



Сейсмотек

APY(AGC) и деконволюция.

Об искажениях формы сигнала в ходе нелинейных преобразований.

■ Киреева А.П., Фиников Д.Б., ООО «Сейсмотек», г. Москва.

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

Аннотация. В сейсморазведке часто используют статистические модели и, в частности, статистическую модель сейсмической трассы. При этом обычно предполагается, что с точностью до плавных функций, компенсирующих эффект геометрического расхождения, амплитуды трассы стационарны по временной шкале. Это особенно важно, когда речь идет о статистических способах обратной фильтрации (деконволюции). Это свойство часто плохо выполняется на требуемых объемах выборок. Процедуры коррекции амплитуд, конечно, позволяют обеспечить стационарность записей, однако считаются некорректными по двум причинам: 1) зарегистрированные амплитуды несут в себе важную информацию об отражающих свойствах среды и 2) применение нелинейной адаптивной процедуры может привести к существенным искажениям свёрточной модели сейсмической трассы. Первая причина вряд ли может считаться важной, т.к. ввод амплитудных множителей легко обратим, а анализу второй причины посвящена настоящая работа. Показано экспериментально, что в статистическом смысле (т.е. с допущением случайных флуктуаций формы импульса) применение AGC (Automatic Gain Control) с разумными параметрами мало искажает свёрточную модель и может быть полезно для реализации статистических алгоритмов деконволюции.

Ключевые слова. AGC, APY, деконволюция, матчинг-деконволюция, цифровая обработка сигналов

Введение. Постановка задачи.

В обработке применяется множество алгоритмов, которые могут нарушать свёрточную модель сейсмической трассы. В сущности, это можно сказать почти обо всех адаптивных процедурах, а без них не обходится ни один граф обработки. Здесь мы рассмотрим одну, неизменно популярную процедуру обработки, а именно автоматическую регулировку усиления (APY), и попробуем проанализировать искажения формы импульса, ею обусловленные. Далее будем называть эту процедуру AGC (Automatic Gain Control), следуя привычной аббревиату-

ре, которой пользуются в современном программном обеспечении.

Итак, свёрточная модель сейсмической трассы записывается в виде:

$$z(t)=s(t)*d(t), \quad (1)$$

где $s(t)$ - форма сигнала, а $d(t)$ - импульсная трасса, * - свертка

$$d(t)=g(t) \cdot r(t), \quad (2)$$

где $g(t)$ - описывает геометрическое расхождение, а $r(t)$ - последовательность коэффициентов отражений.

Обычно рассматривают трассу $Z(t)=z(t)+n(t)$, где $n(t)$ - аддитивная случай-

ная помеха, не коррелированная с $z(t)$, которая может иметь различную природу и статистические свойства. Помеху и её влияние мы рассмотрим несколько позже, а сейчас будем рассматривать записи, описываемые формулами (1) и (2). Считают, что все случайные величины здесь имеют нулевое среднее.

О сигнале $s(t)$ обычно предполагают, что он обладает определёнными свойствами. Так предполагается, что он связан с функцией источника, которая является физически осуществимой, т.е. односторонней или, иными словами, полуфинитной. Также функция источника имеет эффективную длительность (есть несколько формальных определений этого понятия), существенно меньшей длины записи. Кроме того, уже на этапе регистрации и самой первичной обработки запись подвергается частотной фильтрации, и сигнал имеет ограниченный спектр в диапазоне частот (F_l - нижняя, F_h - верхняя частота). Мы не обсуждаем здесь данные вибрационной сейсморазведки, поскольку на первых же этапах обработки сигналы стараются привести к виду, характерному для импульсных и взрывных источников. Делаются и определённые предположения об амплитудном и фазовом спектре функции $s(t)$.

Про $r(t)$ в большинстве алгоритмов обработке предполагают, что это реализация некоторого стационарного случайного процесса, имеющего структуру специфического «белого шума». Его специфичность заключается в том, что этот процесс представляет собой последовательность «идеальных» импульсов (дельта функций), вступающих в случайные моменты времени. При этом моменты вступления $\theta(i)$ образуют пуассоновский поток событий с интенсивностью μ . Амплитуды могут иметь любое, но

одинаковое (не зависящее от времени вступления) распределение со среднеквадратичным отклонением σ . Важно, что амплитуды отражений распределены одинаково и имеют нулевое среднее. Если интенсивность потока стремится к бесконечности, а амплитуды распределены нормально, то, при соответствующей нормировке, процесс $r(t)$ становится нормальным (гауссовым) белым шумом.

Важно, что многие методы обратной и корректирующей фильтрации, применяемые в обработке, опираются на т.н. теорему Кэмпбелла [1] и её обобщения [2,3,4]. Эта теорема связывает оценки автокорреляционных функций трассы и сигнала.

$$E(z(t)z(t+\tau)) = \sigma^2 \mu \int s(t)s(t+\tau)dt \quad (3)$$

$$\sigma^2 = E(a_i^2),$$

где μ - интенсивность потока отражений.

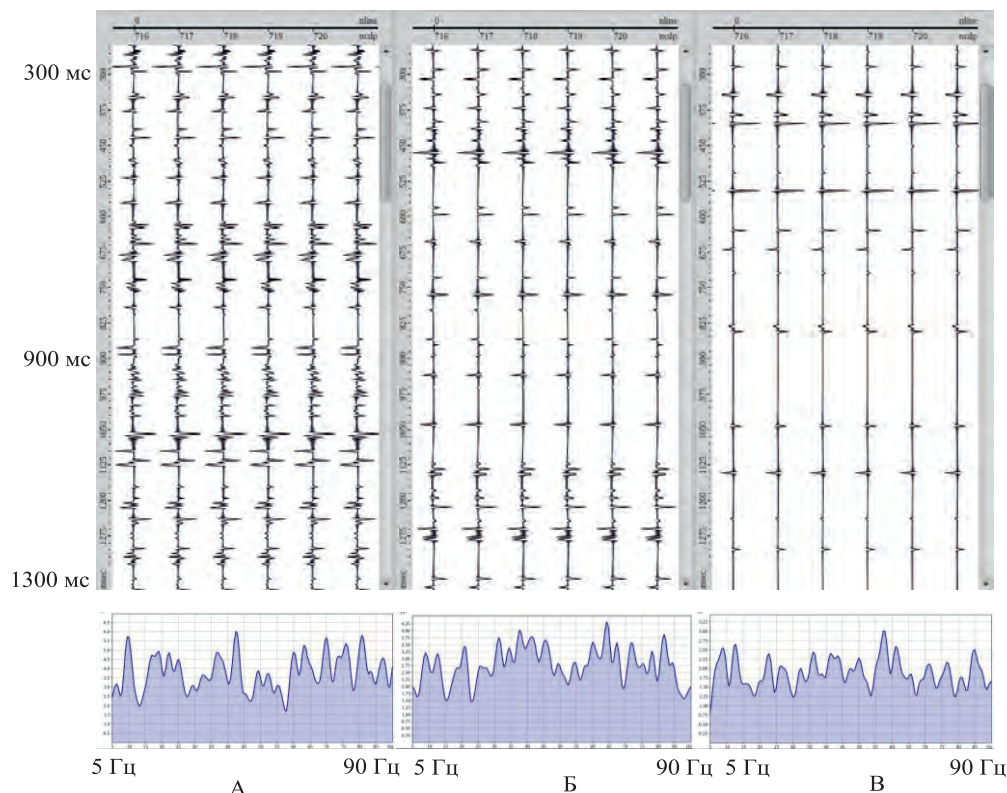
На рис.1 показаны три реализации пуассоновского импульсного процесса с сигналом, который можно назвать цифровым аналогом дельта-функции, т.е. фильтром верхних частот со срезом, соответствующим частоте Найквиста F_n .

Он получается дискретизацией симметричного сигнала

$$\frac{\sin(F_n * t)}{F_n * t}.$$

В данном случае шаг дискретизации 2 мс и, стало быть, $F_n = 250$ Гц. Если момент вступления попадает на дискретный отсчет, то фильтр превращается в импульс Кронекера, а если момент вступления попадает между отсчетами, то на модельной импульсной трассе появляются незначительные, но заметные осцилляции. Так моделируется «идеальная» импульсная трасса в диапазоне частот $(0, F_n)$. Приведены три реализации процесса с различной интенсивностью потока отражений. Указаны

► Рис. 1. Трассы коэффициентов отражения с разной интенсивностью со средним интервалом между вступлениями
А) 10 мс;
Б) 20 мс;
В) 100 мс.



средние интервалы между вступлениями. Этот параметр связан обратной пропорцией с величиной μ .

Амплитудный спектр такой трассы должен стремиться к равномерному при стремлении окна анализа к бесконечности. Однако мы видим, что при оценивании спектра в окне длительностью в 2 секунды, спектр, рассчитанный преобразованием Фурье по оценке корреляционной функции длительностью 200 мс, далек от равномерного. Это одна из главных сложностей в задаче деконволюции, с которой сталкивается геофизик в обработке. Отчасти справиться с ней помогает осреднение статистик по пространственным координатам, но не в случае деконволюции разреза в горизонтально слоистой среде.

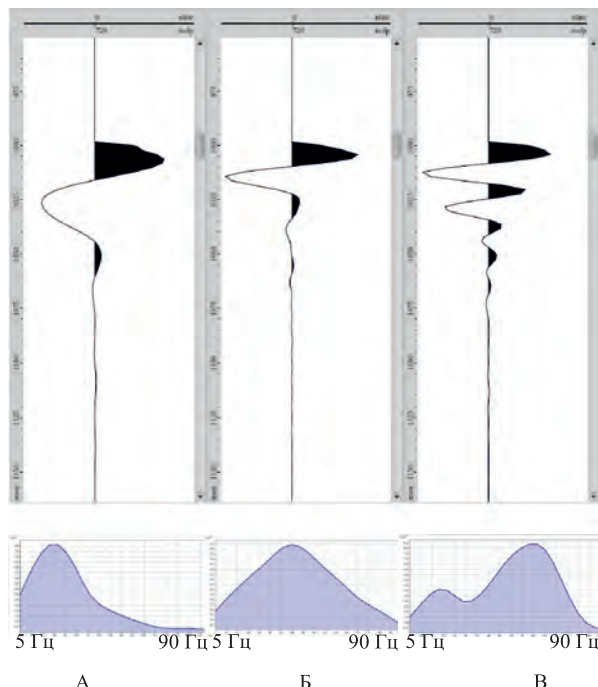
О сигнале $s(t)$ часто предполагают, что логарифм его амплитудного спектра и его фазовый спектр связаны преобразованием Гильберта. Т.е. сигналы предполагаются минимально-фазовыми. Минимально-фазовые сигналы могут быть только полночастотными (их амплитуд-

ный спектр не может иметь нулей в спектре). Наблюдаемые сигналы считаются результатами полосовой фильтрации минимально-фазовых сигналов. На следующих рисунках показаны минимально-фазовые с различными амплитудными спектрами, которые будут использованы дальше.

На рис. 2 изображены три минимально-фазовых сигнала с различными амплитудными спектрами.

Сигналы «полночастотные», т.е. рассчитаны с ненулевым амплитудным спектром до частоты Найквиста, равной 250 Гц при шаге дискретизации 2 мс. Минимально-фазовый сигнал рассчитывается по формулам из [5]. Спектр показан в диапазоне (0, 100 Гц). Выше 100 Гц он затухает, но, всё же, существенно отличен от 0 (иначе, минимально-фазовый сигнал было бы нельзя смоделировать).

В этой работе мы обсудим только искажения свёрточной модели трассы, обусловленные применением АРУ. Свёрточная модель может искажаться и в



▲ Рис. 2. Минимально-фазовые сигналы с преобладанием:
А) низких частот;
Б) средних частот;
В) высоких частот.

результате любых нестационарных и/или нелинейных преобразований. Даже умножение на плавную функцию, компенсирующую геометрическое расхождение, искажает свёрточную модель, но можно (в данном случае даже аналитически) показать, что эти искажения незначительны. Гораздо опаснее различные способы когерентной фильтрации, миграционные преобразования, в которых форма сигнала может меняться в зависимости от наклона события, связанного с полезными отражениями. Однако здесь мы рассмотрим только воздействие одной процедуры, полагая, что сама методика исследования может быть обобщена на другие задачи.

Почему рассмотрено именно влияние AGC? Дело в том, что с самого начала цифровой обработки [6] процедура стала широко применяться на самых разных стадиях. В последующую эпоху, когда больше стали уделять внимания динамическим особенностям сигналов, приме-

нение AGC стало более ограниченным, и, если оно и применяется, то с обязательным выводом примененных коэффициентов. Между тем, во многих ситуациях AGC (пусть и с последующим обращением, т.е. делением на множители, которыми выравнивались амплитуды) бывает необходимо. Поэтому неизменно актуальными остаются вопросы возможной пользы и вреда от применения такого рода алгоритмов.

Зачем нужно АРУ(AGC)?

Мы не будем обсуждать здесь несомненную пользу AGC, когда оно используется в вспомогательных целях, таких как коррекция статики, скоростной анализ и пр. В этих случаях после применения АРУ данные не идут в дальнейшую обработку. Иная ситуация возникает, когда регулировка амплитуд используется для получения статистик, необходимых для деконволюционных преобразований, или непосредственно перед деконволюцией (с последующим обращением). Здесь необходимо снова вспомнить теорему Кэмпбелла.

Как было отмечено выше, суть теоремы в том, что случайный процесс, описывающий $r(t)$, является «белым шумом», хотя и специфической структуры. Рассмотрим эту формулу подробнее:

$$r(t) = \sum_i a(i) * \delta(t - \theta(i)), \quad (4)$$

где δ – дельта-функция.

При выполнении означенных выше условий, полагая $E(a(i))=0$, можно утверждать:

$$E(r(t)*r(t+\tau)) = \sigma^2 * \mu * \delta(\tau) \quad (5)$$

Эта формула и означает, что $r(t)$ – белый шум.

Кэмпбелл вывел формулу для характеристической функции процесса $r(t)$ [1], а традиционно используемое в геофизике

утверждение (5), является прямым следствием из доказанной им теоремы. При этом он не рассматривал случайные коэффициенты $a(i)$, но позже появились обобщения [2,3,4], в которых допускается произвольное, но одинаковое для всех i распределение $a(i)$. Правомерность такого описания импульсной трассы здесь обсуждать не будем, отчасти некоторые соображения приводятся в [7]. Отметим лишь то, что качественно пуассоновский поток сигналов описывает ситуации, когда запись характеризуется набором отдельных пачек отражений, что соответствует наблюдаемым в сейсмике процессам. При этом, условия теоремы будут выполняться, если рассматривать сумму независимых потоков отражений и допустить фон малоамплитудных отражений с частотой, с которой они встречаются, стремящейся к бесконечности. Таким образом, мы видим, что теорема Кэмпбелла «обслуживает» довольно широкий класс импульсных процессов, допускаются даже случайные вариации формы сигнала. Однако существенным ограничением модели является то, что процесс должен быть стационарным, функции распределений амплитуд неизменны во времени.

Для дальнейших экспериментов выберем реализацию пуассоновского потока со средним расстоянием между вступлениями 10 мс.

Однако прежде чем переходить к экспериментам, остановимся на упомянутом выше обобщении модели $r(t)$, а именно добавлением в неё аддитивного гауссовского белого шума с нулевым средним и среднеквадратичным отклонением σ_n^2 . Это эквивалентно выписанной раньше формуле:

$$Z(t)=z(t)+n(t), \quad (6)$$

где $n(t)$ обладает свойствами: $E(n(t))=0$,

$$E(n(t)n(t+\tau))=\sigma_n^2 \int s(t)s(t+\tau)dt$$

Это не вполне «типичная» помеха. Чаще полагают, что сигнальная часть и помеха обладают разными спектральными характеристиками. Однако если предположить, что случайная помеха порождается тем же источником, что и полезный сигнал, т.е. попросту описывает сигналы, рассеянные на случайных неоднородностях и не связанные с коррелируемыми по пространству полезными отражениями. В такую модель не вписываются различные микросейсм, но их подавление обычно трудностей не вызывает и, во всяком случае, должно рассматриваться вне контекста обсуждаемой задачи. Отчасти этот вопрос обсуждается.

Суть теоремы Кэмпбелла в этом случае не меняется, и формула (3) должна быть переписана следующим образом:

$$E(z(t)z(t+\tau))=(\sigma^2\mu+\sigma_n^2) \int s(t)s(t+\tau)dt \quad (7)$$

а формула (5):

$$E(r(t)*r(t+\tau))=(\sigma^2\mu+\sigma_n^2)\delta(\tau) \quad (8)$$

Т.е. в задаче деконволюции $n(t)$ с указанными корреляционными свойствами помехой не является. В сущности, добавление этого «шума» отражает тот общеизвестный факт, что «слабые» отражения присутствуют в каждом временном отсчете и мало коррелируются по латерали. Последнее свойство несущественно для дальнейшего.

Согласно вышеизложенному, в показанную раньше последовательность коэффициентов отражений со средним интервалом между вступлениями 10 мс добавлен белый шум с малыми амплитудами (примерно в 20 раз меньших основных отражений). Такая добавка мало меняет изображение, но существенна для дальнейших экспериментов,

поскольку на трассах исчезают нулевые промежутки, которые в реальных данных, конечно, не наблюдаются.

На рис. 3 показаны трассы с интенсивностью потока отражений, соответствующие среднему времени между вступлениями 10 мс, свернутые с сигналами, показанными на рис. 2.

Дальше мы будем иллюстрировать эксперименты, в которых выбран сигнал со спектром, изображенным в середине рис. 3. Все дальнейшие эксперименты проводились и с другими сигналами из представленного набора. Результаты и выводы по этим сигналам принципиально не отличаются, поэтому иллюстрироваться не будут.

Также опускаем эксперименты, связанные с компенсацией геометрического расхождения. Можно показать и теоретически, и экспериментально, что искажения от коррекции геометрического расхождения плавной функцией приводят к незначительным искажениям свёрточной модели (они обычно относятся к самым начальным интервалам записи). Если применяется AGC, эти эффекты рассматривать нет необходимости.

Тем не менее, поскольку мы собираемся изучать искажения, связанные с AGC, проверим, насколько эта процедура

искажает сверточную модель. Нас интересует этот вопрос, прежде всего, в контексте задачи деконволюции, поэтому и проверять искажения мы будем двумя способами. Наиболее прямой способ реализуется по следующей схеме: по известному сигналу рассчитывается обратный фильтр, действующий в диапазоне частот (0,100) Гц. Этот фильтр применяется к трассе, описываемой формулой $z(t)=s(t)*r(t)$. Далее к $z(t)$ применяется АРУ с различными длинами окна. В результат вводится обращённая функция усиления. Результаты сравниваются с идеальной функцией $r(t)$.

На рис. 4 иллюстрируются эти эксперименты с окнами 160, 80 и 40 мс.

Как можно видеть на Рис. 5, искажения оценок $r(t)$, обусловленные нелинейным преобразованием, невелики. Окно, примерно соответствующее эффективной длительности сигнала 80 мс, обеспечивает достаточно малые искажения. Однако совершенно необязательно использовать AGC непосредственно для деконволюции. Гораздо важнее узнать, насколько надёжно оцениваются статистики, т.е. корреляционные функции, которые используются при деконволюции. Это можно выяснить либо сопоставлением оценок корреляционных функций, либо опосредованно, рассчитывая оценки формы минимально-

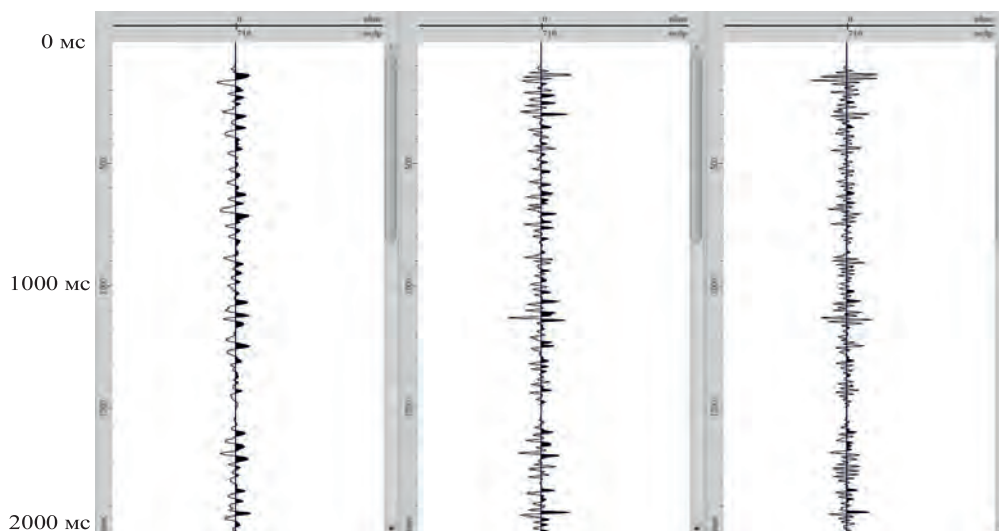
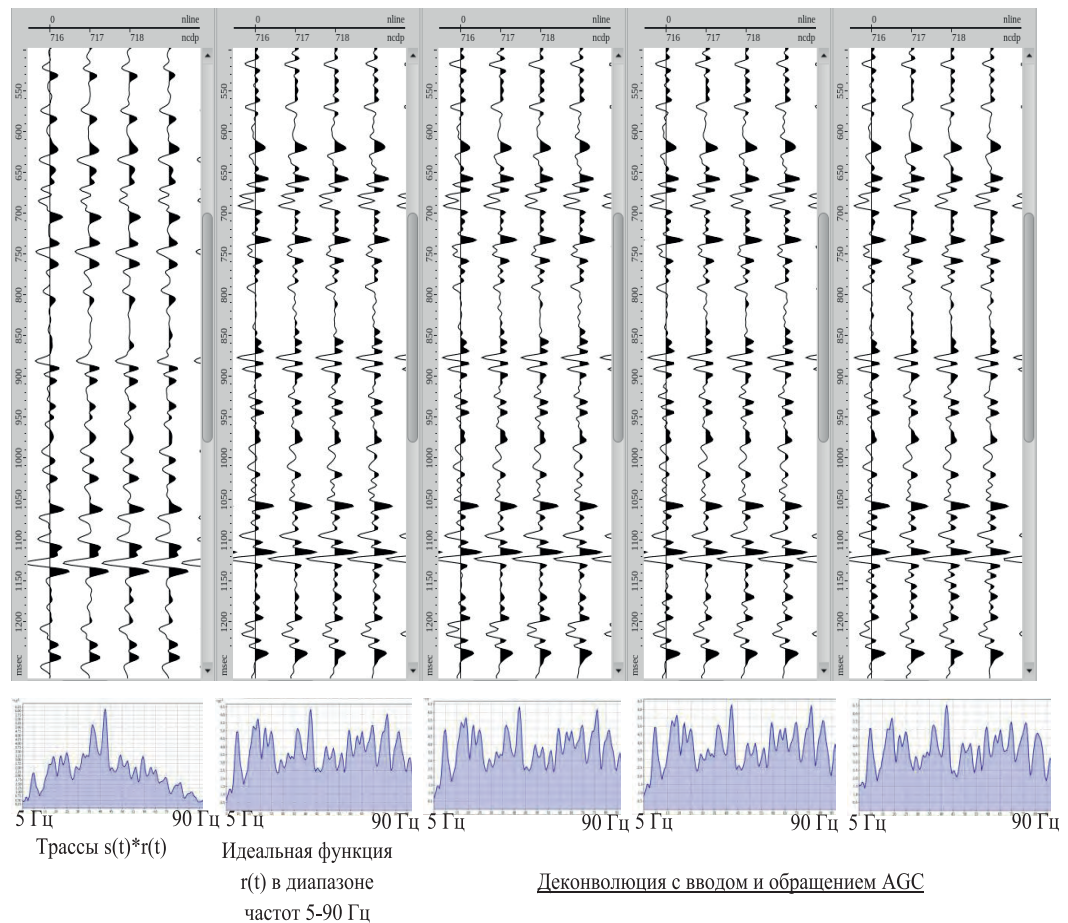


Рис. 3. Трасса с интенсивностью потока отражений 10 мс, свернутая с минимально-фазовыми сигналами/

► Рис. 4.
Результаты
деконволюции
с вводом
и обращением
AGC /



фазового сигнала, порождаемые этими корреляционными функциями. Если оценки удовлетворительны, то их можно применить для деконволюции данных без AGC, т.е. уменьшить влияние нелинейных эффектов.

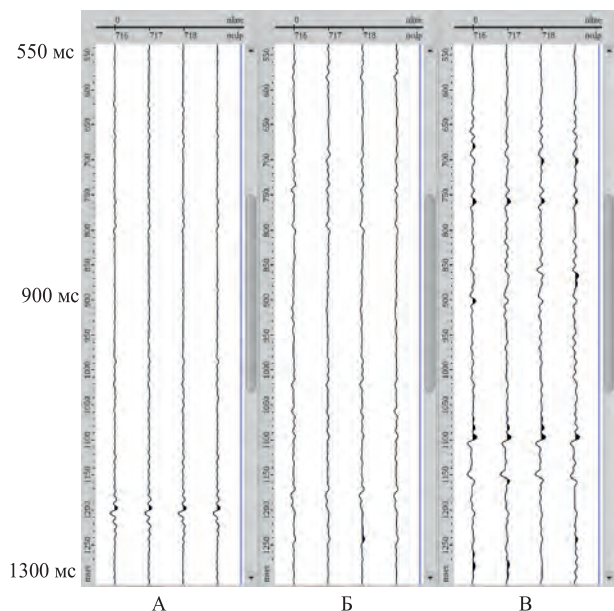
Такую технологию мы называем «матчинг-деконволюцией». Название обусловлено тем, что в ходе этой процедуры ищется сигнал, который приводит исходную запись к результату её «жёсткой» деконволюции. Если деконволюция была минимально-фазовой, то и полученная оценка будет оценкой минимально-фазового сигнала. После этого рассчитывается обратный фильтр на этот сигнал и применяется к исходной трассе. Оценка может быть «отредактирована» (так как это делается при работе с оценками сигнала, полученными по скважинным данным). Может быть подобрана нужная регуляризация. Важно, что,

применив фильтр к оцененному сигналу, можно измерить изменения амплитуд. Технология описана в [8]. В экспериментах, описанных ниже, никакая редакция оценок не производилась, т.к. важно было исследовать искажения формы импульса из-за применения AGC.

Видно, что все результаты деконволюции можно считать удовлетворительными (рис. 7). Погрешности увеличиваются по мере уменьшения окна, начиная с 80 мс, но и при 40 мс искажения невелики.

Между тем, приведенные примеры ниже не отвечают на вопрос, вынесенный в заголовок раздела. В самом деле, никто и не делает деконволюцию по данным с нескорректированным геометрическим расхождением, а в наших примерах амплитуды достаточно стационарны. Зачем же тогда вносить ненужные нелинейные искажения?

Эксперимент проведен для того,



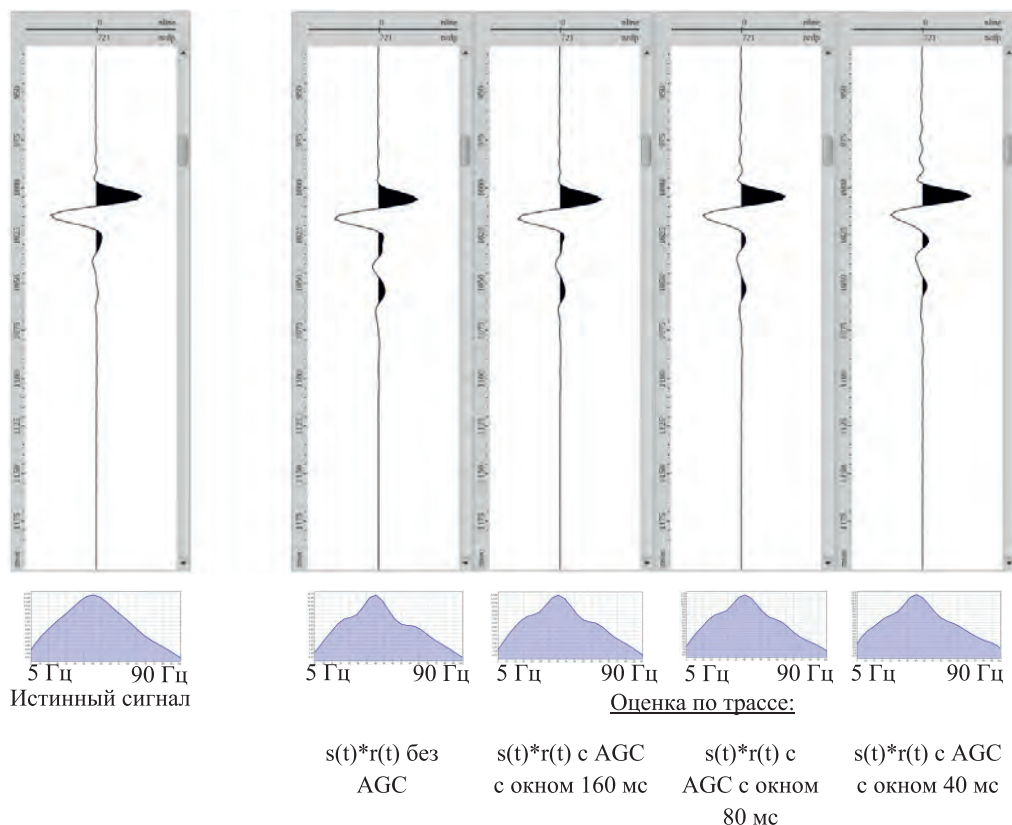
▲ Рис. 5. Разность идеальной функции $r(t)$ и деконволюции с вводом и обращением AGC с окном А) 160 мс Б) 80 мс В) 40 мс.

чтобы показать, что искажения, вносимые AGC, при разумном выборе параметров позволяют получать удовлетворительные оценки формы сигнала. Применять же их можно и к трассам без AGC. Однако, реальные трассы могут и не обладать выдержанностью коэффициен-

тов отражений по времени. Часто реальные записи содержат две или три пачки интенсивных отражений, которые и дают основной вклад в оценки корреляционных функций. Ситуация бывает намного хуже, когда немногочисленные пачки отражений имеют похожие спектральные характеристики (провалы и пики спектров, обусловленные характером слоистости, имеют похожие амплитудные спектры). На рис. 8 показана именно такая ситуация.

Слева (на Рис. 8) изображена импульсная трасса, содержащая 3 группы отражений. Каждая из этих «пачек» содержит «провал» в амплитудном спектре примерно на 40 Гц. Правее изображена та же трасса, на которой те же импульсные трассы свёрнуты с минимально-фазовым сигналом. Справа изображена сейсмограмма после AGC с окном 80 мс. Ниже приводятся спектры сейсмограмм. Видно, что спектры первых двух сейсмограмм содержат «провал» на частоте 40 Гц, и он отсутствует на сейсмограмме после AGC.

► Рис. 6. Истинный сигнал и оценка формы сигнала по различным трассам.



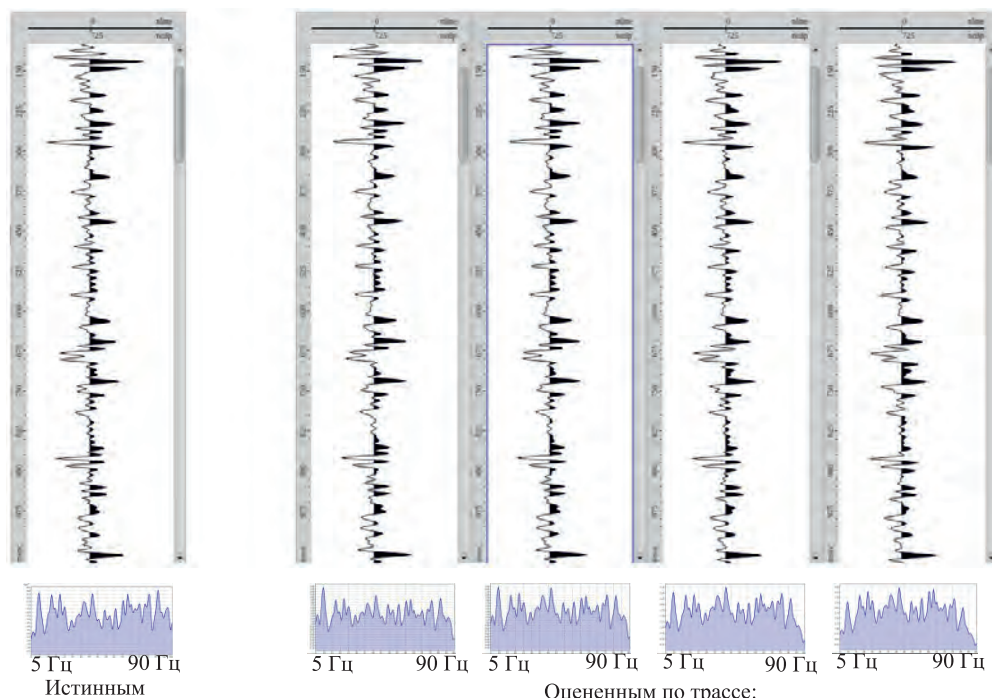
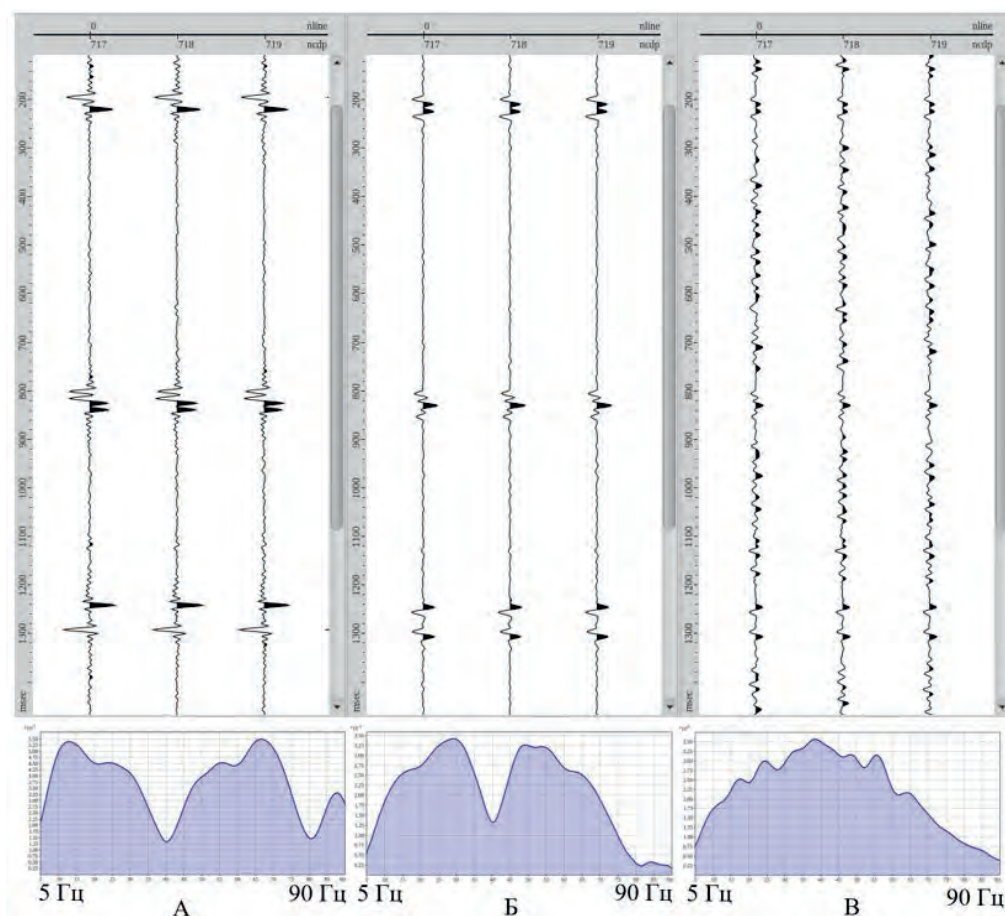


Рис. 7.
Результат
деконволюции
с сигнатурой,
представленной
различным
сигналом.

Оцененным по трассе:
 $s(t)*r(t)$ без AGC $s(t)*r(t)$ с AGC с окном 160 мс $s(t)*r(t)$ с AGC с окном 80 мс $s(t)*r(t)$ с AGC с окном 40 мс

Рис. 8.
А) Импульсная
трасса $r(t)$;
Б) Свертка
импульсной
трассы
с сигналом
 $s(t)*r(t)$;
В) Свертка
импульсной
трассы $s(t)*r(t)$
с применением
AGC 80 мс.

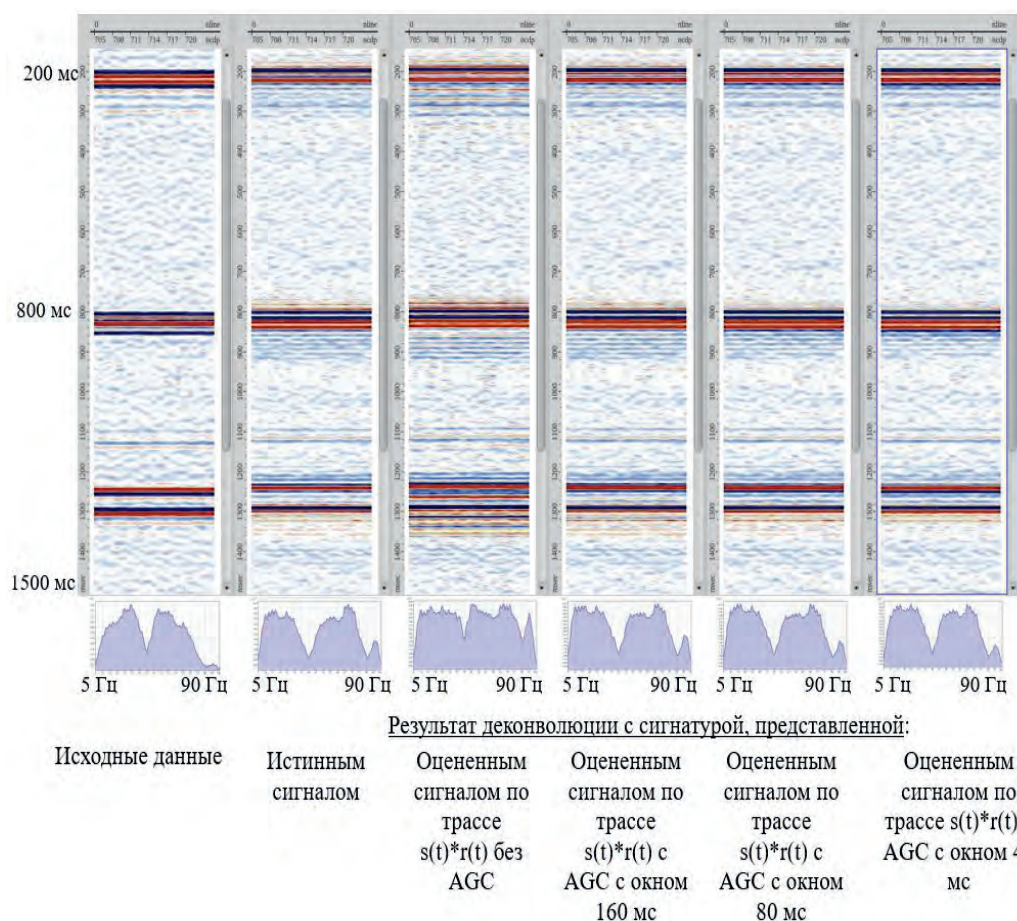
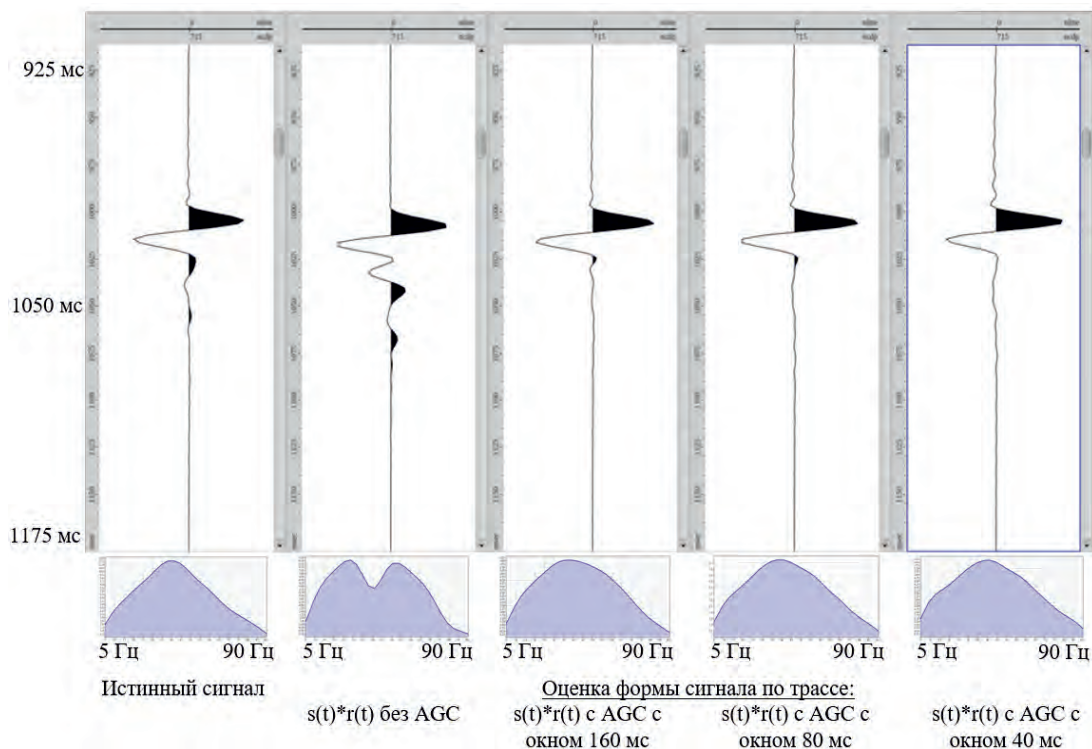


Ниже (на рис. 9.) приводятся оценки
формы сигнала с различными окнами AGC.
На следующем рис. 10 показаны

результаты деконволюции с полученными
оценками.

Все оценки по трассам с AGC представ-

► Рис. 9.
Оценки
формы
сигнала
по трассе
 $s(t)*r(t)$.



◄ Рис. 10.
Исходные
данные и
результаты
деконволюции
с различными
сигнатурами.

ляются вполне удовлетворительными, оценка по исходной сейсмограмме существенно искажена.

На следующем рисунке показаны фрагменты тех же сейсмограмм в большем масштабе.

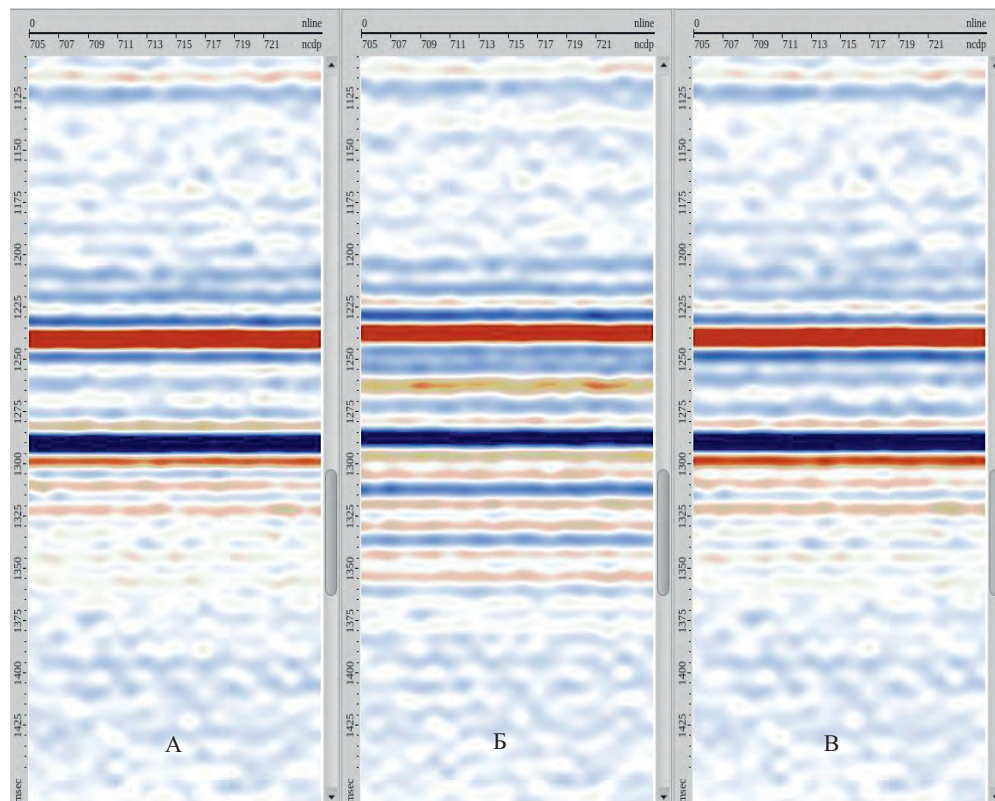


Рис. 11.
 Результат
 деконволюции
 в увеличенном
 виде с
 сигнатурой,
 представленной
 сигналом
 А) истинным;
 Б) оцененным
 по трассе
 $s(t)*r(t)$ без AGC;
 В) оцененным
 по трассе
 $s(t)*r(t)$ с AGC
 с окном 80 мс.

АРУ при наличии шума с иными корреляционными свойствами

Мы рассматривали помеху $n(t)$, которая представляла собой гауссов белый шум, свёрнутый с формой волны $s(t)$. Для задачи деконволюции, решаемой по оценкам корреляционных функций, этот шум помехой не является. Однако, хорошо известно, что даже в отсутствии регулярных помех есть случайный шум с корреляционными свойствами, отличными от корреляционных свойств полезного сигнала. AGC может поднимать этот уровень, возможно, слабой помехи, до уровня сильных полезных отражений. Конечно, можно исключать области, где очевидно отсутствие полезного сигнала и области настроек, однако следует помнить, что оценка автокорреляции трассы – это сумма автокорреляций помехи и полезного сигнала.

Спектральная характеристика оптимального винеровского фильтра:

$$F(\omega) = \frac{S^*(\omega)}{\alpha * |S(\omega)|^2 + N(\omega)},$$

где α – средний квадрат $d(t)$; $S(\omega)$, $N(\omega)$ – спектр мощности помехи.

Фильтр, который получают по функции автокорреляции, имеет амплитудный спектр:

$$|F(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{\alpha * |S(\omega)|^2 + N(\omega)}}$$

Т.е. его амплитудный спектр представляет собой среднее геометрическое между амплитудными спектрами винеровского фильтра и идеального обратного фильтра $\frac{1}{S(\omega)}$.

Таким образом, он является более «жёстким» по сравнению с винеровским фильтром. Отметим, что такой оператор применяют и при обработке изображений, когда стремятся достичь большей резкости, ценой меньшего ослабления помехи [9]. Фазовый спектр у него связан преобразованием Гильберта с логарифмом амплитудного спектра, т.е. фильтр является минимально-фазовым (у винеровского фильтра это не так). Таким образом, учет помехи в функции автокорреляции реализует некоторое «регу-

ляризирующее» действие (обратный фильтр не поднимает так сильно помеху, как идеальный обратный оператор). Сжатие сигнала, конечно, при этом менее эффективно, но обычно в обработке наоборот, для регуляризации добавляют в знаменатель под корнем некоторую константу (на геофизическом жаргоне это называют уровнем белого шума, хотя реальный шум и так влияет на автокорреляционную функцию нужным образом). Поэтому наличие аддитивной помехи снижает эффективность деконволюции, но вполне оправданным образом. Мы не будем здесь иллюстрировать эти эффекты специальными экспериментами на моделях, а перейдем к примеру на реальном материале.

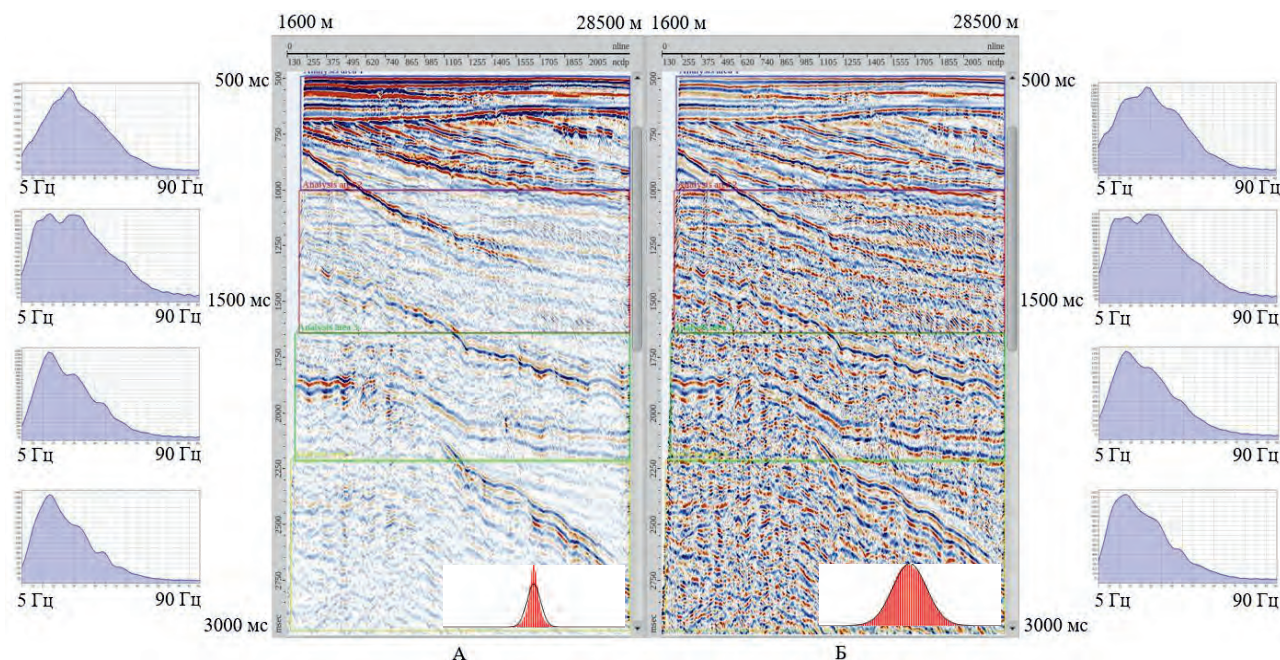
Пример с реальными данными

Сейсмические данные, используемые в данной статье, были взяты из источника, имеющегося в открытом доступе. Они были получены в Северном море в

районе северной части Викинг Грабена¹.

На рис.12 изображены, соответственно, пример реального временного разреза и его же изображение после AGC со скользящим окном 100 мс. Слева показаны амплитудные спектры, оцененные по исходному разрезу, справа - по разрезу с AGC. Видно, что амплитудные спектры во многом похожи (существенно различаются только в верхнем окне). Согласно экспериментам, на модельных данных есть основание больше доверять оценкам справа. Сходство оценок по форме ожидаемо, но в оценки, полученные по большим окнам, корреляционные функции входят с разными множителями, поэтому общая оценка может и существенно отличаться. Главным критерием здесь должно быть качество деконволюции, а не спектральные оценки как таковые. Видно и влияние поглощения, приводящее к затуханию спектра с увеличением временной координаты окна. Это позволяет надеяться, что и при оценках

▼ Рис. 12. Амплитудные спектры, измеренные в разных окнах на реальных данных А) без AGC, Б) с окном AGC 100 мс; внизу показаны гистограммы плотности распределения амплитуд сейсмических трасс.



¹ https://wiki.seg.org/wiki/Mobil_AVO_viking_graben_line_12

параметров эффективной добротности целесообразно использовать регулировки амплитуд.

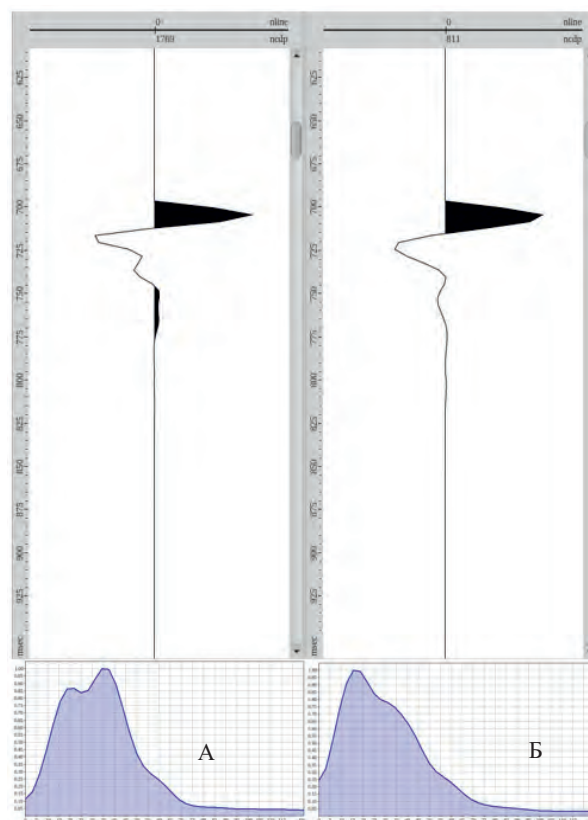
Ниже показаны гистограммы распределений амплитуд. Видно, что после AGC гистограмма лучше аппроксимируется гауссовой кривой, т.е. распределение амплитуд больше похоже на нормальное. Известно, что именно при нормальном распределении оценки корреляционных функций имеют наименьшую дисперсию и являются более надёжными, чем при любых других распределениях. Слева гистограмма более характерна для качественных сейсмических данных, отличающихся высокой динамической выразительностью. Однако именно на таких «хороших» данных, гораздо более пригодных для интерпретации, чем те, что приведены справа, корреляционные оценки подвержены большим искажениям. Отметим, что для более тонкого анализа формы сигнала, опирающегося на статистические оценки моментов, отличных от первого и второго, данные после столь жёсткого AGC совершенно не пригодны (т.е. анализировать фазовый спектр бесполезно).

Любой статистический критерий разрешённости записи, основанный на иных смешанных моментах, нежели корреляционные функции, окажутся нечувствительны к вариациям фазового спектра, т.к. для нормального гауссова процесса все иные смешанные моменты выражаются первыми двумя: математическим ожиданием и функцией автокорреляции. Для оценки минимально-фазового или нуль-фазового сигнала, наоборот, данные после AGC могут быть предпочтительнее.

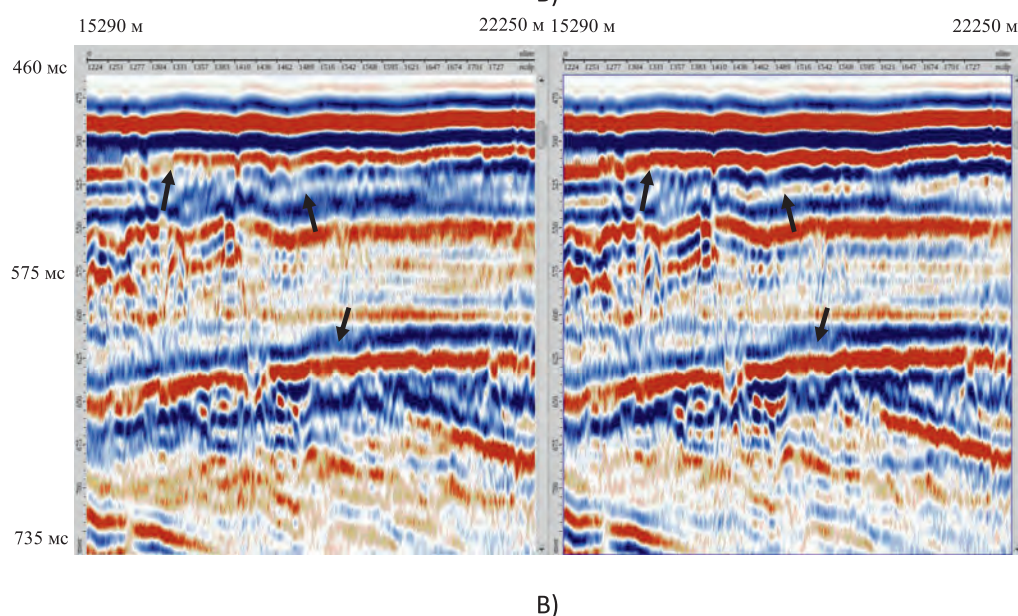
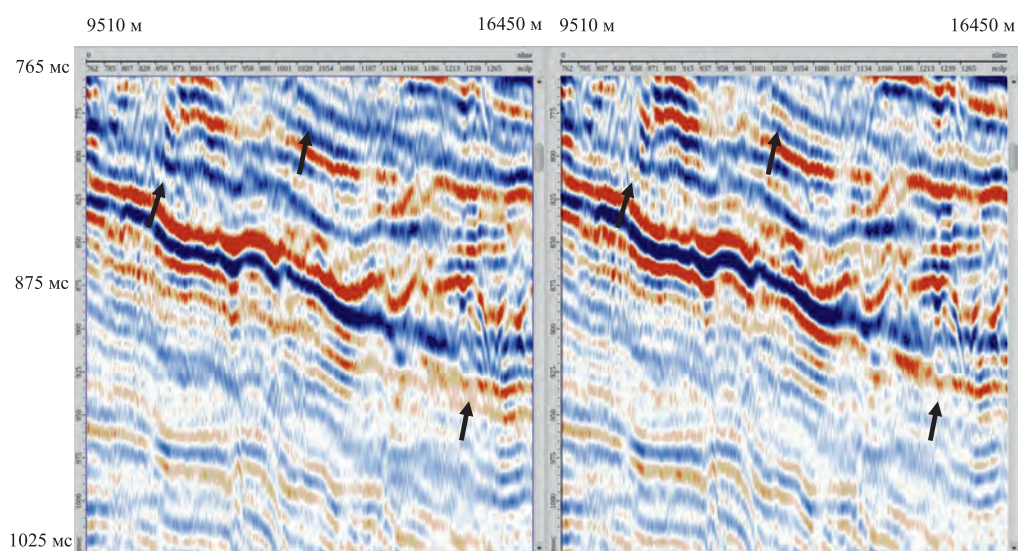
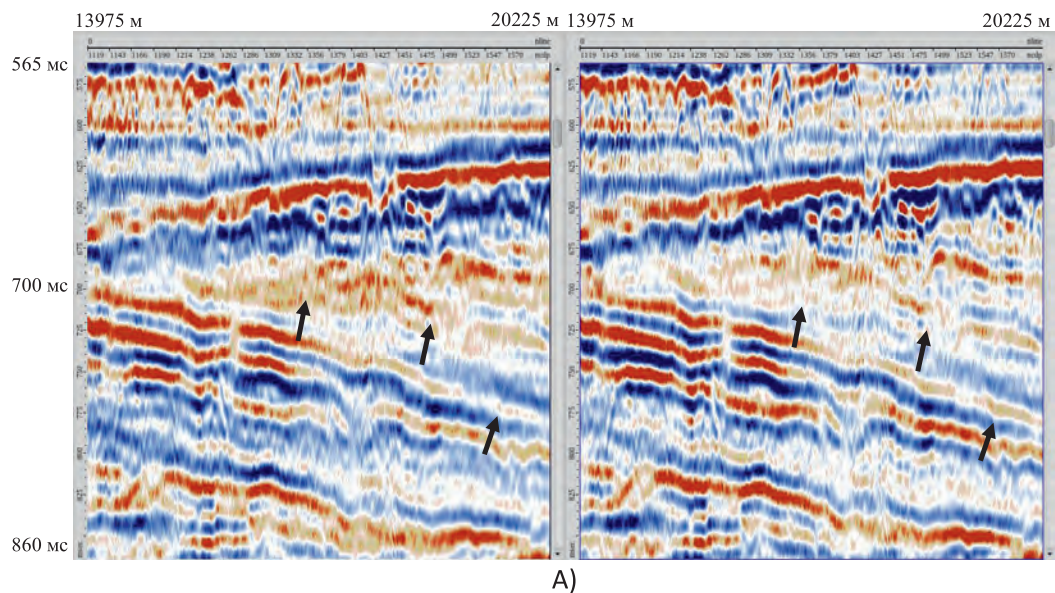
Рассмотрим оценки минимально-фазовых сигналов и результаты деконволюции с использованием этих оценок. Поскольку видна изменчивость спектра,

обусловленная поглощением, выбираем окно настройки в верхней части разреза.

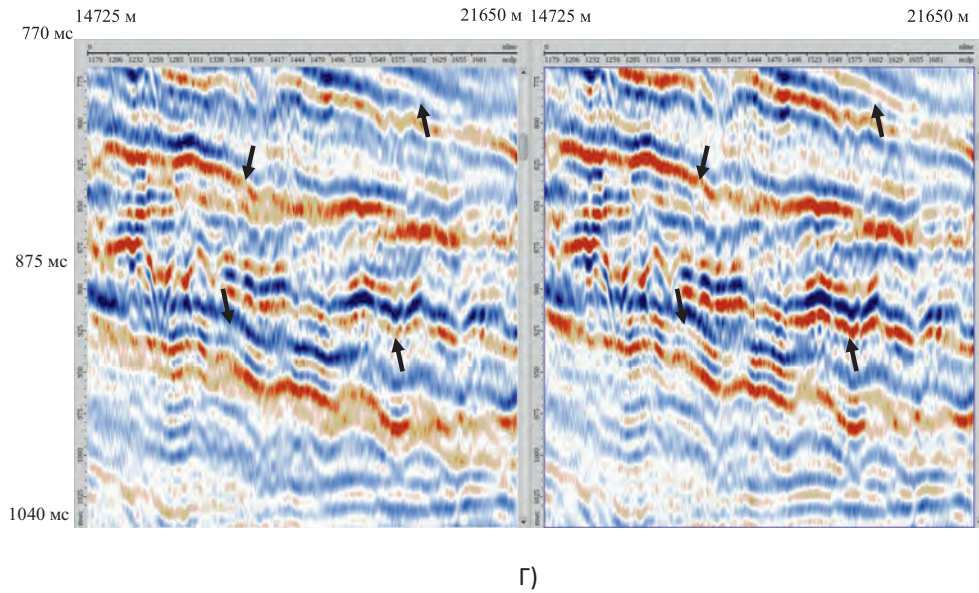
На рис. 13 показаны оценки формы сигнала, а внизу слева и справа показаны амплитудные спектры фрагментов разрезов. На рис. 14 показаны результаты деконволюции с оценками минимально-фазового сигнала без AGC (слева) и с AGC (справа). Показаны фрагменты временных разрезов, т.к. различия в результатах можно оценить лишь в деталях (разрезы «в целом» отличаются не столь значительно). Главные отличия указаны стрелочками на разрезе и вполне согласуются с тем, что было отмечено ранее. Помеха, которая отличается по спектральному составу от сигнала, оказывает «регуляризующее» действие на деконволюцию, амплитудный спектр выравнивается меньше, но и уменьшается влияние шума. Такой результат обыч-



▲ Рис. 13. Оценки сигналов.
А) без AGC; Б) с окном AGC 100 мс.



▲ Рис. 14. (Начало) – (А, Б, В, Г) Фрагменты результата деконволюции с оценкой сигнала без AGC (слева) и с окном AGC 100 мс (справа).



▲ Рис. 14. (Продолжение) – (А, Б, В, Г) Фрагменты результата деконволюции с оценкой сигнала без AGC (слева) и с окном AGC 100 мс (справа).

но считают предпочтительным.

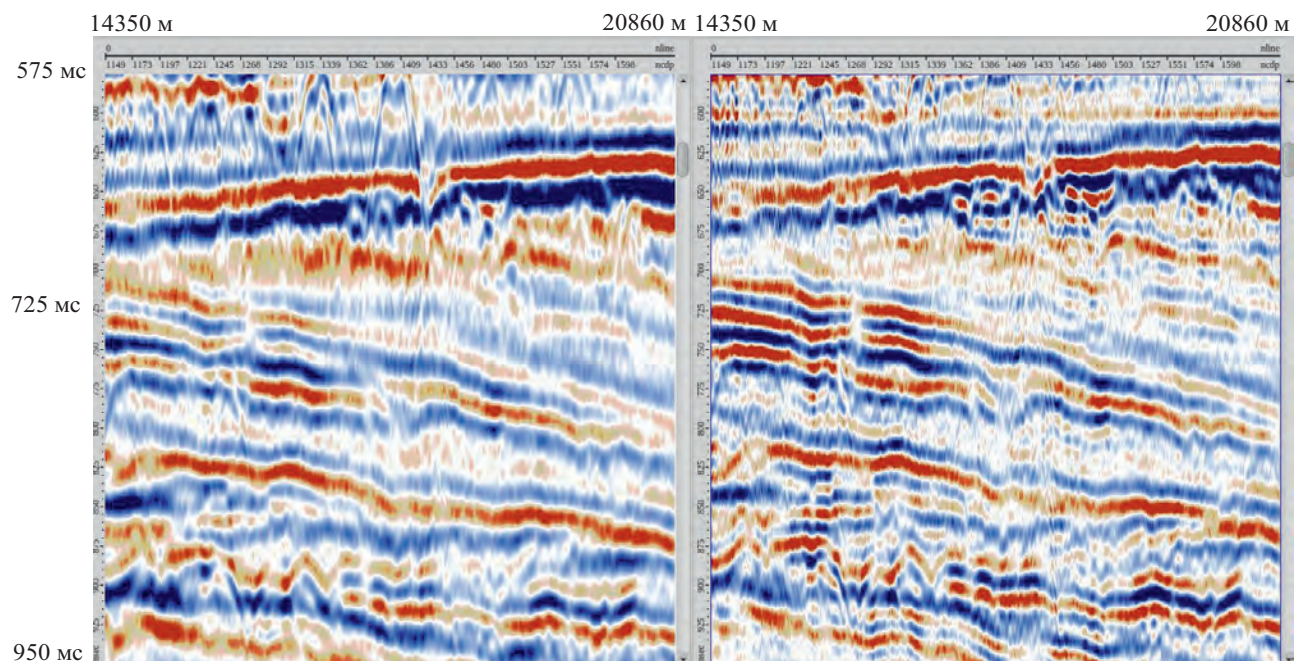
На рис. 15 показан такой же фрагмент исходного разреза (слева) и результат деконволюции с AGC.

Эффект от деконволюции очевиден, хотя можно сказать, что она выполнена достаточно «мягко». Примеры, показанные выше, без применения AGC, выглядят более шумными без заметного

прироста разрешённости.

Заключение

В работе мы обсудили всего один приём, который давно знаком геофизикам и используется на практике. Особенно широко он применялся в 70-90-е годы, когда вопросам сохранения динамических параметров уделялось меньше



▲ Рис. 15. Фрагмент исходного разреза (слева) и результат деконволюции с оцененным сигналом с применением окна AGC 100 мс (справа). Показан тот же фрагмент, что и на рис. 14 А.

внимания в промышленной обработке. С тех пор как в интерпретации стали широко применяться алгоритмы AVO-AVA анализа, различные инверсионные преобразования, многие алгоритмы «слепой» деконволюции считаются скомпрометированными с точки зрения сохранения амплитуд. В работе [8] приводятся приёмы т.н. матчинг-деконволюции, которые призваны контролировать искажения амплитуд в ходе деконволюции. Эти же приёмы (с выделением формы сигнала, на которых строится обратный фильтр) мы использовали здесь, чтобы изучить искажения, обусловленные нелинейным преобразованием (такая возможность декларировалась и в [8]).

Можно ли утверждать, что приём универсален? На этот вопрос никак нельзя ответить утвердительно. В самом деле, если мы имели много шума, спектральные характеристики которого существенно отличны от тех, что описывают полезные отражения, и мы этот шум существенно ослабили в ходе обработки, то в результате AGC есть опасность снова его поднять до уровня полезного сигнала. Однако можно утверждать, что наличие такого шума может лишь привести к излишней «регуляризации», т.е. снижению эффективности деконволюции с точки зрения расширения (выравнивания) амплитудного спектра. Здесь уместно заметить, что если применяется минимально-фазовая деконволюция, то всегда возможно её многократное применение. Это одна из причин, по которой до получения финальных результатов стараются использовать именно минимально-фазовую деконволюцию, оставляя окончательную коррекцию фазового спектра на завершающие этапы обработки, приближенные к интерпретации. Кроме того, возможно множество мето-

дических приёмов для исключения из областей настройки протяженных участков с такого рода помехой. Главный вывод из данной работы заключается в том, что не нужно опасаться нелинейных эффектов и потерь в динамической выразительности волнового поля после AGC. В приведенных экспериментах мы осознанно использовали небольшие окна в AGC, чтобы подчеркнуть этот тезис. Одновременно отметим, что для процедур оценивания фазовых спектров на основе статистик, существенно опирающихся на негауссовость распределения амплитуд сейсмической записи [10], такой приём совершенно не пригоден (или его следует применять с большой осторожностью). Дело здесь не в искажениях фазового спектра (специально поставленные эксперименты как раз показывают, что он мало искажается в результате AGC), а в высокой дисперсии статистик, когда распределение амплитуд стремится к нормальному.

Несмотря на высказанные ограничения, опыт показывает, что применение AGC для деконволюции (лучше сказать, «матчинг-деконволюции») обычно сказывается положительно с точки зрения повышения её устойчивости и достижения благоприятного компромисса между повышением разрешённости и обеспечением хорошего отношения сигнала/помеха.

Литература

1. Campbell N.R. The study of discontinuous phenomena. Proc. Cambridge Philos. Soc., 15, pp. 117-136, 1909.
2. Кингман Дж. Пуассоновские процессы. Под ред. А.М. Вершика. — М.: МЦНМО, 2007 г. — 136 с.
3. Рытов С. М. Введение в статистическую радиофизику. Ч.1. Случайные процессы. — М.: Наука, 1976 г. — 496 с.

4. Малахов А. Н. Кумулянтный анализ случайных негауссовых процессов и их преобразований. – М.: Сов. радио, 1978. – 376 с.

5. Оппенгейм А. В., Шэфер Р. В. Цифровая обработка сигналов: Пер. с англ./ Под ред. С. Я. Шаца. – М.: Связь, 1979. – 416 с.

6. Козлов Е.А., Гогоненков Г.М., Лернер Б.Л. и др. Цифровая обработка сейсмических данных. – М.: Недра, 1976 г. – 297 с.

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

8. Кунченко Д.С., Овчинников К.Р., Фиников Д.Б О задачах деконволюции сейсмических записей и возможностях контроля искажений формы сигнала // ПРИБОРЫ и СИСТЕМЫ РАЗВЕДОЧНОЙ ГЕОФИЗИКИ Общероссийский ежеквартальный научно-технический журнал. - 2022. - №3. - С. 79-88.

9. Применение цифровой обработки сигналов / [С. Л. Фрини, Дж. Ф. Кайзер, Х. С. Макдональд и др.]; Под ред. Э. Оппенгейма. – М.: Мир, 1980. - 552 с.

10. Овчинников К.Р., М.А. Рябинский, Фиников Д.Б Фазовая деконволюция 3D-данных сейсморазведки. Технологические и методические аспекты применения статистического алгоритма коррекции фазового спектра // Геофизика. - 2022. - №3. - С. 16-22.

Подробнее об авторах



Киреева
Алина Павловна

геофизик,
ООО «Сейсмотек».
Научные интересы –
исследование алгоритмов
и программ обработки
данных сейсморазведки.
Занимается обработкой
данных сейсморазведки,
тестированием ПО Prime.
Окончила Российский
государственный университет
нефти и газа (НИУ)
им. И.М. Губкина по
специальности
«Сейсморазведка» (2024 г).
Работает в отрасли
с 2023 года.



Фиников
Дмитрий Борисович

Директор департамента
разработки алгоритмического
и программного обеспечения,
ООО «Сейсмотек».
Возглавляет научное
сопровождение проектов,
внедрение новых методов
обработки сейсмических
данных, разработку и
совершенствование ПО Prime.
Окончил Московский ордена
Трудового Красного Знамени
институт нефтехимической
и газовой промышленности
им. И.М.Губкина по
специальности "Прикладная
математика" (1979г.).
Кандидат технических наук.
Работает в отрасли
с 1978 года.