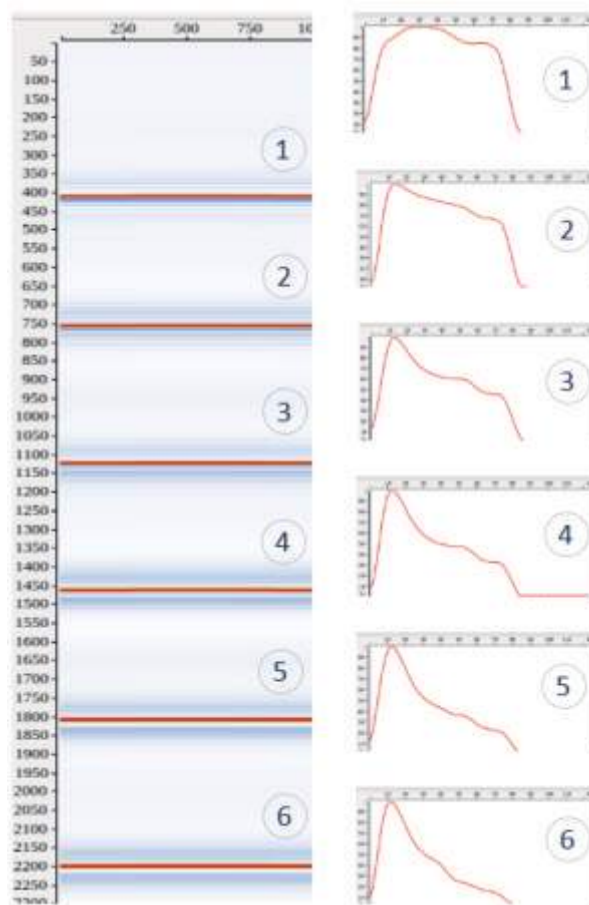
▲ Рис. 10. Сверху – идеальный результат, снизу – результат нестационарной деконволюции с использованием оцененных сигналов.

цию мы тоже пропустим, поскольку наиболее интересной становится возможность сделать «слепую» деконволюцию – «факторной».

В данном случае мы показываем, как можно скомпенсировать эффекты поглощения.

На следующем рисунке показана форма сигнала после стационарной деконволюции за «верхнюю часть» разреза (рисунок 11). Показаны амплитудные спектры, в которых эффект поглощения выявлен настолько очевидно, что оценка параметров декремента сложностей не представляет.

На следующем рисунке показан результат приведения трассы к стационарному виду за счет коррекции поглощения (рисунок 12). Оценка параметров декремента производилась отдельным этапом, на котором здесь останавливать-



▲ Рис. 11. Формирование оператора поглощения.

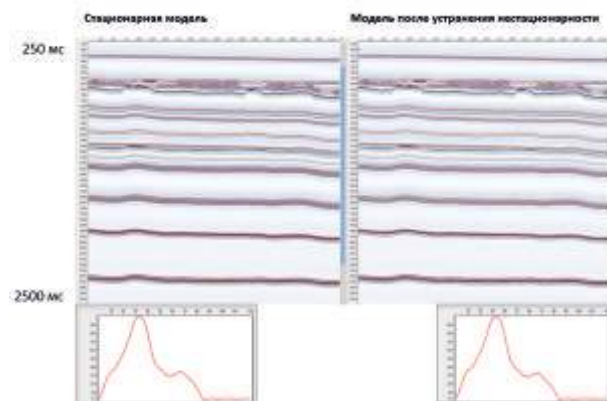
ся не будем, поскольку, по нашему мнению, здесь годится любой работоспособный алгоритм оценки параметров частотно-зависимого затухания, т. к. модельные трассы свободны от интерференции по построению.

В данном случае был применен алгоритм, описанный в [3], но, как отмечено выше, годится и любой другой (например, по оценке наклона логарифма отношения амплитудных спектров сигналов, приписанных к заданным горизонтам).

Сопоставление со стационарной моделью показывает, что компенсация поглощения выполнена почти идеально.

Наконец, на рисунке 13 показан окончательный результат деконволюции с коррекцией поглощения.

Это лишь одно из приложений методики, которое представляет самостоятель-

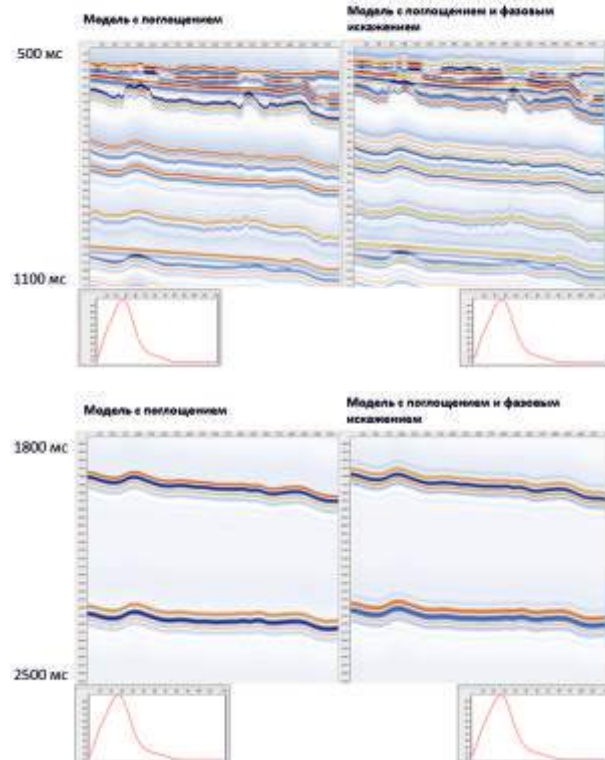
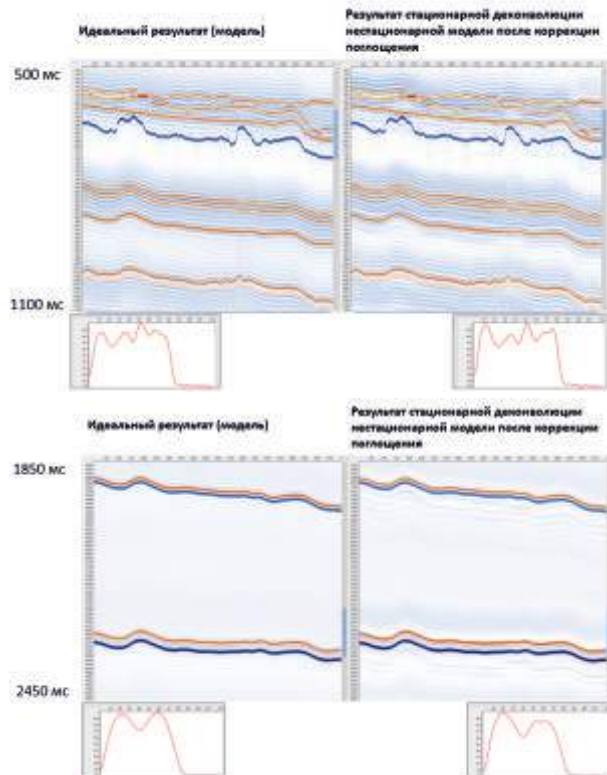


▲ Рис. 12. Формирование оператора поглощения.

ный интерес. Главная идея состоит в том, чтобы сопровождать деконволюционные процедуры оценками формы сигнала и контролировать по ним искажения динамики записей.

Понятно, что оценки здесь делаются в тех же предположениях, в рамках которых делалась деконволюция. Так, если деконволюция была нуль-фазовой, то и оценки формы сигнала будут нуль-

▼ Рис. 13. Сверху – идеальный результат (модель), снизу – результат стационарной деконволюции нестационарной модели после коррекции поглощения.



▲ Рис. 14. Сверху – модель с поглощением, снизу – модель с поглощением и фазовым искажением.

фазовыми, а, если как в приведенных экспериментах, форма сигнала предполагалась минимально-фазовой, то и оценки будут минимально-фазовыми.

Над ними можно производить дополнительную обработку, сглаживать по пространству, взвешивать по времени, отсекая осцилляции и т. п.

Важно понимать, что, хотя фазовые характеристики сигнала мы получаем в согласии с модельными предположениями, – это не отменяет возможности их последующей коррекции.

На рисунке 14 показан тот же разрез с нестационарной формой сигнала, свёрнутой с некоторым чисто «фазовым» фильтром.

Характеристика фильтра и его фазовый спектр показаны на рисунке 15.

Характер волновой картины не очень усложнился, т. к. амплитудный спектр сигнала сравнительно узкий. А вот после минимально-фазовой деконволюции,

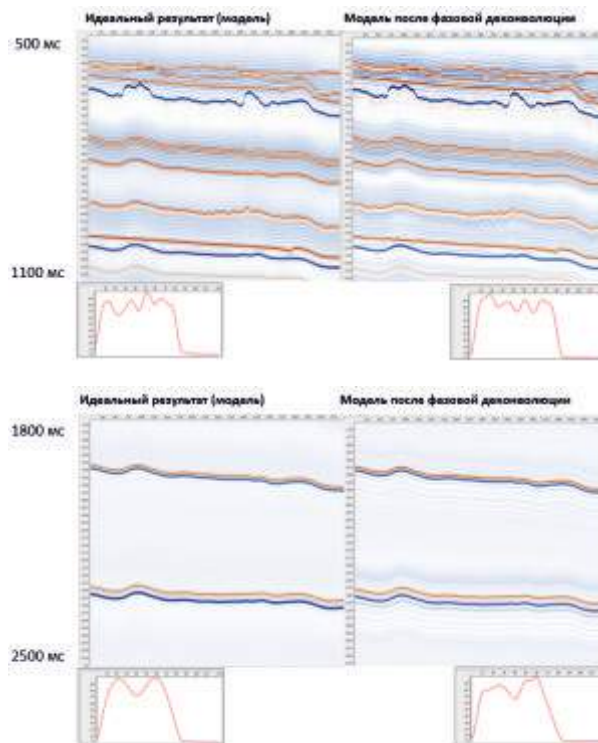
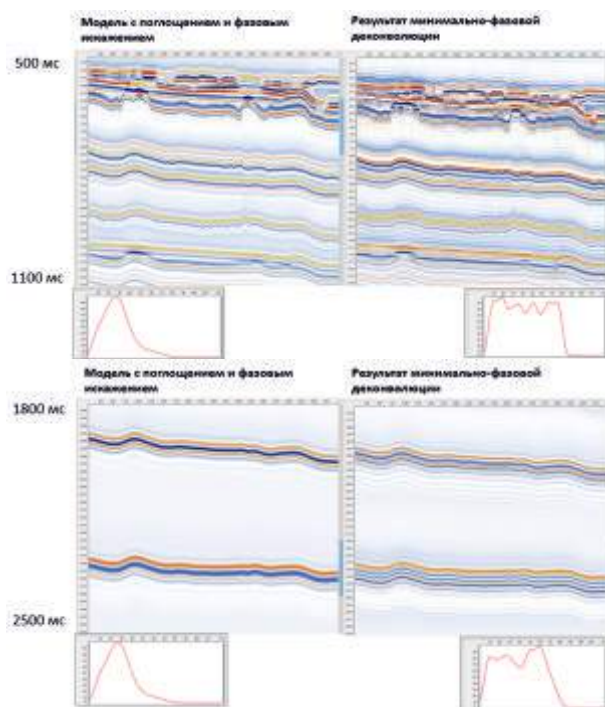


▲ Рис. 15. Характеристика фазового фильтра.

когда спектр расширился – запись стала гораздо сложнее. Это видно из рисунка 16.

При этом, оценки формы сигнала, конечно, получатся теми же. Они извлекаются из того же минимально-фазового оператора. Последующая коррекция фазового спектра, как видно из рисунка 17, полностью решает задачу. Применен способ, описанный в [11].

▼ Рис. 16. Сверху – модель с поглощением и фазовым искажением, снизу – результат минимально-фазовой деконволюции.



▲ Рис. 17. Сверху – модель с поглощением и фазовым искажением, снизу – модель после фазовой деконволюции.

Получаем и оценки формы сигнала уже смешанно-фазового в той же технике с применением **matching**'а.

Надо сказать, что применение фазовой деконволюции требует особого контроля: фазовый фильтр определяется с точностью до знака и подвижки и значит может приводить даже к структурным искажениям результатов. Конечно, в программах предусмотрено множество защит от такого рода искажений. Но все же, необходимо иметь возможность контролировать работу процедуры, особенно при площадных наблюдениях. Предлагаемая методика позволяет это делать (и, кстати, всегда применялась нами при фазовой деконволюции 3D данных [13]).

Выводы

Предлагается методика сопровождения процедур деконволюции оценками формы сигналов, на которых базируются эти алгоритмы. На основе этих оценок

можно развивать новые способы обратной фильтрации, но, главное – появляется возможность контроля искажений динамики в ходе обработки.

Получаемые оценки позволяют сделать «слепую» деконволюцию – «факторной», что может не только реабилитировать традиционные подходы в графах «динамической обработки», но и повысить эффективность и надежность процедур.

Matching – сам по себе становится эффективным средством деконволюции и развитие алгоритмов этой группы так же представляет интерес с точки зрения совершенствования способов обратной и корректирующей фильтрации.

В работе подробно рассмотрен пример нестационарной деконволюции, одной из наиболее «подозрительных» процедур с точки зрения искажений динамических параметров. Кроме того, продемонстрирован новый инструмент оценивания параметра поглощения, крайне востребованный в современной обработке. Конечно, основной смысл работы состоит в том, что метод полезен для контроля динамики при использовании любых свёрточных процедур в общем, и деконволюционных в частности.

Литература

1. Ампилов Ю. П. Поглощение и рассеяние сейсмических волн в неоднородных средах. – 1992. – 154, [1] с.: ил.; 20 см.; ISBN 5-247-03382-5: Б.
2. Рытов С.М. Введение в статистическую радиофизику, Ч. 1, Случайные процессы, М., 1976.
3. Денисов М. С., Оберемченко Д. М., Фиников Д. Б. Амплитудная деконволюция сейсмических записей с учетом частотно-зависимого поглощения // Геофизика. – 1999. – №. 4. – С. 25-29.
4. Кондратьев О. К. Сейсмические волны в поглощающих средах. – Недра, 1986. – 174, [2] с.: ил.; 22 см.
5. Кунченко Д. С., Родин И. В., Фиников Д. Б. Оценивание параметров поглоще-

ния и Q-деконволюция в пластовой модели среды в обобщённой статистической модели сейсмической трассы.

6. Кунченко Д. С., Фиников Д. Б. О задачах деконволюции сейсмических записей и возможностях контроля формы сигнала // ГеоЕвразия 2018. Современные методы изучения и освоения недр Евразии. – 2018. – С. 579-582.

7. Кунченко Д. С., Фиников Д. Б., Шалашников А. В. Влияние фазового спектра сигнала на результаты робастной деконволюции // ГеоЕвразия 2020. Современные методы изучения и освоения недр Евразии. – 2018. – С. 45-48.

8. Малкин А. Л. Негауссовская статистическая модель сейсмической записи // Геология и геофизика. – 1989. – №. 1. – С. 106-115.

9. Полубояринов М. А., Фиников Д. Б. Предсказывающая деконволюция в задаче коррекции нестационарных сейсмических записей // Технологии сейсморазведки. – 2006. – №. 1. – С. 24-32.

10. Сильвия М. Т., Робинсон Э. А. Обратная фильтрация геофизических временных рядов при разведке на нефть и газ: пер. с англ. – Недра, 1973. – 413 с.

11. Фиников Д.Б. Симметризирующие фильтры // Технологии сейсморазведки. – 2007. – № 1. – С. 26-36.

12. Фиников Д.Б., Сорин А.Я. Возможности определения формы сигнала в рамках традиционной модели сейсмической трассы. // Деп. ВИНТИ. № 3625-84 деп.

13. Овчинников К.Р., Фиников Д.Б., Рябинский М.А. фазовая деконволюция 3d-данных сейсморазведки. Технологические и методические аспекты применения статистического алгоритма коррекции фазового спектра // Геофизика, выпуск №3 2022г. с. 16-22.