

На правах рукописи

Адамович Олег Олегович

**МЕТОДИКА УЧЕТА ВЛИЯНИЯ ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ РАЗРЕЗА ПРИ
ОБРАБОТКЕ ДАННЫХ ТРЕХМЕРНОЙ НАЗЕМНОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ
(В УСЛОВИЯХ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ)**

25.00.10 Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2013

Работа выполнена в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова

Научный руководитель: Доктор технических наук,
Жуков Александр Петрович

Официальные
оппоненты: Никитин Алексей Алексеевич,
доктор физико-математических наук, профессор,
Российский государственный геологоразведочный
университет имени С. Орджоникидзе, профессор

Потапов Олег Александрович,
доктор технических наук, профессор,
ООО «Геофизическое Партнерство», консультант

Ведущая организация: Государственное федеральное унитарное
предприятие «Всероссийский научно-
исследовательский институт геофизических методов
разведки»

Защита состоится 22 мая 2013 г. в 16:00 на заседании Диссертационного совета Д.501.001.64 при Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, ГСП-1, г. Москва, Ленинские горы, ГЗ МГУ, зона «А», геологический факультет, ауд. 308.

С диссертацией можно ознакомиться в читальном зале отдела диссертаций Фундаментальной библиотеке (Ломоносовский проспект, 27, сектор А, 8 этаж, к.812)

Автореферат разослан « 22 » апреля 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Никулин Борис Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

При обработке и интерпретации сейсмических данных одной из главных проблем, с которой сталкиваются геофизики, является учет влияния приповерхностных неоднородностей. Влияние верхней части разреза (ВЧР) выражается в искажении формы сигнала, времени его прихода и генерации поля волн-помех.

Многообразие сейсмогеологических условий и большое количество типов приемных расстановок, регистрирующих волновое поле, определяют отсутствие универсальных методов, способных справиться с данной проблемой. Особенно актуально это для материалов трехмерных сейсморазведочных работ, полученных с использованием центрально-симметричной приемной расстановки или системы типа крест. Данная система характеризуется значительным расстоянием между параллельными линиями взрыва и приема, при перпендикулярном их расположении. Подобная разреженность в пространстве значительным образом ограничивает возможности использования стандартных алгоритмов обработки данных, несмотря на преимущества трехмерности наблюдений.

Характерным примером неоднородного строения ВЧР является Западно-Сибирский регион, где мозаичное чередование зон многолетней мерзлоты и зон растепления способствует формированию сейсмических аномалий, корректировка влияния которых включает расчет статических, амплитудных и частотных поправок, а также подавление волн-помех, вызванных структурой ВЧР.

Внедрение в производственную сейсморазведку метода многократных перекрытий послужило основой для разработки подходов к определению поправок непосредственно по сейсмическим данным, без проведения дополнительных полевых исследований. Большинство алгоритмов расчета корректирующих поправок имеют значительные ограничения, связанные с расчетом длиннопериодной составляющей, что обуславливает необходимость создания специального подхода к обработке данных, контролирующего корректность расчета длиннопериодных поправок.

Методика эффективного учета длиннопериодной составляющей статических поправок должна содержать возможность интерактивно влиять на полученное решение, а расчетная часть - не быть требовательной к вычислительным ресурсам и контролироваться небольшим количеством параметров. Одним из таких параметров является частотный состав корректирующих поправок.

Развитие данного направления в разработке методики учета искажающего влияния верхней части разреза считается весьма актуальным.

Целью работы является разработка методики учета искажающего влияния ВЧР при обработке данных наземной объемной (3D) сейсморазведки с использованием особенностей системы наблюдений.

Объектом исследования настоящей работы является верхняя часть геологического разреза и учет ее влияния при проведении сейсморазведочных работ 3D.

В соответствии с целевым назначением, **основные задачи** сформулированы так:

1. Анализ эффективности алгоритмов учета искажающего влияния ВЧР с использованием выборок сейсмотрасс различного рода.
2. Определение выборок сейсмотрасс данных 3D, наилучшим образом подходящих для подавления волн-помех и случайного шума.
3. Разработка алгоритма для повышения эффективности расчета статических, амплитудных и спектральных поправок по данным 3D сейсморазведки с использованием специального вида выборок.

Основные защищаемые положения:

1. Оптимизация процедур обработки, направленных на подавление помех различного типа для данных сейсморазведки, полученных с использованием центрально-симметричной приемной расстановки, достигается с использованием крестовых выборок специального вида типа cross-spread.
2. Использование крестовых выборок при наземных исследованиях 3D позволяет корректно применять алгоритмы учета приповерхностных аномалий, опирающиеся на преобразование Фурье по пространственным координатам.
3. Эффективность расчета статических поправок на основе поверхностно-согласованного подхода к компенсации приповерхностных искажений повышается с использованием частотного подхода.

Научная новизна

1. Разработана авторская методика учета приповерхностных искажений в области пространственных частот для данных наземной сейсморазведки с использованием крестовых выборок данных (cross-spread).
2. Впервые для учета искажающего влияния ВЧР в условиях Западной Сибири опробована методика регуляризации решения поверхностно-согласованной системы уравнений путем фильтрации в области пространственных частот для данных 3D с использованием выборок cross-spread.
3. Предложена методика подавления случайного и когерентного шума до суммирования с использованием ряда выборок сейсмотрасс типа cross-spread первого и

второго рода, шаблонов источников и шаблонов приемников (template источников, template приемников).

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы докладывались на следующих геофизических конференциях: «Геомодель», Геленджик, Россия, 2007 г; на 72-ой конференции и выставке EAGE, Барселона, Испания, 2006 г; на конференции «Ломоносов – 2007», МГУ, Россия, Москва. По теме диссертации опубликовано пять работ, в том числе одна на английском языке. Основные защищаемые положения опубликованы в журнале, входящем в список рецензируемых журналов ВАК.

По теме диссертации опубликовано пять работ, в том числе одна на английском языке. Основные защищаемые положения опубликованы в журнале, входящем в список рецензируемых журналов ВАК.

Личный вклад. Ядро защищаемой работы основано на исследованиях автора. Им выполнено теоретическое обоснование разработанного подхода, разработаны алгоритмы и программы для ЭВМ, а также выполнено экспериментальное опробование подхода, положенного в основу диссертации.

Практическая значимость

Предложенный подход позволяет быстро и качественно выполнить учет искажающего влияния ВЧР, что необходимо для корректной структурной и динамической интерпретации целевых интервалов сейсмических разрезов.

Выполненные автором исследования показали эффективность использования выборок различного рода для шумоподавления. Предложенный в данной работе метод расчета статических поправок в полуавтоматическом режиме на основании преобразования Фурье по пространственным координатам с использованием выборок cross-spread можно использовать для всех процедур, основанных на преобразовании Фурье по пространственным координатам.

Структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Материалы диссертации изложены на страницах машинописного текста, проиллюстрированы рисунками.

Благодарности

Автор выражает признательность своему научному руководителю доктору технических наук Жукову А.П. за постановку задачи и предоставленную возможность проведения работ.

Автор выражает глубокую признательность Эпову К. А. - начальнику отдела интерпретации ООО «Геофизические системы данных» за проделанную совместную работу.

Автор благодарит за ценные советы и помощь при написании работы Шехтмана Г.А., Короткова И.П., Шнеерсона М.Б., Кузнецова В.М., Жемчугову В.А. и Козырева В.С., а также весь коллектив ООО “Геофизические системы данных”.

Особую благодарность автор выражает своим родственникам и особенно супруге Овсянниковой И.С., без моральной поддержки которых данная работа не была бы написана.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении кратко излагается состояние проблемы, обосновывается актуальность темы диссертационной работы, а также сформулированы цели и задачи исследований, отмечена их практическая значимость и научная новизна.

Глава 1. Искажающее влияние ВЧР и его учет при обработке данных сейсморазведки 3D.

В данной главе рассматриваются методы коррекции искажений, вносимых ВЧР, которые традиционно используют в МОГТ без учета особенностей центрально-симметричной системы наблюдений.

Одним из первых методов, описанных в отечественной литературе и ориентированных специально на повышение точности определения статических поправок, является метод синтетического годографа, теоретические основы которого изложены в работах И.И. Гурвича и В.М. Глоговского (1963). До его появления широкое распространение получил метод исключения влияния ЗМС, основанный на построении разностных годографов общей точки возбуждения (ОТВ) и общей точки приема (ОТП) (Готов, 1954). В рассматриваемом подходе авторы использовали методику разностных годографов не для исключения отрицательного влияния статических задержек в трассах, а для их определения. Идея алгоритма заключалась в оценке по разностным годографам эффективных параметров среды, построении по ним теоретического годографа и получении статических поправок в виде разности теоретического и наблюдаемого годографов. Далее полученные из различных разностных годографов поправки усреднялись. Этот подход не совершенен со статистической точки зрения: процедура образования разностей времен вдвое увеличивает дисперсию шума их определения, а сравнительно простое описание разностного годографа требует использования только малых удалений, что также ухудшает статистический эффект (Карапыш 1981, Глоговский В.М. 1981).

Указанные недостатки подхода заставили вести поиск по созданию более совершенных алгоритмов. В 1968 г. Nileman предложил метод, послуживший отправной точкой основного направления разработки проблемы коррекции статических поправок,

который успешно развивается и в настоящее время. Его идея заключалась в том, что для каждой трассы временной сдвиг интерпретировался как сумма статических поправок за пункт взрыва и пункт приема. Временные сдвиги в пределах годографа ОГТ аппроксимировались параболой, при этом любые отклонения связывались с остаточными кинематическими поправками. Это было первым применением так называемого *поверхностно-согласованного подхода*.

Исследованию данного подхода для коррекции приповерхностных аномалий посвящено большое количество работ (Глоговский 1983, Гольдин 1975, Козырев 1975, Щварцман 1978, Карапыш 1981, Taner 1974, Wiggins 1976). В результате данных исследований в качестве основного автором был выбран подход, основанный на четырех факторной модели. Спектр зарегистрированного сигнала можно представить в следующем виде:

$$F_{nm}(\omega) = S_n(\omega)R_m(\omega)C_k(\omega)D_l(\omega) \quad (1)$$

где $k = 1/2(m+n)$ и $l = m-n$. F_{nm} – спектр зарегистрированной трассы, $S_n(\omega)$ – спектр влияния источника, $R_m(\omega)$ – спектр влияния приемника, $C_k(\omega)$ – структурный фактор, $D_l(\omega)$ – фактор удаления источник-приемник. Для каждой сейсмической трассы можно записать выражение (1), в результате чего получится система уравнений, состоящая из $m \cdot n$ трасс-уравнений и $m+n+k+l$ неизвестных. Для современных 3D съемок количество сейсотрасс составляет десятки и сотни миллионов, а количество неизвестных ограничивается несколькими миллионами.

Уравнение (1) представлено в мультипликативной форме (которая соответствует свёрточной форме во временной области), что не очень удобно для решения. Если прологарифмировать обе части уравнения, оно приобретет следующий вид:

$$\ln F_{nm}(\omega) = \ln S_n(\omega) + \ln R_m(\omega) + \ln C_k(\omega) + \ln D_l(\omega) \quad (2)$$

В большинстве случаев на практике не вычисляют полные частотно-зависимые характеристики отдельных факторов, обуславливающих влияние ВЧР. Поверхностно-согласованные фазовые сдвиги учитывают при обработке введением обычных статических временных сдвигов, которые представляют линейные фазовые поправки в частотной области. Амплитудные поправки вычисляют как среднее значение амплитудного спектра. Коррекция среднего значения амплитудного спектра соответствует произведению сейсмической трассы и полученного скаляра во временной области. Это эквивалентно прибавлению константы к логарифму амплитудного спектра. При решении полученных систем уравнений рассчитывают поправки за пункты взрыва и, если необходимо, за удаление источник-приемник. Полное решение системы (2) называют *поверхностно-согласованной*

деконволюцией. Как показывает практика, более корректное решение задачи получается путем независимого рассмотрения амплитудного и статического факторов (Сысоев, 2012).

Как известно, подобно разложению колебаний во временной области, графики спектральных искажений, связанных с ВЧР, можно представить как набор пространственно-частотных компонент (Козырев 2003). Частотные составляющие делят обычно на три диапазона относительно длины расстановки: короткопериодный – от 0 до 0.5 длины; среднепериодный - от 0.5 до 2-х длин; длиннопериодный - от 2-х и более длин расстановки.

Уравнение (2) записывается для каждой сейсмотрассы, в результате чего получается система уравнений, состоящая из $m \cdot n$ трасс-уравнений и $m+n+k+l$ неизвестных. При проведении современных работ 3D количество трасс составляет десятков и сотен миллионов. При этом количество неизвестных источников, приемников, удалений и точек ОГТ составляет миллионы. Таким образом, на основании (2) получается переопределенная система уравнений. Традиционным способом решения таких систем является метод наименьших квадратов. Как показано в целом ряде работ (Гольдин 1975, Глоговский 1983, Шварцман 1978, Taner 1974, Wiggins 1976), данный подход позволяет определять короткопериодную и среднепериодную составляющую искажений, однако при увеличении пространственного периода аномалии значительно падает точность данного метода. Еще один недостаток этого метода заключается в том, что необходимо иметь оценку левой части систем уравнений 1-2 (спектры, времена, амплитуды), которая часто искажена ввиду большого количества помех. Кроме того, четырехфакторная модель является наиболее приближенной к строению ВЧР. На зарегистрированный спектр трассы могут влиять и другие факторы. Поэтому на практике часто рассматриваются независимо три задачи: коррекция статических поправок, коррекция амплитуд и коррекция спектра.

Для того, чтобы обойти недостатки метода на основе подхода (1) – (2), при расчете статических поправок используют ряд альтернативных подходов: метод максимизации энергии суммотрассы ОГТ, предложенный впервые Claerbout (1985); группа методов на основе первых вступлений головных (рефрагированных) волн в первых вступлениях сейсмограмм общей точки взрыва (ОТВ) (Hampson, 1984); учет аномалий скоростей суммирования $V_{огт}$ (Козырев, 1982); метод интерактивной коррекции статических поправок (Козырев, 2003). Исправления формы сигнала и амплитуды коррекции на основе факторного разложения спектра сигнала (1) – (2) на данный момент является практически единственным используемым методом.

Вычисление статических поправок для 2D и 3D данных принципиально ничем не отличается. Существует ряд модификаций системы (1) (Galbraith 1995;Schultz 1984; Мешбей 1988), однако данные подходы обладают такими же ограничениями и недостатками. Можно

выделить технологию интерактивной коррекции статических поправок с использованием пространственных зафиксированных баз суммирования, что делает возможным реализацию интерактивного подхода в случае 3D данных (Коротков, 2011).

Помимо искажения спектра отраженных волн, неоднородное строение ВЧР является источником большого количества волн-помех, интерференция с которыми значительно искажает амплитуды и частоты однократно отраженных волн на суммарных разрезах. Вне зависимости от типа помех большинство методов их подавления основано на преобразовании данных в другие области, где возможно успешное разделение сигнала и помехи.

Рассмотрим шумоподавление на примере поверхностных волн и преобразования Фурье. Для волн другого типа и других преобразований получаются схожие результаты. Эффективность применения шумоподавления зависит от того, каким образом выборка трасс отражает поведение шума и полезного сигнала. Для успешного шумоподавления с применением двумерного преобразования Фурье необходимо, чтобы выборка трасс представляла собой набор данных, в котором отсутствует эффект наложения пространственных частот, и данные представлены на равномерной пространственной сетке.

При достаточной пространственной дискретизации поверхностного шума определенного частотного состава можно подавить волны данного типа путем мьютинга в F - K области соответствующей части спектра и последующего обратного преобразования в X - T область. Кроме того, стоит отметить, что в случае 2D съемок практически все выборки обладают достаточно равномерной пространственной дискретизацией для подавления шума.

В случае отличия годографа во временной области от линейного он так же отличается от линейного и в частотной области. Именно поэтому затруднено подавление тех волн-помех, годограф которых описывается кривыми большего порядка на основании преобразования Фурье.

В случае 3D наземных съемок наибольшее распространение получила центрально-симметричная (крестовая) система наблюдений. Для данной системы характерно перпендикулярное расположение линий приема и линий возбуждения на выборках ОТВ, ОТП (общей точки приема), ОГТ (общей глубинной точки) и РУ (равных удалений). Подавление волн-помех на основании двумерного преобразования Фурье не будет давать оптимальных результатов в силу того, что годографы волн поверхностного шума выглядят как различные сечения конуса поверхностного шума и представляют собой гиперболы или проявляются как случайный шум, то есть значительным образом отличаются от линейного (Dunkin 1971).

Использование трёхмерных фильтров для подавления шума с использованием выборок ОТВ, ОТП, ОГТ, РУ затруднено вследствие значительного расстояния между

трассами и, как следствие, значительного пространственного аляйсинга (Yilmaz 2001). До недавнего времени областью применения трехмерных фильтров были суммарные кубы ОГТ, в которых расстояние между трассами соответствует расстоянию между ОГТ.

Основным методом подавления случайного шума является применение различных двух- и трехмерных пространственных фильтров, основанных на когерентности сигнала в выбранном пространственно-временном окне и вычитающих шум на основе той или иной пространственной оценки сигнала (медианная фильтрация, фильтрация по динамическому отношению сигнал/шум, F - XU деконволюция и т.д.). По аналогии с подавлением когерентных волн-помех, результат шумоподавления зависит от выборки, по которой проводится шумоподавление.

Глава 2. Основные выборки данных 3D наземной сейсморазведки.

Во второй главе проведен анализ выборок данных в случае двумерной съемки. Проведен анализ трехмерных съемок. Выбраны основные параметры и характерные «классические» выборки данных 3D. Введены специфические выборки данных, характерные только для наземных крестовых съемок 3D.

Зарегистрированное на поверхности волновое поле рассматривают как зависимое от пространственных координат позиций источника и приемника, а также времени $A=A(x,y,t)$.

Выборкой волнового поля назовем все те сейсмические трассы из общего набора A , которые задают, используя определенные математические законы изменения координат x и y . На практике число применяемых законов достаточно ограничено, что обусловлено физической рациональностью полученных выборок.

При проведении двумерной съемки вдоль профиля дискретизации подвергают три независимые переменные: положение источника (x_s), приемника (x_r) и время (t), т.е. исходное зарегистрированное волновое поле $A=A(x,y,t)$ является трехмерным. В случае трехмерной съемки дискретизации подвергаются пять независимых переменных: положения по оси абсцисс и по оси ординат источника (x_s, y_s) и приемника (x_r, y_r), а также время (t), т.е. исходное волновое поле для трехмерных съемок является пятимерным $A=A(x_s, x_r, y_s, y_r, t)$.

Для двумерных съемок основными типами выборок, используемых для обработки и анализа данных, являются следующие: выборка по общей точке взрыва $x_s=const$; общей точке приема $x_r=const$; равных удалений $x_s-x_r=const$ и общей срединной точке (ОСТ) $(x_s+x_r)/2=const$.

Для 3D данных аналогичным образом получают «классические» выборки, которые отличаются от двумерных дополнительной координатой дискретизации. Выборка типа общей точки взрыва $x_s=const$ и $y_s=const$; общей точки приема $x_r=const$ и $y_r=const$; равных удалений

$x_s - x_r = const$ и $y_s - y_r = const$; ОГТ $(x_s + x_r)/2 = const$ и $(y_s + y_r)/2 = const$. При равномерной и плотной дискретизации источников и приемников в пространстве приведенных выше выборок достаточно для обработки и анализа данных. Однако в современной производственной сейсморазведке 3D такая плотность данных в силу различных причин практически недостижима.

В качестве примера в работе рассмотрена типичная съемка 3D с расстоянием между пунктами взрыва и приема 50 м и расстоянием между линиями приема и возбуждения, равным 200 м. Показано, что с использованием таких выборок данных 3D сейсморазведки происходит пространственный аляйсинг. Традиционным способом уменьшения пространственного аляйсинга может быть применение группирования источников или приемников, однако в условиях неоднородной ВЧР применение значительных баз группирования может значительным образом исказить спектр полезного сигнала (Adamovich 2010).

Применяя пятимерность полного зарегистрированного волнового поля, полученного в пределах всей площади работ, можно сконструировать выборки специального вида, характерные только для трехмерных работ. Для данных, полученных с использованием крестовой приемной расстановки, это - cross-spread первого рода ($x_r = const$ и $y_s = const$) и cross-spread второго рода ($x_s = const$ и $y_r = const$). На рис.1в приведены графические представления полученных выборок. Оказывается, что выборки данных такого рода представляют собой непрерывные кубы единичной кратности ОГТ. При выборке cross-spread первого рода получается представление волнового поля максимально плотное. Сейсмотрассы в таком кубе в значительно меньшей степени подвержены пространственному аляйсингу, и использование данных выборок позволяет осуществить корректное применение как 2D, так и 3D фильтров.

Для дальнейшего анализа необходимо ввести такое понятие, как *пространственная непрерывность* регистрируемого волнового поля. Данные являются пространственно непрерывными, если при небольшом изменении координат поверхностных позиций соседних сейсмотрасс (ПВ, ПП) происходит небольшое изменение координат изображения или координат удаления. На качественном уровне это можно объяснить следующим образом. Рассмотрим выборку трасс ОТВ (рис. 1а) и выборку трасс cross-spread (рис. 1в). Для сейсмограммы ОТВ характерно разрывное представление данных в координатах средних точек. Можно взять несколько соседних сейсмограмм ОТВ, полученных от источников, расположенных между двумя соседними линиями приема. Такую супер-сейсмограмму ОТВ можно назвать сейсмограммой шаблона источников (source template). Этот термин используется при планировании полевых работ. При такой выборке трасс покрытие средними точками является непрерывным, без пропусков.

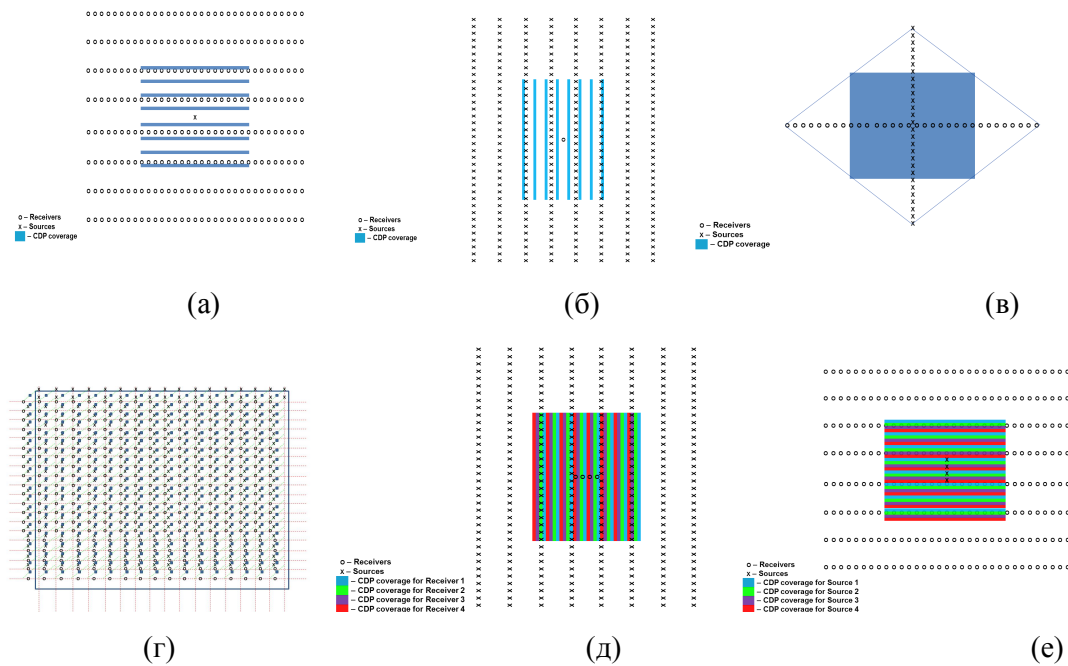


Рис.1. Пространственное представление выборок данных. Выборка данных ОТВ (а), выборка данных шаблон ОТВ(б), выборка данных ОТП (в), выборка данных шаблон ОТП (г), выборка данных РУ (д), выборка данных cross-spread 1ого рода (е).

Расстояние между линиями приема является, однако, значительным. То есть при незначительном изменении координаты средней точки происходит значительное изменение координаты поверхностных позиций. Это может быть причиной ухудшения представления данных вследствие влияния изменчивости приповерхностных условий регистрации колебаний. В случае выборки типа cross-spread положения источников и приемников изменяются минимально возможным образом при изменении средних точек, в результате чего выборка отображает данные максимально непрерывным образом. Так же удобно интерпретировать понятие непрерывности с использованием координаты удаление источник-приемник. В случае выборок cross-spread происходит плавное изменение координаты между соседними трассами. В случае выборки шаблона источников или шаблона приемников значение удаления меняется скачкообразно при переходе от соседних трасс.

Помимо того, что данные представлены непрерывным образом внутри выборки cross-spread, она обладает еще одним полезным свойством. Чтобы его проиллюстрировать, введем понятие центра выборки cross-spread как точки пересечения соответствующих линий пунктов приема и пунктов взрыва. Оказывается, что центры cross-spread первого рода расположены по площади на расстоянии, равном расстоянию между линиями приема и линиями взрыва. Центры cross-spread второго рода расположены по площади на расстоянии, равном, соответственно, расстоянию между пунктами приема и пунктами взрыва. Замечательным свойством таких выборок является то, что в пространстве положение центров cross-spread

упорядочено даже при наличии пропусков или смещений пунктов взрывов или пунктов приема. Данное пространственное упорядочивание ведет к значительным улучшениям свойств преобразования Фурье по пространственным координатам.

Известно, что при неравномерной дискретизации записи ее спектр, рассчитанный с помощью дискретного преобразования Фурье, представляет собой свертку спектра данных на равномерно дискретизированной сетке с оператором неравномерной дискретизации (Sheng Xu 2005; Zwartjes 2007; Daniel 2009). Это ведет к искажению результатов работы алгоритмов в области пространственных частот, что характерно, например, для выборок ОТВ и ОТП.

Таким образом, выборки cross-spread позволяют получить максимально плотное и непрерывное представление данных внутри себя, а также представить их на пространственно равномерной сетке вдоль всей площади работ. Недостатком выборки cross-spread является то, что ее размеры в пространстве ограничены параметрами приемной расстановки.

Еще одной специфической выборкой сейсмотрасс, которую можно получить с использованием данных, полученных с ортогональной системой наблюдения, является выборка “плиточного” вектора удаления (Offset vector tile (OVT)) (Vermeer, 2002). С ее использованием можно представить сейсмотрассы вдоль всей площади съемки. Для того, чтобы получить такую выборку, необходимо ввести l -вектор $x_r - x_s = const$, $y_s - y_r = const$ и $x_s - x_r = const$, $y_r - y_s = const$. Такой вектор указывает направление из центра cross-spread на среднюю точку, отвечающую заданной паре источник-приемник.

Для формирования выборки OVT объединим сейсмотрассы, отвечающие нескольким соседним ОГТ в пределах выборки cross-spread первого рода, с похожими значениями (или, что то же самое, несколько соседних трасс отвечающих введенному l -вектору). Количество ОГТ, которое необходимо объединить, определим по следующему правилу: количество ОГТ в направлении линии источников (шаг между линиями приема)/(шаг между источниками) и в направлении линии приемников - (шаг между линиями взрыва)/(шаг между приемниками). После этого сделаем такую процедуру для всех cross-spread 3D съемки и объединим полученные сейсмотрассы в одну выборку. При этом получается выборка почти квазиравного вектора удаления, покрывающего всю площадь работ. Графически данная выборка представляет собой блоки с указанными выше размерами и напоминает плиточные покрытия какой-либо поверхности, отсюда идет аббревиатура OVT (offset-vector-tile). Аналогичным представлением обладает пара cross-spread – OVT второго рода.

Недостатком данной выборки является невозможность представить данные максимально непрерывным образом, поскольку при переходе от группы средних точек, принадлежащих одному cross-spread, к группе точек соседнего cross-spread происходит скачкообразное изменение координат источников и приемников или, что тоже же самое, -

скачкообразное изменение удаления источник-приемник. Такое представление может ухудшать результаты обработки с использованием данной выборки. Это является недостатком крестовой центрально-симметричной системы наблюдений, при использовании которой невозможно получить выборку, покрывающую всю площадь съемки максимально непрерывным и плотным образом. Достоинством выборки OVT является то, что с ее помощью сейсмотрассы покрывают всю площадь работ минимально разрывным образом.

Глава 3. Теоретическое обоснование методов использования выборок cross-spread для устранения искажающего влияния ВЧР

В третьей главе рассматриваются теоретические основы алгоритмов коррекции искажающего влияния ВЧР при проведении сейсморазведочных работ 3D с использованием центрально-симметричной расстановки с помощью выборок специального вида типа cross-spread.

Рассмотрим возможность расчета и регуляризации статических поправок с использованием частотного подхода на основе выражения (1). Используя полученные результаты, можно переходить к вопросам коррекции амплитуд спектра. Для простоты можно начать с 2D случая. В рамках модели (1) время прихода отражения от выделенного отражающего горизонта обычно представляется в следующем виде:

$$t(x_r, x_s) = r(x_r) + s(x_s) + g(x_{cmp}) + o(x_{cmp}, \Delta x) \quad (3)$$

Здесь: x_r, x_s - координаты приемника и источника на профиле; $x_{cmp} = \frac{x_r + x_s}{2}$ - координата средней точки; $\Delta x = x_r - x_s$ - удаление “источник-приемник”; $r(\square)$, $s(\square)$ - функции, описывающие поверхностно-согласованные поправки для приемников и источников соответственно; - неискаженное время прихода отражения от горизонта (т.н. структурный фактор); $o()$ - фактор остаточной кинематической поправки;

Вначале целесообразно провести анализ 2D-случая в предположении об отсутствии остаточных кинематических сдвигов и совпадении функций статических поправок для источника и приемника (случай наземного источника). Тогда (3) примет следующий вид:

$$t(x, h) = s(x + h) + s(x - h) + g(x) \quad (4)$$

где: $x = x_{cmp} = \frac{x_r + x_s}{2}$ - координата средней точки; $h = \frac{\Delta x}{2} = \frac{x_r - x_s}{2}$ - половина удаления “источник-приемник”;

Основная идея предлагаемого подхода состоит в том, что при переходе в область пространственных частот выражение (3) преобразуется в следующее:

$$T(jk, h) = S(jk)e^{jk h} + S(jk)e^{-jk h} + G(jk) \quad (5)$$

$$T(jk, \mathbf{h}) = S(jk) \cdot 2 \cos(k\mathbf{h}) + G(jk) \quad (6)$$

В результате этого вместо громоздкой системы уравнений (4) для каждой пространственной частоты k получаем свою систему гораздо меньшего порядка (равного количеству представительных выборок равных удалений, то есть средней кратности сейсмической съемки), не связанную с другими.

Система наблюдений 3D. Обобщение определяющих уравнений для случая наземных площадных сейсмических наблюдений не вызывает принципиальных трудностей. Удаления и координаты ОГТ, а также пространственное волновое число становятся векторными величинами. Трехфакторная модель (4) в области частот в этом случае описывается следующим уравнением:

$$T(\vec{k}, \vec{h}) = S(jk)e^{j\vec{k}\vec{h}} + S(jk)e^{-j\vec{k}\vec{h}} + G(\vec{k}) \quad (7)$$

Однако на сегодняшний день практические возможности непосредственного применения данного подхода весьма ограничены. Связанно это с тем, что большинство съемок 3D характеризуются очень малой плотностью трасс. Поэтому кубы равных удалений, как показано в главе 2, при фиксированном азимуте характеризуются очень большим шагом пространственной дискретизации. Для предотвращения эффекта наложения частот, перед применением данного метода необходимо учесть коротко- и среднепериодные составляющие статических поправок. Другой проблемой, осложняющей работу с реальными данными, является нерегулярность систем наблюдений, заключающаяся в произвольной форме полигона, ограничивающего участок съемки, неравномерное распределение кратности по площади и т.д. На первый взгляд, все это должно приводить к тому, что в рассматриваемой постановке задача практически не будет решаться. Однако это не так, и при удачной параметризации результаты могут быть получены даже для таких съемок. Одной из наиболее эффективных, как показано выше, является параметризация cross-spread. Для простоты рассмотрим трехфакторную модель, тогда выражение (4) в случае 3D съемок с использованием параметризации cross-spread примет вид:

$$t(\vec{c}_1, \vec{l}_1) = s(\vec{c}_1 + \vec{l}_1 - \vec{h}) + r(\vec{c}_1 + \vec{l}_1 + \vec{h}) + g(\vec{c}_1 + \vec{l}_1) \quad (8)$$

$$t(\vec{c}_2, \vec{l}_2) = s(\vec{c}_2 + \vec{l}_2 - \vec{h}) + r(\vec{c}_2 + \vec{l}_2 + \vec{h}) + g(\vec{c}_2 + \vec{l}_2) \quad (9)$$

Поскольку оба полученных уравнения имеют одинаковый вид, рассмотрим далее первое из них, опуская индексы при переменных. Выполняя двумерное преобразование Фурье по координате выборки cross-spread, получаем:

$$T(\vec{k}, \vec{l}) = S(k)e^{j\vec{k}(\vec{l}-\vec{h})} + R(k)e^{j\vec{k}(\vec{l}+\vec{h})} + G(\vec{k})e^{j\vec{k}\vec{l}} \quad (10)$$

На первый взгляд, данное уравнение отличается от (7) только наличием фазового множителя. Однако его левая часть соответствует выборке cross-spread, а не точке ОГТ, то

есть пространственная сетка, по которой выполняется преобразование Фурье, является более редкой. За счет того, что средние точки выборок cross-spread характеризуются большим пространственным шагом дискретизации, чем точки ОГТ, из этих выборок удастся сформировать наборы данных, характеризующиеся примерно одинаковым вектором \vec{l} , без пропусков, покрывающих всю площадь.

Типичная центрально-симметричная расстановка имеет одинаковый шаг между линиями приемников и линиями источников, равный 300 м. Шаг между источниками и приемниками - 50 м. Стандартный размер бина ОГТ для такой расстановки равен 25x25 м. При этом шаг пространственной дискретизации для выборок cross-spread первого рода составит 300x300 м, а для выборки второго рода - 50x50 м. Выборки первого типа можно использовать для определения низкочастотных компонент статических поправок, а второго типа - для среднечастотных. Преимущество выборок второго типа (и, особенно, первого) перед выборками ОГТ заключается в их более высокой кратности. Таким образом, один из возможных сценариев решения задачи для неплотных систем наблюдения 3D может выглядеть так:

- На первом этапе выполняется расчет координат центров cross-spread и бинирование l-вектора, а так же расчет времен прихода отражений, например методом корреляции с внешней моделью.
- Второй этап – получение выборки фиксированного l-вектора, отвечающего центрам cross-spread первого или второго рода. После получения выборок l-вектора - выполнение быстрого преобразования Фурье по пространственным координатам.
- Третий этап – независимый расчет пространственных спектров $S(\vec{l})$, $R(\vec{l})$ и $R(\vec{l})$ для каждой пространственной частоты.
- Четвертый этап – полосовая фильтрация спектров, отвечающих статическим поправкам за источники и приемники. Характер фильтра может быть анизотропным – разные периоды пропускания или подавления при разных направлениях **lx** **Ошибка!** **Источник ссылки не найден.**, **ly** **Ошибка!** **Источник ссылки не найден.**, при эллиптическом характере интерполяции. Для уменьшения эффекта Гиббса зона перепада крутизны фильтра сглаживается окном Хэмминга.
- На пятом этапе выполняется обратное преобразование Фурье отфильтрованных спектров $S(\vec{l})$ и $R(\vec{l})$ из **lx** - **Ошибка!** **Источник ссылки не найден.**, **ly** в $x - y$ область. Для получения окончательных статических поправок рассчитанные карты интерполируются с сетки центров cross-spread на сетку соответственно источников и приемников.

Пункты 1-3 являются наиболее вычислительно затратными, при этом они, по сути, являются подготовительными. Основные результаты получаются на этапах 4-5. Это создает основания для использования данной методики в интерактивном режиме. Кроме того, решение в частотной области позволяет выполнять напрямую обращение матриц методом наименьших квадратов в отличие от итеративного метода Гаусса-Зейделя, который используется для решения системы (3) в пространственной области. Как показано в работе (Шварцман 1978), предлагаемый подход ведет к повышению точности и устойчивости полученного решения.

Преимущество параметризации cross-spread перед выборками ОТВ и ОТП для такого типа расстановок заключается в их более равномерной пространственной дискретизации. Так, для рассматриваемого примера, в случае выбора в качестве независимых координат пары ОТВ-удаление, пространственная ячейка характеризовалась бы размерами 300x50 м. Кроме того, при проведении наземных работ положения пунктов взрыва часто значительно смещены, что создает трудности для реализации пространственного преобразования Фурье и искажает полученные спектры (Zwartjes 2007).

Задача определения статических поправок полностью эквивалентна проблеме коррекции амплитуд сейсмической записи за поверхностные условия. Отличия заключаются лишь в том, что вместо времен прихода в левой части уравнения (3) расположены логарифмы амплитуд отраженной волны. Вектор неизвестных при этом содержит логарифмы корректирующих множителей, отвечающие поверхностным позициям источников и приемников, фактору удаления, а также “глубинному” фактору. Переходя в область пространственных частот, получаем выражение:

$$L(\vec{k}, \vec{h}) = LS(jk)e^{j\vec{k}\vec{h}} + LR(jk)e^{-j\vec{k}\vec{h}} + LG(\vec{k}) + LO(\vec{k})|h|^2 \quad (11)$$

Вводя частотную зависимость в выражение (11), получим следующее соотношение для коррекции амплитудного спектра отраженных волн за поверхностные условия:

$$L(\omega, \vec{k}, \vec{h}) = LS(\omega, jk)e^{j\vec{k}\vec{h}} + LR(\omega, jk)e^{-j\vec{k}\vec{h}} + LG(\omega, \vec{k}) + LO(\omega, \vec{k})|h|^2 \quad (12)$$

Решение систем уравнений (6), (10), (11), (12) можно получить методом наименьших квадратов. Анализ показывает, что решение, полученное на основе данного подхода, имеет структуру, близкую к решению во временной области. Однако при использовании частотного подхода возможна корректная и осознанная регуляризация путем фильтрации полученного решения в области пространственных частот. Это позволяет явно контролировать гладкость и вид получаемого решения, а также гибко управлять такими параметрами, которые обычно на качественном уровне характеризуют статические поправки как длиннопериодные или среднепериодные.

Стоит отметить, что не составляет труда расширить данный подход для коррекции статических поправок при обработке многокомпонентных данных, для которых данная проблема является еще более существенной по сравнению с работой на продольных волнах (Адамович, 2007; Бурлаков, 2007).

В данной главе проведен также анализ шумоподавления и показано, что использование выборки типа cross-spread позволяет использовать не только $2D^F - K$ фильтрацию, но и $3D^F - K_x - K_y$ в силу равномерной и максимально плотной дискретизации по обеим пространственным координатам при использованной системе наблюдений.

В силу описанных в главе 2 свойств выборки cross-spread появляется возможность применения пространственных трехмерных фильтров до суммирования, хотя традиционно такие фильтры применялись после суммирования. Учитывая пятимерность сейсмических данных до суммирования и, как следствие, пятимерность случайного шума, его подавление может потребовать разработку и применение пятимерных фильтров. В качестве альтернативы может использоваться каскадное применение фильтров по различным выборкам (это показано в главе 4).

Анализ возможностей шумоподавления приведен на основе различных процедур обработки, использующих аппарат преобразования Фурье. Можно предположить, что выводы относительно шумоподавления с использованием выборок типа cross-spread на основе других алгоритмов обработки будут так же эффективнее, чем при использовании стандартных выборок, в силу плотного и непрерывного представления волнового поля.

Глава 4. Опробование предложенных алгоритмов коррекции влияния ВЧР на синтетических и реальных данных наземной сейсморазведки 2D/3D в условиях Западной Сибири.

Неоднородное строение ВЧР приводит к тому, что исследуемый регион характеризуется наличием полного диапазона искажающих статических аномалий. При этом сейсмогеологические условия приводят к тому, что большинство методов коррекции статических поправок не позволяют получить полного решения. В этой главе приведены результаты, полученные и опубликованные автором совместно с Эповым К.А. (2012).

Для первоначального тестирования алгоритма коррекции статических поправок было синтезировано несколько наборов профильных данных, в точности удовлетворяющих уравнениям (3). В условиях выбранной модели (в работе приведены соответствующие таблицы для параметров модели и системы наблюдений) было получено решение системы (6). За исключением постоянной составляющей, рассчитанные кривые статических поправок

и структурного фактора очень хорошо совпадают с модельными, несмотря на то, что характер аномалии носит принципиально длиннопериодный характер.

Следующим шагом было создание более сложной модели статических поправок, содержащей частотные компоненты на всех пространственных периодах. В результате получилось, что основной вклад в погрешность дает низкочастотная составляющая, период которой почти в 10 раз больше длины расстановки. Более высокочастотные компоненты статических поправок рассчитываются практически идеально.

Для оценки возможностей предлагаемой методики в площадном варианте с использованием крестовой расстановки были синтезированы поля времен, отвечающие постоянному структурному фактору и ряду приповерхностных аномалий. Были заданы три поверхностные аномалии, соответствующие трем различным типам приповерхностных искажений – коротко-, средне- и длиннопериодным. Общее количество l-векторов составило 160. Размер бина l-вектора определяется геометрией наблюдений и равен расстоянию между линиями приема на расстояние между линиями возбуждения, в нашем случае 200x200м.

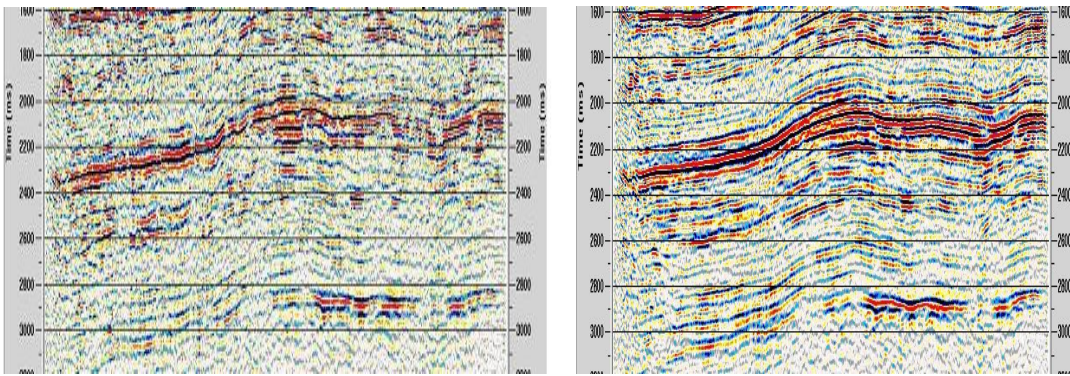


Рис.2. Сейсмические данные 2D (Западная Сибирь). Предварительный разрез (слева), суммарный временной разрез после двух итераций коррекции статических поправок (справа).

Расчет поправок выполнялся в пять этапов согласно графу, приведенному в главе 3. На первом этапе рассчитывались теоретические времена для каждой трассы, а также координаты cross-spread второго типа и номера l-вектора. На втором этапе проводилась выборка трасс, соответствующих фиксированному l-вектору, и выполнялось быстрое преобразование Фурье полученных карт времен по пространственным координатам относительно центров cross-spread второго рода с шагом по площади 50x50м. На третьем этапе для каждой пространственной частоты выполнялась инверсия спектров полученных матриц l-векторов. Инверсия выполнялась методом наименьших квадратов. На четвертом этапе проводилась двумерная полосовая фильтрация рассчитанных спектров статических поправок за приемники и за источники в частотной области по значению модуля пространственного периода. Выбирались периоды пропуска и подавления, а переходная зона для устранения эффекта Гиббса сглаживалась окном Хэмминга. Фильтр имел анизотропный характер,

позволяющий фиксировать значения периодов вдоль соответствующих осей пространственных периодов K_x , K_y и по эллиптическому закону интерполировать для всего поля пространственные периоды. Форму и амплитуду аномалий удалось восстановить практически без искажений в структурном факторе.

В качестве примера эффективного применения предлагаемой методики к реальным данным рассмотрим результаты, полученные на материалах детализированных сейсморазведочных работ 2D одного из месторождений северной части Западной Сибири. На рис. 2 (слева) представлен предварительный временной разрез, полученный с учетом статических поправок за рельеф. После первой итерации не удалось полностью скорректировать аномалию ВЧР, расположенную в восточной части профиля. Это было связано с тем, что на данном участке время прихода было измерено с большой ошибкой. После первой итерации качество определения времени пробега улучшилось, что позволило выявить и учесть данную аномалию. После повторного скоростного анализа и второй итерации расчета статических поправок был получен разрез, показанный на рис. 2 (справа).

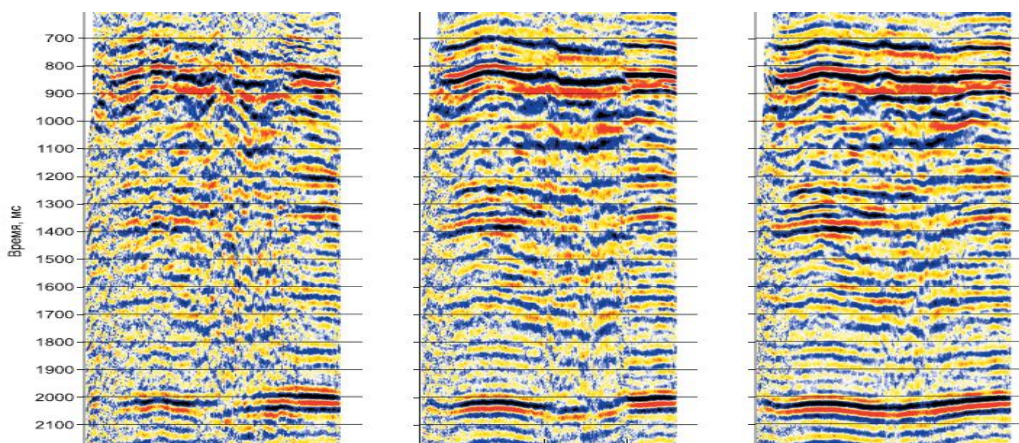


Рис.3. Вертикальное сечение куба: с учетом статических поправок за рельеф (слева); с учетом короткопериодной составляющей статических поправок (центр); с учетом среднечастотной составляющей, полученной с применением рассматриваемого метода (справа).

Рассмотрим особенности применения данной методики на примере сейсмических данных 3D, полученных на одном из месторождений севера Западной Сибири. В данном случае неучет статических поправок негативно сказывается на качестве суммарных временных разрезов. Отсутствие среднечастотной составляющей не позволяет провести выравнивание времен отражений в пределах выборок ОГТ перед суммированием, что является причиной низкого качества сейсмического изображения (рис. 3а). Применение предлагаемой методики позволило получить карту среднечастотной составляющей статических поправок, использование которых приводит к заметному положительному эффекту (рис. 3в). Расчет данных поправок выполнялся с использованием параметризации cross-spread первого типа (что обусловило “низкочастотный” характер получаемого

результата), шаг между центральными точками выборок составлял 100x200 м. При этом количество бинов в отдельной выборке cross-spread могло достигать 4608 (128 вдоль линий приема и 36 вдоль линий источников). Для предотвращения эффекта наложения частот в качестве исходных данных использовали времена с учтенными короткопериодными поправками, полученными автоматическим методом. Полученные карты поправок подвергали фильтрации в области пространственных частот.

Рассмотрим особенности применения предлагаемой методики шумоподавления на примере сейсмических данных 3D, полученных на одном из месторождений севера Западной Сибири.

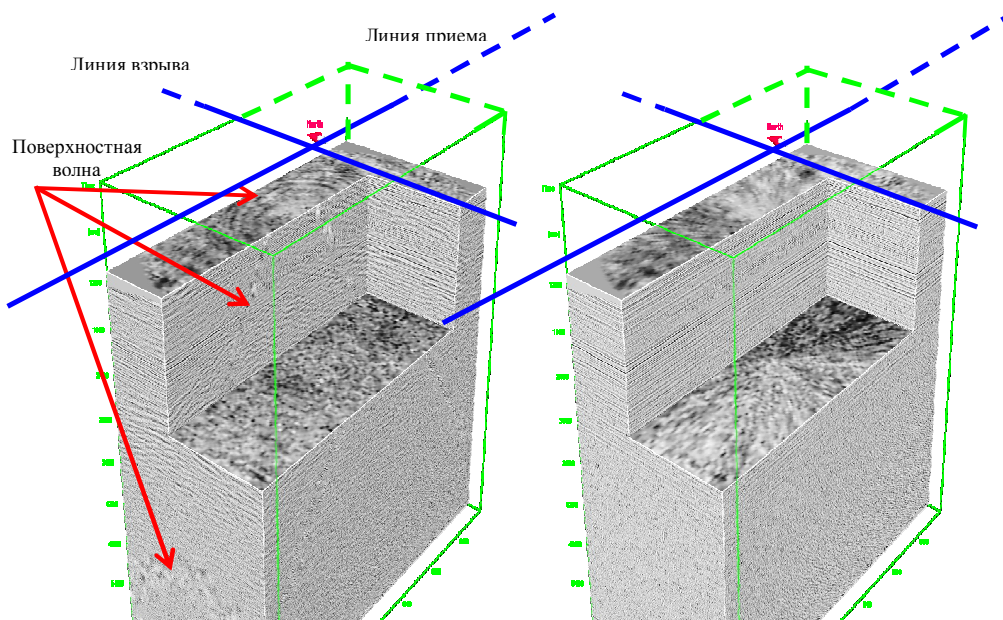


Рис.4. Трехмерное представление куба cross-spread, реальные данные. До подавление шума (слева), после подавления шума (справа).

На рис. 4 представлен один из кубов cross-spread до и после $3D^{F-Kx-Ky}$ фильтрации. Сравнение применения 2D фильтра в $F-K$ области по панелям равных азимутов и 3D фильтра в $F-Kx-Ky$ области по выборкам cross-spread показало более “мягкое” действие 3D фильтра, а именно устранение шума при сохранении особенностей суммарной записи ОГТ, при использовании 2D фильтра происходит успешное удаление шума, однако удаляется и энергия полезного сигнала. Аналогично, работа $F-XY$ фильтров до суммирования показала лучший результат в подавлении случайного шума и сохранении сигнала по сравнению с применением $F-X$ и $F-Y$ фильтров.

Этот эффект особенно хорошо заметен в области неполной кратности мьютинга кинематической поправки. Это связано с малой кратностью при выборе панелей азимутов в случае 2D выборок и ухудшения работы $F-K$ фильтра. При этом стоит отметить, что при

бинировании азимутов для повышения кратности даже с незначительным шагом (5 градусов) значительно понижается эффективность работы фильтров в $F - K$ области. В случае 3D выборок? фильтрация происходит по равномерно заполненному кубу данных, что значительно улучшает возможность выделения сигнала на фоне шума. На рисунке 5 приведены вертикальные сечения куба ОГТ до и после шумоподавления до суммирования. Положительный эффект от применения шумоподавления очевиден.

Для подавления случайного шума целесообразно использовать поочередно выборки кубов cross-spread, template источников, template приемников и OVT, поскольку в данном случае природа случайного шума чаще всего не связана с каким-то конкретным событием (возбуждением колебаний на поверхности). В таких случаях случайный шум может проявляться различным образом на разных выборках. Для проверки данного факта к кубам cross-spread, template-источников, template-приемников и OVT поочередно применяли $F - XY$ деконволюцию, при этом происходило пошаговое повышение соотношения сигнал/шум на суммарном кубе без потери информативности отраженных волн. Можно предположить, что для наиболее полного подавления случайного шума целесообразна разработка пятимерных фильтров, например, F-XXYY деконволюции, например, по перекрывающимся панелям cross-spread.

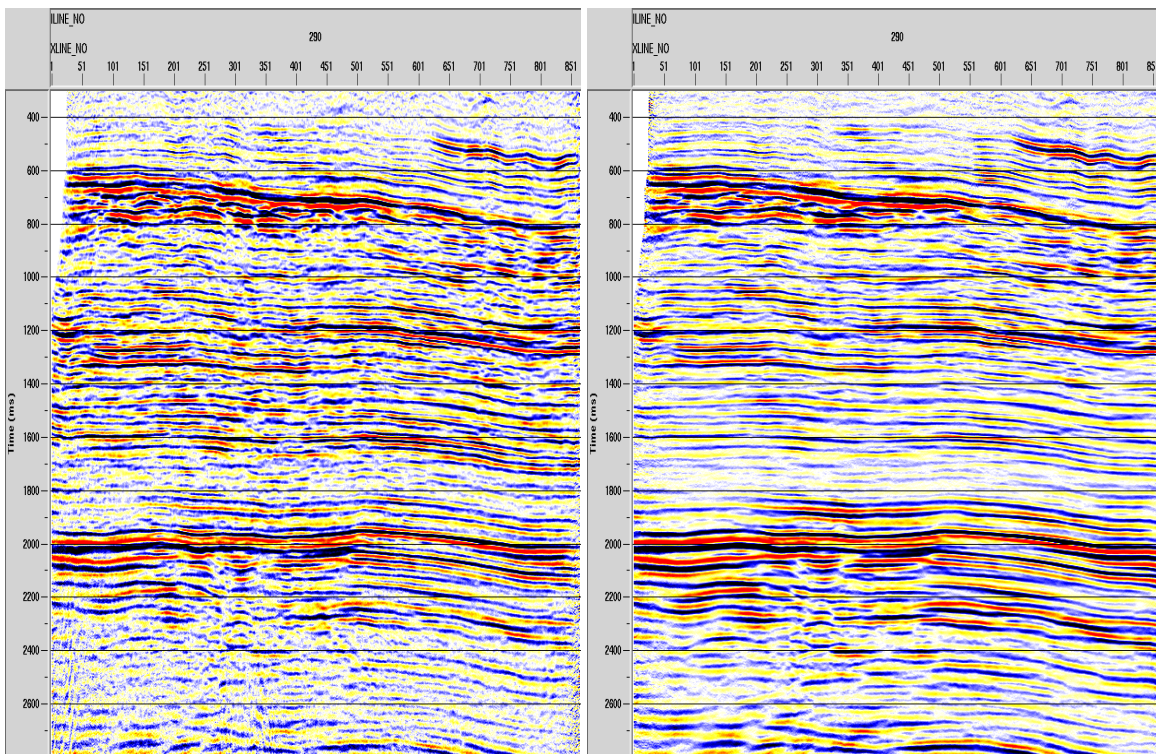


Рис.5. Вертикальное сечение куба ОГТ. До шумоподавления (слева), после $F - Kx - Ky$ фильтрации по выборке cross-spread (справа).

Заключение

Основные выводы, следующие из результатов данной работы, состоят в следующем:

- Коррекция искажающего влияния ВЧР является одной из основных задач при обработке данных наземной сейморазведки.
- Подавление волн-помех, связанных с ВЧР, зависит от типа выборок, по которым выполняется шумоподавление. «Классические» выборки ОТВ, ОТП, ОГТ, РУ для данных 3D сейморазведки, полученных с использованием центрально-симметричной расстановки, не позволяют проводить оптимальное шумоподавление.
- Использование выборок cross-spread позволяет использовать алгоритмы коррекции статических поправок на основании перехода в область пространственных частот.
- Использование алгоритма коррекции статических поправок в области пространственных частот позволяет обоснованно подходить к регуляризации полученного решения путем полосовой фильтрации.
- Подавление когерентных волн-помех до суммирования по данным 3D сейморазведки, полученным с использованием центрально-симметричной расстановки, целесообразно проводить с использованием выборок типа cross-spread трёхмерными фильтрами.
- При подавлении случайных помех целесообразно последовательно использовать шумоподавление по выборкам различного вида из-за пятимерной природы данных до суммирования.

По теме диссертационной работы опубликованы следующие работы:

1. **Адамович О.О., Эпов К. А.** Метод полуавтоматического определения среднечастотных статических поправок. // «Технологии сейморазведки» №2.2012.С 25-41.
2. **Адамович О. О.** Использование математического моделирования данных наземной сейморазведки и ВСП для оценки возможностей сейсмического метода в условиях юга Сибирской платформы. // «Гальперинские чтения – 2010».
3. **Бурлаков А. В., Адамович О. О.** Опыт обработки многокомпонентных данных из различных регионов территории бывшего СССР. // Конференция «Ломоносов – 2007».
4. **Адамович О. О., Иванов С. С., Бурлаков А. В., Эпов К. А., Коротков И. П., Шулакова В. Е.** Анализ способов расчета статических поправок для обменных волн. // «ГЕОМОДЕЛЬ – 2007».
5. **О. Adamovich, К. Epov, I. Korotkov and P. Veeken.** Finite difference modeling to evaluate the effect of acquisition and processing parameters on the resolution of seismic

land data. An example from SE Siberia.// 72th Conference EAGE, Barcelona, 2010.