

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Российский государственный геологоразведочный университет имени  
Серго Орджоникидзе»  
(МГРИ-РГГРУ)

УДК 550.832.441

На правах рукописи

**АХМЕТСАФИН РАИС ДАХИЕВИЧ**

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ОЦЕНКИ СКОРОСТЕЙ И  
РАЗДЕЛЕНИЯ СОСТАВЛЯЮЩИХ ВОЛН  
МНОГОЭЛЕМЕНТНОГО ВОЛНОВОГО АКУСТИЧЕСКОГО  
КАРОТАЖА**

25.00.10 - «Геофизика, геофизические методы поисков полезных  
минералогических ископаемых»

**диссертация**

на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Научный консультант:

доктор технических наук, профессор

Афанасьев Виталий Сергеевич

МОСКВА – 2017

## ОБОЗНАЧЕНИЯ

АКЦ	акустическая цементометрия
БПФ	быстрое преобразование Фурье
ВАК	волновой акустический каротаж
ГИС	геофизические исследования скважин
КВПФ	коротко-временное преобразование Фурье
ОПВ	обнаружение первого вступления
ФЕС	фильтрационно-емкостные свойства горных пород
ФКД	фазокорреляционная диаграмма
ФМС	физико-механические свойства горных пород
casing wave	волна Лэмба по обсадной колонне
collar wave	волна по корпусу прибора
first break	первое вступление волны
(f-k)-область	область частота – волновое число
(f-p)-область	область частота – интервальное_ время
H- волна	гидроволна
LWD	каротаж в процессе бурения
mud wave	гидроволна
P-волна	продольная волна (Prima)
PCA	Principal Component Analysis - метод главных компонент
R-волна	волна Рэлея
S-волна	поперечная волна (Second)
SH, SV	поляризованные изгибные волны
slowness	интервальное время
St-волна	волна Стоунли
STC	Slowness-Time Coherence
SFC	Slowness-Frequency Coherence
SVD	Singular Value Decomposition - сингулярное разложение
( $\tau$ -p)-область или (tau-p)-область	время_ пробега – интервальное_ время

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>7</b>
Актуальность темы .....	10
Цель и задачи работы.....	12
Область исследования. ....	12
Научная новизна.....	13
Защищаемые научные положения:.....	14
Апробация работы.....	18
Публикации.....	18
Объем и структура диссертации.....	20
Благодарности.....	21
<b>ГЛАВА 1  ПРИБОРЫ МНОГОЭЛЕМЕНТНОГО АКУСТИЧЕСКОГО КАРОТАЖА И МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ АКУСТИЧЕСКИХ (СЕЙСМИЧЕСКИХ) МАССИВОВ .....</b>	<b>22</b>
1.1  Теоретические основы ВАК и его интерпретации.....	22
1.1.1  Упругие волны, регистрируемые в волновом пакете.....	24
1.1.2  Связь параметров волн с петрофизическими параметрами .....	31
1.2  Многоэлементные приборы ВАК, конструкция и основные характеристики .....	34
1.2.1  Акустический массив регистрируемых данных – пространственно- временная функция .....	39
1.3  Одномерная (1D) фильтрация в частотной области .....	40
1.3.1  Спектральный состав акустических сигналов .....	41
1.3.2  Спектрограмма регистрируемых сигналов, коротко-временное Фурье-преобразование.....	43
1.3.3  Преобразование Гильберта, аналитический сигнал .....	48
1.4  Методы оценки времени первого вступления волн.....	51
1.4.1  Пороговая оценка первого вступления.....	52
1.4.2  Статистические методы оценки первоприбытия .....	53

1.4.3	Оценка интервальных времен по временам первых вступлений составляющих волн .....	56
1.5	Оценка интервального времени составляющих волнового пакета на основе меры когерентности .....	63
1.5.1	Метод сембланс .....	63
1.5.2	Метод метод суммирования энного корня .....	70
1.5.3	Взвешенный сембланс .....	71
1.5.4	Дифференциальный сембланс .....	71
1.5.5	Дисперсионный сембланс .....	71
1.5.6	Частотный или спектральный сембланс .....	75
1.5.7	Метод фазового суммирования .....	76
1.5.8	Фазовый сембланс .....	77
1.5.9	Комплексный функционал когерентности .....	78
1.5.10	Производные представления сембланс .....	80
1.6	Двумерная (2D) фильтрация .....	80
1.6.1	Двумерное преобразование Фурье. Преобразование из области пространство-время в область частота-волновое число ( $f - k$ преобразование) .....	81
1.6.2	Преобразование Радона, Tau-p Transform (Slant Stack – наклонное суммирование), ( $\tau - p$ )-преобразование .....	83
1.6.3	Преобразование Карунена - Лозва и SVD-фильтрация .....	85
1.7	Основные результаты и выводы по главе .....	88
<b>ГЛАВА 2 ГИЛЬБЕРТ СЕМБЛАНС - ОЦЕНКА ИНТЕРВАЛЬНЫХ ВРЕМЕН И ПЕРВОПРИБЫТИЯ СОСТАВЛЯЮЩИХ ВОЛН .....</b>		<b>89</b>
2.1	Развитие метода фазового суммирования .....	90
2.2	Основные соотношения метода Гильберт сембланс .....	92
2.3	Фазовые переходы .....	96
2.4	Проекция Гильберт сембланс для отображения по глубине .....	97
2.5	Дисперсионное представление Гильберт сембланс .....	98

2.6	Основные результаты и выводы по главе .....	99
<b>ГЛАВА 3 ФИЛЬТРАЦИЯ СЕМБЛАНС НА ОСНОВЕ СИНГУЛЯРНОГО РАЗЛОЖЕНИЯ.....</b>		<b>101</b>
3.1	Фильтрация на основе разложения Карунена-Лоэва .....	102
3.2	Критерии оценки ранга матриц сембланс .....	109
3.3	Основные результаты и выводы по главе .....	110
<b>ГЛАВА 4 МЕТОД ФИЛЬТРАЦИИ ПО СКОРОСТИ НА ОСНОВЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ РАДОНА .....</b>		<b>111</b>
4.1	Основные соотношения .....	111
4.1.1	Преобразование Радона через $(\tau - p)$ -область .....	112
4.1.2	Преобразование Радона через $(f - p)$ -область .....	113
4.1.3	Применение Ram-Lak фильтров (КИХ rho-фильтрация).....	113
4.2	Вычислительная реализация .....	114
4.2.1	Вычислительная реализация через $(\tau - p)$ -область.....	114
4.2.2	Вычислительная реализация через $(f - p)$ -область .....	116
4.3	Отсечка по времени пробега .....	117
4.4	Усиление когерентной составляющей .....	118
4.5	Примеры .....	119
4.5.1	Пример 2. Каротаж в процессе бурения. ....	119
4.5.2	Пример 3. Каротаж через обсадную колонну. ....	124
4.5.3	Пример 4. Каротаж через обсадную колонну. ....	134
4.6	Основные результаты и выводы по главе .....	136
<b>ГЛАВА 5 РЕАЛИЗАЦИЯ ДИСПЕРСИОННОГО СЕМБЛАНС .....</b>		<b>137</b>
5.1	Вычислительная схема.....	140
5.2	Вычисление дисперсионного Гильберт сембланс .....	142
5.3	Пример коррекции волны Стоунли .....	142
5.4	Рекомендации по применению дисперсионного сембланс .....	152
5.5	Основные результаты и выводы по главе .....	153
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>		<b>154</b>

<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>157</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЯ .....</b>	<b>184</b>
<b>Приложение А Сингулярное разложение матриц.....</b>	<b>184</b>
<b>Приложение Б Вывод формулы обратного преобразования Радона .....</b>	<b>185</b>
<b>Приложение В Матлаб-скрипты.....</b>	<b>187</b>
В.1 Гильберт-сембланс .....	187
В.1.1 Наклонное суммирование.....	187
В.1.2 Фильтрация на основе разложения Карунена-Лозва.....	188
В.2 Спектральный сембланс .....	189
В.3 Сембланс.....	190
В.4 Фазовое суммирование .....	191
В.5 Фильтрация по скорости.....	192
В.5.1 Фильтрация по скорости через ( $\tau$ - $p$ ) область .....	192
В.5.2 Фильтрация по скорости через ( $f$ - $p$ ) область.....	193
В.6 Дисперсионный сембланс.....	194
В.7 F-k преобразование.....	196
В.8 Повышение разрешающей способности трехэлементного зонда .....	197

## ВВЕДЕНИЕ

Волновой Акустический Каротаж (ВАК) - метод геофизических исследований в скважинах, основанный на изучении акустических свойств горных пород (скоростей распространения и затухания упругих волн), пересеченных скважиной.



Рис. 1. Актуальные проблемы многоэлементного ВАК

Первый акустический каротаж с целью изучения упругих свойств горных пород был выполнен в 1957 г. [119]. Разработчики зонда исходили из того, что распространение звука (акустических волн) через горные породы от излучателя до приемника, размещенных в одном корпусе, подчиняются закону Снеллиуса (закон преломления) [127]. Объектом измерения были скорости распространения составляющих волн, которые связаны с упругими свойствами горных пород уравнениями Био-Гассмана [127].

Современный ВАК применяется в открытом стволе для оценки ФЕС и ФМС горных пород, а в обсаженных скважинах – для оценки технического состояния скважин и контроля качества цементирования. Применяется ВАК и

для калибровки сеймики (например, при построении геомеханических моделей) (рис. 2).



Рис. 2. Актуальные проблемы многоэлементного ВАК

Современные приборы (аппаратура) ВАК содержат группу акустических излучателей и группу приемников (антенную решетку), расположенных на цилиндрическом корпусе. Волновой пакет ВАК включает волны, распространяющиеся от излучателей до приемников (через жидкость, заполняющую скважину) по изучаемой породе: продольная (P, *Prima* – первая), поперечная (S, *Second* – вторая), поверхностные волны Стоунли (St) и Рэлея (R); только по жидкости заполняющей скважину (H, гидроволна, *mud*) и по стальному корпусу прибора (*collar*). В обсаженной скважине к ним добавляются волны, распространяющиеся по стальной обсадной колонне (*casing*) и по цементному камню между колонной и породой. Физическая природа составляющих волн различна, поэтому они различаются рядом физических параметров, таких как скорость распространения,



продолжительность, частотный диапазон и поляризация. Конструктивные параметры приборов, такие как геометрия взаимного расположения излучателей и приемников, частота возбуждающего импульса, поляризация и полоса пропускания приемников, длительность и квантование регистрации определяются условиями возможного разделения составляющих волн. При изучении горных пород как информативные волны рассматриваются Р, S и St-волны. Для большинства известных разрезов соотношения скоростей Р- и S-волн составляет  $\sim\sqrt{3}\approx 1.73$ , а соотношение скоростей поверхностных волн Рэлея и S-волн  $\sim\sqrt{(2-2/\sqrt{3})}\approx 0.92$  и ниже. Расстояние от излучателей до ближнего приемника антенной решетки проектируют так, чтобы информативные волны успели «разбежаться» и их интерференция была минимальной.

В открытом стволе нет места *casing*-волне и практически отсутствует поверхностная R-волна, распространяющаяся в скважине в виде сильно неоднородной волны – ее не возбуждают излучатели аппаратуры ВАК [51]. Паразитными остаются корпусная и гидроволна. Разделение информативных волн с корпусной достигается отбрасыванием последней назад по времени за счет увеличения пути пробега между щелевыми прорезами в корпусе прибора от излучателя до первого приемника. Влиянием гидроволны обычно пренебрегают, т.к. ее продолжительность сопоставима с продолжительностью импульса возбуждения и ее скорость, как правило, ниже, чем по породе. При оценке технического состояния скважин изучают волну по стальной колонне, остальные являются паразитными. Скорость волны по колонне практически неизменна, зато амплитуда, затухание и продолжительность позволяют оценить сцепление цемента с колонной и породой, а также состояние самого цемента. Иногда возникает задача доразведки с целью оценки изменения ФЕС методом ВАК через обсадную колонну. В этом случае уже волна по стальной колонне является паразитной. При каротаже в процессе бурения (LWD) корпус прибора ВАК представляет собой утяжеленную буровую трубу, внутри которой под большим давлением поступает буровой раствор, и паразитная волна по корпусу

прибора представляет значительную как техническую, так и методическую проблемы [262].

Современные методики интерпретации ВАК с целью оценки ФЕС и ФМС предполагают оценку следующих характеристик составляющих волн: фазовую скорость  $v$  (или интервальное время  $\Delta t = 1/v$ , *slowness*,  $p$ ), амплитуду, эффективное затухание. Дополнительно могут оцениваться групповая скорость пакетов диспергирующих составляющих и продолжительность волн. Все эти оценки становятся возможными после идентификации, выделения и разделения составляющих волн. Разделение волн ВАК это целый комплекс конструктивных и математических решений, с помощью которых в большинстве практических случаев основная задача решается. Проблемы возникают при интерференции волн - при близких скоростях слабых информативных и высоких паразитных волн, имеющих еще и большую продолжительность, а также при дисперсии волн – когда составляющая волна имеет хоть и узкий спектр, но не является монохроматической, и скорость зависит от частоты.

Прямая задача - моделирование ВАК в различных геолого-технических условиях скважин рассмотрена в частности в [1,58,68,85,118,246,274].

### **Актуальность темы**

Рассматриваемые проблемы в скоростном анализе (см. рис. 2) связаны с недостатком разрешающей способности существующих методов обработки в случае наложения (интерференции) волн. Одной из проблемных задач является каротаж через обсадную колонну с целью доразведки - оценки изменения фильтрационно-емкостных свойств и выбора новых объектов разработки (особенно актуально для месторождений в поздней стадии разработки) в высокоскоростных карбонатных разрезах, когда скорость Р-волны близка к скорости звука в стальной трубе. Зачастую за десятилетия эксплуатации сцепление колонны с цементом ухудшается и при ВАК через обсадную колонну информативная Р-волна «забивается» высокой паразитной «звонящей»

волной по колонне. Другой проблемной задачей этой группы является каротаж в процессе бурения (LWD), и также в высокоскоростном карбонатном разрезе. Так как нет возможности конструктивно отбросить по времени паразитную волну по стальному корпусу прибора (в приборах на кабеле это удается за счет щелей в корпусе), то эта волна по скорости может стать сопоставимой с информативной Р-волной, а по уровню даже превышать ее (при этом по частоте эти волны не разделяются).

Рассматриваемая в диссертационной работе проблема дисперсионного анализа (см. рис. 2) - пересчет наблюдаемой фазовой скорости пакета диспергирующей волны в скорость, которая может характеризовать горную породу для дальнейшей (геофизической, петрофизической) интерпретации.

Идентификация информативных волн в зарегистрированном волновом пакете является первой и важнейшей задачей обработки данных ВАК. От ее решения зависит вся дальнейшая интерпретации ВАК и ее геологическая результативность. Задача усложняется при близких значениях частот и скоростей распространения таких пар составляющих волн как Р-волны в породе и L-волны в обсадной колонне, S- и R-волн, Н- и St-волн и др. [51].

Разработка методов разделения составляющих волн ВАК по скорости их распространения, а также методов повышающих точность оценки их скоростей для последующей интерпретации в условиях интерференции и дисперсии является актуальной задачей.

**Объектом исследования** являются двумерные массивы записей многоэлементного ВАК, содержащие зарегистрированные информативные и паразитные составляющие волны. Предполагается, что (некоторые) составляющие сопоставимы по уровню, продолжительности, частоте, интерферируют и диспергируют, однако в силу различной физической природы имеют различную фазовую скорость распространения.

**Предметом исследования** является техника оценки скоростей распространения составляющих волн ВАК и разделения составляющих волн по скорости в условиях их интерференции и дисперсии.

### **Цель и задачи работы.**

Основной целью диссертационного исследования является решение научной проблемы оценки скоростей и эффективного разделения составляющих пакета многоэлементного ВАК в условиях их интерференции и дисперсии за счет применения интегральных математических преобразований.

Для достижения поставленной цели сформулированы и решены следующие задачи:

1. Провести анализ отечественных и зарубежных достижений и программных реализаций в части обработки массивов ВАК по оценке скоростей составляющих волн, проанализировать применяемые методы и технологии обработки, оценить уровень автоматизации и комплексности решений;

2. Разработать метод преобразования двумерных массивов записей (матриц) ВАК для визуализации и последующей эффективной оценки интервальных времен (скоростей) и продолжительности составляющих информативных и паразитных волн;

3. Разработать методы фильтрации составляющих волн за счет различия диапазонов их интервальных времен (скоростей);

4. Разработать метод компенсации дисперсии, позволяющий оценивать интервальное время (скорость) как некоторую не связанную с частотой универсальную характеристику породы для данного типа диспергирующих волн для дальнейшей интерпретации;

5. Реализовать разработанные методы в виде программ оценить их эффективность на проблемных примерах.

### **Область исследования.**

Исследование выполнено в рамках пунктов: 14. Методы обработки и интерпретации результатов измерения геофизических полей;

15. Компьютерные системы обработки и интерпретации геолого-геофизических данных Паспорта специальности 25.00.10 - Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых (технические науки).

**Теоретической и методологической основой диссертационной работы** являются теория матриц, интегральные преобразования Радона, Гильберта, Фурье, Карунена-Лоэва труды ведущих зарубежных и российских ученых, посвященные различным аспектам ВАК, обработке сейсмических и акустических массивов. При проведении исследований использовались методы обработки сигналов во временной и в частотной области, двумерные интегральные преобразования и сингулярное разложение матриц, реализованные в MATLAB.

**Информационной базой исследования** являются результаты исследований, опубликованные в ведущих отечественных и зарубежных изданиях, известные программные реализации по обработке записей ВАК (в составе пакетов программ по обработке результатов геофизических исследований скважин).

### **Научная новизна**

1. Предложена новая оценка меры когерентности сигналов по приемникам записей массивов ВАК в  $(\tau - p)$ -области, названная автором как Гильберт сембланс или мгновенный сембланс. Мера когерентности выражается с помощью преобразований Радона и Гильберта, и является альтернативой традиционному оконному сембланс в  $(\tau - p)$ -области.

2. Предложен метод фильтрации значений сембланс на основе *rank-k* аппроксимации матриц. Метод основан на типовом представлении всплесков когерентной мощности составляющих волн ВАК на изображениях сембланс, и может применяться для подавления помех и шумов, а также исключения проявлений отдельных составляющих волн в  $(\tau - p)$ -области.

3. Предложен метод фильтрации сигналов по приемникам записей массивов ВАК в  $(\tau - p)$ -области на основе прямого и обратного преобразования Радона, в котором предварительно оцененное значение  $\tau_{\min}$  отсекает начальный шум до времени первого вступления по каждому приемнику, а дополнительный вес на значение Гильберт сембланс подавляет помехи и усиливает когерентные составляющие в заданном диапазоне скоростей.

4. Предложена и реализована вычислительная схема оценки дисперсионного Гильберт сембланс в  $(\tau - p)$ -области. Дисперсионные кривые учитываются в значениях выделенной операционной матрицы, что делает вычислительную схему универсальной для вычисления различных представлений дисперсионного сембланс.

Таким образом, на основе интегрального преобразования Радона, применяя дополнительно интегральные преобразования Гильберта, Фурье и Карунена-Лозва (*rank-k* аппроксимация) предложен подход к решению для массивов записей ВАК следующих трех задач: (1) оценка меры когерентности сигналов в  $(\tau - p)$ -области; (2) фильтрация по интервальному времени в  $(\tau - p)$ - и  $(f - p)$ -области; (3) коррекция оценок интервального времени на дисперсию.

### **Защищаемые научные положения:**

1. Предлагается Гильберт сембланс - мера мгновенной когерентности мощности сигналов по приемникам в  $(\tau - p)$ -области на основе преобразований Радона и Гильберта. Отсутствие окна усреднения приведенной мощности повышает разрешающую способность меры при оценке интервальных времен составляющих волнового пакета ВАК.

2. Предлагается нелинейная фильтрация Гильберт сембланс на основе *rank-k* аппроксимации. Выявлены факторы, влияющие на выбор ранга аппроксимирующей матрицы.

3. Предлагается фильтрация по скорости массивов ВАК в  $(\tau - p)$ -области на основе прямого и обратного преобразования Радона (по схеме: наклонное

суммирование – rho фильтрация – обратное наклонное суммирование) с введением дополнительных опций: отсечка по предварительно оцененному приведенному времени пробега  $\tau$  и вес на значение Гильберт сембланс.

**Теоретическая значимость работы** состоит в развитии традиционной методологии сембланс и комплексировании ее с обратной задачей – фильтрацией по скорости и задачей компенсации дисперсии волн.

**Практическая значимость работы** – реализация результатов исследований в виде формализованных процедур для прикладных программ обработки результатов ГИС.

**Степень достоверности результатов** обеспечена строгостью математических преобразований (см. табл. 1, табл. 2), отсутствием дополнительных допущений, сопоставлением результатов обработки массивов записей ВАК.

Табл. 1. Применяемые математические преобразования

1	$y(k, m) \Rightarrow y(t, m) \Rightarrow y(t, x);$	<i>Пространственно-временная функция записей ВАК</i>
2	$STR(\tau, l) = \sum_{m=1}^M y(\tau + p_l x_m, m);$	Наклонное суммирование записей ВАК, <i>slant-stack</i> , <i>Slowness-Time Representation</i>
3	$y^*(\tau, m) = \sum_{l=1}^L STR(\tau - p_l x_m, l);$	Обратное наклонное суммирование, <i>inverse slant-stack</i>
4	$R(\tau, p) = \Re\{y(\tau, x)\} = \int y(\tau + px, x) dx;$	Преобразование Радона
5	$y(\tau, x) = \Re^{-1}\{R(\tau, p)\} =$ $\frac{1}{2\pi} \frac{d}{d\tau} \int R_h(\tau - px, p) dp;$ $R_h(\tau, p) = H[R(\tau, p)];$	Обратное преобразование Радона
6	$Y(f, m) = F[y(t, m)];$	Прямое и обратное преобразование Фурье

7	$H[y(t, m)] = \frac{1}{\pi} \int \frac{y(t_1, m)}{t - t_1} dt_1$ $y_a(t, m) = H^*[y(t, m)] =$ $= y(t, m) + j \cdot H[y(t, m)];$	Преобразование Гильберта и аналитические сигналы
8	$y(t, m) = \sum_{j=1}^n \alpha_{mj} \phi_j(t);$ $\lambda_j \phi_j(t) = \int_{-\infty}^{\infty} Q(t, \tau) \phi_j(\tau) d\tau$	Разложение Карунена-Лозва
9	$R = U \Lambda V^T = \sum_{i=1}^K \lambda_i u_i v_i^T.$	Сингулярное разложение матриц

Математические решения диссертационной работы представлены в табл. 2.

Табл. 2. Математические решения диссертационной работы

1	$HAIC_m(k) = k * \log(D(k) / k)$ $+ (N - k - 1) * \log((D(N) - D(k)) / (N - k - 1));$ $D(k) = \sum_{i=1}^k  y_a(i, m) ^2.$	Статистический критерий оценки времени первого вступления на основе критерия Акаике и преобразования Гильберта.
2	$I_j(\mathbf{p}_{new}, t_{mud}, \alpha) =$ $= \left\  \mathbf{T}_j - \mathbf{A}_j \begin{pmatrix} \mathbf{p}_{new} \\ t_{mud} \end{pmatrix} \right\ ^2 + \alpha \ \mathbf{p} - \mathbf{p}_{new}\ ^2; \quad j = 1 \vee 2.$	Пересчет вектора оценок интервального времени (из $\mathbf{p}$ в $\mathbf{p}_{new}$ ) трехэлементных зондов по оценкам времен первых вступлений ( $\mathbf{T}_j$ ), с оценкой времени пробега в жидкости ( $t_{mud}$ ) и на основе минимизации функционала Тихонова.



3	$STCH_1(\tau, p) = \frac{\left  \sum_{m=1}^M y_a(\tau + px_m, m) \right }{\sum_{m=1}^M  y_a(\tau + px_m, m) } =$ $= \frac{ H^*[\Re\{y(\tau, x)\}] }{\Re\{ H^*[y(\tau, x)] \}};$ $STCH(\tau, p) = \frac{\left  \sum_{m=1}^M y_a(\tau + px_m, m) \right ^2}{M \cdot \sum_{m=1}^M  y_a(\tau + px_m, m) ^2} =$ $= \frac{ H^*[\Re\{y(\tau, x)\}] ^2}{M \cdot \Re\{ H^*[y(\tau, x)] ^2\}}.$	<p>Гильберт сембланс на основе преобразований Радона и Гильберта.</p>
4	$(STCH(\tau, p)) \Rightarrow (STCH(i, j)) = U\Lambda V^T =$ $= \sum_{i=1}^{\min(N, M)} \lambda_i u_i v_i^T =$ $= \sum_{i=1}^k \lambda_i u_i v_i^T + \sum_{i=k+1}^{\min(N, M)} \lambda_i u_i v_i^T \approx \sum_{i=1}^k \lambda_i u_i v_i^T.$	<p>Аппроксимация матриц значений сембланс матрицей меньшего ранга (метод главных компонент, преобразование Карунена - Лоэва).</p>
5	$y_{new}(t, x) = \Re^{-1}\{R(\tau, p)\} =$ $= \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \int_{p_{\min}}^{p_{\max}} R_h(t - px, p) dp;$ $R(\tau, p) = \Re\{y(t, x)\} = \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} y(\tau + px, x) dx;$ $R_h(\tau, p) = H[R(\tau, p)] = \text{Re}[H^*[R(\tau, p)]].$	<p>Фильтрация по скорости (интервальному времени) и приведенному времени пробега на основе прямого и обратного преобразования Радона.</p>
6	$DSTCH(\tau, p) = \frac{\left  \sum_{m=1}^M y_{as}(\tau + px_m, m) \right ^2}{M \cdot \sum_{m=1}^M  y_{as}(\tau + px_m, m) ^2};$ $y_{as}(\tau, m) = H^*[y_s(\tau, m)];$ $y_s(t + px_m, m) = F^{-1}\{Y(f, m) \cdot e^{j2\pi \cdot f \cdot s(f, p, d) \cdot x_m}\}.$	<p>Дисперсионный Гильберт сембланс.</p>

## Апробация работы

Основные положения и результаты диссертационной работы представлялись и докладывались на следующих научно-практических конференциях:

- **Ахметсафин** Р.Д., Паттерсон Д., Дубинский В. Новый метод улучшения точности измерений в анализе тонких слоев // SEG/EAGE/EAGO 3-я Международная конференция и выставка «Санкт-Петербург – 2008. Геонауки: От новых идей к новым открытиям», Russia, 7-10 April 2008, CD-Rom, B036.
- **Ахметсафин** Р.Д. Фильтрация по скорости данных акустического каротажа через обсадную колонну // Научно-практическая конференция «Новая техника и технологии для геофизических исследований скважин». Тезисы докладов конференции в рамках XVI международной специализированной выставки «Газ. Нефть. Технологии-2008» г. Уфа, 21 мая 2008 г. С. 227-229.
- **Ахметсафин** Р.Д., Дубинский В., Паттерсон Д., Ли Ч. Использование преобразования Радона для эффективного разделения волновых составляющих по скоростям при акустическом каротаже на кабеле и в процессе бурения // Tyumen 2009 - International Conference and Exhibition , 02 March 2009, EAGE.
- Bolshakov A., Li C., **Achmetsafin** R., Dubinsky V., Patterson, D. Field Examples of Effective Common Mode Noise Reduction in Acoustic Data by Utilizing Radon Transform // 71st EAGE Conference & Exhibition. – 2009 SPE EUROPEC. Amsterdam, Netherlands. T040.

## Публикации

Основные результаты работы изложены в:

- **Ахметсафин** Р.Д., Булгаков А.А. Дополнительное уплотнение геофизических файлов // НТВ «Каротажник». - 2001. - № 85. - С. 78-82.
- **Ахметсафин** Р.Д., Булгаков А.А. Частотно-временное разделение волн акустического каротажа // НТВ «Каротажник». - 2002. - № 90. - С. 46-50.

- **Ахметсафин Р.Д.**, Булгаков А.А. Сжатие данных при акустическом каротаже // НТВ «Каротажник». - 2002. - № 90. - С. 51-56.
- Сулейманов М.А., Семенов Е.В., Иванов В.Я., **Ахметсафин Р.Д.** Комплекс АМК-2000 для контроля технического состояния и качества цементирования скважин// НТВ «Каротажник». - 2003. - №111-112.
- **Ахметсафин Р.Д.**, Ардаширов А.Р., Булгаков А.А., Габдрахманов И.Р., Дворкин В.И., Иванов В.Я., Сулейманов М.А., Служаев В.Н., Лаздин А.Р. Автономная геофизическая система «Горизонталь» с доставкой на бурильных трубах // НТВ «Каротажник». - 2005. - №10–11. - С. 39–46.
- **Ахметсафин Р.Д.**, Булгаков А.А. О сжатии двумерных геофизических данных // НТВ «Каротажник». - 2005. – №10-11. – С. 187-193.
- **Ахметсафин Р.Д.**, Дубинский В., Паттерсон Д. Метод разделения волн волнового акустического каротажа с помощью преобразований Радона и Гильберта // НТВ «Каротажник». - 2007. - №11(164). - С. 82-96.
- **Ахметсафин Р.Д.**, Дубинский В., Паттерсон Д. Метод Гильберт-сембланс. Обработка данных акустического каротажа // Геология и геофизика. – 2008. - Т. 49(9). - С. 919-925.
- **Ахметсафин Р.Д.** О возможности многоэлементного акустического каротажа для подавления эффекта «звонящей» колонны // Геофизика. - 2009, - № 1. - С. 44-47.
- **Ахметсафин Р.Д.** Цифровая фильтрация акустических массивов волнового каротажа // НТВ «Каротажник». - 2013. - №9(231). - С. 110-116.
- **Ахметсафин Р.Д.**, Ахметсафина Р.З. Статистические методы оценки времен первых вступлений по записям волнового акустического каротажа // НТВ «Каротажник». - 2014. - № 4 (238). - С. 54-60.
- **Ахметсафин Р.Д.** Алгоритмические основы сейсмолокации бурового долота. // НТВ «Каротажник». - 2014. - №5(239). - С. 67-73.

- **Ахметсафин Р.Д., Ахметсафина Р.З.** О повышении разрешающей способности трехэлементных зондов акустического каротажа // Геофизика. - 2014. - №6. - С. 58-61.
- **Ахметсафин Р.Д.** Применение разложения Карунена-Лозва для фильтрации меры когерентности многоканальных записей акустического каротажа // Геофизика. - 2015. - №1. - С. 78-81.
- **Ахметсафин Р.Д., Ахметсафина Р.З.** Две вычислительные реализации фильтрации по кажущимся скоростям массивов записей многоэлементного волнового акустического каротажа // Геофизика. – 2016. - № 3. - С. 78-84.
- **Ахметсафин Р.Д., Ахметсафина Р.З.** Сембланс – инструмент оценки скоростей составляющих пакета волнового акустического каротажа // НТВ «Каротажник». – 2016. - №8 (266). - С. 98-118.
- **Akhmetzafin R., Dubinsky V., Patterson D.J.** Wave analysis using phase velocity processing: пат. 7646673 США. – 2010.

### **Объем и структура диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, основных выводов, списка использованных источников и приложений. Содержит 197 стр. машинописного текста, 91 рисунков, 6 таблиц и 124 формулы. Библиография включает 274 наименований.

В первой главе приведен обзор. Оригинальным результатом автора в первой главе является статистический метод оценки времени первого вступления волн на основе информационного критерия Акаике и преобразования Гильберта. Метод не является «групповым» или методом обработки массивов записей ВАК, поэтому не выделен из обзора. Основные оригинальные результаты автора работы представлены во второй, третьей, четвертой и пятой главах.

Во второй главе представлен метод оценки скоростей составляющих волн на основе беззаконной меры когерентности, разработанной и названной автором как Гильберт сембланс.

В третьей главе представлен разработанный автором метод фильтрации Гильберт сембланс на основе разложения Карунена-Лоэва.

В четвертой главе представлен разработанный автором метод фильтрации по скорости на основе прямого и обратного преобразования Радона.

В пятой главе представлена разработанная автором вычислительная схема дисперсионного сембланс.

В диссертационной работе не рассматриваются методические аспекты интерпретации данных ВАК, такие как расчленение разрезов скважин, оценки ФЕС коллекторов, оценки качества цементирования обсадных колонн и др. Это конечные цели ВАК. Работа посвящена исключительно первой и часто самой сложной стадии обработки предшествующей интерпретации – разделению волн.

### **Благодарности**

Автор выражает искреннюю благодарность научному консультанту профессору В.С. Афанасьеву за неоценимую помощь на завершающем этапе подготовки диссертации. Автор выражает глубокую признательность и благодарность коллективу АО НПФ «Геофизика» г. Уфа, где в 2000 году автор начал научную деятельность в области нефтепромысловой геофизики в должности заведующего лабораторией математического и программного обеспечения.

□

## ГЛАВА 1 ПРИБОРЫ МНОГОЭЛЕМЕНТНОГО АКУСТИЧЕСКОГО КАРОТАЖА И МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ АКУСТИЧЕСКИХ (СЕЙСМИЧЕСКИХ) МАССИВОВ

Блестящие обзоры и изложение теории, аппаратуры, обработки и интерпретации акустического каротажа представлены в работах [41,44,51, 86, 90, 105, 110, 116, 119, 126, 127, 141, 146, 187, 194, 196, 208, 244]. Обработка акустических (сейсмических) массивов (многоканальных данных как двумерных массивов) подробно представлена в работах [25, 60, 100, 135, 186, 187, 204, 215, 270]. Пожалуй, лучше и не написать, хотя есть в изложениях некоторые противоречия и дискуссии в описании механизмов возникновения и распространения упругих волн в скважине и около-скважинном пространстве. В качестве степеней свободы остаются лишь последовательность изложения и выводы, которые подготовят читателя к восприятию последующих трех глав с оригинальными результатами.

### **1.1 Теоретические основы ВАК и его интерпретации**

В 1935 году Конраду Шлюмберже был выдан первый патент на то, что сейчас могло бы считаться акустическим каротажем. В патенте описывается, как использовать передатчик и два приемника для измерения скорости звука на коротком интервале по горной породе в стволе скважины (рис. 1.1). Тогда способ не удалось реализовать – технологии 1930-х не позволяли с необходимой точностью регистрировать разность по времени вступления сигналов на двух приемниках [116].

Возможность регистрации появилась спустя 15 лет, и три нефтяные компании - Magnolia (ныне Mobil), Humble (ныне Esso) и Shell-Humble в 1951 году независимо друг от друга сообщили о реализации каротажа скорости прохождения звуковой волны по горной породе [116]. Принцип метода не изменился - измерение разницы во времени прохождения акустической волны

по горной породе с использованием одного передатчика и двух приемников (рис. 1.2). Эту разницу во времени прохождения, приведенную к расстоянию между приемниками, называют интервальным временем или медленностью (*slowness*). Эта величина, обратная скорости и обозначается как  $\Delta t$  или  $p=1/v$ .

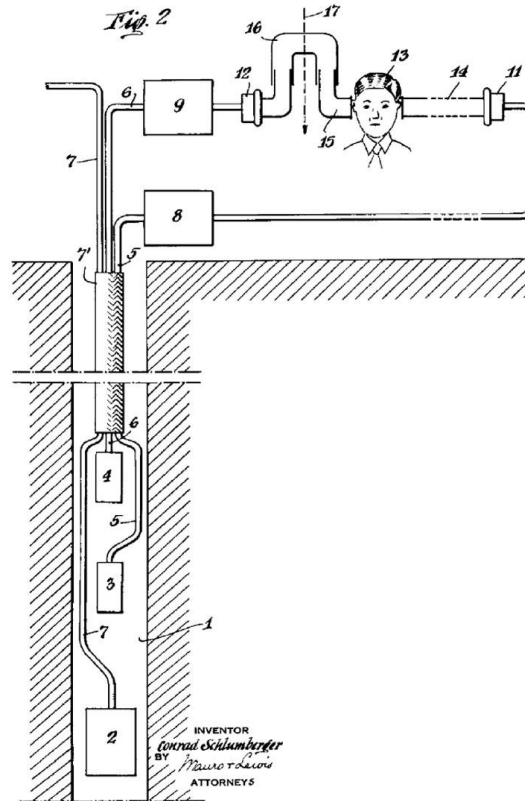


Рис. 1.1. Патент Конрада Шлюмберже [116]

Вернемся в начало 1950-х. Тогда единственным известным применением принципа каротажа скорости было улучшение интерпретации сейсмических данных. Однако исследователи [147,267] уже проводили опыты по распространению акустических волн в пористых средах. Результатом исследований стала известная зависимость интервального времени от пористости

$$\Delta t_{means} = \phi \Delta t_{fluid} + (1 - \phi) \Delta t_{matrix}$$

$$\phi = \frac{(\Delta t_{matrix} - \Delta t_{means})}{(\Delta t_{matrix} - \Delta t_{fluid})} \quad , \quad (1.1)$$

которая на многие годы определила развитие акустического каротажа [50, 212, 247]. И хотя радиоактивные методы в значительной степени вытеснили акустический каротаж при определении пористости, расхождение нейтрон-плотностной и акустической пористости полезно при изучении коллекторских свойств, структуры и заполнения порового пространства.

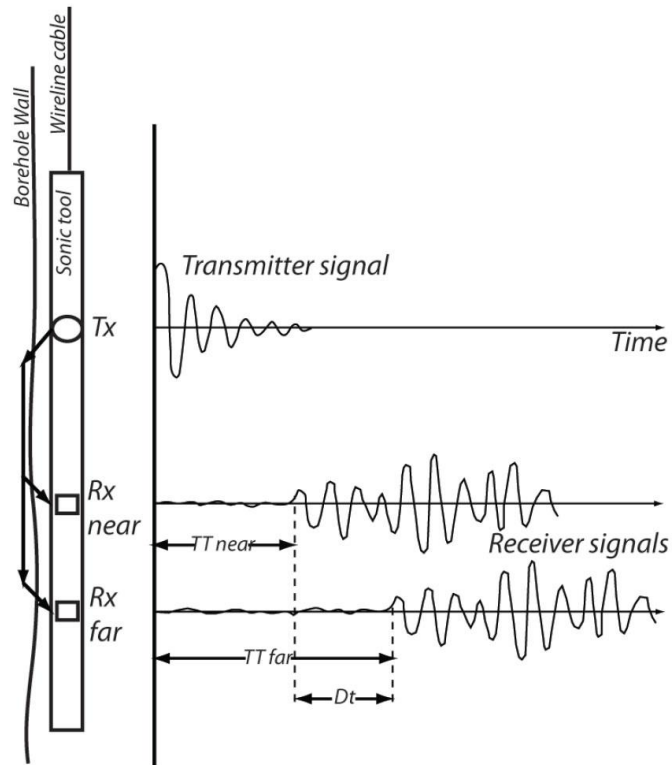


Рис. 1.2. Принцип АК [127]

Кроме оценки ФЕС акустический каротаж применяются для оценки упруго-деформированного состояния и физико-механических свойств горных пород [51,105,127], а в обсаженных скважинах – для оценки состояния колонны и цементного кольца [51].

### 1.1.1 Упругие волны, регистрируемые в волновом пакете

В настоящем разделе концептуально рассматривается распространения акустических волн в скважинной жидкости и распространение упругих волн в горных породах в окрестности скважины. Подробное описание распространения акустических волн в скважине заполненной жидкостью представлено в [51,53,54,115,126,151,201,206,274].



Первоначально импульс, генерируемый излучателем зонда ВАК, порождает волну в скважинном флюиде. Эта волна распространяется со скоростью  $v_H$ , и достигает стенки ствола скважины или обсадной колонны. Согласно закону Снеллиуса часть энергии сразу отражается обратно в скважину, остальная преломляется и далее распространяется по породе, поверхности (стенкам) скважины или по обсадной колонне.

Табл. 1.1. Скорости волны сжатия в упругих средах

Наименование породы или среды	$v_p$ (км/с)	
	от	до
Воздух	0,3	0,36
Почвенный слой	0,2	0,8
Гравий, щебень, песок	0,1	1,0
Вода	1,43	1,59
Глина	1,2	2,5
Песчаник	1,5 (рыхлые)	4,0 (очень плотные)
Сланцы	2,0	5,0 (метаморфические)
Известняки, доломиты	3,0	6,0
Лед	3,0	4,0
Гранит	4,5	6,5
Базальт	5,0	7,0

Среди всех волн, которые порождаются и распространяются по породе, поверхности (стенкам) скважины или по обсадной колонне выделяются такие, для которых удастся установить взаимосвязи с некоторыми свойствами или характеристиками горных пород и техническим состоянием (стальная колонна и цементное кольцо) скважины. Такие волны принято называть информативными [51]. Основные из них это Р и S- волны. Измеряемые параметры волн – скорость распространения ( $v_P$  и  $v_S$ , или интервальное время  $\Delta_P$  и  $\Delta_S$ ), амплитуда (максимальное значение на некоторой фазе) и затухание (параметр  $\alpha$ , определяемый отношением сигналов одной фазы на приемниках антенной решетки). Закон Снеллиуса определяет углы преломления (рис. 1.3)

этих волн от жидкости, заполняющую скважину (скорость в жидкости  $v_H$ ), в горную породу:

$$\frac{\sin \gamma_H}{v_H} = \frac{\sin \gamma_{P,S}}{v_{P,S}} \quad (1.2)$$

В

табл. 1.1. приведены скорости волны сжатия  $v_p$  для некоторых сред.

Кроме гидроволны, волн сжатия и сдвига, геометрические свойства заполненной жидкостью скважины предполагают дополнительные способы распространения энергии колебаний, а именно, посредством поверхностных или трубных волн, которые также регистрируются в полной волновом пакете.

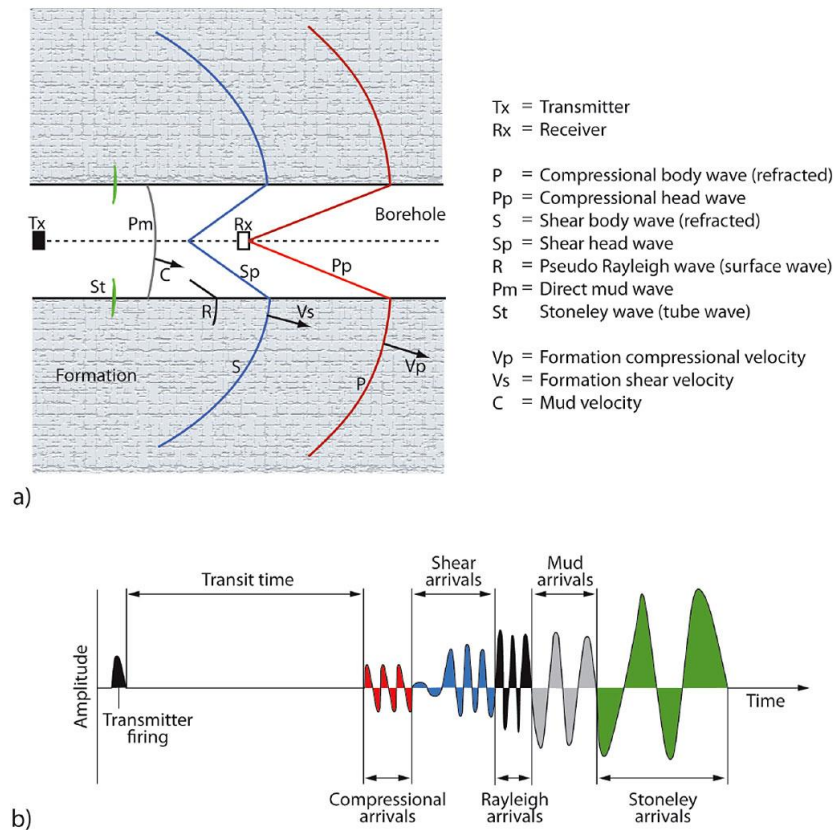


Рис. 1.3. Распространение составляющих волн в скважине: а) схема распространения; б) хронологическая последовательность [141]

Рассмотрим составляющие волны в хронологии волнового пакета для необсаженных скважин.

(1) Продольная волна (Р-волна, *Primary* - головная, *compressional*-сжатия).

Объемная волна, колебания вдоль оси скважины (рис. 1.4).

- (2) Поперечная (S-волна, *Second* – вторая, *shear*-сдвига, *transverse*). Объемная волна, колебания перпендикулярны оси скважины (рис. 1.4). S-волна может быть представлена в поляризованной форме – SH- и SV-волнами [116] (рис. 1.5), по различию параметров которых можно судить об анизотропии упругих и фильтрационно-емкостных свойств горных пород [102].
- (3) Псевдо-Рэлея поверхностная волна эллиптического движения частиц на границе твердого тела (горной породы) и жидкости (скважинного флюида). Для задач интерпретации применения не нашла.
- (4) Гидроволна (*mud*, далее H-волна). Объемная волна в скважинном флюиде.
- (5) Стоунли-волна (*Stoneley*, St-волна)<sup>1</sup>. В механизме распространения участвует одновременно жидкость и стенка скважины, которая расширяется и сжимается, при прохождении волны давления (рис. 1.6).

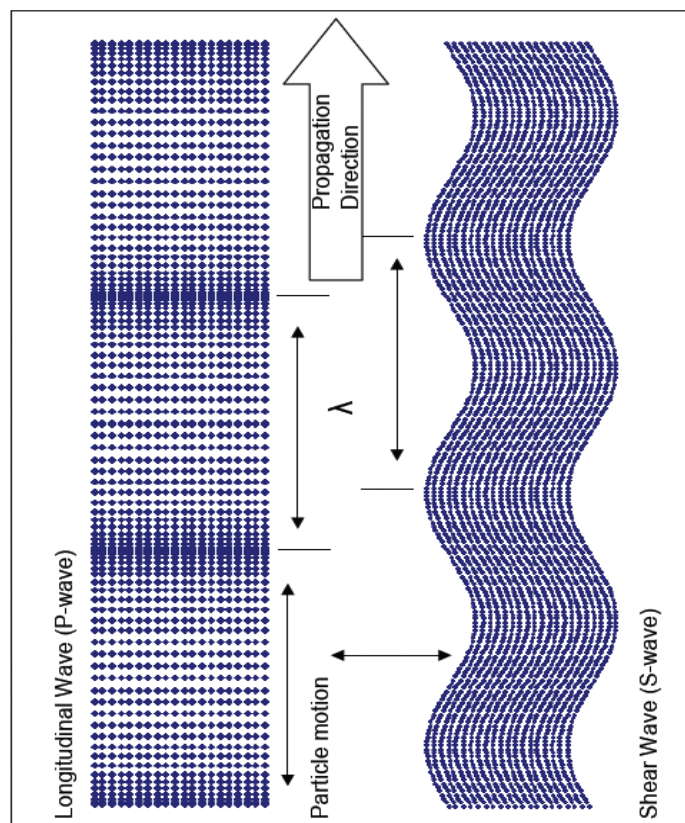


Рис. 1.4. Распространение P-и S-волн [119]

<sup>1</sup> Название этой волны в ВАК за последние 30 лет претерпело изменения. Ее сначала называли волной Лэмба-Стоунли (Lamb-Stoneley), затем просто волной Стоунли. Теперь ее иногда называют волной Стоунли-Шольте или просто волной Шольте (Scholte) [177].

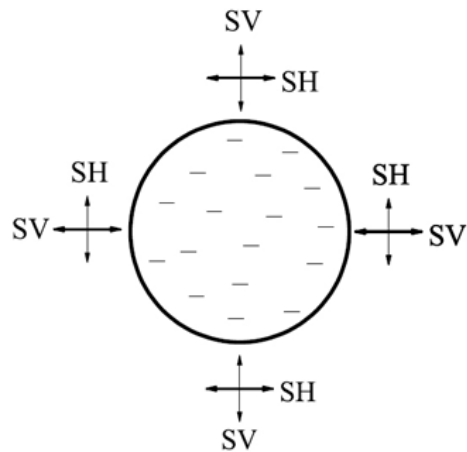


Рис. 1.5. Разложение S-волн на ортогональные (поляризованные) составляющие

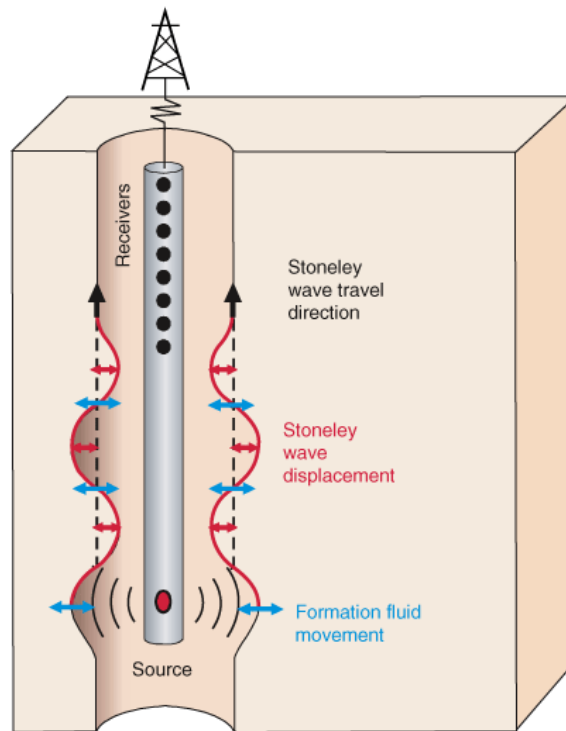


Рис. 1.6. Схема формирования волны Стоунли [106]

В типичном случае при заполненной жидкостью скважине, скорость продольной волны  $v_p$ , больше, чем скорость поперечной волны  $v_s$ , которая в свою очередь имеет скорость больше, чем скорость волны в жидкости  $v_H$ .

К информативным P-, S- волнам [51] добавляется и St-волны. В табл. 1.2 приведены основные приложения в геофизике измерений скоростей и амплитуд P-, S- и St-волн.

Табл. 1.2. Приложения для результатов измерений волн

Измерение (скорости и амплитуды)	Приложение
Полный волновой пакет	Калибровка сейсмики и вертикального сейсмического профилирования (ВСП); Около-скважинная и межскважинная томография (идентификация трещин, мониторинг заводнений); Оценка цементного кольца.
Р-волна	Пористость и литология; Содержание углеводородов; Оценка порового давления; Состояние цементного кольца; Калибровка наземной сейсморазведки; Синтез сейсмических трасс.
S-волна	Механические свойства; Обнаружение трещин и их оценка; Определение проницаемости; Соотношение P/S – волн для определения литологии и обнаружения газа
St-	Оценка проницаемости; Характеристика латеральной непрерывности трещин.

#### 1.1.1.1 Дополнительные волны, регистрируемые в волновом пакете

В волновом пакете дополнительно могут регистрироваться ряд волн. Приведем их, не придерживаясь хронологического порядка.

(б) Изгибная волна (рис. 1.7). Дипольные излучатели современных зондов ВАК возбуждают в скважине так называемые изгибные волны (*Flexural wave*), которые отличается от волны сдвига или S-волны [141]. Изгибные волны являются дисперсионными – это означает, что фазовая скорость зависит от частоты. Только при очень низких частотах скорость изгибной волны равна скорости S-волны, распространяющейся в пласте. Это усложняет оценку интервального времени S-волны по измерениям интервального времени изгибной волны, и может привести к методическим ошибкам [116]. Поскольку трудно возбудить изгибные волны в интервале низких частот, поэтому, как правило, требуется коррекция интервального времени изгибной

волны до интервального времени  $S$ -волны. Применяя методы цифровой обработки сигналов - фильтр нижних частот можно уменьшить эффекты дисперсии и повысить достоверность оценки. Как и  $S$ -волна изгибная волна или, вернее, оценки  $S$ -волны по изгибной волне могут быть представлены в поляризованной форме –  $SH$ - и  $SV$ -волнами.

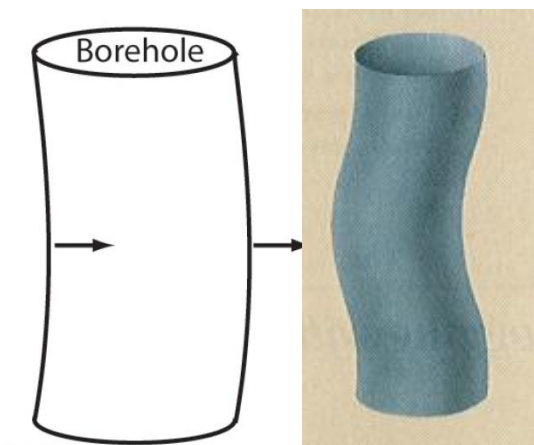


Рис. 1.7. Изгибная волна

(7) Корпусная волна. Большинство приборов ВАК легко узнаваемы по характерным щелевым прорезам (рис. 1.8). Щелевой корпус инструмента гарантирует, что распространение звуковой энергии по корпусу прибора окажется медленнее, чем сигнал, передаваемый через горные породы. Однако для приборов LWD такие прорезы могут привести к потере прочности т.к. нагрузка на буровое долото передается через прибор. В этом случае применяют другие конструктивные приемы, что не всегда приводит к полному подавлению этой паразитной волны [157,262].



Рис. 1.8. Щели в стальном корпусе зонда ВАК

Волны, распространяющиеся по стальной колонне обсаженных скважин с известной скоростью [54, 210]:

(8) Поляризованная волна Лява (Love-wave).

(9) Волна Лэмба (Lamb-wave, L, Casing).

В табл. 1.3 представлены типовые значения оценок составляющих волн в обсаженной скважине.

Табл. 1.3. Типовые значения оценок составляющих волн в обсаженной скважине [210]

Parameters of the free-pipe acoustic model Parameters	Velocity of P-wave (m/s)	Velocity of S-wave (m/s)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Radius (m)
Fluid	1500	--	1000	0.075
Casing	5800	3000	7800	0.085
Fluid annual	1500	--	1000	0.086
Cement	3000	1800	2000	0.109
Formation	4200	2400	2500	$\infty$

#### 1.1.2 Связь параметров волн с петрофизическими параметрами

Прямая задача - моделирование ВАК с учетом ряда геологических и технических факторов (конструкция, состояние, заполнение скважины и т.п.) рассмотрена в частности в [1,29, 31, 57,58, 62, 68,73, 83,85, 157,161,162, 178,246, 260]. При обработке (интерпретации) ВАК решается обратная задача. В открытом стволе это, прежде всего, оценка фильтрационно-емкостных и упруго-прочностных свойств горных пород [55, 136]

В настоящее время существует две теории (модели), связывающие параметры P-, S-волн с петрофизическими параметрами – это модель Био-Гассмана и модель Кустера-Токсоза [91].

### 1.1.2.1 Модель Био-Гассмана

В модели Био-Гассмана [96, 137, 170] скорость Р-волны  $v_p$ , S-волны  $v_s$  и объемная плотность  $\rho$  связаны формулами:

$$v_p^2 = \frac{1}{\rho} [\rho_{ma} v_{p_{ma}}^2 (1 - \beta) + M\beta^2] \quad (1.3)$$

$$v_s^2 = \frac{\rho_{ma}}{\rho} v_{s_{ma}}^2 (1 - \beta) \quad (1.4)$$

$$\rho = (1 - \Phi)\rho_{ma} + \Phi\rho_f \quad (1.5)$$

где:  $v_{p_{ma}}$  и  $v_{s_{ma}}$  - скорости Р- и S-волн для минерального скелета (матрицы);  $\rho_{ma}$  - плотность матрицы;  $\rho_f$  - плотность жидкости в поровом пространстве;  $\Phi$  - пористость. Параметры  $M$  и  $\beta$  могут быть выражены через пористость и модули объемной упругости твердой и жидкой фазы заполняющей поры:

$$1 - \beta = (1 - \Phi)^{m(\Phi)} \quad (1.6)$$

$$\frac{1}{M} = \frac{\beta - \Phi}{K_{ma}} + \frac{\Phi}{K_f} \quad (1.7)$$

где показатель  $m$  является функцией пористости  $\Phi$ ;  $K_{ma}$  - модуль объемной упругости матрицы;  $K_f$  - модуль объемной упругости жидкости.

### 1.1.2.2 Модель Кустера-Токсоза

В модели Кустера-Токсоза [168, 250] неоднородность пористой среды описывается коэффициентами  $\alpha_m$  - статистическим распределением поровых объемов. Предполагается, что пористая среда состоит из различных однородных фаз - твердой фазы (упругая матрица) и случайно распределенных включений другой фазы, которая может быть твердой, жидкой или газообразной. Предполагается, что включения - поры являются эллипсоидальными. Коэффициент  $\alpha$  определяет отношение малой и большой полуоси  $\alpha = a/c$ . Общая пористость такой среды - это сумма концентраций пор (плотностей пор)

$$\Phi = \sum_{m=1}^M \sum_{l=1}^L C(\alpha_{m,l}) \quad (1.8)$$



где:  $C(\alpha_{m,l})$  – объемная концентрация пор различного типа; коэффициент  $\alpha_{m,l}$ ,  $m = 1 \dots M$ ,  $l = 1 \dots L$ ;  $M$  – число пор;  $L$  – это число поры, насыщая пространство вместе в поры (вода, нефть, газ),  $L = 1$  or  $2$  or  $3$ .

### 1.1.2.3 Проницаемость пласта

Во многих публикациях скорость и затухание волны Стоунли связывают с проницаемостью пласта [2,52,56,63,83,106,243]. Под воздействием волн сжатия и сдвига частицы на поверхности скважины совершают эллипсообразные движения. При сжатии-растяжении происходит циклическое проникновение жидкости в породу. Часть энергии волны уходит на преодоление сопротивления этому проникновению. Поэтому считается, что чем выше проницаемость горной породы, тем ниже скорость и выше затухание St-волны. Поэтому чтобы оценить проницаемость предварительно необходимо оценить скорость и время первого вступления St-волны. Такая задача осложняется интерференцией St-волны с S-волной [48].

Скорость волны Стоунли  $V_{St}$  в скважине определяется выражением:

$$V_{St}^{-2} = \rho_f \left[ \frac{1}{K_f} + \frac{1}{G} - \frac{2}{j \cdot r \omega} \cdot \frac{k_0}{\eta_f} E(a \sqrt{-j \cdot \omega / D}) \right] \quad (1.9)$$

где  $\omega$  – круговая частота,  $\rho_f$ ,  $\eta_f$ ,  $K_f$  – плотность, вязкость и модуль всестороннего сжатия поровой жидкости;  $G$ ,  $k_0$  – модуль сдвига и абсолютная проницаемость породы,  $r$  – радиус скважины;  $E(x) = x \cdot K_1(x) / K_2(x)$ , здесь  $K_1(x)$ ,  $K_2(x)$  – функции Кельвина 1-го и 2-го рода [65];  $D$  – коэффициент диффузии Био [96]. Скорость волны Стоунли, определяемая выражением (1.9), является комплексной величиной, для получения фазовой скорости  $v_{St}$  и коэффициента затухания  $\alpha$  необходимо выделить действительную и мнимую части этого выражения.

## 1.2 Многоэлементные приборы ВАК, конструкция и основные характеристики

К концу 1950-х годов можно было говорить об обобщении некоторого опыта эксплуатации трехэлементных приборов (рис. 1.2). Выявились некоторые проблемы. В частности перекося положения прибора, обрушения и размывы стенок скважины влияли на оцениваемое интервальное время (*slowness*) из-за неодинакового времени прохождения волны по жидкости от стенки скважины к каждому приемнику. Решение задачи было найдено исследователями компании Shell [116]. Развитием этой технологии стал зонд компенсированного акустического каротажа, содержащий 2 излучателя и 4 приемника (рис. 1.9). Однако, несмотря на увеличение количества элементов, такой зонд не является многоэлементным зондом акустического каротажа в современном понятии.

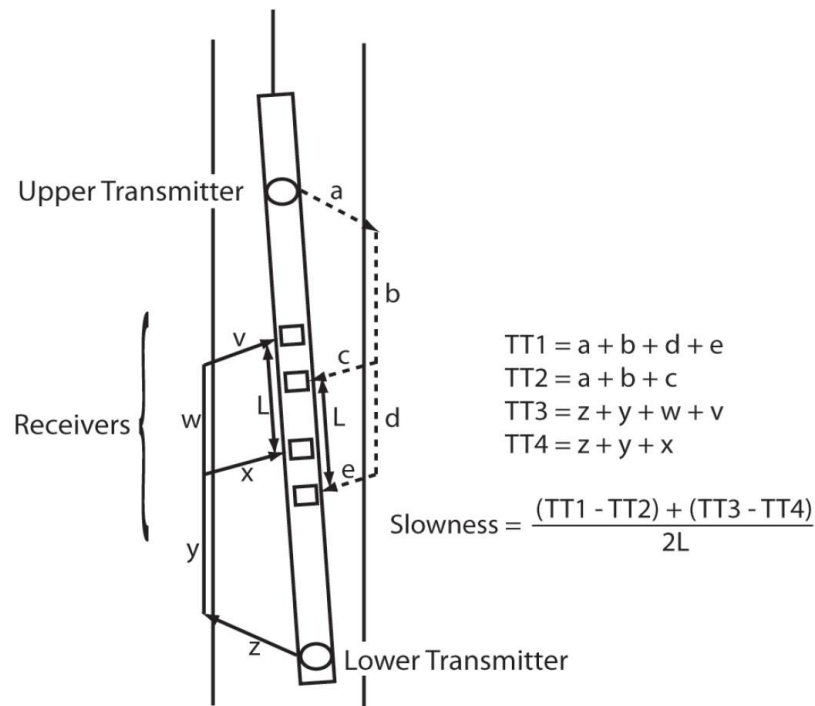


Рис. 1.9. Зонд компенсированного акустического каротажа [116]

В современном понимании многоэлементный зонд ВАК содержит секцию излучателей (*Transmitter section*) и секцию приемников (*Receiver section*) или антенную решетку. Секция излучателей может состоять из 1-го или 2-х монополярных излучателей (различающихся частотой импульса) и 2-х

ортогональных дипольных излучателей. Секция приемников может состоять из 4, 6, 8-ми (и до 16) равноудаленных групп монополярных и дипольных приемников (рис. 1.10).

Излучатели представляют собой цилиндры из пьезоэлектрических или магнитострикционных материалов. При подаче электрического тока излучатель изменяет объем и генерирует волну давления или импульс, который передается во всех направлениях. Физически это точечный источник, или полюс, и, обозначается как монополярный источник. Приемники, как правило, из пьезоэлектрической керамики, генерируют электрический ток, соответствующий колебаниям давления в жидкости вокруг зонда. Частотный диапазон типового акустического каротажа составляет от 5 до 15 кГц, и сигнал.

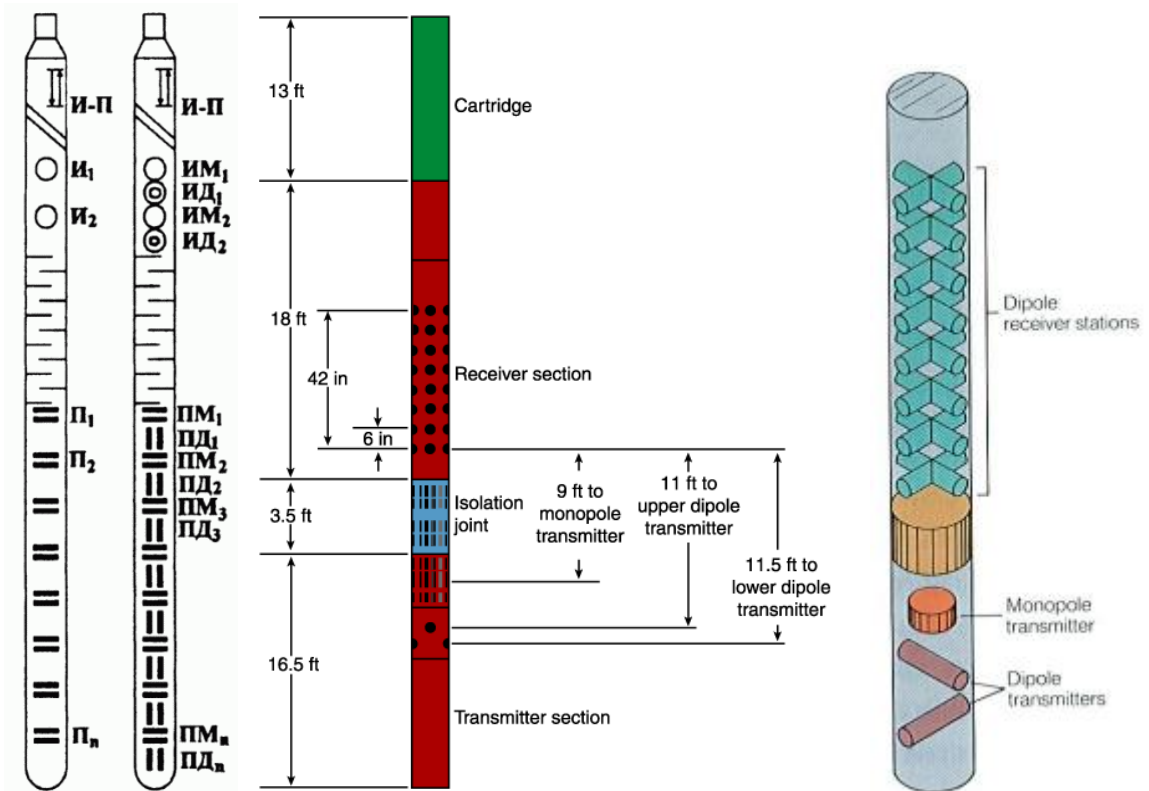
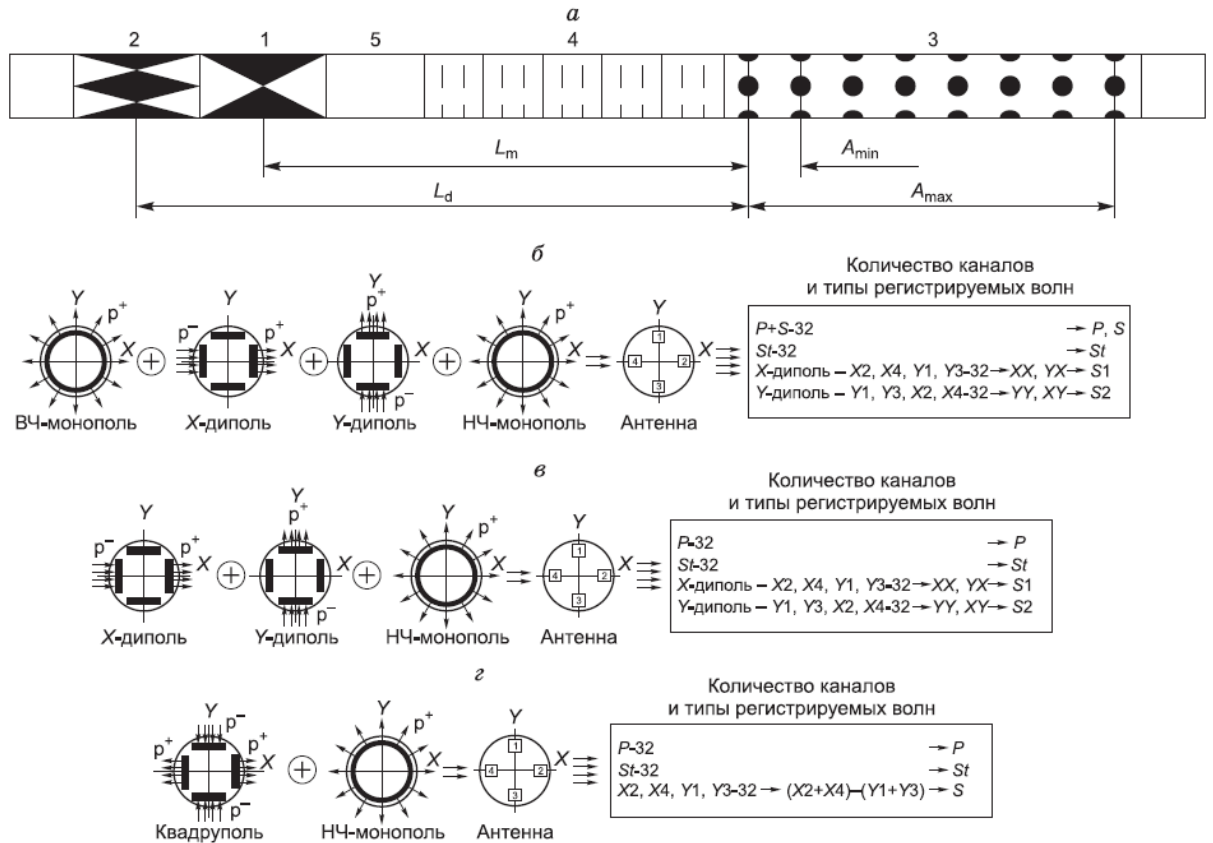


Рис. 1.10. Две схемы многоэлементных зондов ВАК: а) монополярный; б) монополярно-дипольный (Шлюмберже, DSI)

Оценки поперечной волны (S-волны) для таких типов излучателей ограничены высокоскоростными разрезами, чтобы разнести прибытие S-волны

на приемники с прибытием волны по жидкости (см. рис. 1.3). Прогресс в обработке данных не может изменить законы отражения и преломления, так что была необходима принципиально другая техника для измерения интервального времени S-волн независимо от интервального времени Н-волны. Решение этой проблемы было найдено в виде нового типа излучателя - дипольного излучателя.

Дипольные излучатели представляют собой цилиндрические поршни, которые создают повышение давления на одной стороне ствола скважины и снижение на другой, или изгибные волны (рис. 1.7). Главное достоинство – гидроволна (Н-волна) в волновом пакете уже не наблюдается. Кроме того две пары ортогональных дипольных излучателей позволяют регистрировать SH- и SV-волны, а по их соотношению давать оценку анизотропии свойств горных пород (трещиноватость, направление главных напряжений). На рис. 1.11 и рис. 1.12 представлены состав и режимы работы прибора кросс-дипольного ВАК [31]



а: 1 – блок монополюсного излучателя, 2 – блок кросс-дипольного излучателя, 3 – многоэлементная приемная антенна, 4 – акустический изолятор, 5 – блоки запускающей и управляющей электроники.

Рис. 1.11. Состав и режимы работы прибора кросс-дипольного ВАК [31]

Корпус прибора типа LWD (каротаж в процессе бурения) представляет собой утяжеленную буровую трубу. По этой трубе распространяется звуковая волна в монополюсном и дипольном режимах возбуждения сегментов излучателя. Причем в дипольном режиме она даже значительно выше из-за асимметричности возбуждения. Конструктивно отбросить назад по времени (как в приборах на кабеле) эту волну не удастся - нужны иные решения по ее подавлению. Иначе она сама подавит исследуемую волну по породе (особенно в высокоскоростных карбонатных разрезах). Кроме того, из-за малого зазора между корпусом прибора LWD и пробуренным стволом скважины дисперсия S(изгибной)-волны, возбуждаемой в дипольном режиме может составлять до 25% [37].

Квадропольный режим излучения (на рис. 1.12 представлены фазы сегментов излучателя) применяется для оценки скорости S-волны.

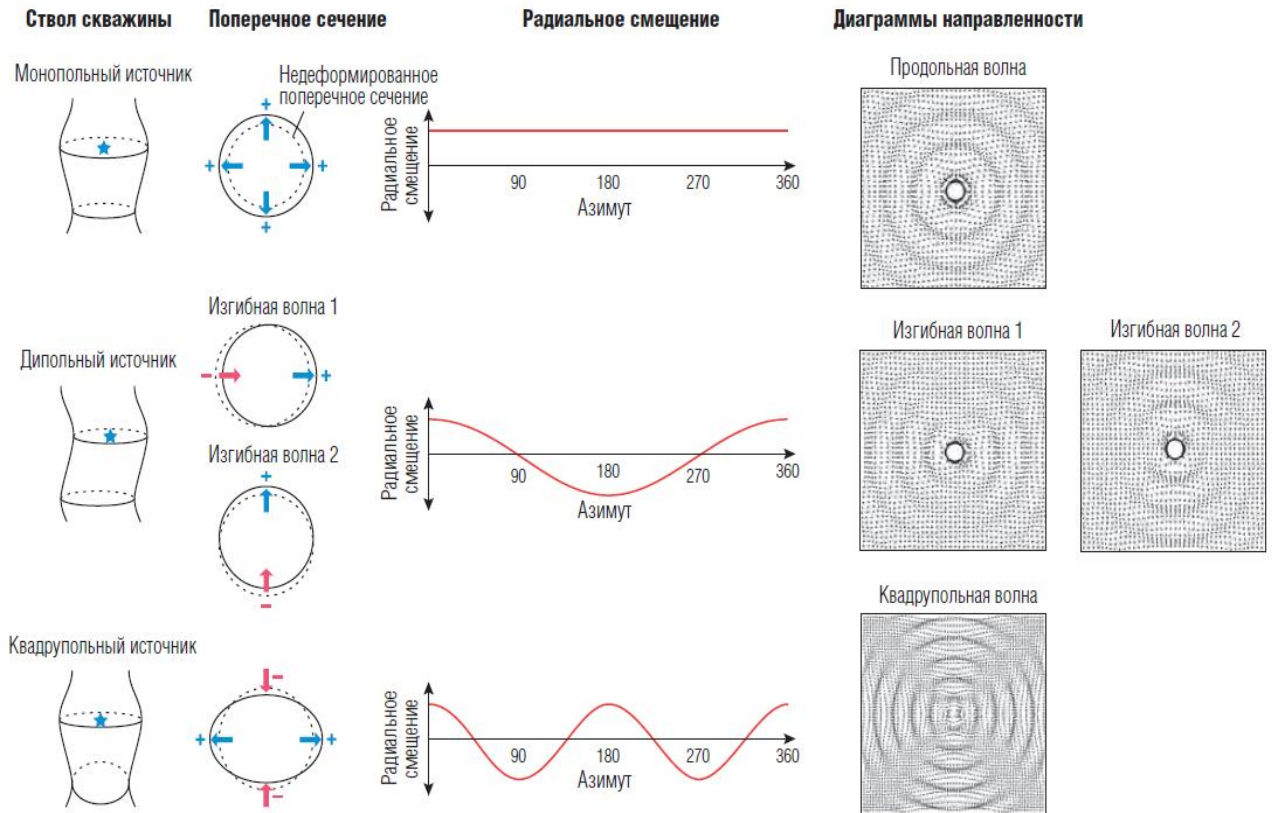


Рис. 1.12. Монопольный, дипольный и квадрупольные режимы

Квадрупольный режим имеет следующие достоинства [37]:

- Возбуждаются S(изгибная мода)-волны, P-волна незначительна как в дипольном режиме;
- Характерная для приборов LWD в монопольном и дипольном режимах корпусная (*collar*) волна практически отсутствует. Это дает возможность исследовать S-волну в высокоскоростных (карбонатных) разрезах. Остаточные проявления *collar*- волны возможны только при существенном перекосе или эксцентриситете прибора в скважине.
- В низкоскоростных породах на низкой частоте  $\sim 2$  кГц дисперсия S(изгибной)-волны практически отсутствует (составляет до 1-2% и ею можно пренебречь);
- В высокоскоростных породах на повышенной частоте  $\sim 7-8$  кГц дисперсии S(изгибной)-волны нет.

### 1.2.1 Акустический массив регистрируемых данных – пространственно-временная функция

Пространственно-временная запись  $y(t, x)$  – это акустический массив или массив ВАК. Первое измерение – это время регистрации, второе – координата приемника вдоль оси прибора. К этой записи мы будем применять двумерные преобразования для того, чтобы решить задачу фильтрации по скорости

Если имеется  $M$  приемников,  $y(k, m)$  – зарегистрированный массив данных по приемникам на излучающий импульс (массив ВАК), где  $m = 1 \div M$ ,  $k = 1 \div N$  (количество точек по времени с шагом  $T_0$ ).

Далее будем отождествлять обозначения пространственно-временного представления  $y(t, x)$ , временного представления по приемникам (каналам)  $y(t, m)$   $m = 1 \div M$  и двумерный массив записей ВАК  $y(k, m)$  размерности  $N \times M$ .

#### 1.2.1.1 Оценка числа сигналов в мультиканальных записях

Теоретически в зарегистрированном массиве  $y(k, m)$ ,  $m = 1 \div M$ ,  $k = 1 \div N$  можно выделить до  $M$  сигналов полной длины. В условиях зашумленности и интерференции количество таких сигналов предложено [265] оценивать на основе информационного критерия Акаике (ИКА, AIC, *Akaike Information Criterion*) и принципа минимальной длины описания (МДО, MDL, *Minimum Description Length*).

Сформируем матрицу ковариаций

$$\mathbf{C} = \mathbf{y}^T \mathbf{y},$$

где  $\mathbf{y}$  – матрица измерений размером  $N \times M$ . Матрица ковариаций  $\mathbf{C}$  имеет размер  $M \times M$  и собственные числа  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \dots \geq \lambda_M$ . ИКА определяется как [95]

$$AIC(W) = -2 \log \left( \frac{\prod_{m=W+1}^M \lambda_m^{1/(M-W)}}{\frac{1}{M-W} \sum_{m=W+1}^M \lambda_m} \right)^{(M-W)N} + 2W(2M - W), \quad (1.10)$$

а МДО

$$MDL(W) = -2 \log \left( \frac{\prod_{m=W+1}^M \lambda_m^{1/(M-W)}}{\frac{1}{M-W} \sum_{m=W+1}^M \lambda_m} \right)^{(M-W)N} + W(2M - W) \log(N). \quad (1.11)$$

Минимумы этих критериев соответствуют оптимальному значению  $W$  как количеству сигналов, выделяемых в массиве  $y(k, m)$ .

### 1.3 Одномерная (1D) фильтрация в частотной области

Теория и практика цифровых фильтров, расчет КИХ (с конечной импульсной характеристикой) и БИХ (с бесконечной импульсной характеристикой) фильтров частотной области это целое направление в цифровой обработке сигналов [38,43,72].

Учитывая, что затухание P, S и St-волн зависит от частоты [51], одним из специальных конструктивных приемов разделения волн является регистрация ВАК с несколькими частотами возбуждения в диапазоне 2.5-40 кГц. Совместно с применением узкополосных цифровых фильтров для записей по каждой частоте возбуждения этим удается решить задачу раздельной регистрации волн лишь отчасти. Такой конструктивный прием в настоящей работе не рассматривается – мы исходим из того, что в волновом пакете потенциально присутствуют все составляющие волны в диапазоне 4-20 кГц.

Обычно для записей ВАК применяют полосовые цифровые фильтры, которые позволяют подавить низкочастотный дрейф нуля и высокочастотный шум. Для фильтрации применяются как КИХ (с конечной импульсной характеристикой), так и БИХ (с бесконечной импульсной характеристикой) фильтры [72].

Физически реализуемые цифровые фильтры вносят фазовый сдвиг, что естественно, смещает время первого вступления составляющих волн. Поэтому применяют три способа: (1) применяют цифровые КИХ фильтры с нулевой фазой; (2) цифровой фильтр проектируют с линейной фазочастотной



характеристикой в полосе пропускания – в результате временной (не фазовой) сдвиг не зависит от частоты и рассматривается как общее запаздывание; (3) двунаправленная фильтрация без внесения фазового сдвига – осуществляется обработка вектора  $u$  в два приема - сначала в прямом, а затем в обратном направлении для компенсации сдвига.

### 1.3.1 Спектральный состав акустических сигналов

Спектральный состав Р- и S- волн во многом определяется спектром инициирующего сигнала источника, который в свою очередь определяется электромеханической колебательной системой акустического излучателя. В [31] изучен спектр монополюсных и дипольных источников – излучателей акустических импульсов. На рис. 1.13 представлен типовой импульс монополюсного источника. На рис. 1.14 представлен спектр импульса монополюсного источника, а на рис. 1.15 представлен спектр дипольного источника. На рис. 1.16 представлены спектры измерительных каналов монополюсных и дипольных приемников. Спектры сигналов приемников, как правило, шире спектра сигнала излучателя. Когда говорят о частоте возбуждения излучателя – имеют в виду частоту пика спектра.

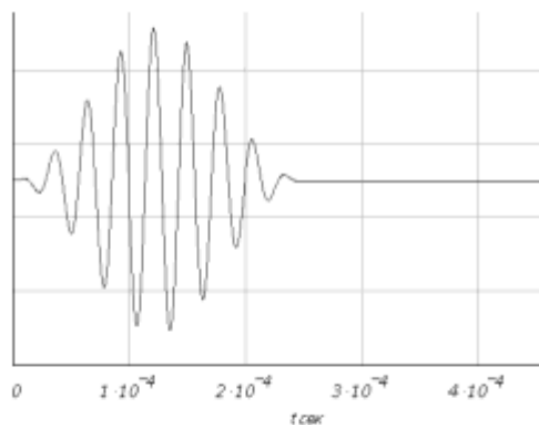


Рис. 1.13. Иницирующий акустический сигнал монополюсного источника [31]

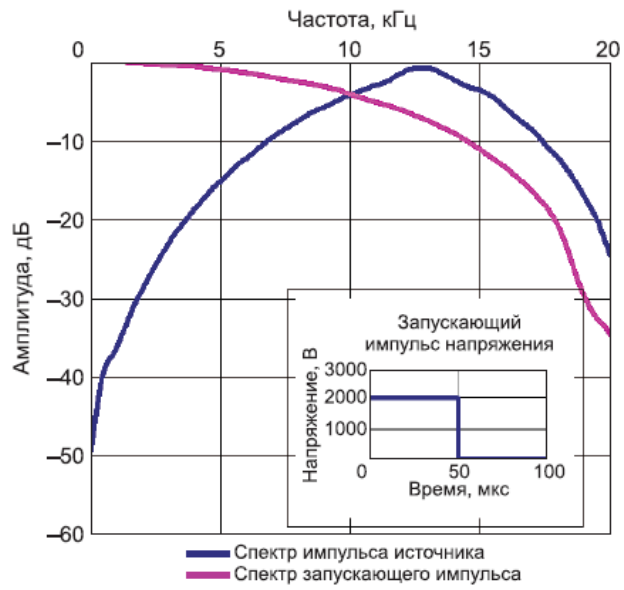


Рис. 1.14. Спектр импульса монополюсного источника [31]

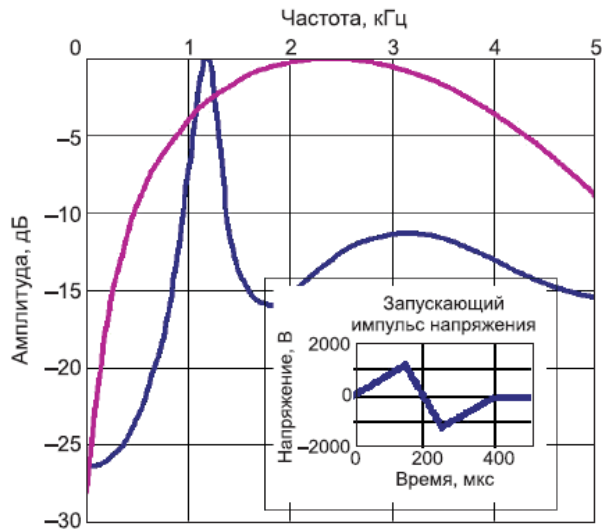


Рис. 1.15. Спектр импульса дипольного источника [31]

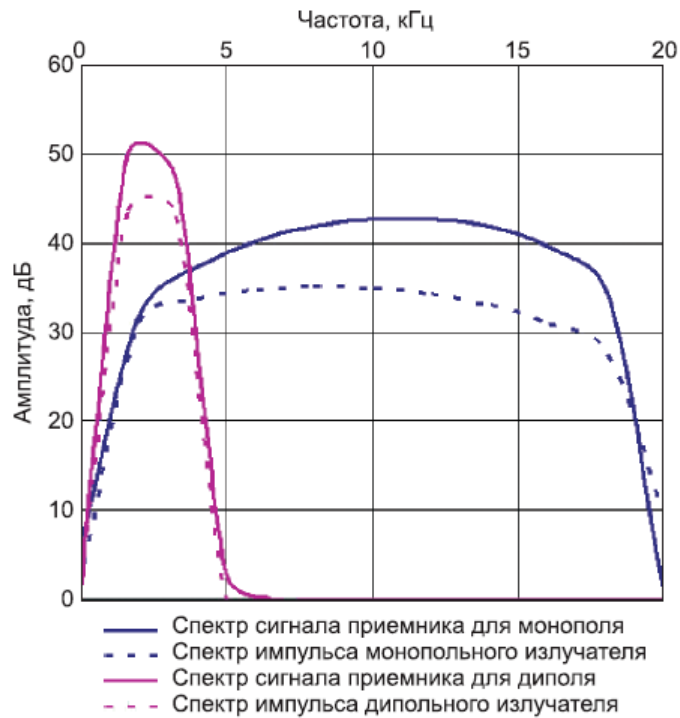


Рис. 1.16. Спектр сигнала приемника [31]

### 1.3.2 Спектрограмма регистрируемых сигналов, коротко-временное Фурье-преобразование

Попытаемся, используя современные достижения в области спектрального анализа сигналов выделить волны акустического каротажа – продольную, поперечную, Стоунли, корпусную и гидроволну. Эти волны различаются временем вступления и временем затухания, а также частотой. При этом, возможно, их перекрытие, как во временной, так и в частотной области. Именно этот фактор, вызывает трудности в их выделении, и на наш взгляд явился основной причиной дискуссии [6, 51].

Появившийся относительно недавно метод время-частотного представления ( $t-f$ , *Time-Frequency Representation*, *TFR*) спектральной плотности сигнала, получивший название коротко-временное Фурье преобразование (*Short-Time Fourier Transform*) [89,117], [99] (функция *spectrogram* библиотеки *Signal Processing* в MATLAB) иногда позволяет не только четко разделять составляющие волны пакета ВАК, но и корректно их классифицировать [218] (рис. 1.17).

Чтобы представить зависимость времени в преобразовании Фурье, надо выделить сигнал  $y(u)$  в пределах временного окна в окрестности специфицированного времени  $t$ , затем вычислить преобразование Фурье, и делать это для каждого момента времени  $t$ . Полученное преобразование называется коротко-временным Фурье преобразованием (КВФП) или коротко-временным спектром:

$$F(t, f; h) = \int_{-\infty}^{+\infty} y(u) h(u-t) e^{-j2\pi fu} du$$

где  $h(t)$  - окно коротко-временного анализа (Рис. 1.17),  $f$  - частота. Умножение на относительно короткое окно  $h(u-t)$  эффективно подавляет сигнал вне рассматриваемой окрестности точки  $u = t$ , КВФП – «локальный» спектр сигнала  $y(u)$  вокруг времени  $t$ . При условии, что коротко-временное окно имеет конечную энергию, КВФП является обратимым согласно

$$y(t) = \frac{1}{E_h} \int_{-\infty}^{+\infty} \left[ \int_{-\infty}^{+\infty} F(u, f; h) h(t-u) du \right] e^{j2\pi ft} df = \frac{1}{E_h} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} F(u, f; h) h(t-u) e^{j2\pi ft} dudf ,$$

где

$$E_h = \int_{-\infty}^{+\infty} |h(t)|^2 dt .$$

КВФП также может быть выражено в спектрах сигнала и окна:

$$F(t, f; h) = \int_{-\infty}^{+\infty} Y(v) H(v-f) e^{-j2\pi(v-f)t} dv ,$$

где  $Y$  и  $H$  - Фурье преобразование  $y$  и  $h$  соответственно. Таким образом, КВФП  $F(t, f; h)$  можно рассматривать как результат прохождения сигнала  $y(t)$  через полосно-пропускающий фильтр, чья частотная характеристика  $H(v-f)$ , и выведена из родительского фильтра  $H(v)$  смещением  $f$ .

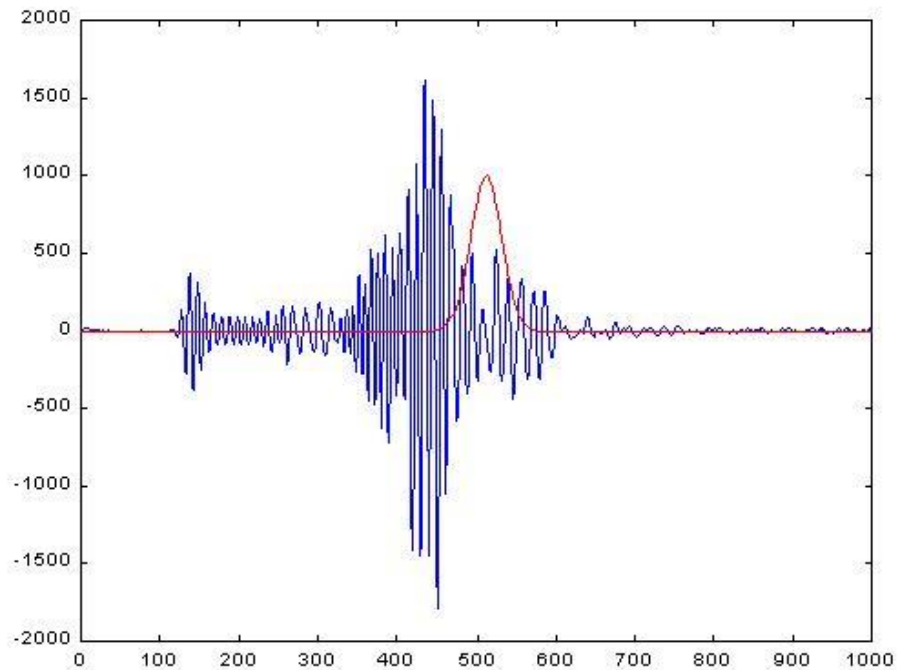


Рис. 1.17. Сигнал  $y(u)$  и коротко-временное окно  $h(u-t)$

Важнейшим является выбор вида и ширины окна. Казалось бы, чем уже окно, тем лучше разделение волн по времени. С одной стороны, хорошее временное разрешение требует короткого окна  $h(t)$ . С другой стороны, для хорошего частотного разрешения требуется узкополосный фильтр, то есть длинное окно  $h(t)$ . Но, к сожалению, вследствие принципа неопределенности Гейзенберга-Габора [117], эти пожелания не выполняются одновременно. В ходе исследований установлено, что ширину временного окна для ВАК рекомендуется выбирать равным  $t_p/8 \div t_p/4$ , где  $t_p$  – продолжительность сигнала.

Идеальный временной фильтр – с прямоугольным окном, однако при реализации такого фильтра происходит всплеск и размытие границ спектра. Для того чтобы улучшить частотный спектр на границах реализуемого временного окна применяют различные преобразования и формулы. Чаще других используются окно Хеннинга и окно Хемминга, преобразования Уолша, Гаусса, Чебышева и др..

Окно Хеннинга или Хемминга [89, 117] в коротко-временном анализе позволяет «плавно» вырезать часть сигнала для последующего преобразования

Фурье с минимальным искажением спектра. В последнее время для время-частотного анализа в области геофизики набирает популярность так называемое S-преобразование с применением функции Гаусса в качестве временного окна

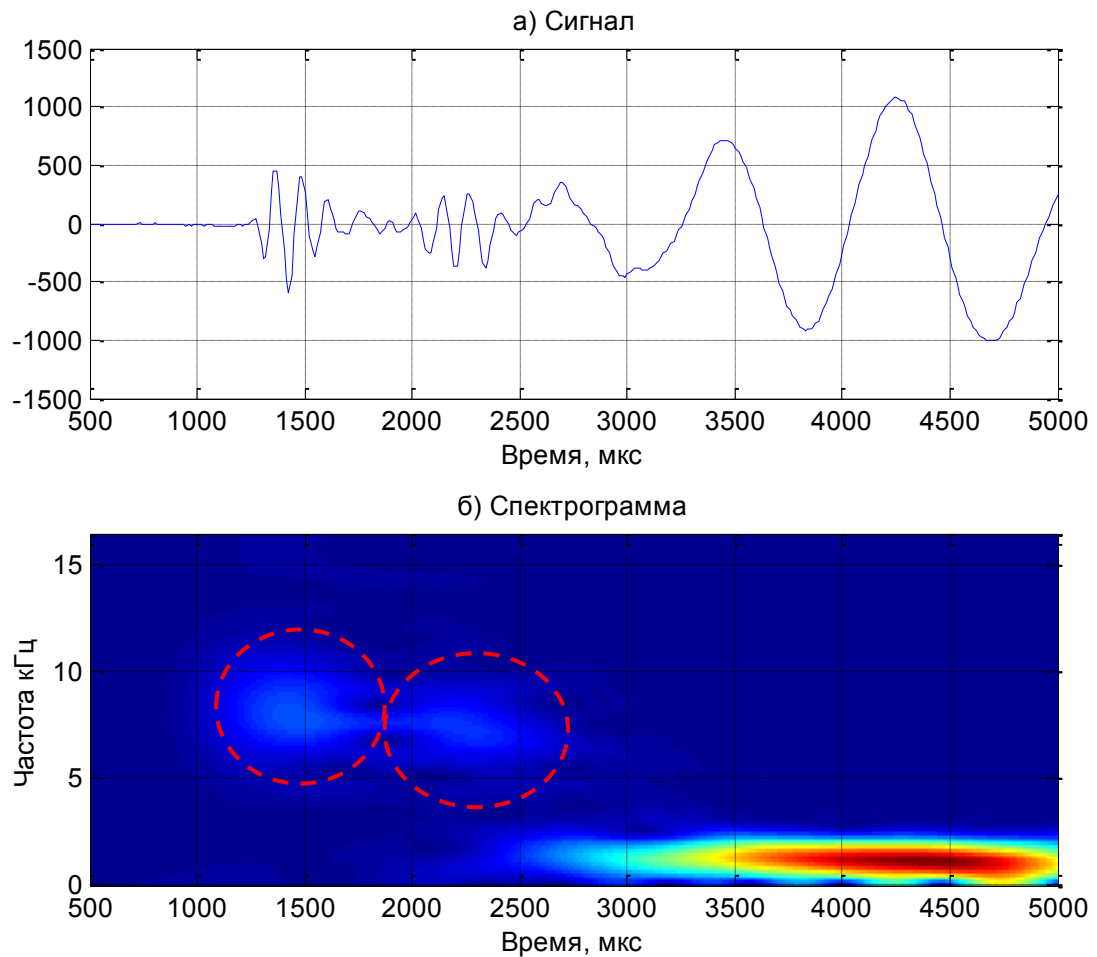


Рис. 1.18. Спектрограмма 1 – частотно-временное представление (ХМАС F1).

На рис. 1.18 представлена спектрограмма сигнала по одному из приемников (прибор ХМАС F1), где достаточно хорошо прослеживаются P-, S- и St-волны. P- и S-волны возбуждаются в окрестности 8 кГц, а St-волна в окрестности 2 кГц. При этом волны достаточно разнесены по времени. Однако это достаточно редкий случай. Еще одно, можно сказать, идеальное разделение представлено на рис. 1.19 для одного из приемников трехэлементного прибора

(1 излучатель, 2 приемника) МАК-2. На рис. 1.20 представлен более типичный, но также достаточно идеализированный вид спектрограммы.

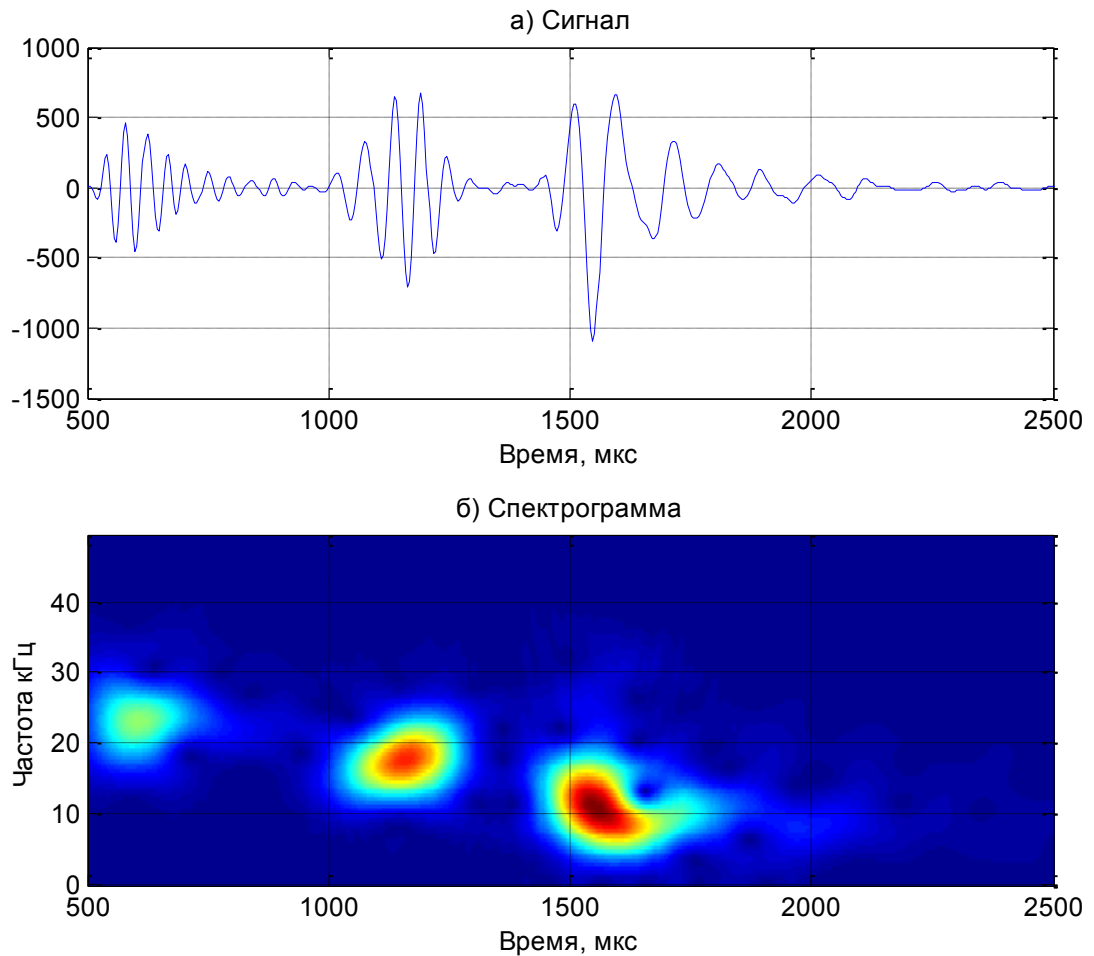


Рис. 1.19. Спектрограмма 2 – частотно-временное представление (МАК-2).

Таким образом, КВФП представляется перспективным инструментом обработки данных ВАК. Каждая составляющая ВАК представляется на диаграмме КВФП «пятном», взаимное расположение которых еще ждет своего исследователя на предмет геофизической, петрофизической и геологической интерпретации. Исследования должны быть комплексными с учетом геометрии зонда и частоты возбуждения. КВФП по сравнению с только временным или только частотным разделением, несомненно, имеет преимущество.

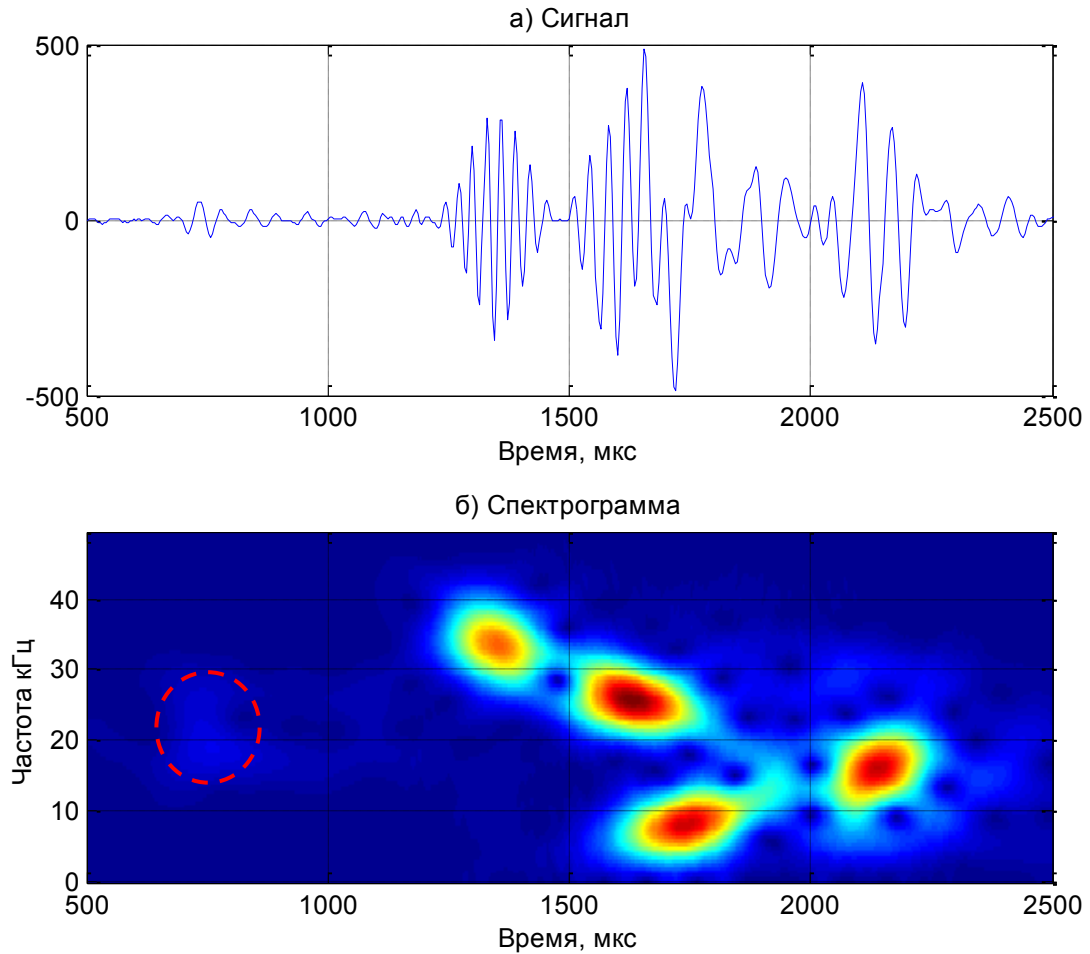


Рис. 1.20. Спектрограмма 3 – частотно-временное представление (МАК-2).

### 1.3.3 Преобразование Гильберта, аналитический сигнал

Ортогональным дополнением сигнала  $y(t)$  называется сигнал  $y_h(t)$  такой, что

$$\int_{-\infty}^{\infty} y(t)y_h(t)dt = 0 \quad (1.12)$$

При этом подразумевается, что  $y_h(t)$  тождественно не равен нулю. Преобразование Гильберта (*Hilbert transform*) позволяет рассчитать ортогональное дополнение сигнала  $y(t)$  как:

$$y_h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{y(\tau)}{\pi(t - \tau)} d\tau = 0 \quad (1.13)$$



В частотной области преобразование Гильберта можно записать через преобразование Фурье:

$$Y_h(f) = F[y_h(t)] = H_F(f) \cdot F[y(t)] = H_F(f) \cdot Y(f) \quad (1.14)$$

Частотная характеристика фильтра Гильберта равна:

$$H_F(f) = -j \cdot \text{sign}(f) = \begin{cases} j, & f < 0; \\ 0, & f = 0; \\ -j, & f > 0. \end{cases} \quad (1.15)$$

Тогда ортогональное дополнение или преобразование Гильберта представляется через прямое и обратное преобразование Фурье

$$y_h(t) = F^{-1}[H_F(f) \cdot F[y(t)]] \quad (1.16)$$

Аналитическим сигналом называется комплексный сигнал вида [28]

$$y_a(t) = y(t) + j \cdot y_h(t) \quad (1.17)$$

Спектр аналитического сигнала:

$$Y_a(f) = Y(f) + j \cdot Y_h(f) = \begin{cases} 0, & f < 0; \\ Y(0), & f = 0; \\ 2 \cdot Y(f), & f > 0. \end{cases} \quad (1.18)$$

Преобразование Гильберта представляется как

$$y_h(t) = \text{imag}[F^{-1}[Y_a(f)]] \quad (1.19)$$

Оператор аналитического представления

$$y_a(t) = H_a[y(t)] = F^{-1}\{[1 + j \cdot H_F(f)] \cdot F[y(t)]\} \quad (1.20)$$

На практике, для дискретных сигналов (вместо  $y(t)$  с бесконечным временем рассматривается конечный временной ряд  $y(n)$ ,  $y(n)$ ,  $n=0 \dots N-1$ ) применяют разновидность дискретного преобразования Фурье – быстрое преобразование Фурье (БПФ) (функция *hilbert* библиотеки *Signal Processing* в MATLAB) [99].

### 1.3.3.1 Оценка мгновенных амплитуды и частоты акустических волн

Одним из способов представления сигнала одновременно в частотной и временной областях является определение мгновенной частоты, т.е. частоты сигнала как функции времени.

Для такого сигнала можно определить понятия мгновенной амплитуды и мгновенной частоты [164, 28]:

$$a(t) = |y_a(t)| \quad \text{- мгновенная амплитуда;}$$

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d \arg y_a(t)}{dt} = \frac{1}{2\pi} \frac{y'_h(t)y(t) - y_h(t)y'(t)}{|y_a(t)|^2} \quad \text{- мгновенная частота.}$$

$$y(t) = a(t) \cdot \cos[2\pi \cdot f(t) \cdot t].$$

Мгновенная амплитуда акустического сигнала – это и есть та самая «огибающая», которую мысленно проводит каждый геофизик-интерпретатор. Мгновенная амплитуда позволяет упростить и сделать более надежным выделение первого вступления и совместно с мгновенной частотой разделить волн акустического каротажа. Кроме того, мы надеемся, что мгновенная амплитуда и мгновенная частота послужат основой для пересмотра старых и разработки новых методик.

На рис. 1.21 представлена акустическая волна и ее мгновенная амплитуда, а на рис. 1.22 представлена мгновенная частота исходной волны.

Возможности аналитического сигнала на этом не исчерпаны, так, например, можно оценить мгновенную фазу

$$\varphi(t) = \arg y_a(t) = \tan^{-1} \frac{y_h(t)}{y(t)},$$

и усредненное время вступления частот (рис.4)

$$t(f) = -\frac{1}{2\pi} \frac{d \arg Y_a(f)}{df}.$$

Последнее означает, что, задавшись частотой, можно оценить усредненное время вступления этой частоты в сигнале. Надеемся, что и эта зависимость вызовет интерес интерпретаторов.

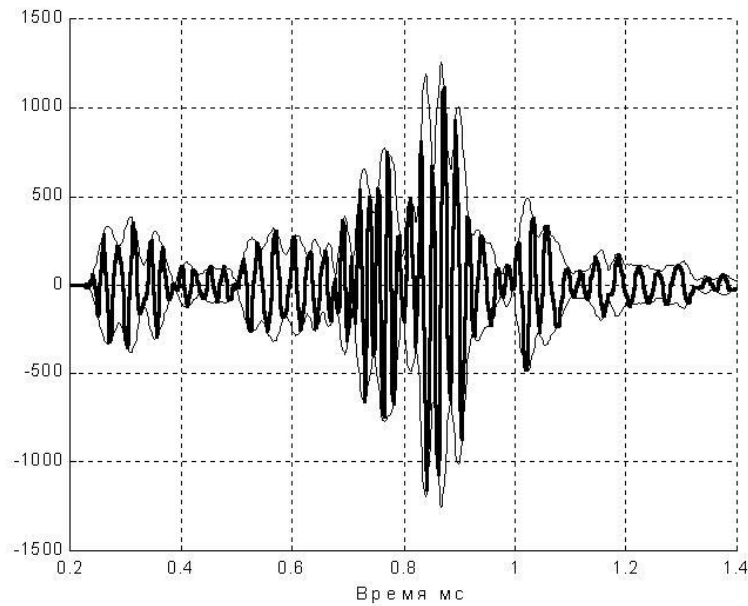


Рис. 1.21. Исходный сигнал и его мгновенная амплитуда

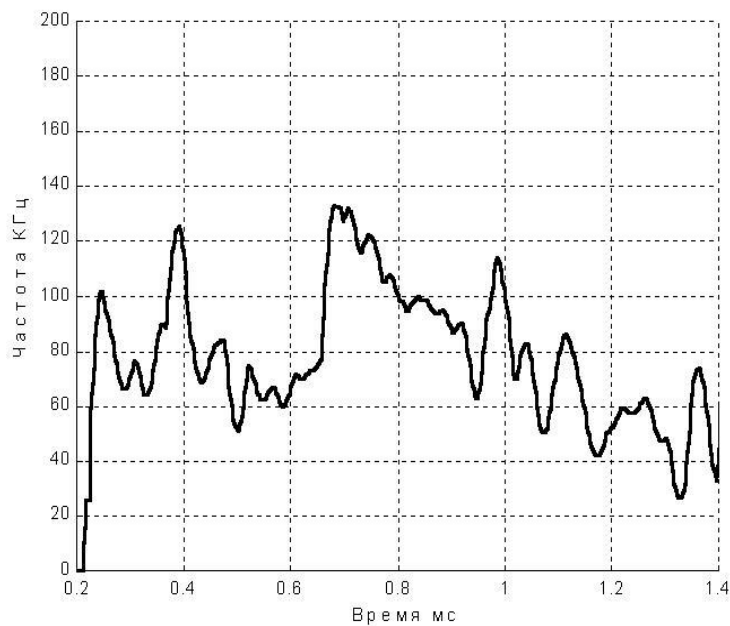


Рис. 1.22. Мгновенная частота

#### 1.4 Методы оценки времени первого вступления волн

На первом этапе обработки ВАК оцениваются времена первого вступления и скорости P-, S-, St-волн (для обсаженных скважин и L-волна), а следовательно, и  $\Delta t$ . Затем следует оценка  $\Lambda$  и  $\alpha$ . И только после этого приступают к геофизической и петрофизической интерпретации.

Задача выделения первого вступления составляющих ВАК - P- и S- и St-волн является одной из основных и трудоемких [39, 51, 163, 266]. Инструментом любых исследований являются методы, которые в зависимости от источника и способа получения информации классифицируются на эвристические, статистические и комбинированные (смешанные). Большинство традиционных методов можно классифицировать как эвристические, поскольку они формализуют интуитивно найденные приемы и имитируют интеллектуальную деятельность человека. К ним относятся методы, основанные на предварительной частотной фильтрации, задании некоторого уровня дискриминации и анализе фазовых переходов. Первое вступление, как правило, определяется по вступлению первой полуволны (положительной или отрицательной), превышающей заданный уровень помехи (уровень дискриминации) в пределах некоторого временного окна.

#### 1.4.1 Пороговая оценка первого вступления

Полученный сигнал, очевидно, содержит большое количество информации. Тем не менее, измерение  $\Delta t$  основано на обнаружении только первый или наибольшую энергию, передаваемую скорости передатчиков инструмента, известных как обнаружение первого вступления (ОПВ, *FMD-first motion detect, first break*) [116]. На основании ряда параметров (тип породы и тип жидкости, диаметр скважины, геометрия зонда) исследователь может предсказать время ОПВ. В программном обеспечении инженер может установить временное окно (*FMD Window*) вероятного ОПВ. Также должно быть установлено пороговое значение, позволяющее отсечь фоновый шум (уровень отсечки) в пределах окна обнаружения (*Threshold*). Процесс ОПВ показан на рис. 1.23.

Помехи в зарегистрированном сигнале являются основной проблемой ОПВ. Поэтому предварительно сигнал фильтруют, отбрасывая низкочастотный дрейф и высокочастотный шум, но это не решает всех проблем. На рис. 1.23 показаны типичные случаи занижения и завышения времени пробега волны при

ОВП. Причины, которые могут привести к уменьшению амплитуды первого вступления до уровня шумов - высокая газонасыщенность, рыхлые образования, размывы или обрушения, растворенный газ в буровом растворе. Даже в идеальных условиях уменьшение амплитуды энергии с расстоянием от источника представляет собой одно из конструктивных ограничений ВАК.

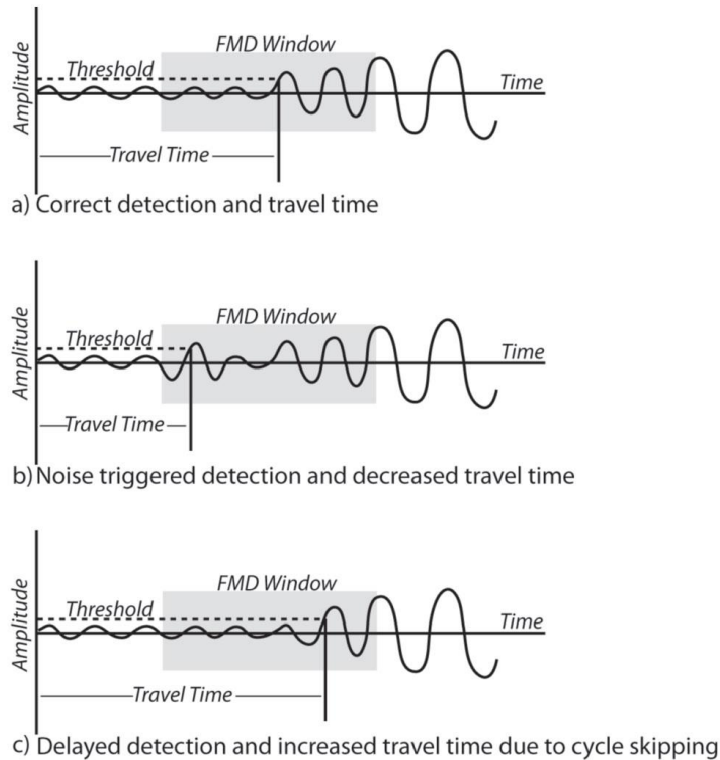


Рис. 1.23. Процесс ОПВ: а) идеальная ситуация; б) ОПВ ложно срабатывает на шумовой всплеск; в) ОПВ не обнаружило «истинный» пик и обнаруживает последующий пик [116].

В следующих двух параграфах (1.4.2 и 1.4.3) представлены оригинальные (математические) решения автора, на вошедшие в основные результаты исследований по теме диссертационной работы.

#### 1.4.2 Статистические методы оценки первоприбытия

Как показано выше, в условиях сильной зашумленности данных методы типа ОПВ не всегда позволяют получать корректные оценки. Зачастую, один раз подобранные параметры (частотного фильтра, временного окна, уровень дискриминации) не обеспечивают успеха на всем интервале каротажа, что

также снижает уровень автоматизации. Много зависит и от субъективного фактора - квалификации интерпретатора.

Статистические методы оценивания времени первого вступления основанные на соотношении *STA/LTA* (*Short Term Average/Long Term Average*) позволяют автоматизировать решение задачи и достаточно широко применяется в сейсмике [228]. В современных программных системах интерпретации ГИС при обработке данных ВАК эти методы не нашли широкого применения [144].

Наиболее интересным, в плане применения к ВАК представляется статистическое оценивание времени первого вступления, предложенное в [184], где применяется информационный критерий Акаике (ИКА) [82, 237] вычисляемый через дисперсии двух отрезков волны

$$AIC(k) = k \cdot \log(\text{var}(y(1:k))) + (N - k - 1) \cdot \log(\text{var}(y(k+1:N))) \quad (1.21)$$

где  $y(k)$ ,  $k = \overline{1, N}$  - массив данных волн, и  $\text{var}(\cdot)$  - дисперсия. Время первого вступления оценивается по минимуму  $AIC(k)$  (*AIC-picker*).

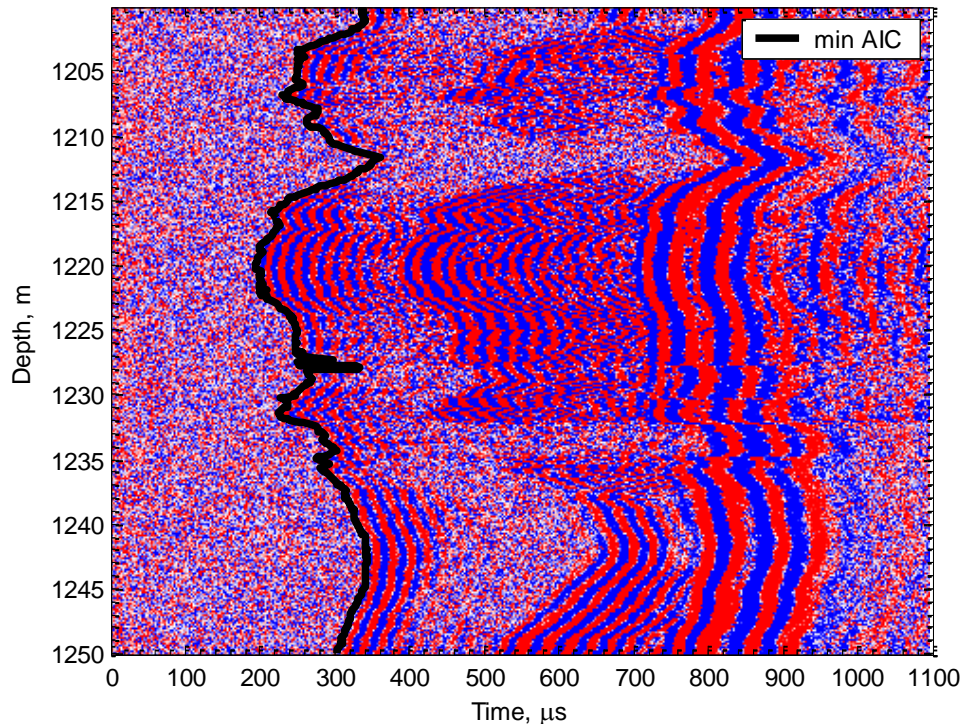


Рис. 1.24. ФКД и оценка первоприбытия

В работе [15] ИКА (1.21) получил развитие как

$$HAIC(k) = k * \log(D(k)/k) + (N - k - 1) * \log((D(N) - D(k))/(N - k - 1)), \quad (1.22)$$

где предварительно формируется массив кумулятивных сумм

$$D = cumsum(C) \Rightarrow D(k) = \sum_{i=1}^k C(i)$$

квадратов модуля значений аналитического сигнала (1.17)

$$C = abs(y_a)^2 \Rightarrow C(k) = |y_a(k)|^2$$

Показано [15], что несмотря на вычислительные затраты на преобразование Гильберта, вычисление  $HAIC$  по (1.22) эффективнее вычисления  $AIC$  по (1.21) при практически одинаковых результатах оценки первоприбытия P- и S-волн (рис. 1.24 - рис. 1.26).

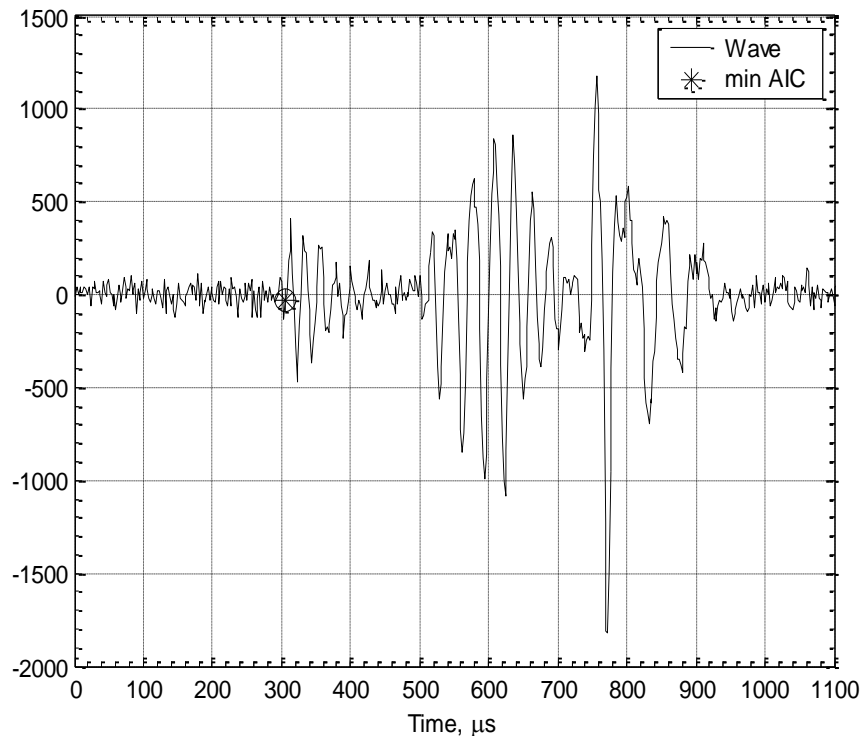


Рис. 1.25. Оценки времени первого вступления P-волны по первому локальному минимуму  $AIC(k)$  на отметке 1250 м.

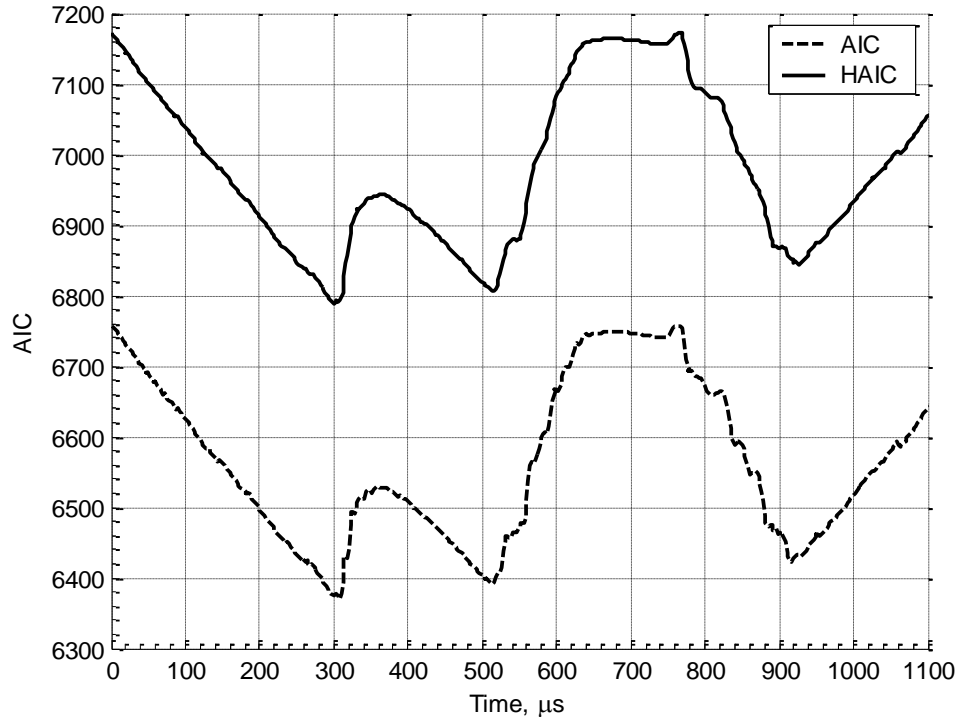


Рис. 1.26. Значения  $AIC(k)$  и  $HAIC(k)$  [15] на отметке 1250 м.

#### 1.4.3 Оценка интервальных времен по временам первых вступлений составляющих волн

В конце прошлого века трехэлементные зонды акустического каротажа «массового применения» типа МАК-2 и АК-4 представлялись «уходящими в прошлое» и «отражающими максимальный уровень развития технических средств АК первой половины 80-х годов» [51], однако они до сих пор составляют основную часть отечественного парка приборов. Оценка интервального времени трехэлементного зонда равна разности времен первых вступлений исследуемой волны на дальний и ближний приемники, деленная на расстояние между приемниками.

Мы не станем анализировать причины долголетия, а также останавливаться на всех недостатках такого типа зондов и преимуществах современных многоэлементных. Задача, которая решена в [18] - это повышение разрешающей способности трехэлементных зондов по оценке интервального



времени. Интервальное время ( $\Delta t$ , *slowness*) для данного типа зондов оценивается по разности времен прибытия P(и S)-волны на дальний и ближний приемник. При этом база зонда (расстояние между приемниками) составляет 0.5 м. Для тонкослоистых разрезов такая оценка является слишком грубой. При шаге каротажа  $\Delta h = 0.1$  м, по сути, регистрируется скользящее среднее по 5-ти точкам.

В настоящей работе предлагается математически «расшить» базу зонда и привести оценки интервального времени к шагу каротажа. Предпринята попытка получить такие оценки интервального времени, если бы база зонда была уменьшена до  $\Delta h$ , и при этом относительная погрешность оценок, обусловленная шагом квантования по времени, пропорционально не возросла. Иными словами, решается задача, обратная скользящему арифметическому среднему.

Если реализацию скользящего арифметического среднего рассматривать как разновидность цифрового сглаживающего или «размывающего» (*smooth*) фильтра, то обратную задачу решается с помощью «повышающего резкость» (*sharpening*) фильтра. В такой постановке, задача впервые решалась еще в 1962 году на IBM 704 [130] применением цифрового фильтра с конечной импульсной характеристикой. Позднее [47,181], для повышения разрешающей способности акустических приборов применялся фильтр Калмана.

В нашей постановке, как и в [47], задача сводится к решению линейной системы уравнений. Мы предлагаем применять самый простой метод решения - метод наименьших квадратов (МНК). Ответ на вопрос, почему для повышения разрешающей способности зондов акустического каротажа применялись другие методы, а МНК ранее не применялся – ответ также очень простой – не хватало вычислительной мощности. Так, если решать матричное уравнение относительно вектора  $\mathbf{x}$  длины  $N$

$$\mathbf{y} = \mathbf{A}\mathbf{x},$$

то по МНК решение получается сразу, но с обращением матрицы  $N \times N$

$$\mathbf{x} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{y},$$

а с применением фильтра Калмана, решение появляется через  $N$  итераций, но в скобках под знаком обращения - скаляр

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{A}^T (\mathbf{A} \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{A}^T + \sigma)^{-1} (\mathbf{y} - \mathbf{A} \mathbf{x}_{k-1}).$$

Мы не будем сопоставлять эти методы [264], так как их предназначение разное. Фильтр Калмана предназначен как следящая система за изменением вектора  $\mathbf{x}$ , а в нашем случае это статические свойства горных пород. Кроме того, при применении фильтра Калмана возникает проблема - необходимо знать начальное приближение  $\mathbf{x}_0$ , и априорную информацию о распределении и дисперсии  $\sigma$  ошибки. Поэтому применение фильтра Калмана в [47,181] – это невозможность выполнить обращение больших матриц вычислительными средствами того времени (только для хранения матрицы  $100 \times 100$  требуется от 40Кб, а вся оперативная память ЭВМ не превышала 64Кб – минус операционная система, сама программа ...).

Для трехэлементных зондов регистрируются параметры  $\Delta t$  – интервальное время,  $t_1$  – время прибытия по ближнему приемнику и  $t_2$  – время прибытия по дальнему приемнику. Их точки записи разнесены. Так, для  $\Delta t$  это положение середины антенной решетки или базы зонда (точка  $O$ ), для  $t_1$  – середина расстояния от излучателя (источника акустического воздействия) до ближнего приемника (точка  $O_1$ ), для  $t_2$  – середина расстояния от излучателя до дальнего приемника (точка  $O_2$ ). Поэтому, сначала надо выровнять точки записи (мы ориентируемся на то, что имеем только LAS-файлы, и у нас нет данных первичной регистрации). Сдвиг  $O-O_1$  для МАК-2 составляет 0.75 м, а для АК-4 1 м. Сдвиг  $O-O_2$  для МАК-2 составляет 0.5 м, а для АК-4 0.75 м. Кроме того, надо учитывать, что интервальное время привязывается к центру отрезка, а время прибытия к границе.

Интервал исследования по глубине разобьем на отрезки, равные шагу по глубине  $\Delta h = 0.1$  м ( $N$  отрезков). Каждому отрезку присвоим атрибут –



где  $L$  при  $\Delta h = 0.1$  м равно 10 для МАК-2 или 15 для АК-4;  $x_0$  - время прохождения акустического сигнала по заполняющей скважину жидкости (принимается допущение, что это время неизменно для всех отметок глубины исследуемого интервала скважины);  $p$  и  $q$  – сдвиг на точку записи для ближнего и дальнего приемников в шагах по глубине.

Отметим, что выбор одной из систем уравнений (1.24) или (1.25) критичен, если нет первичных записей волнового пакета, а имеются только LAS-файлы. В этом случае выбирается та система, где  $p$  или  $q$  целые. Так, для АК-4 это второй приемник, а для МАК-2 - первый. По этой же причине мы не объединяем системы (1.24) и (1.25), исключив систему (1.23). При объединении систем (1.23) с системой (1.24) или (1.25) количество неизвестных возрастает на единицу (за счет добавления нового атрибута  $x_0$ ), а количество уравнений уже превышает количество неизвестных.

Объединяя уравнения (1.23) и (1.24) или уравнения (1.23) и (1.25) запишем в матричной форме

$$\mathbf{y}_j = \mathbf{A}_j \begin{pmatrix} \mathbf{x} \\ x_0 \end{pmatrix}; \quad j = 1 \vee 2. \quad (1.26)$$

Решить объединенную систему (1.26) можно по МНК минимизацией функционала

$$I_j(\mathbf{x}, x_0) = \left\| \mathbf{y}_j - \mathbf{A}_j \begin{pmatrix} \mathbf{x} \\ x_0 \end{pmatrix} \right\|^2; \quad j = 1 \vee 2.$$

Формальное решение такой задачи хорошо известно. Однако системы уравнений (1.26) относятся к плохо обусловленным разреженным (вид матриц  $\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2$ ) системам линейных алгебраических уравнений [77]. Это означает, что малейшие погрешности в оценках  $t_1, t_2$  (и  $\Delta t$ ) приводят к значительной вариации искомого вектора неизвестных оценок. Задача решения такой системы в математике относится к некорректным задачам (по Адамару) [77].

Эффективным методом решения некорректных задач является метод регуляризации по Тихонову [77], основанный на привлечении дополнительной априорной информации о решении, которая может быть как качественной, так и количественной.

В качестве такой априорной информации у нас есть результаты каротажа по интервальному времени  $\Delta t$ , к которым мы будем приближать искомое решение  $\mathbf{x}$ . Сформируем функционал Тихонова в виде

$$I_j(\mathbf{x}, x_0, \alpha) = \left\| \mathbf{y}_j - \mathbf{A}_j \begin{pmatrix} \mathbf{x} \\ x_0 \end{pmatrix} \right\|^2 + \alpha \|\Delta t - \mathbf{x}\|^2; \quad j = 1 \vee 2, \quad (1.27)$$

где  $\alpha$ - регуляризирующий параметр, который мы предлагаем принимать в диапазоне  $0.1 \div 0.2$ .

Минимизация функционала (1.27) сводится к решению системы линейных уравнений

$$\mathbf{y} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ x_0 \end{bmatrix},$$

где  $\mathbf{A}$  – квадратная матрица порядка  $(N+1)$ . Если необходимо пересчитать  $\Delta t$  для интервала глубин в 1000 м с шагом 0.1 м, то потребуется хранение и обращение вещественной матрицы размером  $10001 \times 10001$  (или 400 Мб памяти ЭВМ). Современные персональные компьютеры это позволяют, что невозможно было в «первой половине 80-х годов».

На рис. 1.27 приведен пример пересчета данных прибора АК-4 при минимизации критерия (1.27). Кривая  $t_2$  «Синтетическая 1» вычислена по формуле (1.25) по пересчитанному интервальному времени ( $\mathbf{x}$ ), а кривая «Синтетическая 2» вычислена по исходному интервальному времени каротажа ( $\Delta t$ ). Отметим, что кривая  $t_2$  «Синтетическая 1» практически совпадает с кривой  $t_2$  каротажа. Также приведены аналогичные сопоставления по кривой  $t_1$ , которые могут служить некоторым индикатором адекватности пересчета, т.к. кривая  $t_1$  не входит в критерий (1.27) для АК-4.

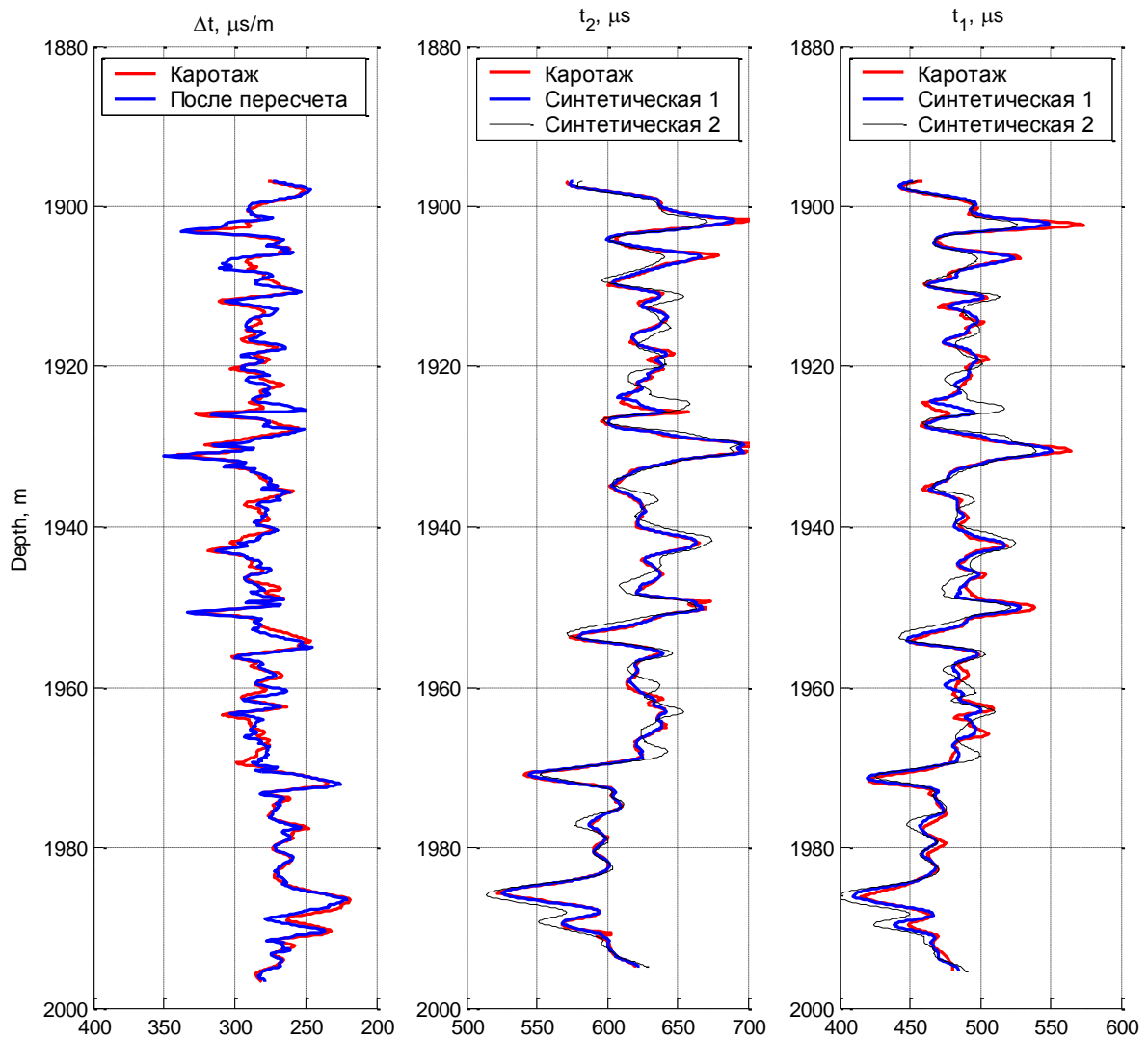


Рис. 1.27. Результаты пересчета интервального времени [18].

Итак, записи трехэлементных зондов акустического каротажа могут быть переобработаны с целью повышения разрешающей способности оценок интервального времени по глубине, что особенно важно для тонкослоистых разрезов. Разрешающая способность может быть повышена с величины базы зонда до величины шага каротажа по глубине. Для этого принимается допущение, что при каротаже время прохождения акустического сигнала по заполняющей скважину жидкости неизменно. Были сомнения, что принятое допущение может свести на нет все заявленные возможности. Мы проверили алгоритм только на нескольких скважинах и границу чувствительности к такой

«неизменности» выявить не удалось (по кавернометрии и инклинометрии). Формальный результат получается всегда. Чтобы метод получил шанс войти в практику нужна более широкая апробация.

### **1.5 Оценка интервального времени составляющих волнового пакета на основе меры когерентности**

Очевидно, что ОПВ не самый эффективный метод оценки скоростей составляющих волн, как впрочем, и статистические методы. Однако они являются единственным надежным методом обработки начальной обработки записей трехэлементных зондов ВАК. Эти методы можно назвать индивидуальными – запись по каждому приемнику обрабатывается отдельно на предмет скоростей составляющих волн.

Для многоэлементных зондов ВАК в [153] предложено применять метод, получивший ранее в сейсмике название сембланс (*semblance*) [199, 240, 159]. Вычислительная особенность метода – сразу обрабатывается весь массив записей по всем приемникам на одной отметке глубины.

#### **1.5.1 Метод сембланс**

Метод сембланс в настоящее время является основным инструментом обработки данных многоэлементной акустики, и хорошо зарекомендовал себя в открытом стволе для разделения по скорости волн акустического каротажа. Каждая из составляющих волн характеризуется выделяется на карте сембланс «пятном», определяющим всплеск когерентности мощности.

Сембланс – мера когерентности распределения мощности между зарегистрированными сигналами на приемниках антенной решетки зонда ВАК в координатах Время\_пробега\_волны (*Travel\_Time*) – Интервальное\_время (*Slowness*). Метод имеет еще одно название – *STC (Slowness-Time Coherence)* [141] и рассматривается как мера подобия сигналов приемников, приведенная к интервальному времени.

## 1.5.1.1 Основные соотношения

Формула, которая отождествляется с методом сембланс, имеет вид [30, 67, 153, 199]

$$STC(\tau, p) = \frac{\sum_{t=\tau}^{\tau+T} \left[ \sum_{m=1}^M y(t + px_m, m) \right]^2}{M \cdot \sum_{t=\tau}^{\tau+T} \sum_{m=1}^M y^2(t + px_m, m)} \quad (1.28)$$

где  $x_m$  - расстояния от центра антенной решетки до  $m$ -го приемника,  $M$  - количество приемников,  $y(t, m)$  - сигналы ВАК по приемникам,  $p$  (или  $\Delta T$ ) - интервальное время (*slowness*) - величина, обратная скорости,  $T$  - некоторое окно времени. Считается, что формула (1.28) характеризует когерентность мощности сигналов по времени и скорости (замедлению). При этом числитель (1.28) характеризует саму когерентную мощность, а знаменатель - всю приведенную мощность сигналов по тем же измерениям. Сембланс  $STC(\tau, p)$  может принимать значения в интервале  $(0, 1]$ , 0 - нет никакой когерентности между сигналами, 1 - полная когерентность.

Формула (1.28) содержит линейное суммирование (*linear stack, LS*) или известное как наклонное суммирование или *slant stack*, предложенное F.Rieber еще в 1936 году [214], и регулируемый направленный прием, предложенный Л.А. Рябинкиным в 1957 году [71]

$$LS(\tau, p) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M y(\tau + px_m, m). \quad (1.29)$$

Переходя к индексам, соотношение (1.28) переписывается как

$$STC(\tau, p) \Rightarrow STC(i, j) = \frac{\sum_{k=i}^{i+N_T-1} \left[ \sum_{m=1}^M y(k \cdot \Delta t + j \cdot m \cdot \Delta p \cdot \Delta x + b, m) \right]^2}{M \cdot \sum_{k=i}^{i+N_T-1} \sum_{m=1}^M y^2(k \cdot \Delta t + j \cdot m \cdot \Delta p \cdot \Delta x + b, m)} =$$

$$= \frac{\sum_{k=i}^{i+N_T-1} \left[ \sum_{m=1}^M d(k, j, m) \right]^2}{M \cdot \sum_{k=i}^{i+N_T-1} \sum_{m=1}^M d^2(k, j, m)} \quad (1.30)$$



где  $\Delta p$  - шаг по *slowness*;  $\Delta x$  - шаг расстояния между приемниками;  $\Delta t$  - шаг по времени пробега (квант времени);  $N_T$  - длина окна в квантах времени  $T = N_T \Delta t$ ;  $b$  - коэффициент приведения к середине антенной решетки и к началу диапазона *slowness*. Введем матрицу  $\mathbf{D}$  размером  $N_T \times M$

$$\begin{aligned} \mathbf{D}_{N_T \times M} &= \{y(k \cdot \Delta t + j \cdot m \cdot \Delta p \cdot \Delta x + b, m)\} = \\ &= \{d(k, j, m)\}; k = \overline{i, i + N_T - 1}; m = \overline{1, M} \end{aligned} \quad (1.31)$$

тогда (1.30) примет вид компактный матричный вид [255, 256]

$$STC(i, j) = \frac{\|\mathbf{D} \cdot \mathbf{e}\|^2}{M \cdot \|\mathbf{D}\|^2}, \quad (1.32)$$

где  $\mathbf{e}$  – единичная вектор строка длины  $M$ .

Сембланс-плот (или *STC-plot*) [141] это представление (1.28) в виде имиджа. Обычно отбрасывают  $STC(\tau, p) < 0,5$  чтобы не засорять картинку. Волны P, S, St различаются по скорости (интервальному времени), поэтому даже если они перекрываются (интерферируют) в пределах антенной решетки, на сембланс-плот каждая из них представляется отдельным облаком-пятном. Разрешающая способность метода зависит от количества приемников и длины временного окна. К недостатку метода сембланс можно отнести необходимость выбора величины временного окна усреднения [259], которое, по сути, загрубляет распределение когерентной мощности.

#### 1.5.1.2 Проекция на геофизических планшетах и оценка интервального времени

Для отображения сембланс плот по глубине строят проекцию на ось  $p$  - находят максимум по  $\tau$  [141] (рис. 3.7a)

$$STC_{1D}(p) = \max_{\tau} STC(\tau, p) \quad (1.33)$$

Значение  $\tau$  соответствующее максимуму (1.33) принимается за оценку интервального времени.

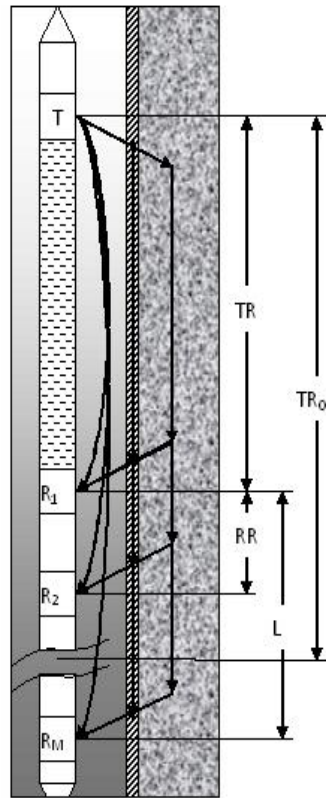


Рис. 1.28. Пример 1. Прибор ВАК.

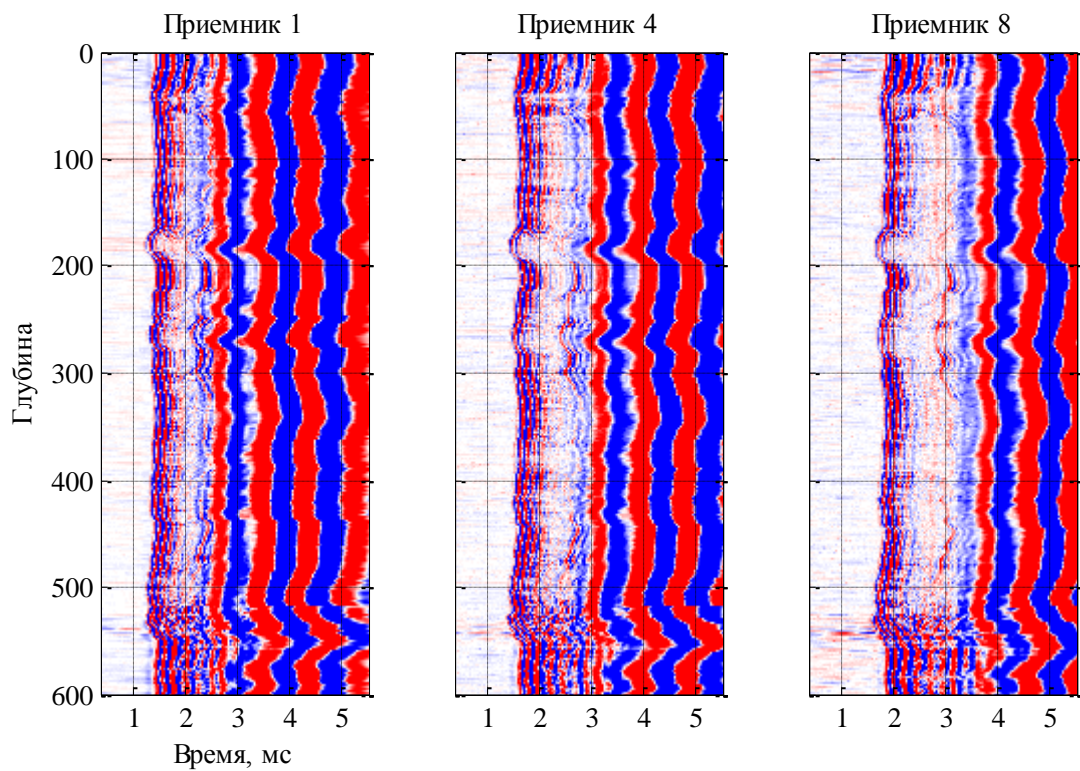


Рис. 1.29. Пример 1. Запись волнового акустического каротажа: фазо-корреляционные диаграммы по 1-,4-,8-му приемникам.

В качестве основного примера (далее Пример 1) рассматриваются результаты каротажа многоэлементного прибора ВАК типа ХМАС F1 (компании Baker Hughes) с 8 приемниками (группами приемников) в песчаниках *береа*. Расстояние от передатчика до первого приемника ( $TR$ , см. рис. 1.28) составляет 11 футов  $\approx 3,35$  м, расстояние между приемниками ( $RR$ , см. рис. 1.28) 0,5 фута  $\approx 0,15$  м, частота возбуждения  $f_{tool} \approx 8$  кГц,  $dt=12$  мкс,  $N=432$  точки по времени, «мертвое время» регистрации = 360 мкс, оцифровка 32 бита (динамическая). На рис. 1.29 представлены исходные ФКД по 1-, 4-, 8-му приемникам. На рис. 1.30 представлен регистрируемый массив данных по приемникам на отметке глубины 288.

На рис. 1.31 представлено изображение традиционного сембланс в  $(\tau - p)$ -области: отчетливо видны пятна когерентной мощности, соответствующие P-, S- и St-волнам. На рис. 1.32 отражена одномерная проекция традиционного сембланс, которая отображается на геофизических планшетах в виде имиджа по глубине, и по пикам (локальным максимумам) которого оцениваются интервальные времена составляющих волн.

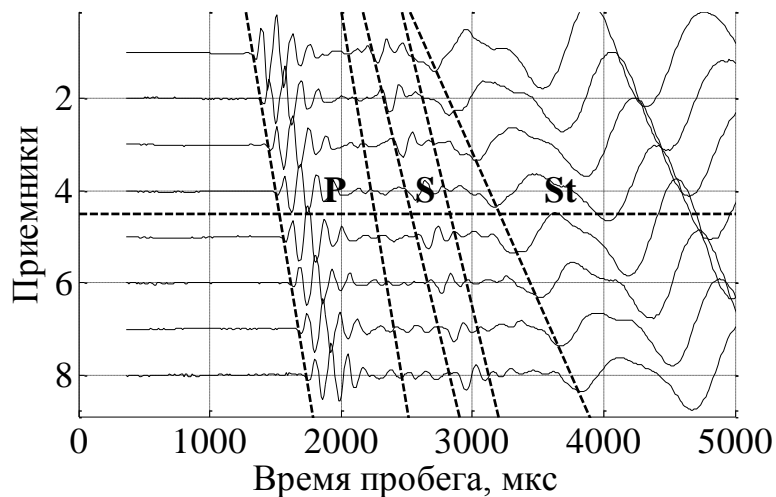


Рис. 1.30. Пример 1, отметка 288. Запись ВАК.

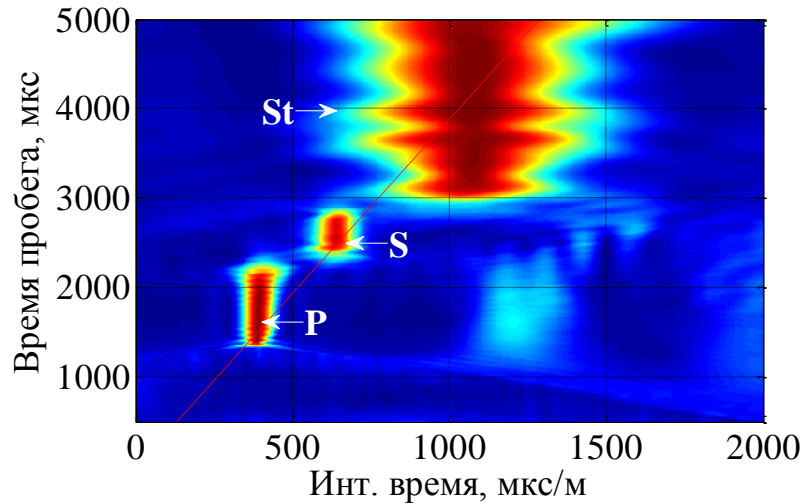


Рис. 1.31. Пример 1, отметка 288. Традиционный сембланс (окно 384 мкс).

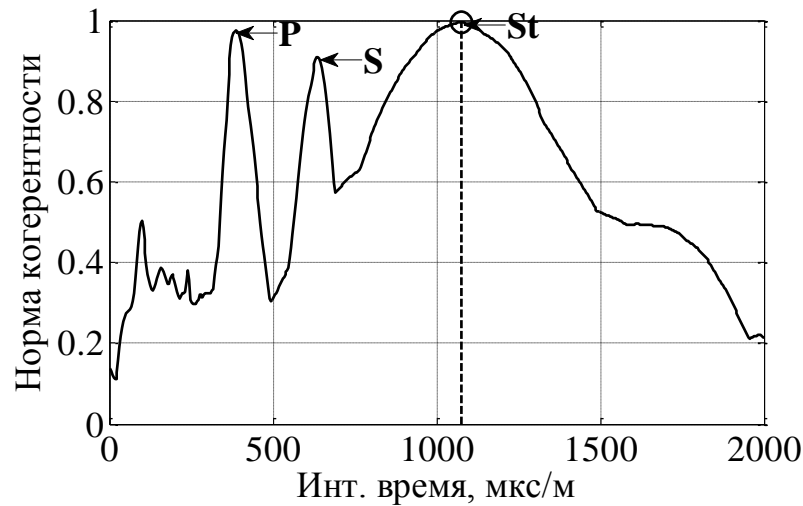


Рис. 1.32. Пример 1, отметка 288. Проекция традиционного сембланс.

На рис. 1.33 для расчета  $STC$  последовательно применялось 2,-4,-6,-8 приемников при длине окна 384 мкс, а на рис. 1.34 представлены  $STC$  с длиной временного окна усреднения  $T= 12; 192; 768; 1536$  мкс. Как и следовало ожидать: (1) чем больше количество приемников, тем отчетливее локализация когерентной мощности; (2) чем больше длина окна усреднения, тем меньше помех на изображении сембланс, однако при этом возрастает вероятность полного размытия пятен информативных волн (на рис. 1.34г полностью размыто пятно S-волны).

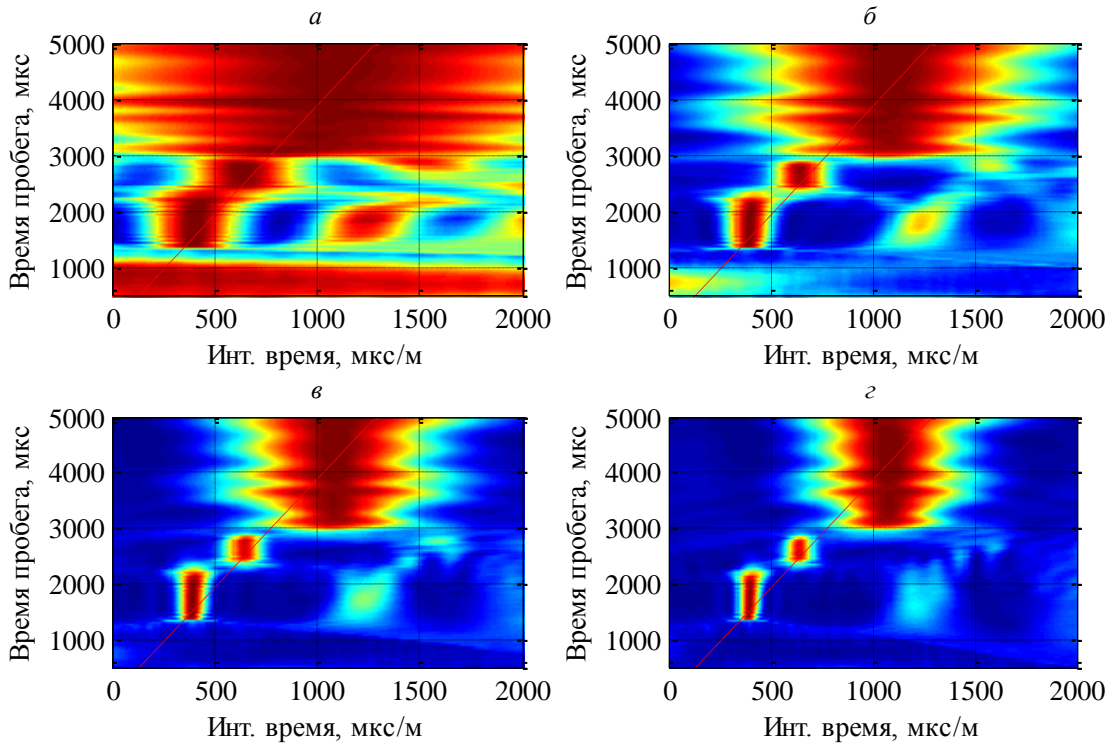


Рис. 1.33. Пример 1, отметка 288. Число приемников а) 2; б) 4; в) 6; г) 8.

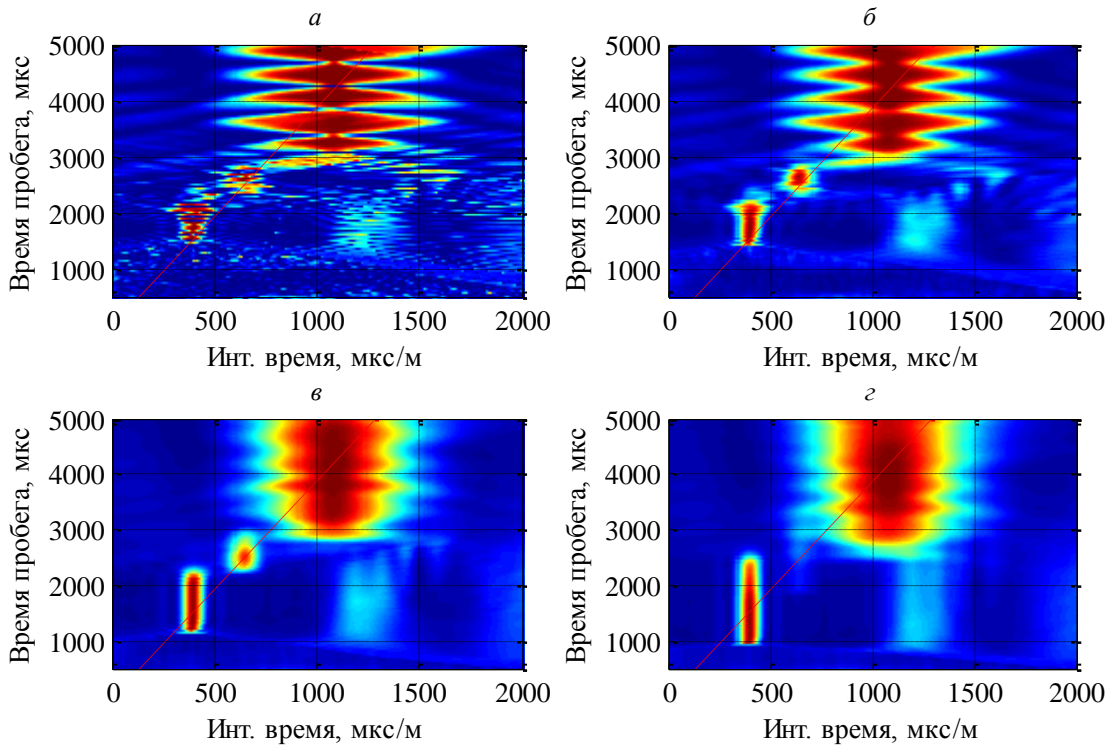


Рис. 1.34. Пример 1, отметка 288. Влияние окна усреднения: а) 12 мкс (минимальное); б) 192 мкс; в) 768 мкс; г) 1536 мкс.

### 1.5.1.3 Зашумление и размытие сембланс

Зашумление и размытие пятен сембланс в  $(\tau - p)$ -области может происходить по следующим причинам:

1. Недостаточное количество приемников;
2. Помехи в зарегистрированных сигналах [213];
3. Методическая причина – когерентные события при пропуске нескольких циклов (*coherent multiple cycle skipping events*) [266];
4. Изменение скоростных свойств разреза в пределах антенной решетки [163];
5. Дисперсия волн (S-волны, изгибной, St-волны) (см. ниже).

Зашумление и размытие максимумов сембланс приводит к ошибке (или смещению) оценки интервального времени. Чтобы решить эти проблемы появилось множество вариаций формул (1.28)-(1.30) [114,138,155,173,179,219,227], также отождествляемых с понятием сембланс. Вычисление по формулам (1.28)-(1.30) принято называть «традиционный сембланс» (*traditional semblance, conventional semblance*).

### 1.5.2 Метод метод суммирования энного корня

Одной из первых попыток улучшить представление (1.28) является метод, получивший название  $n^{\text{th}}$ -root stack [165,191] или метод суммирования энного корня. Когерентность, как и в (1.28) представляется в  $(\tau - p)$  области

$$\rho(\tau, p) = \frac{\sum_{t=\tau}^{\tau+T} \left| \sum_{m=1}^M |y(t + px_m, m)|^{\frac{1}{n}} \cdot \text{sgn}[y(t + px_m, m)] \right|^n}{\sum_{t=\tau}^{\tau+T} \left[ \sum_{m=1}^M |y(t + px_m, m)|^{\frac{1}{n}} \right]^n} \quad (1.34)$$

и также принимает значения в интервале  $[0, 1]$ . Принципиальное отличие от (1.28) – экспоненциальный вес  $1/n$  записей ВАК. Рекомендуемое значение  $n = 4$ . Смысл улучшения - более четкое выделение пиков когерентности (максимумов пятен). Однако улучшение оказалось незначительным и широкого распространения метод не получил.

### 1.5.3 Взвешенный сембланс

Пожалуй, наиболее простой вариацией сембланс (1.28) является взвешенный сембланс [114,179]

$$wSTC(\tau, p; T) = \frac{\sum_{t=\tau}^{\tau+T} \left[ \sum_{m=1}^M y(t + px_m, m) \cdot w(t, m) \right]^2}{M \cdot \sum_{t=\tau}^{\tau+T} \left[ \sum_{m=1}^M y^2(t + px_m, m) \cdot \sum_{m=1}^M w^2(t, m) \right]}, \quad (1.35)$$

где веса  $w(t, m)$  подбираются так, чтобы «проявить» искомую когерентность.

### 1.5.4 Дифференциальный сембланс

Дифференциальный сембланс предложен в [239]. Получил развитие [113, 198, 229]

$$dSTC(\tau, p; T) = \frac{\sum_{t=\tau}^{\tau+T} \sum_{m=1}^M \left[ \frac{\partial}{\partial x} y(t + px_m, m) \right]^2}{M \cdot \sum_{t=\tau}^{\tau+T} \sum_{m=1}^M y^2(t + px_m, m)}. \quad (1.36)$$

### 1.5.5 Дисперсионный сембланс

Скорость звука зависит от частоты звуковой волны. Этот эффект называется дисперсией [34,90,119,122,126,155,175,180,182,193,203,231, 232, 260, 268, 271,272]. Чем выше частота, тем ниже скорость - это нормальная дисперсия (аномальная дисперсия - наоборот). Интерес к дисперсии при волновом акустическом каротаже (ВАК) появился с развитием аппаратуры с дипольными излучателями [31]. Дело в том, что при дипольном режиме излучения вместо поперечной (S) волны, возбуждаемой при монополярном режиме, возбуждаются поляризованные изгибные (SH, SV) волны и скорость их распространения (в отличие от S-волны) в большой степени зависит от частоты. Отметим, что продольная (P) волна, возбуждаемая в монополярном режиме практически не подвержена дисперсии. Для изгибной волны дисперсия может быть причиной ошибки оценки скорости, что может быть критично при интерпретации ВАК. Особенно если сопоставляются результаты приборов

старого поколения с монопольными излучателями, рассчитанные на  $\sim 20$  кГц и современные с дипольными излучателями, рассчитанные на частоту ниже 5 кГц. Дисперсию волн характеризуют дисперсионными кривыми. Они представляют зависимости – наблюдаемое фазовое интервальное время (НФИВ) (или наблюдаемая фазовая скорость) от частоты. На рис. 1.35а и рис. 1.35б представлены примеры дисперсионных кривых изгибной волны. По семейству дисперсионных кривых можно построить двумерную функцию  $p_d(f, p)$ , которая возвращает НФИВ в зависимости от частоты и интервального времени изучаемой волны как характеристики породы (ИВП) (или  $\text{НФИВ} = p_d(\text{частота}, \text{ИВП})$ ). В качестве ИВП диспергирующей волны может быть принято НФИВ на некоторой опорной частоте. За опорную частоту для изгибной волны, возбуждаемой в дипольном режиме целесообразно принять частоту  $f_0=0$  кГц. На этой частоте изгибная волна (для которой характерна нормальная дисперсия) имеет максимальную скорость (минимальное интервальное время), и эта скорость практически совпадает со скоростью S-волны, возбуждаемой в монопольном режиме.

Интерес к дисперсии при ВАК добавили и достижения в методиках интерпретации проницаемости по измерениям волны Стоунли (St) [36]. Трубные волны Рэлея характеризуются обратной (в отличие от нормальной) дисперсией в скоростных породах и нормальной дисперсией в низкоскоростных породах. На рис. 1.35в и рис. 1.35г представлены примеры дисперсионных кривых St-волны [242]. Кроме того, скорости изгибной волны [156] и St-волны зависят от диаметра скважины и изменяются в окрестности самого прибора (в зависимости от его геометрических размеров [61,64,86, 119, 157, 202, 208, 211, 232, 234, 244, 245,271,272]).

Проблема дисперсии при ВАК сформировалась 25 лет назад и заключалась в следующем: а) что на самом деле мы оцениваем, когда вычисляем скорости диспергирующих волн по их первым вступлениям на



приемники антенной решетки? б) что принимать за оценку скорости диспергирующей волны для дальнейшей интерпретации?

Решение проблемы было найдено в виде дисперсионного сембланс [156], который является развитием традиционного метода сембланс [153], широко применяемого для ВАК. В методе сембланс каждая из составляющих волн (P, S, St) характеризуется пятном, определяющим всплеск когерентности. Дисперсия приводит к размытию пятен, что соответствует размытию когерентной мощности составляющих волн по скорости распространения в зависимости от частоты. Дисперсия изгибной волны и волны Стоунли активно исследуется по настоящее время [171,176,245,263] и основным инструментом является спектральный сембланс [97,211,245].

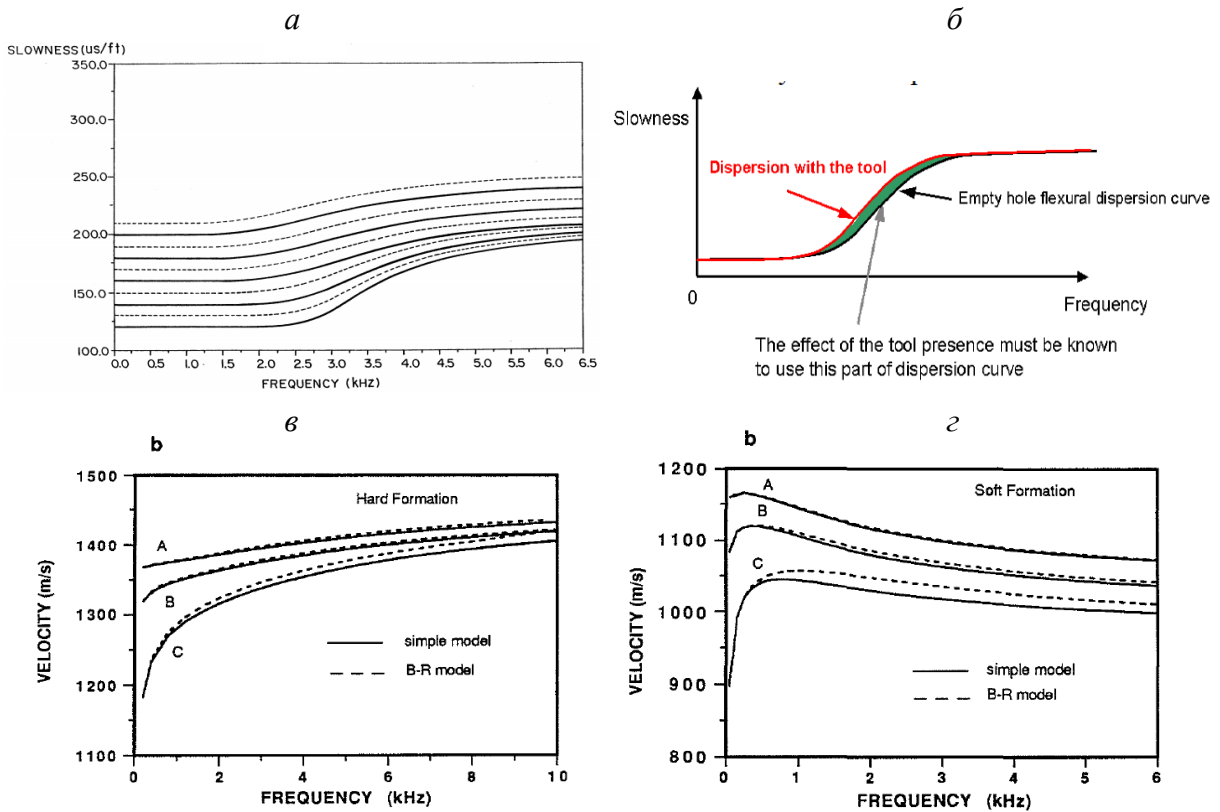


Рис. 1.35. Дисперсионные кривые: а) изгибной волны [154]; б) влияния прибора в скважине [208]; в) и г) St-волны для высоко- и низкоскоростных разрезов [242].

Обозначим  $Y(f,m) = F[y(t,m)]$  – преобразование Фурье сигнала  $m$ -го приемника, тогда согласно свойству сдвига

$$F[y(t + px_m, m)] = F[y(t, m)] \cdot e^{j \cdot 2\pi \cdot f \cdot p \cdot x_m} = Y(f, m) \cdot e^{j \cdot 2\pi \cdot f \cdot p \cdot x_m} \quad (1.37)$$

Подставляя (1.37) в (1.28) [155, 156] и с учетом свойства линейности преобразования Фурье

$$\begin{aligned} STC(\tau, p; T) &= \frac{\sum_{t=\tau}^{\tau+T} \left| F^{-1} \left\{ \sum_{m=1}^M F[y(t + px_m, m)] \right\} \right|^2}{M \cdot \sum_{t=\tau}^{\tau+T} \sum_{m=1}^M \left| F^{-1} \{ F[y(t + px_m, m)] \} \right|^2} \\ &= \frac{\sum_{t=\tau}^{\tau+T} \left| F^{-1} \left\{ \sum_{m=1}^M Y(f, m) e^{j \cdot 2\pi \cdot f \cdot p \cdot x_m} \right\} \right|^2}{M \cdot \sum_{t=\tau}^{\tau+T} \sum_{m=1}^M \left| F^{-1} \{ Y(f, m) e^{j \cdot 2\pi \cdot f \cdot p \cdot x_m} \} \right|^2} \end{aligned} \quad (1.38)$$

где  $F^{-1}[\cdot]$  – оператор обратного преобразования Фурье. Соотношения (1.28) и (1.38) идентичны.

В отличие от (1.38) дисперсионный сембланс (*dispersive STC*) [155, 156, 211, 272] позволяет учитывать эффект дисперсии волн (особенно важно для изгибной волны и волны Стоунли) на основе поправок по теоретическим зависимостям частота – фазовая скорость волны (называемым дисперсионные кривые) типа тех, что представлены на рис. 1.35 [76, 104, 169, 231, 245].  
Дополнительный фактор - диаметр скважины.

$$DSTC(\tau, p; T) = \frac{\sum_{t=\tau}^{\tau+T} \left| F^{-1} \left\{ \sum_{m=1}^M Y(f, m) e^{j \cdot 2\pi \cdot f \cdot s(f, p, d) \cdot x_m} \right\} \right|^2}{M \cdot \sum_{t=\tau}^{\tau+T} \sum_{m=1}^M \left| F^{-1} \{ Y(f, m) e^{j \cdot 2\pi \cdot f \cdot s(f, p, d) \cdot x_m} \} \right|^2}, \quad (1.39)$$

где  $s(f, p, d)$  - представляет собой теоретическую фазовую задержку на единицу длины на частоте  $f$ ;  $d$  – диаметр скважины. Формально, смысл дисперсионного сембланс заключается в подмене в (1.28) исходного сигнала  $y(t, m)$  по каждому приемнику на синтетический  $y_s(t, m)$ , для которого

$$y(t, m) \Rightarrow y_s(t, m); \quad y_s(t + px_m, m) = F^{-1} \{ F[y(t, m)] \cdot e^{j \cdot 2\pi \cdot f \cdot s(f, p, d) \cdot x_m} \}, \quad (1.40)$$

и формула (1.39) представляется видом (1.28)

$$DSTC(\tau, p; T) = \frac{\sum_{t=\tau}^{\tau+T} \left[ \sum_{m=1}^M y_s(t + px_m, m) \right]^2}{M \cdot \sum_{t=\tau}^{\tau+T} \sum_{m=1}^M y_s^2(t + px_m, m)}. \quad (1.41)$$

Следует отметить, что дополнительно должны учитываться не только диаметр скважины, но и геометрия самого прибора, присутствие которого в скважине изменяет скорость прохождения волн как раз в пределах антенной решетки.

### 1.5.6 Частотный или спектральный сембланс

Если исключить в (1.38) обратное преобразование Фурье, то получим так называемый частотный или спектральный сембланс [98,122,158,173,175,180, 209]. Отметим, что здесь уже нет места временному окну усреднения

$$FS(f, p) = \frac{\left| \sum_{m=1}^M Y(f, m) e^{j \cdot 2\pi \cdot f \cdot p \cdot x_m} \right|^2}{M \cdot \sum_{m=1}^M |Y(f, m)|^2} \quad (1.42)$$

или [244, 245]

$$\rho(f, p) = \frac{\left| \sum_{m=1}^M \text{conj}[Y(f, m)] e^{j \cdot 2\pi \cdot f \cdot p \cdot x_m} \right|}{\sqrt{M \cdot \sum_{m=1}^M \text{conj}[Y(f, m)] Y(f, m)}} \quad (1.43)$$

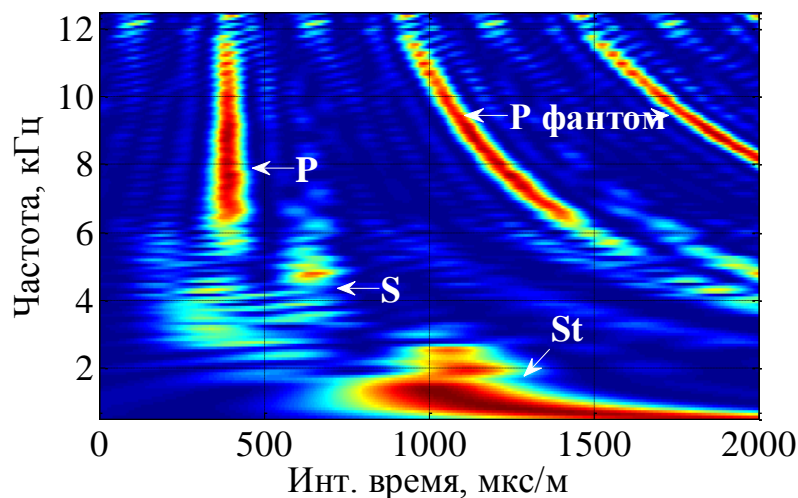


Рис. 1.36. Пример 1, отметка 288. Спектральный сембланс

На рис. 1.36 представлен спектральный сембланс вида (1.42) для Примера 1.

Существует еще несколько разновидностей спектрального сембланса. Наибольшее распространение получил WSS (Weighted Spectral Semblance) [182,244], в котором вводится окно усреднения, но уже в частотной области

$$WSS(f, p) = \sum_{f=f_0-\Delta f}^{f_0+\Delta f} W(f, f_0) \cdot \frac{\left| \sum_{m=1}^M \text{conj}[Y(f_0, m)] e^{j \cdot 2\pi \cdot f_0 \cdot p \cdot x_m} \right|}{\sqrt{\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \text{conj}[Y(f_0, m)] \cdot Y(f_0, m)}} \quad (1.44)$$

где  $W(f, f_0)$  – некоторый весовой коэффициент.

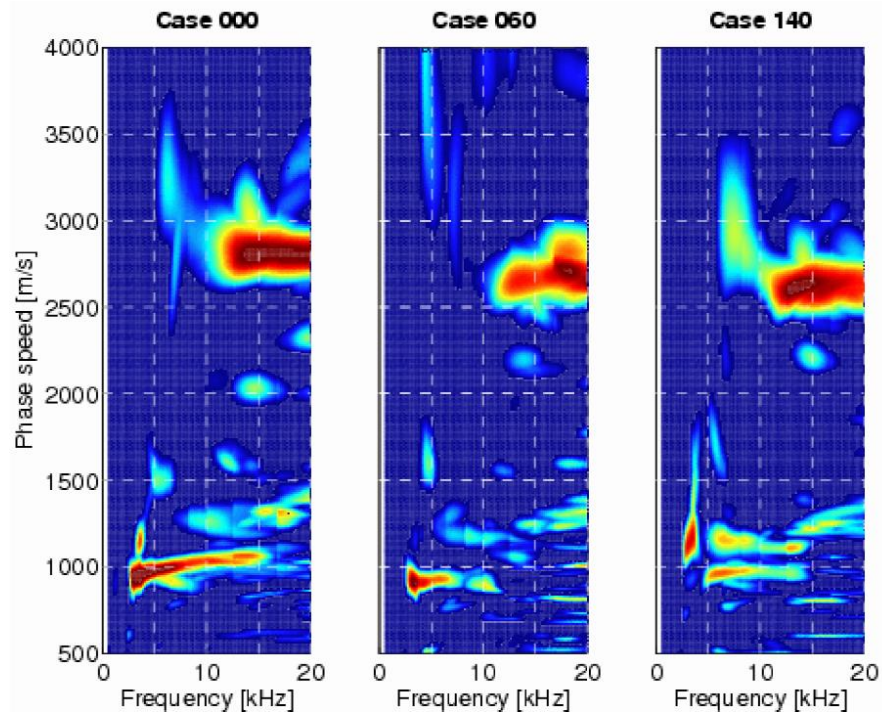


Рис. 1.37. Спектральный сембланс [211]

### 1.5.7 Метод фазового суммирования

Идея фазового суммирования (*phase stack*) также появилась относительно недавно [221] и развивается [131,222] и применительно к данным ВАК в  $(\tau - p)$ -области его можно интерпретировать следующим образом.

Представим  $y(t, m)$  в аналитическом виде

$$y_a(\tau, m) = y(\tau, m) + j \cdot H[y(\tau, m)] = A_m(\tau) \exp[j \cdot \Phi_m(\tau)],$$

$$y(\tau, m) = A_m(\tau) \cdot \cos[\Phi_m(\tau)],$$

где  $\Phi_m(\tau)$  - амплитуда;  $\Phi_m(\tau)$  – фаза,  $H[.]$  – преобразование Гильберта.

Фазовое суммирование (*phase stack, PS*) определяется как

$$\begin{aligned} PS(\tau, p) &= \frac{1}{M} \left| \sum_{m=1}^M \exp\{j \cdot \Phi_m(\tau + px_m)\} \right| \\ &= \frac{1}{M} \left| \sum_{m=1}^M \exp\{j \cdot \arg[y_a(\tau + px_m, m)]\} \right| \end{aligned} \quad (1.45)$$

Геометрически (1.45) представляет собой суммирование  $M$  единичных векторов, поэтому величина  $PS$  также как и (1.28) находится в пределах  $(0 \ 1]$ , и также рассматривается как мера когерентности между сигналами приемников ВАК в зависимости от скорости и приведенного времени пробега.

Обратим внимание, что в отличие от (1.28) формула (1.45) не содержит усреднения в пределах временного окна. Это повышает разрешающую способность, но и повышает чувствительность к помехам. Поэтому оценку по (1.45) предлагалось закруглять, подбирая временное окно [221]

$$PS(\tau, p; T) = \frac{1}{T} \int_{\tau-T/2}^{\tau+T/2} PS(t, p) dt \quad (1.46)$$

Взвешенное фазовое суммирование (*phase-weighted stacks, PWS*), предложенное также в [221] для сейсмических трасс применительно к данным ВАК имеет вид

$$PWS(\tau, p) = LS(\tau, p) \cdot PS^v(\tau, p), \quad (1.47)$$

где  $v$  – показатель степени  $0 \div 2$ .

### 1.5.8 Фазовый сембланс

Если выделять фазу комплексного числа аналитического сигнала [241], то получим так называемый фазовый сембланс [138, 185] в  $(f - p)$ -области. Здесь также нет места временному окну усреднения

$$E(f, p) = \frac{\left\| \sum_{m=1}^M \arg[Y(f, m) e^{j \cdot 2\pi \cdot f \cdot p \cdot x_m}] \right\|^2}{\sum_{m=1}^M \left\| \arg[Y(f, m) e^{j \cdot 2\pi \cdot f \cdot p \cdot x_m}] \right\|^2} \quad (1.48)$$

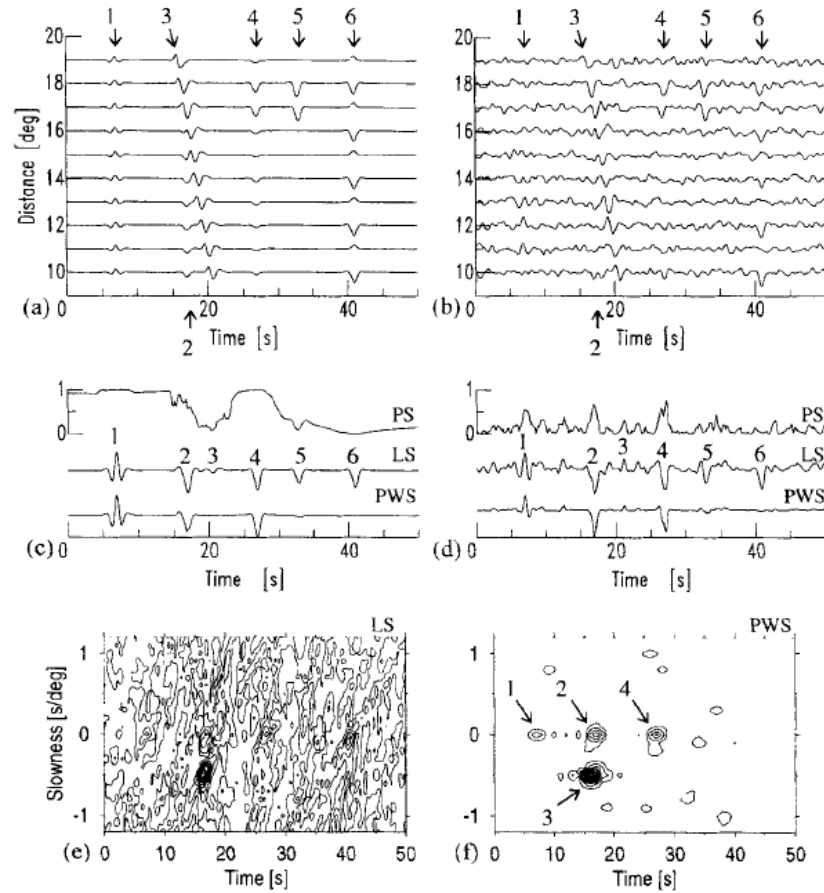


Рис. 1.38. Фазовое суммирование [221]: а) и б) акустические (сейсмические) сигналы; с) и д) PS – фазовое суммирование, LS – линейное суммирование, PWS – взвешенное фазовое суммирование для фиксированного значения  $p$ ; е)  $LS(\tau, p)$ ; д)  $PWS(\tau, p)$

### 1.5.9 Комплексный функционал когерентности

Комплексный функционал когерентности (*Complex Coherency Functionals*) был предложен для сейсмических трасс в [227] на основании работы [241] (где рассматривалась когерентность двух сигналов) и предполагает замену в (1.28) сигналов  $y(t, m)$  аналитическим представлением (комплексной величиной)

$$y_a(t, m) = y(t, m) + j \cdot H[y(t, m)],$$

где  $H[.]$  – преобразование Гильберта

$$C(\tau, p; T) = \frac{\sum_{t=\tau}^{\tau+T} \left| \sum_{m=1}^M y_a(t + px_m, m) \right|^2}{M \cdot \sum_{t=\tau}^{\tau+T} \sum_{m=1}^M |y_a(t + px_m, m)|^2}. \quad (1.49)$$

К сожалению, этот функционал (1.49) не получил должного развития ни в сейсмике ни в ВАК. Сопоставление (1.28) и (1.49) можно найти, пожалуй, лишь в [251]. В Главе 2 настоящей работы автор предлагает безоконный сембланс для ВАК, прототипом которого можно считать комплексный функционал когерентности (1.49).

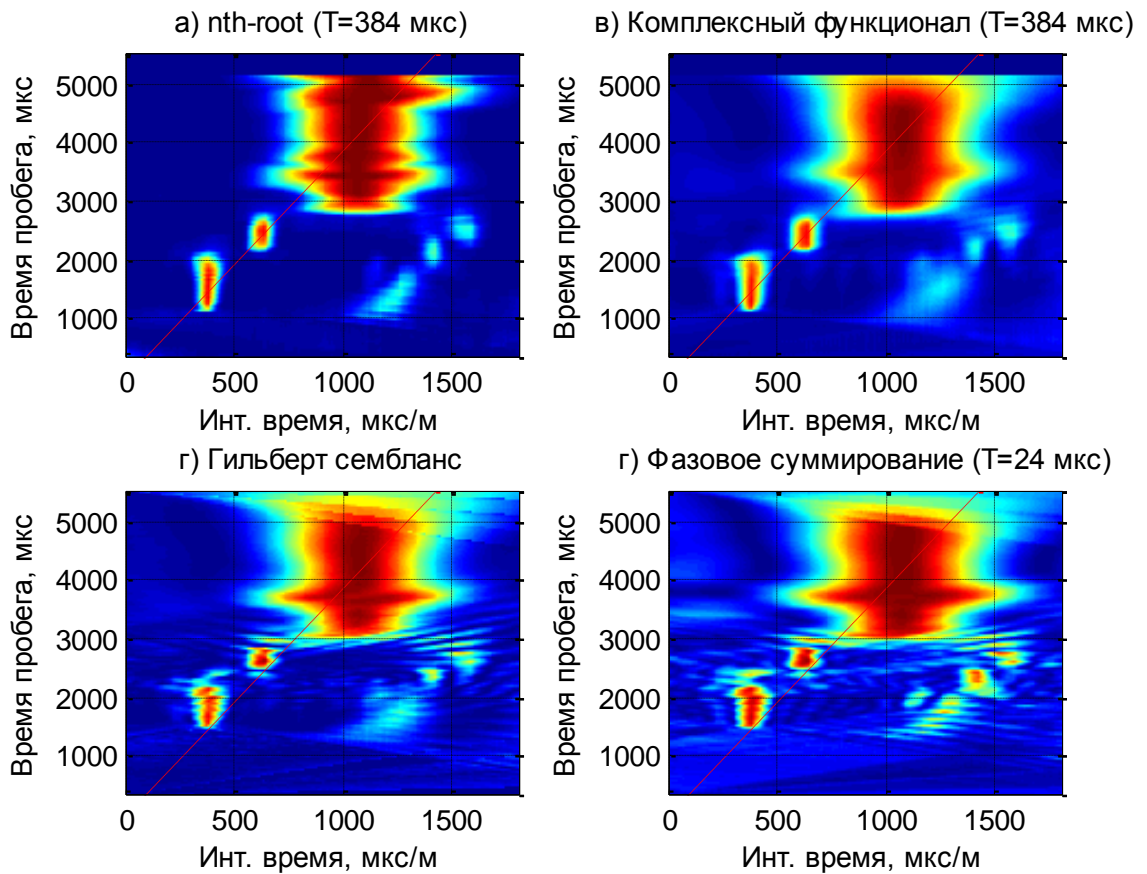


Рис. 1.39. Пример 1, отметка 288. Некоторые виды сембланс в  $(\tau-p)$  области:  
а)  $n^{\text{th}}$ -root когерентность; б) комплексный функционал когерентности;  
в) Гильберт сембланс; г) фазовое суммирование.

### 1.5.10 Производные представления сембланс

Одним из производных представлений сембланс [256] является представление на основе алгоритма многосигнальной классификации *MUSIC* (*MUltiple SIgnal Classification*) предложенного в [223]. В работе [92] предложена *MUSIC* когерентность как

$$P(\tau, p) = \frac{1}{1 - STC(\tau, p)}. \quad (1.50)$$

Другим производным представлением является когерентность на основе *F*-статистики [140]

$$F_s(\tau, p) = \frac{STC(\tau, p)}{1 - STC(\tau, p)}. \quad (1.51)$$

## 1.6 Двумерная (2D) фильтрация

С появлением цифровой техники записи и обработки развивались более современные пространственные фильтры, а также истинные двумерные фильтры. Такая фильтрация была обычно известна как скоростная фильтрация или веерная фильтрация (*fan filtering*), потому что пределы фильтра были определены, поскольку скоростные пределы и соответствующая область отклонения передачи в двумерном пространстве Фурье были сформированным поклонником.

Первоначально фильтры по скорости применялись непосредственно в пространственно-временной области для ослабления горизонтальных составляющих сейсмических массивов. Основной целью фильтрации по скорости является подавление когерентного шума с линейной скоростью в сейсмических данных [67, 190, 238].



1.6.1 Двумерное преобразование Фурье. Преобразование из области пространство-время в область частота-волновое число ( $f - k$  преобразование).

Итак, рассматривается пространственно-временная функция [224]  $y(t, x)$  представленная двумерным массивом записей по приемникам на одной отметке глубины. Обычно, преобразование Фурье связано со спектром и физический смысл при переходе от времени ( $t$ ) в преобразовании Фурье – это частота ( $f$ ). Другое дело пространственная координата ( $x$ ). Поэтому было введено понятие пространственной частоты - волновое число как отношение частоты к фазовой скорости [186, 187]. Волновое число  $k$  есть разность фазы волны (в радианах) в один и тот же момент времени в пространственных точках на расстоянии единицы длины (одного метра).

Двумерное преобразование Фурье функции  $y(t, x)$  [109, 186]

$$Y_2(f, k) = \iint y(t, x) e^{-j2\pi(kx+ft)} dx dt \quad (1.52)$$

Здесь пространственно-временная запись  $y(t, x)$  преобразуется в новые координаты  $Y_2(f, k)$ , где  $f$  и  $k$  временные и пространственные частоты соответственно.

Обратное преобразование от  $(f, k)$  к  $(t, x)$  аналогично прямому преобразованию с соответствующим масштабированием и изменением знака в экспоненциальном ядре.

$$y(t, x) = \iint Y_2(f, k) e^{j2\pi(kx+ft)} dk df \quad (1.53)$$

Фильтрация на основе прямого и обратного преобразования Фурье носит название  $(f - k)$  фильтрация (*Frequency-Wavenumber*). А представление

$$S(f, k) = |Y_2(f, k)| \quad (1.54)$$

носит название  $(f - k)$  спектр (рис. 1.40).

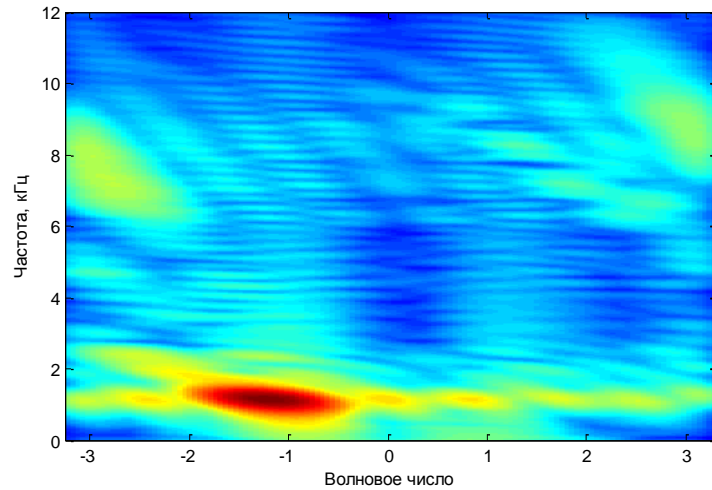


Рис. 1.40. Пример 1, отметка 288. F-k спектр.

Такая фильтрация применяется в сейсмике и пределы в  $(f - k)$  плоскости для обратного преобразования задаются таким образом, чтобы устранить нежелательные пространственные составляющие (например, горизонтальный шум в толще воды на мелководье морской сейсмике). Недостаток – фильтрация может удалить и некоторые «желательные события». На рис. 1.40 представлен  $(f - k)$  спектр Примера 1 на отметке 288. Метод также нашел применение для удаления шумов при межскважинном просвечивании [119]. Для обработки ВАК метод применяется для подавления отраженных волн [94,142] (рис. 1.41).

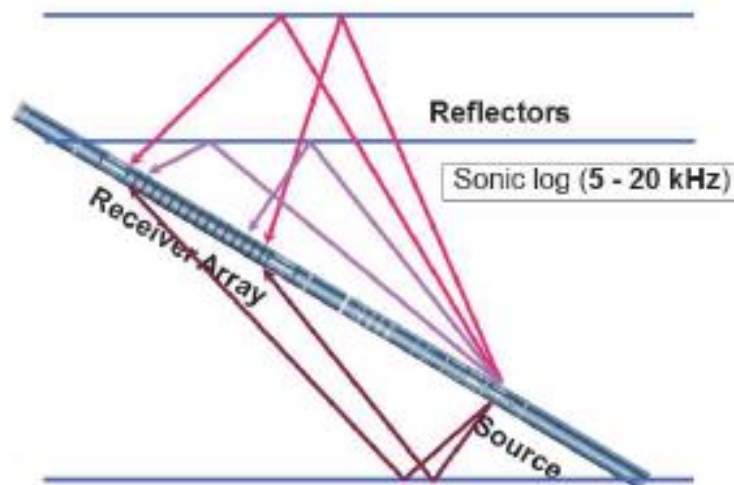


Рис. 1.41. Отраженные волны ВАК [142]

### 1.6.2 Преобразование Радона, Tau-p Transform (*Slant Stack* – наклонное суммирование), $(\tau - p)$ -преобразование

Tau-p преобразование [124,145,180,187,192,197,225,236,248,258,273] или *slant stack* это другой пример многоканальной фильтрации. Это специальный случай интегрального преобразования Радона [32, 121, 129, 236]. Это геометрически проще, чем обычные преобразования Фурье. Вместо того, чтобы разбить сигнал на гармонические компоненты, Tau-p преобразование раскладывает сигнал на плоскости волновых компонентов и, в частности, нулевого смещения времени прибытия.

Прямое интегральное преобразование Радона для пространственно-временной функции  $y(t, x)$  определяется как

$$R(\tau, p) = \mathfrak{R}\{y(t, x)\} = \int y(\tau + px, x) dx, \quad (1.55)$$

где  $p=dt/dx$  или в нотации геофизики – интервальное время  $\Delta t$  (*slowness*).

Применительно к записям ВАК интеграл заменяется суммой

$$R(\tau, p) = x_{RR} \sum_{m=1}^M y(\tau + px_m, m) \quad (1.56)$$

где  $x_{RR}$  – расстояние между приемниками (группами приемников). Заметим сходство формул (1.29) и (1.56), объединяющее их названием *slant stack* или *linear stack*.

В общем случае вычисление по (1.56) для дискретных записей  $y(k \cdot T_0, m)$  требует интерполяции. С другой стороны согласно свойству сдвига преобразования Фурье (1.37)

$$F[y(t + px_m, m)] = F[y(t, m)] \cdot e^{j \cdot 2\pi \cdot f \cdot p \cdot x_m} = Y(f, m) \cdot e^{j \cdot 2\pi \cdot f \cdot p \cdot x_m}.$$

Что дает возможность, применяя прямое и обратное преобразование Фурье избежать в явном виде интерполяции

$$R(\tau, p) = x_{RR} \cdot F^{-1} \left[ \sum_{m=1}^M Y(f, m) \cdot e^{j \cdot 2\pi \cdot f \cdot p \cdot x_m} \right], \quad (1.57)$$

дополнительно выполнить частотную фильтрацию, а также повысить разрешение в  $(\tau - p)$  и  $(f - p)$ -области [143, 180, 216, 226, 268].

### 1.6.2.1 Обратное преобразование Радона

Особо обратим внимание на обратное преобразование т.к. оно будет служить основой для многоканальной фильтрации записей ВАК по скорости в Главе 4. В работах [46,111,112,148,207] представлен вывод формулы обратного преобразования Радона через преобразование Фурье и далее через Гильберта (см. Приложение А).

$$\begin{aligned} \mathcal{H}[R(\tau, p)] &= R_H(\tau, p) = \frac{1}{\pi} \int \frac{R(\bar{\tau}, p)}{\tau - \bar{\tau}} d\bar{\tau}; \\ y(t, x) &= \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \int R_H(t - px, p) dp = \frac{1}{2\pi} \int R'_H(t - px, p) dp. \end{aligned} \quad (1.58)$$

Применительно к массивам ВАК

$$y_m(t) = \frac{1}{2\pi} \int R'_H(t - px_m, p) dp. \quad (1.59)$$

В виде (1.59) обратное преобразование Радона может быть вычислительно реализуемо, если бесконечные пределы интегрирования по  $p$  заменить конечным интервалом (о численной реализации преобразования Гильберта сказано выше). Интеграл в (1.59) заменяется суммой и вычисляется также по схеме *slant stack* – наклонное суммирование.

### 1.6.2.2 Преобразование Радона, взвешенное на сембланс

Первой работой (*Semblance Weighted Radon Transform*) является, пожалуй, работа [235]. Метод развивался в [172] затем для гиперболического преобразования Радона в работе [103] и сложился в [107]. Смысл заключается в том, чтобы перед обратным преобразованием Радона (1.59) результат прямого преобразования (1.56) в  $(\tau - p)$ -области умножить (взвесить) на значение меры когерентности – сембланс (1.28)

$$R_{STC}(\tau, p) = R(\tau, p) \cdot STC(\tau, p). \quad (1.60)$$

### 1.6.3 Преобразование Карунена - Лоэва и SVD-фильтрация

Разложение Карунена-Лоэва (Karhunen-Loeve Decomposition, KLD) или метод главных компонент (Principal Component Analysis, PCA) [40,139] -один из способов уменьшить размерность данных, потеряв наименьшее количество информации.

Принцип разложения Карунена-Лоэва применено к множеству временных функций изложен в работе [133]. Это множество представляется линейной комбинацией базисных функций

$$f_i(t) = \sum_{j=1}^{\infty} \alpha_{ij} \phi_j(t) \quad (1.61)$$

Базисные функции определяются решением интегрального уравнения

$$\lambda_j \phi_j(t) = \int_{-\infty}^{\infty} R(t, \tau) \phi_j(\tau) d\tau \quad (1.62)$$

где  $R(t, \tau)$  – автокорреляционная функция

$$R(t, \tau) = E_j[f_j(t) f_j(\tau)] \quad (1.63)$$

В геофизике этот метод наряду с сингулярным разложением (Singular Value Decomposition, SVD) применяется для фильтрации помех и разделения составляющих волн сейсмики [87,93,125,132,134,150,166,187,195,205,230,252, 254,261] и ВАК [174,149]. Метод применялся к преобразованию Радона [120, 152,183], и к двумерному представлению веерной фильтрации сейсмики ( $\tau$ - $p$ ,  $f$ - $k$ ) [123,188,233,249], а также к коэффициентам сембланс [255,256].

В обработке изображений (Image Processing) метод применяется при распознавании образов [78, 88] и заключается в нахождении последовательности ортогональных осей координат, вдоль которых каждый раз в убывающем порядке определяется максимум полной дисперсии [40].

### 1.6.3.1 В одноканальном режиме

Исходным является вектор-столбец одноканальной записи  $f_t$  размером  $N \times 1$ , где  $N$  – количество точек записи по времени. Формируется матрица ковариаций порядка  $N$

$$C = f_t \cdot f_t^T \quad (1.64)$$

и определяются ее собственные вектора, которые располагаются в порядке убывания соответствующих собственных значений этой же матрицы  $u_1, \dots, u_N$ . Теперь исходный вектор  $f$  можно представить как

$$f_t = \sum_{i=1}^N (f_t^T u_i) \cdot u_i = \sum_{i=1}^N a_i \cdot u_i = \sum_{i=1}^P a_i \cdot u_i + \sum_{i=P+1}^N a_i \cdot u_i = f_t^{LP} + f_t^{BP}, \quad (1.65)$$

где  $P < N$ ,  $f_t^{LP}$  – условно можно принять как низкочастотную (*LowPass*) составляющую, а  $f_t^{BP}$  – также условно как оставшуюся полосовую (*BandPass*, в смысле частотного спектра) часть  $a_i$  – скаляры.

### 1.6.3.2 В многоканальном режиме

Исходной является матрица многоканальной записи  $y_{x,t}$  размером  $N \times M$ , где  $N$  – количество точек записи по времени,  $M$  – количество каналов. Формируется матрица ковариаций порядка  $M$

$$C = y_{x,t}^T \cdot y_{x,t} \quad (1.66)$$

и определяются ее собственные вектора, которые располагаются в порядке убывания соответствующих собственных значений этой же матрицы, а также из них формируется матрица  $V = [v_1, \dots, v_M]$  порядка  $M$ .

Теперь исходную матрицу  $f_{x,t}$  можно представить как

$$y_{x,t} = (y_{x,t} \cdot V) V^T, \quad (1.67)$$

что позволяет разделить на две составляющие

$$y_{x,t} = \sum_{i=1}^M (y_{x,t} v_i) \cdot v_i^T = \sum_{i=1}^M s_i \cdot v_i^T = \sum_{i=1}^P s_i \cdot v_i^T + \sum_{i=P+1}^M s_i \cdot v_i^T = y_{x,t}^{LP} + y_{x,t}^{BP}, \quad (1.68)$$

где  $P < M$ ,  $y_{x,t}^{LP}$  – условно можно принять как низкочастотную (*LowPass*) составляющую, а  $y_{x,t}^{BP}$  – также условно как оставшуюся полосовую (*BandPass*, в смысле частотного спектра) часть;  $s_i$  – вектор-столбцы размером  $N \times 1$ .

Другая форма записи связана с сингулярным разложением матрицы  $f_{x,t}$  (*SVD, Singular Value Decomposition*)

$$y_{x,t} = U \Lambda V^T \approx \sum_{i=1}^K \lambda_i u_i v_i^T \quad (1.69)$$

где  $U = [u_1, \dots, u_N]$  – матрица порядка  $N$  и  $V = [v_1, \dots, v_M]$  матрица порядка  $M$ , состоящие из левых и правых сингулярных векторов соответственно;  $\Lambda$  – матрица размера  $N \times M$  у которой элементы, лежащие на главной диагонали это сингулярные числа в порядке убывания (а все элементы, не лежащие на главной диагонали, являются нулевыми);  $K = \min(N, M)$ .

Как правило,  $N \gg M$ , поэтому примем  $K = M$  и получаем формулу, соответствующую (1.68)

$$y_{x,t} = \sum_{k=1}^M \lambda_k u_k v_k^T = \sum_{i=1}^M s_i \cdot v_i^T = \sum_{i=1}^P s_i \cdot v_i^T + \sum_{i=P+1}^M s_i \cdot v_i^T = y_{x,t}^{LP} + y_{x,t}^{BP} \quad (1.70)$$

т.к. правые сингулярные векторы-столбцы  $v_i$ , участвующие в этом разложении, являются векторами главных компонент и собственными векторами ковариационной матрицы.

### 1.6.3.3 Применение SVD для сембланс

Применительно к сембланс в работах [255,256] предложена нормализация на основе *SVD* разложения матрицы  $\mathbf{D}$  (1.31)

$$STC(\tau, p) = \frac{\|\mathbf{D} \cdot \mathbf{e}\|^2}{M \cdot \|\mathbf{D}\|^2}; \quad \mathbf{D} = U \Lambda V^T \approx \sum_{i=1}^K \lambda_i u_i v_i^T. \quad (1.71)$$

Напомним, что матрица  $\mathbf{D}$  имеет размерность  $N_T \times M$ , где  $N_T$  – длина окна в квантах времени  $T = N_T \cdot \Delta t$ ;  $M$  – количество приемников. Разложение (1.71) позволяет сохранить свойство сембланс – значения *STC* в диапазоне  $[0, 1]$  и улучшить соотношение сигнал/шум [255].

### 1.7 Основные результаты и выводы по главе

1. Метод оценки времени первого вступления по порогу ненадежен с уменьшением соотношения сигнал/шум.
2. Статистические методы оценивания времени первого вступления требуют большой выборки и критичны к «отсечке» сигналов.
3. Разработан статистический метод оценки времени первого вступления составляющих волн на основе информационного критерия Акаике и преобразования Гильберта.
4. Разработан метод, позволяющий повысить разрешающую способность трехэлементных зондов ВАК при оценке интервальных времен по оценкам времен первого вступления.
5. Конструктивными средствами не всегда удается подавить корпусную волну (случай LWD).
6. При АК через обсадную колонну и плохом качестве цементирования трубная волна «забивает» составляющие волны по породе.
7. Метод сембланс нашел широкое применение при обработке массивов ВАК. Крайне важно удачно выбрать временное окно усреднения.
8. Необходимо разрабатывать методы, повышающие точность и надежность оценки интервальных времен составляющих волн.
9. Необходимо разрабатывать методы, позволяющие выделять на фоне высоких корпусной и трубной волн интересующие волны по породе.
10. Необходимо разрабатывать методы оценки скоростных свойств горных пород, позволяющие учитывать дисперсию составляющих ВАК.

□



## ГЛАВА 2 ГИЛЬБЕРТ СЕМБЛАНС - ОЦЕНКА ИНТЕРВАЛЬНЫХ ВРЕМЕН И ПЕРВОПРИБЫТИЯ СОСТАВЛЯЮЩИХ ВОЛН

В настоящей главе предлагается новый метод оценки интервальных времен составляющих волн ВАК, который объединяет достоинства метода сембланс [153] и метода фазового суммирования [221]. Автор настоящей работы предлагает назвать его Гильберт-сембланс метод и полагает, что он полностью заменит оба эти метода. В более широком смысле термин сембланс предлагается трактовать как меру подобия оценок сигналов приемников приведенную к интервальному времени.

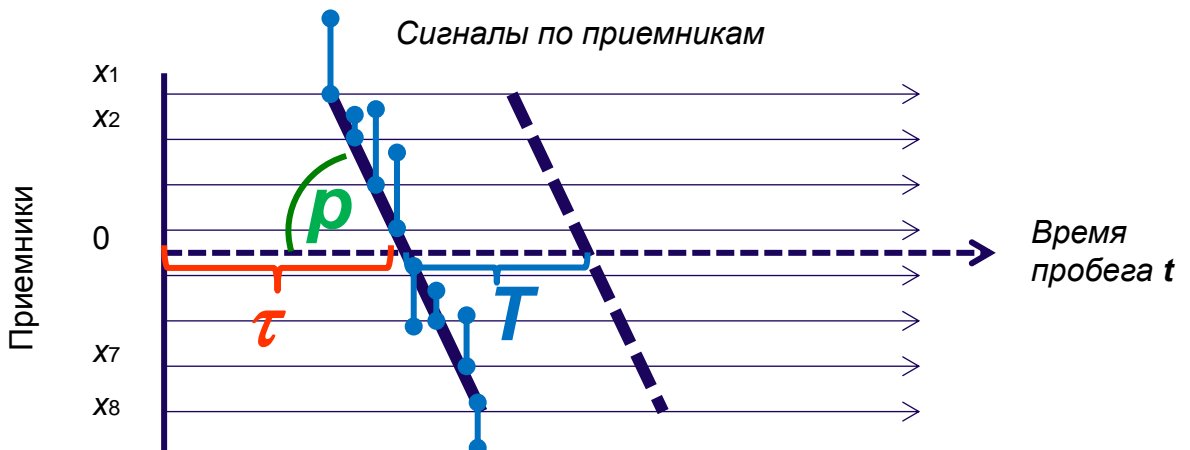


Рис. 2.1. Геометрическая интерпретация сембланс.

Для начала представим геометрическую интерпретацию традиционного сембланс. Под точкой традиционного сембланс понимается значение по формуле сембланс (1.28) при заданных  $\tau$  и  $p$ . В  $(t-x)$ -области время пробега приводится к середине антенной решетки. На этой оси откладывается  $\tau$ . Из точки  $\tau$  под углом  $-\arcsctg(p)$  проводится луч в пределах антенной решетки. Вдоль луча вычисляются среднее арифметическое и среднее квадратическое значений сигналов по всем приемникам. От точки  $\tau$  с шагом квантования по времени проводится еще  $T$  параллельных лучей и вычисления каждый раз

повторяются. Полученные  $T+1$  значений квадратов среднего арифметического и квадратов среднего квадратического усредняются и соотносятся. Минимальная длина окна  $T$  – один такт квантования по времени – или 2 значения для усреднения.

$$STC(\tau, p) = \frac{\frac{1}{T} \sum_{t=\tau}^{\tau+T} \{\text{среднее\_арифметическое\_по\_приемникам}\}^2}{\frac{1}{T} \sum_{t=\tau}^{\tau+T} \{\text{среднее\_квадратическое\_по\_приемникам}\}^2};$$

*среднее\_арифметическое* ≤ *среднее\_квадратическое*;

Автору не

$$0 \leq STC(\tau, p) \leq 1.$$

известно применение метода фазового суммирования для массивов ВАК, поэтому он взял на себя смелость развития этого метод применительно к ВАК, сохранив название (*phase stack*). Это сделано для того, чтобы в дальнейшем можно было сопоставлять метод сембланс и метод фазового суммирования с представляемым в настоящей главе методом Гильберт сембланс.

## 2.1 Развитие метода фазового суммирования

Сигналы по приемникам представим в аналитическом виде (аналитический сигнал) как

$$\begin{aligned} y_a(\tau, m) &= y(\tau, m) + j \cdot H[y(\tau, m)] = y(\tau, m) + j \cdot \bar{y}(\tau, m) \\ &= A_m(\tau) \exp[j \cdot \Phi_m(\tau)] \end{aligned} \quad (2.1)$$

где  $H[.]$  - преобразование Гильберта [32];

$$\begin{aligned} A_m(\tau) &= |y(\tau, m) + j \cdot \bar{y}(\tau, m)| = \sqrt{y^2(\tau, m) + \bar{y}^2(\tau, m)} \\ \Phi_m(\tau) &= \arctan \left[ \frac{\bar{y}(\tau, m)}{y(\tau, m)} \right]. \end{aligned}$$

Фазовое суммирование (*phase stack*) представим как

$$PS_2(\tau, p) = \left\{ \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \exp[j \cdot \Phi_m(\tau + px_m)] \right\}^{1.5} \quad (2.2)$$

Показатель степени 1,5 введен автором для возможности сопоставления с методом сембланс по формуле (1.28) и применения схем дальнейшей обработки

метода сембланс. Значения в формуле (2.2) как и в (1.28) лежат в интервале [0 1], 0 – означает отсутствие когерентности, 1 – полная когерентность сигналов по приемникам.

Фазовое суммирование (2.2) может содержать временное окно [221]

$$PS_2(\tau, p; T) = \frac{1}{T} \int_{\tau-T/2}^{\tau+T/2} PS_2(t, p) dt \quad (2.3)$$

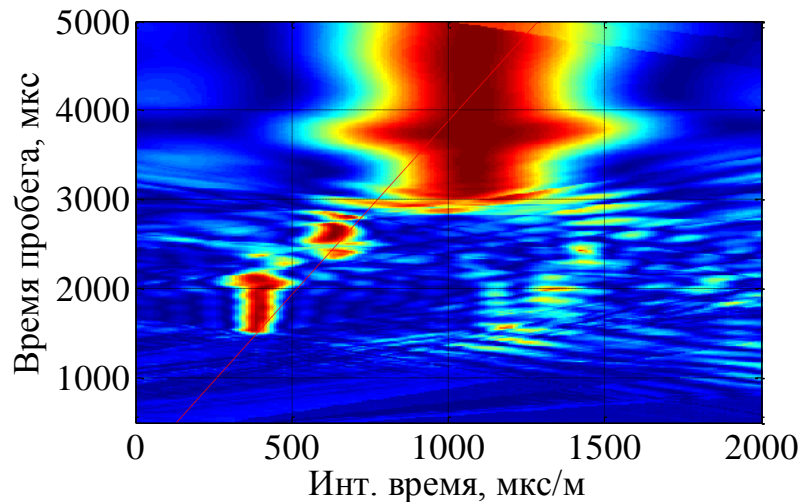


Рис. 2.2. Пример 1. Отметка 288. Фазовое суммирование.

На рис. 2.2 представлен результат фазового суммирования на отметке глубины 288.

Представим геометрическую интерпретацию фазового суммирования. Исходные сигналы заменяются единичными векторами. Угол направления вектора –  $\Phi_m(\tau)$ . Векторы вдоль луча складываются по правилу многоугольника. Длина результирующего вектора  $AB$  соотносится с числом приемников  $M$ . Таким образом, результат фазового суммирования может быть в интервале [0 1]. Значение 1 возможно только когда все вектора сонаправлены (в данном случае – равны). Значение 0 возможно когда точка  $A$  совпадает с точкой  $B$ .

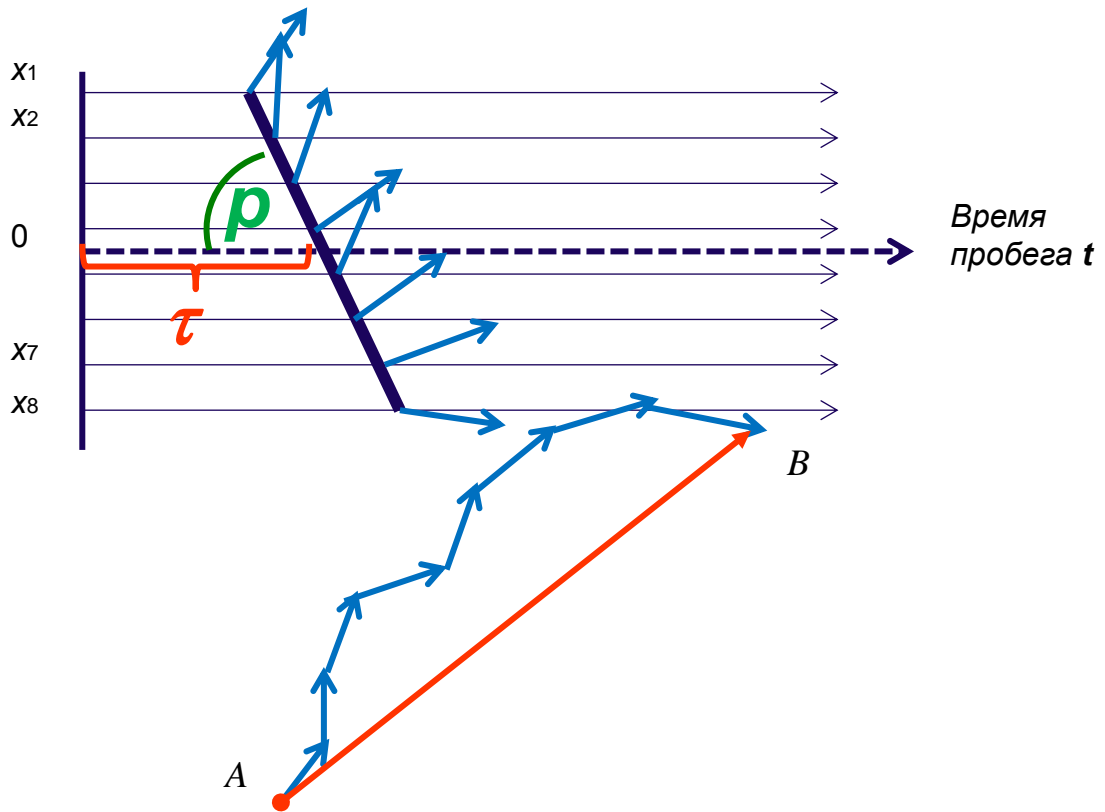


Рис. 2.3. Геометрическая интерпретация фазового суммирования.

## 2.2 Основные соотношения метода Гильберт сембланс

Как уже отмечалось в Главе 1 к недостатку метода сембланс можно отнести необходимость выбора величины временного окна [259], которое, по сути, загрубляет распределение когерентной мощности. В настоящей Главе предлагается безоконный сембланс представляемый через аналитический сигнал и названный автором метод Гильберт-сембланс:

$$STCH_1(\tau, p) = \frac{\left| \sum_{m=1}^M y_a(\tau + px_m, m) \right|}{\sum_{m=1}^M |y_a(\tau + px_m, m)|}, \quad (2.4)$$

и

$$STCH(\tau, p) = \frac{\left| \sum_{m=1}^M y_a(\tau + px_m, m) \right|^2}{M \cdot \sum_{m=1}^M |y_a(\tau + px_m, m)|^2} \quad (2.5)$$

где  $y_a(t, m)$  - аналитическое представление сигнала (2.1). Продолжая или обобщая (2.4), (2.5) можно записать

$$STCH_\nu(\tau, p) = \frac{\left| \sum_{m=1}^M y_a(\tau + px_m, m) \right|^\nu}{M^{\nu-1} \cdot \sum_{m=1}^M |y_a(\tau + px_m, m)|^\nu} \quad (2.6)$$

где  $\nu \geq 1$  - вещественное число.

Формула (2.5), на взгляд автора, более корректно передает содержание понятия когерентности мощности. При этом числитель (2.5) характеризует когерентную мощность, распределенную по скорости (интервальному времени), а знаменатель характеризует общую приведенную мощность, также распределенную по скорости. При этом нет необходимости подбирать временное окно.

По мнению автора, формула (2.5) более корректно передает содержание понятия когерентности мощности и может быть выражена через интегральное преобразование Радона. Если представить массив  $y(t, m)$  как пространственно-временную функцию  $y(x, t)$ , то (2.5) можно представить как

$$STCH(\tau, p) = \frac{|H_\tau^*[\Re\{y(\tau, x)\}]|^2}{M \cdot \Re\{|H_\tau^*[y(\tau, x)]|^2\}} = \frac{|B(\tau, p)|^2}{D(\tau, p)} = \frac{A^2(\tau, p)}{D(\tau, p)} = \frac{C(\tau, p)}{D(\tau, p)} \quad (2.7)$$

где преобразование Радона

$$\Re\{y(\tau, x)\} = \int y(\tau + px, x) dx \quad (2.8)$$

Гильберт-сембланс представлен на рис. 2.4

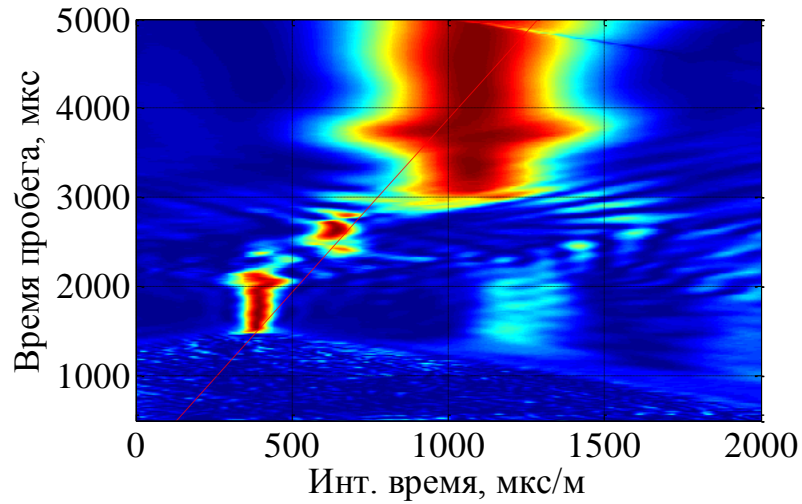


Рис. 2.4. Пример 1, отметка 288. Гильберт сембланс (без окна).

Гильберт сембланс не предполагает окна усреднения, но его можно ввести, тогда Гильберт сембланс (2.5) будет соответствовать комплексному сембланс (1.49). На рис. 2.5 представлены Гильберт сембланс при различной длине окна.

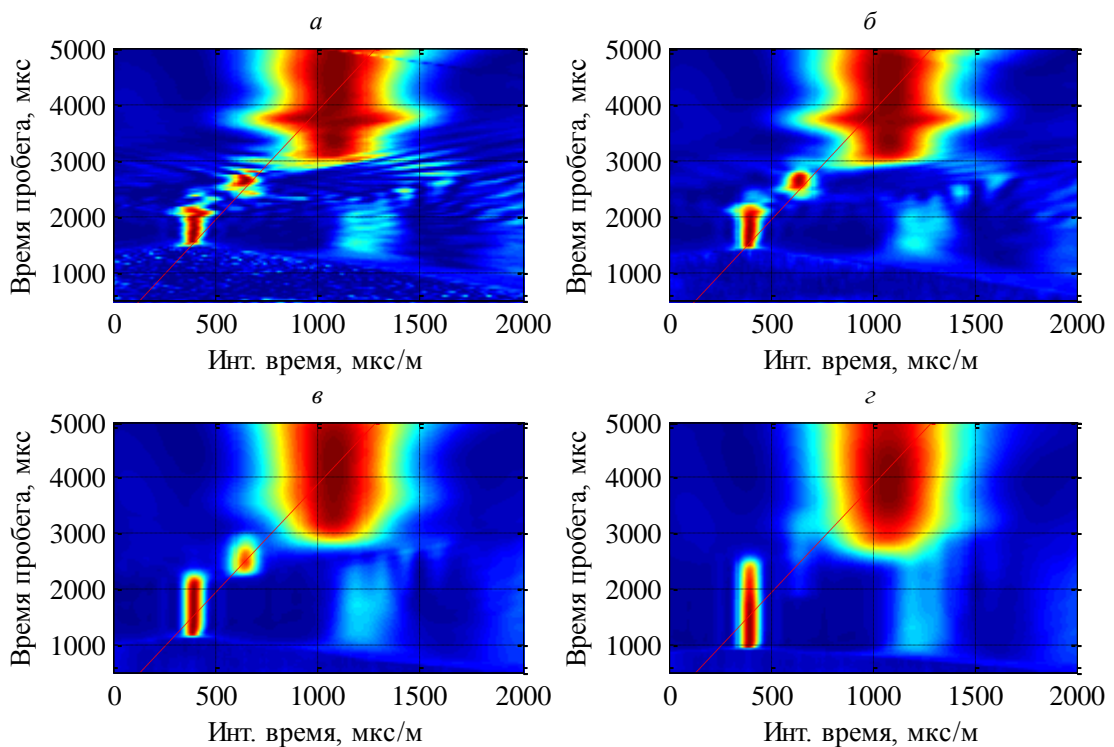


Рис. 2.5. Пример 1, отметка 288. Гильберт сембланс с окном усреднения: а) 12 мкс; б) 192 мкс; в) 768 мкс; г) 1536 мкс.

Представим геометрическую интерпретацию Гильберт сембланс. Исходные сигналы заменяются аналитическими и точка сигнала как комплексная величина представляется вектором (направление вектора – как в случае фазового суммирования, а длина – мгновенная амплитуда). Векторы вдоль луча из точки  $\tau$  под углом  $-\arcsctg(p)$  складываются. Результирующий вектор имеет длину, которая соотносится с суммой длин слагаемых векторов. Значение 1 возможно только когда все вектора сонаправлены. Значение 0 возможно когда точка  $A$  совпадает с точкой  $B$ .

$$STCH_1(\tau, p) = \frac{\text{длина\_суммы\_векторов}}{\text{сумма\_длин\_векторов}};$$

$$\text{длина\_суммы\_векторов} \leq \text{сумма\_длин\_векторов};$$

$$0 \leq STCH_1(\tau, p) \leq 1.$$

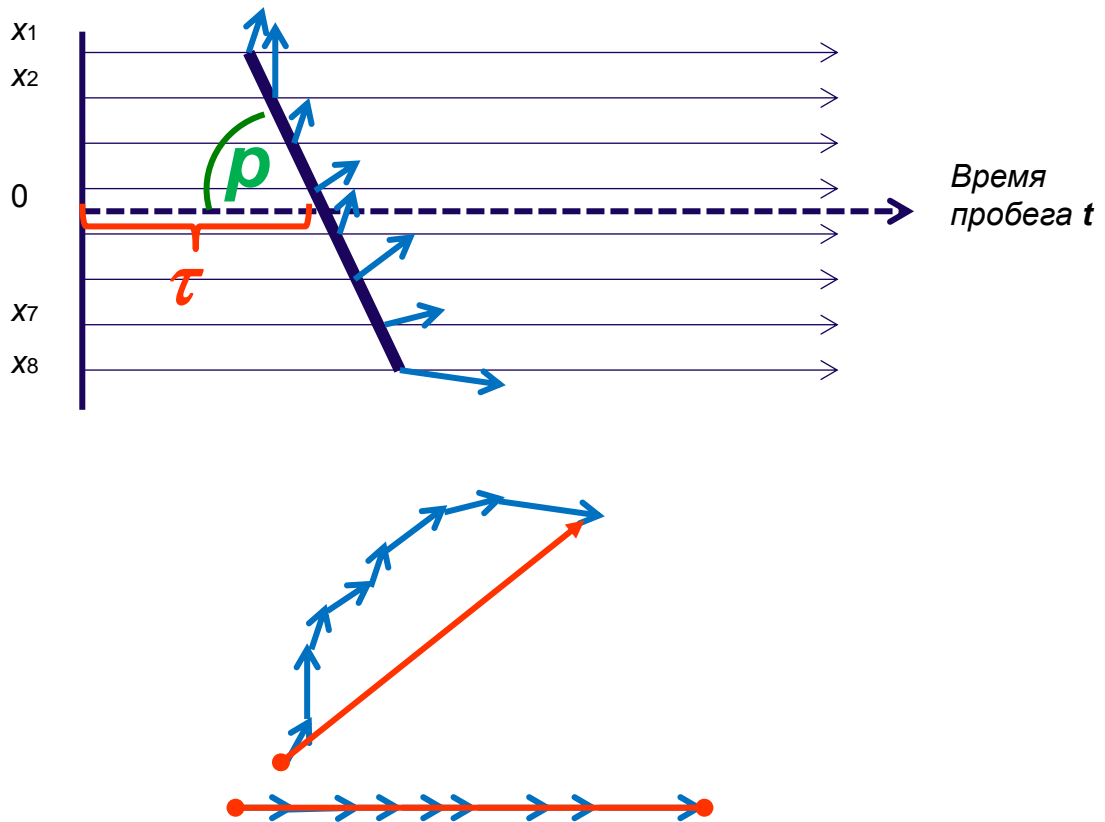


Рис. 2.6. Геометрическая интерпретация Гильберт сембланс.

По аналогии с «мгновенной амплитудой» сигнала, **Гильберт сембланс без окна усреднения представляет «мгновенную меру когерентности», или хотите, «мгновенный сембланс».**

Направление результирующего вектора – бонус Гильберт сембланс.

### 2.3 Фазовые переходы

Введем понятие сембланс фазовых переходов. Физический смысл Гильберт-сембланс – по массиву записей ВАК выделить в группе или цуге (веренице) волн волнового пакета волны, распространяющиеся с разными фазовыми скоростями. Фазовая скорость – это скорость распространения фазы волны, которая совпадает со скоростью распространения волны.

Величина  $B(\tau, p)$  в (2.7) комплексная и формально фаза определяется как

$$\varphi(\tau, p) = \arctan\left(\frac{\text{Im} B(\tau, p)}{\text{Re} B(\tau, p)}\right), \quad (2.9)$$

по которой можно отследить «групповое» изменение фазы.

Для анализа нет необходимости «накручивать»  $\pi$ -границы для достижения непрерывности фазы как в методе PVP (*Phase Velocity Processing*) [163]. Так как для выделения первого вступления нас интересуют только переходы фаз, например, с плюса на минус, то такое представление с учетом веса (5) имеет вид взвешенных фазовых траекторий (рис.3). Мы назвали их сембланс фазовых переходов.

$$Semb_{+/-}(t, \Delta t) = Semb(t, \Delta t) * \Phi_{+/-}(t, \Delta t), \quad (2.10)$$

где  $\Phi_{+/-}$  - бинарная матрица фазовых переходов – их нетрудно определить по  $\pi$ -границам.

Автор предлагает под «сембланс фазовых переходов» понимать выражение

$$\Phi(\tau, p) = STCH(\tau, p) \cdot \varphi(\tau, p) \quad (2.11)$$



На рис. 2.7 представлен фазовый сембланс-плот, по которому можно оценивать не только фазовые скорости составляющих волн, но и фазовое состояние составляющих волн, приведенное к середине антенной решетки.

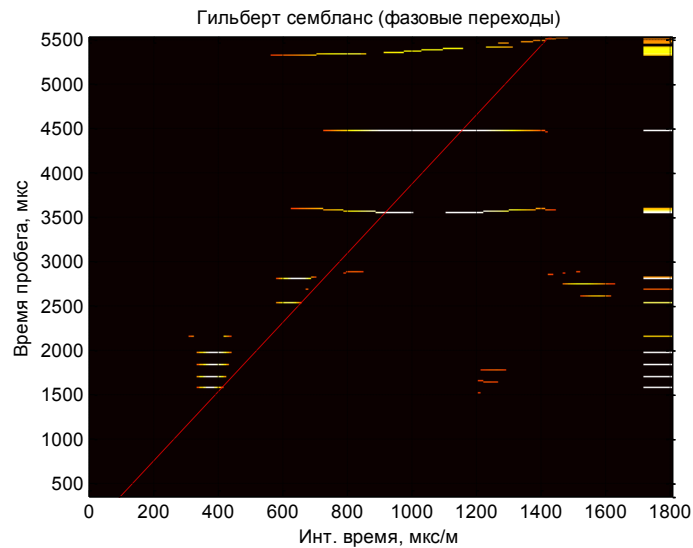


Рис. 2.7. Пример 1, отметка 288. Фазовые переходы Гильберт сембланс.

#### 2.4 Проекция Гильберт сембланс для отображения по глубине

Матрицы  $STCH(\tau, p)$  и  $\Phi(\tau, p)$  позволяют более точно и корректно оценивать как интервальное время, так и первое вступление составляющих волн.

*Первая проекция.* Для отображения Гильберт сембланс  $STCH(\tau, p)$  по глубине, по аналогии с методом сембланс, предлагается строить одномерную проекцию на ось  $p$  (интервальное время, slowness, или  $\Delta T$ )- находят максимум по  $\tau$

$$STCH_{1D}(p) = \max_{\tau} STCH(\tau, p) \quad (2.12)$$

*Вторая предлагаемая проекция.* Для отображения предлагается строить одномерную проекцию на ось  $\tau$  (время прохождения волны, приведенное к середине антенной решетки,  $travel\_time$ )- находят максимум по  $p$

$$STCH_{1D}(\tau) = \max_p STCH(\tau, p) \quad (2.13)$$

Дело в том, что Гильберт сембланс – безоконный и не искажает приведенного первоприбытия.

*Третья предлагаемая проекция.* Для отображения фазового сембланс-плот  $\Phi(\tau, p)$  по глубине также предлагается строить одномерную проекцию

$$\Phi_{1D}(\tau) = \max_p \Phi(\tau, p) \quad (2.14)$$

На рис. 3.7б представлена проекция (2.12). На рис. 2.8а,б представлены проекции (2.13) и (2.14) соответственно.

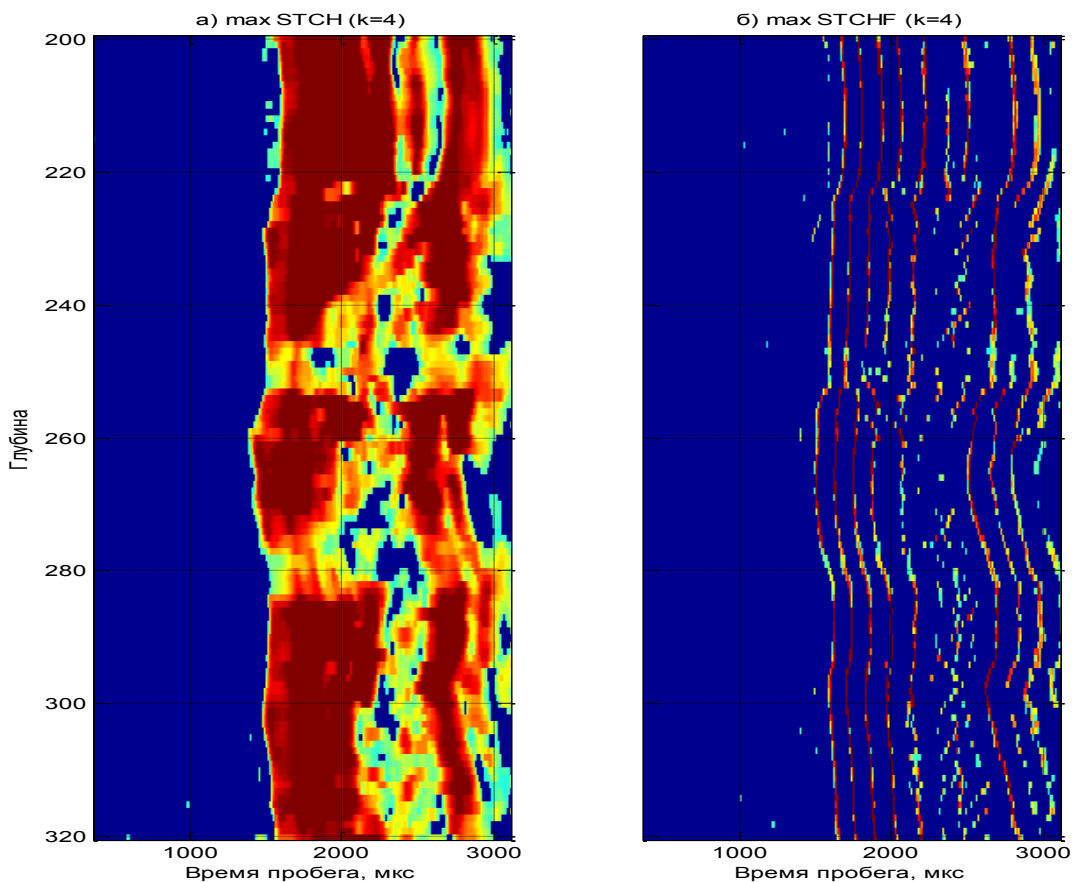


Рис. 2.8. Пример 1. Дополнительные проекции Гильберт сембланс по глубине

## 2.5 Дисперсионное представление Гильберт сембланс

По аналогии с (1.39) для (2.5) выполним «промежуточный заход» в частотную область через прямое и обратное преобразование Фурье.

$$DSTCH(\tau, p) = \frac{\left| F^{-1} \left\{ [1 + j \cdot H_F(f)] \cdot \sum_{m=1}^M Y(f, m) e^{j \cdot 2\pi \cdot f \cdot s(f, p, d) \cdot x_m} \right\} \right|^2}{M \cdot \sum_{m=1}^M \left| F^{-1} \left\{ [1 + j \cdot H_F(f)] \cdot Y(f, m) e^{j \cdot 2\pi \cdot f \cdot s(f, p, d) \cdot x_m} \right\} \right|^2} \quad (2.15)$$

Также имеет место

$$DSTCH(\tau, p) = \frac{\left| \sum_{m=1}^M y_{as}(\tau + px_m, m) \right|^2}{M \cdot \sum_{m=1}^M |y_{as}(\tau + px_m, m)|^2}, \quad (2.16)$$

где, как и в (1.41)

$$y_s(t + px_m, m) = F^{-1} \{ Y(f, m) \cdot e^{j \cdot 2\pi \cdot f \cdot s(f, p, d) \cdot x_m} \}, \quad (2.17)$$

и как в (2.1) - аналитический сигнал

$$y_{as}(\tau, m) = y_s(\tau, m) + j \cdot H[y_s(\tau, m)]. \quad (2.18)$$

## 2.6 Основные результаты и выводы по главе

1. Для оценки интервальных времен составляющих волн многоэлементного ВАК предложен новый метод обработки данных, названный автором как метод Гильберт сембланс. Метод представляет собой альтернативу известному и широко применяемому для обработки массивов ВАК методу сембланс. В отличие от метода сембланс в предлагаемом методе не применяется интегрирование в пределах некоторого временного окна, а применяется преобразование Гильберта, что, по мнению автора, повышает разрешающую способность. Показана связь метода Гильберт сембланс с преобразованием Радона.
2. Предложено понятие фазовый сембланс – фазовое состояние в (*Slowness-Time*)( $\tau - p$ )-области взвешенное на меру Гильберт сембланс.
3. Предложены информативные формы представления на геофизических планшетах результатов обработки методом Гильберт сембланс.

4. Выявлен недостаток предложенного метода. Высокая разрешающая способность метода показывает размыв когерентной мощности составляющих волн в случае неоднородных скоростных свойств горных пород в пределах антенной решетки. Сам по себе такой факт является достоинством, а не недостатком. Однако, при построении проекций для отображения на геофизических планшетах такая «размытость» становится неприемлемой.

У взыскательного читателя может появиться сомнение: Есть метод сембланс, который хорошо себя зарекомендовал. Затем надуман метод Гильберт сембланс, который имеет недостаток. Теперь надуман метод фильтрации, чтобы устранить этот недостаток. В итоге получили результат, аналогичный методу сембланс. Какой смысл во всей этой математике?!

Попытаемся дать ответ. Во-первых, метод Гильберт сембланс имеет предельную разрешающую способность. Во-вторых, метод Гильберт-сембланс может применяться при фильтрации акустических массивов по скорости на основе преобразования Радона. В-третьих, метод Гильберт-сембланс не размывает время прибытия волны (*first break, first-arrival wave*) приведенное к середине антенной решетки.

□

### ГЛАВА 3 ФИЛЬТРАЦИЯ СЕМБЛАНС НА ОСНОВЕ СИНГУЛЯРНОГО РАЗЛОЖЕНИЯ

Отсутствие временного окна повышает разрешающую способность. Повышение разрешающей способности имеет обратную сторону - размыв или расчленение когерентной мощности на Гильберт сембланс плот (рис. 2.4, рис. 3.3a) происходит из-за неоднородности скоростных свойств горных пород в пределах антенной решетки. Свой вклад вносят и помехи, поэтому проекция (2.12) для (2.5) уже не столь информативна (рис. 3.7б) и не приемлема для отображения интервальных времен составляющих волн на геофизических планшетах. Итак, зашумление и размытие максимумов («пятен») сембланс в ( $\tau - p$ )-области может происходить по следующим причинам:

- Недостаточная разрешающая способность зонда [167];
- Помехи в зарегистрированных сигналах [213];
- Методическая причина – когерентные события при пропуске нескольких циклов (*coherent multiple cycle skipping events*) [266];
- Методическая причина – некорректно подобрано окно усреднения [259];
- Изменение скоростных свойств разреза в пределах антенной решетки [163];
- Дисперсия волн (изгибной волны, St-волны).

Можно предположить, что дополнительная фильтрация сембланс как изображений позволит для некоторых указанных выше причин улучшить условия локализации пятен, соответствующих составляющим волнам. Однако обработка изображений сембланс методами традиционной 2D цифровой фильтрации ощутимых результатов не дает (отметим, что окна усреднения и весовые коэффициенты – по сути уже и есть исчерпывающая цифровая фильтрация). Результаты были достигнуты при применении нелинейной фильтрации, основанной на сингулярном разложении матриц.

### 3.1 Фильтрация на основе разложения Карунена-Лозва

Предлагается применить основной эффект KLD-PCA (разложение Карунена-Лозва – метод главных компонент) при обработке изображений – локализация мощности (или плотности) двумерных изображений для фильтрации в  $\tau$ - $p$  области. Предположено, что размытое облако-пятно изображения  $STCH$  (соответствующее P-, S- или St-волне) может быть консолидировано и проекция (2.12) станет приемлемой для отображения по глубине на геофизическом планшете.

Изображения матриц значений сембланс предполагают отображение пятен, характеризующих всплеск когерентной мощности. Идея нелинейной фильтрации основана на следующих принципах: 1) количество наблюдаемых в пакете ВАК волн конечно, следовательно, и конечно количество этих пятен; 2) в  $(\tau$ - $p)$ -области пятна располагаются над (или в окрестности) линией времени прибытия ( $\tau$ ) сигнала к середине антенной решетки распространяющегося с интервальным временем  $p$ ; 3) исходная матрица сембланс имеет полный ранг, что представляется избыточным для представления изображений согласно пп.1-2; 4) матрица сембланс без потери информативных пятен может быть аппроксимирована матрицей меньшего ранга, при этом происходит фильтрация шумов; 5) понижением ранга аппроксимирующей матрицы можно оставлять только главные компоненты – наиболее весомые пятна, количество сохраняемых пятен сопоставимо с рангом матрицы.

Значения сембланс представим матрицей  $\mathbf{X}$  размером  $N \times M$ . Разложение Карунена-Лозва – метод главных компонент предполагает

$$\begin{aligned}
 (STCH(\tau, p)) \Rightarrow \mathbf{X} = U\Lambda V^T = \sum_{i=1}^{\min(N, M)} \lambda_i u_i v_i^T \\
 \sum_{i=1}^k \lambda_i u_i v_i^T + \sum_{i=k+1}^{\min(N, M)} \lambda_i u_i v_i^T \approx \sum_{i=1}^k \lambda_i u_i v_i^T
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

Воспользуемся алгоритмом фильтрации по KLD [87] (только применим его не ко входному массиву, в к матрице значений сембланс) :

1) Формируется матрица ковариаций размером  $M \times M$

$$\mathbf{C} = \mathbf{X}^T \mathbf{X}.$$

2) Задается натуральное число  $k$  (которое и является параметром фильтра) и формируется матрица

$$\mathbf{U} = \{\mathbf{u}_1 \mathbf{u}_2 \dots \mathbf{u}_k\}$$

из первых  $k$  собственных векторов матрицы  $\mathbf{C}$  расположенных в порядке убывания соответствующих собственных значений матрицы  $\mathbf{C}$ .

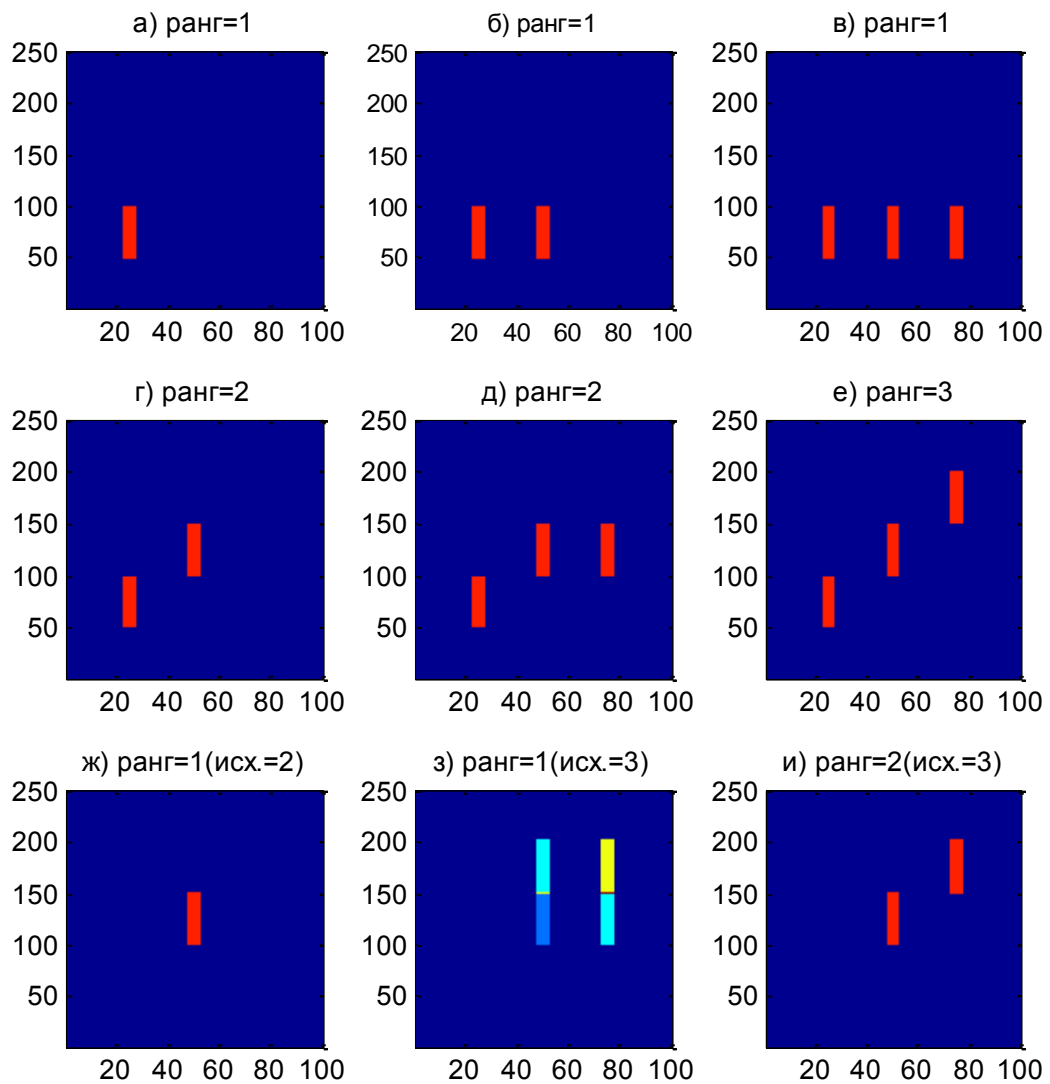


Рис. 3.1. Синтетические примеры матрицы сембланс а) ранг=1, 1 пятно; б) ранг=1, 2 пятна; в) ранг=1, 3 пятна; г) ранг=2, 2 пятна; д) ранг=2, 3 пятна; е) ранг=3, 3 пятна; ж) ранг=1, ранг исходной =2, выделяется 1 пятно; з) ранг=1, ранг исходной =3, выделяется 1 пятно; и) ранг=2, ранг исходной =3, выделяется 2 пятна.

## 3) Результат фильтрации

$$Y = (U * U^T * X^T)^T$$

- матрица исходного размера  $N \times M$ .

В функции *kl* из библиотеки SeismicLab [226] на MATLAB'е представленный выше алгоритм реализован как

$$C = X' * X;$$

$$OPTS.\text{disp} = 0;$$

$$[U,S] = \text{eigs}(R,K,'LM',OPTS);$$

$$Y = (U * U' * X)';$$

Альтернатива может быть представлена через сингулярное разложение:

$$[U,S,V] = \text{svds}(X,K);$$

$$Y = U * S * V';$$

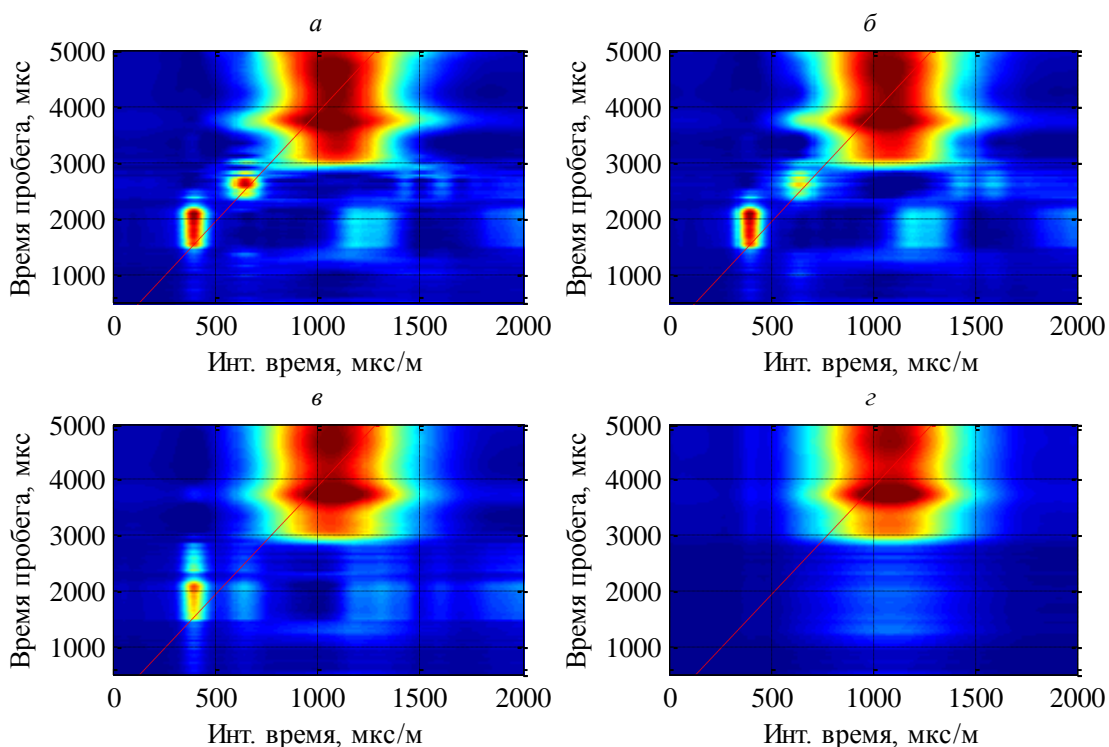


Рис. 3.2. Пример 1, отметка 288, изображение матрицы Гильберт сембланс после фильтрации: а) при  $k=4$ ; б) при  $k=3$ ; в) при  $k=2$ ; г) при  $k=1$ .



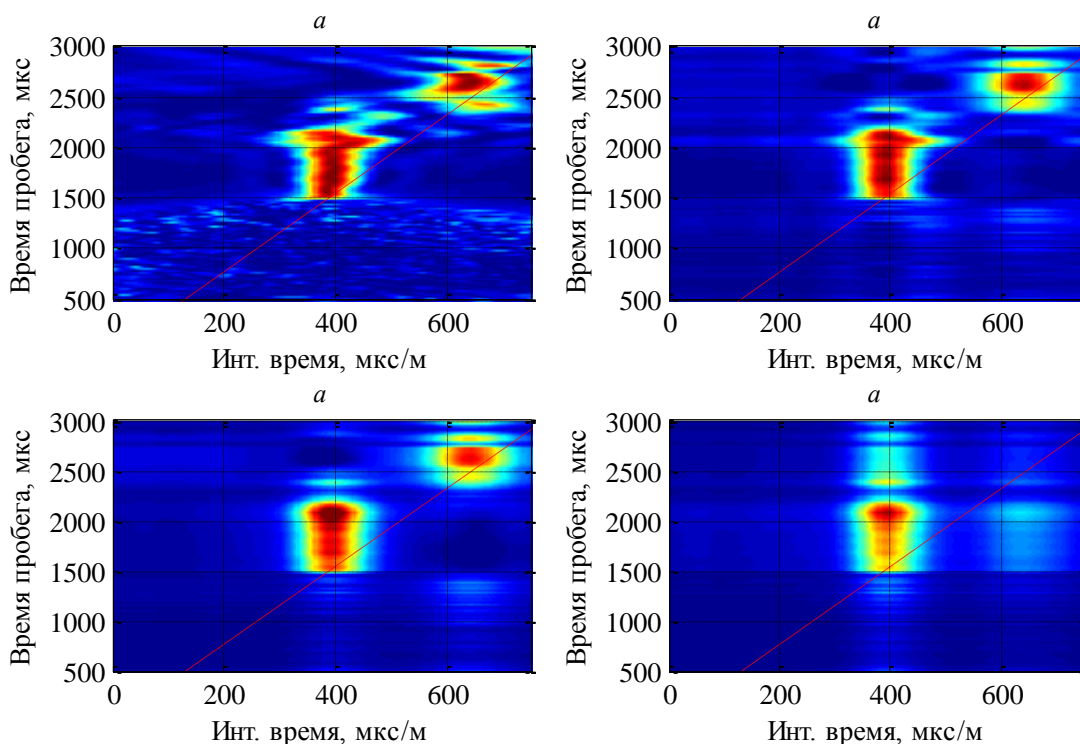


Рис. 3.3. Пример 1, отметка 288, изображение блока Гильберт сембланс:  
 а) исходный; б) после фильтрации при  $k=3$ ; в) после фильтрации при  $k=2$ ;  
 г) после фильтрации при  $k=1$ .

На рис. 3.2 изображены результаты фильтрации *STCH* на отметке глубины 288 с параметром фильтра  $k=4,3,2,1$ . Отметим, что при  $k=1$  осталось только одно (самое большое) облако-пятно, соответствующее волне Стоунли.

Обрежем исходный имидж Гильберт сембланс так, чтобы исключить волну Стоунли и повторим фильтрацию. На рис. 3.3 изображены результаты фильтрации *STCH* на отметке глубины 288 с параметром фильтра  $k=4,2,1$ . Отметим, что при  $k=1$  осталось только одно (самое большое) облако-пятно, соответствующее уже волне Р-волне.

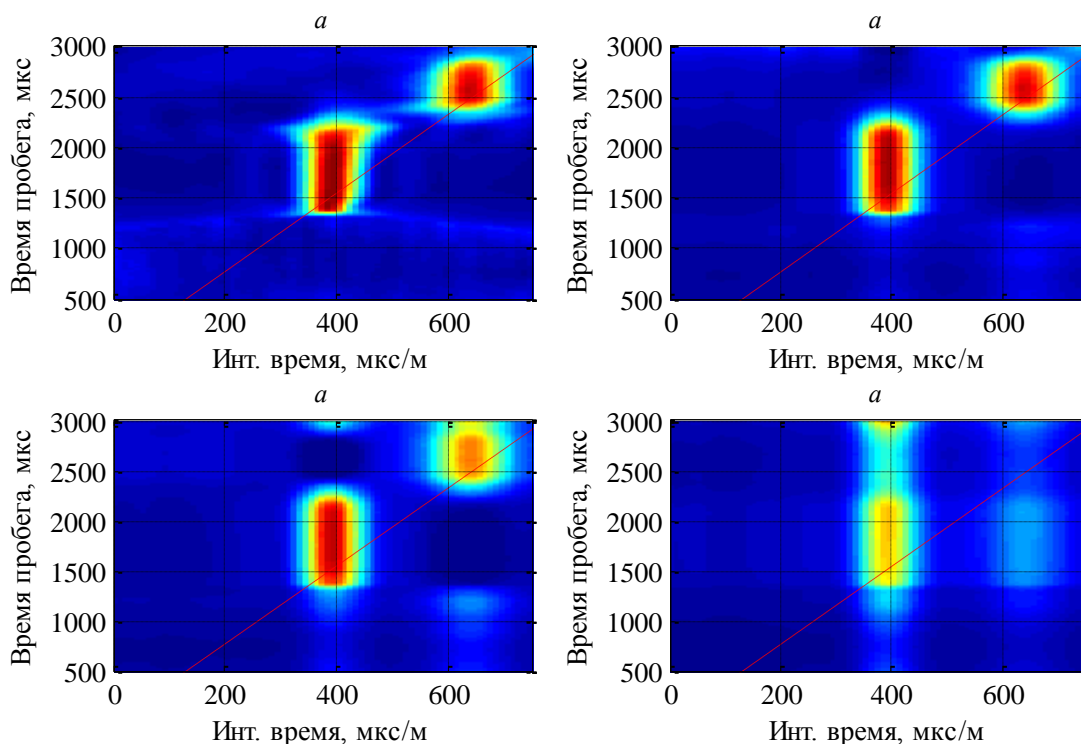


Рис. 3.4. Пример 1, отметка 288, изображение блока Гильберт сембланс с окном усреднения 384 мкс: а) исходный; б) после фильтрации при  $k=3$ ; в) после фильтрации при  $k=2$ ; г) после фильтрации при  $k=1$ .

Фильтрацию по Карунена-Лоэва можно применять совместно с усреднением по окну. На рис. 3.4 приведен пример такой совместной фильтрации.

Справедливости ради отметим, что фильтрацию по Карунена-Лоэва можно применять и к «классическому» сембланс. На рис. 3.5 приведен пример такой фильтрации. Отметим, что при  $k=1$  также осталось только одно (самое большое) облако-пятно, соответствующее Р-волне.

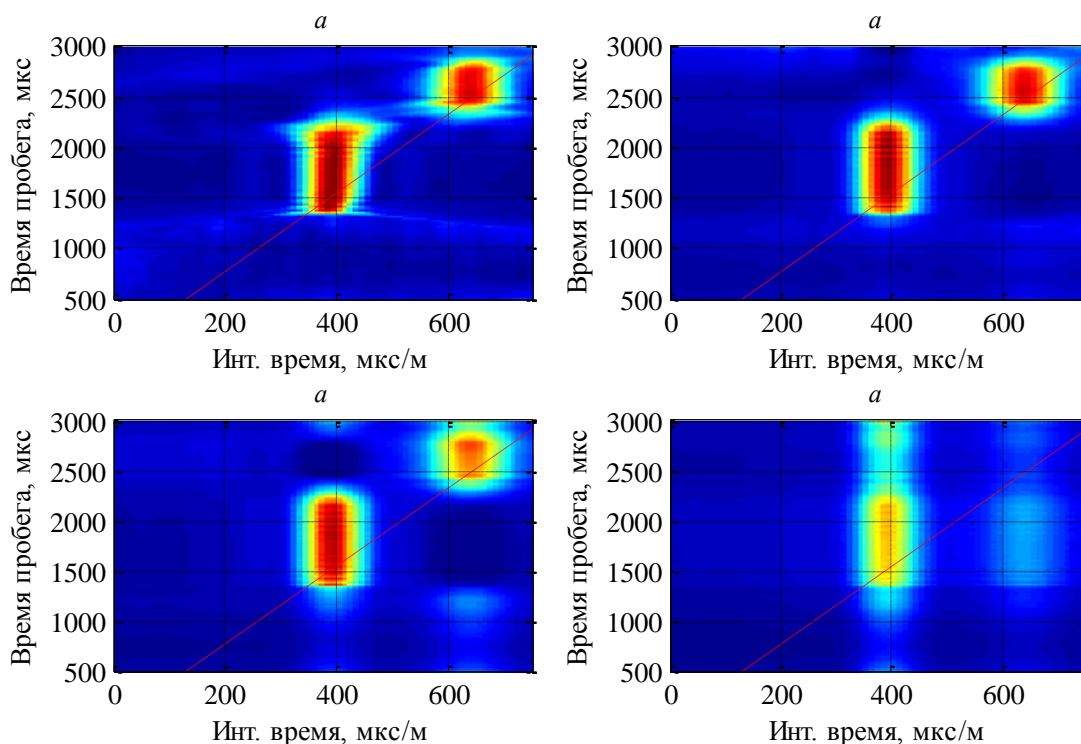


Рис. 3.5. Пример 1, отметка 288, изображение блока традиционного сембланс с окном усреднения 384 мкс: а) исходный; б) после фильтрации при  $k=3$ ; в) после фильтрации при  $k=2$ ; г) после фильтрации при  $k=1$ .

На рис. 3.7 представлены проекции (1.33) по глубине для (1.28) с параметром  $T=384$  мкс (а) и (2.12) для (2.5) до (б) и после фильтрации при  $k=2$  (в) по Карунена-Лоэва.

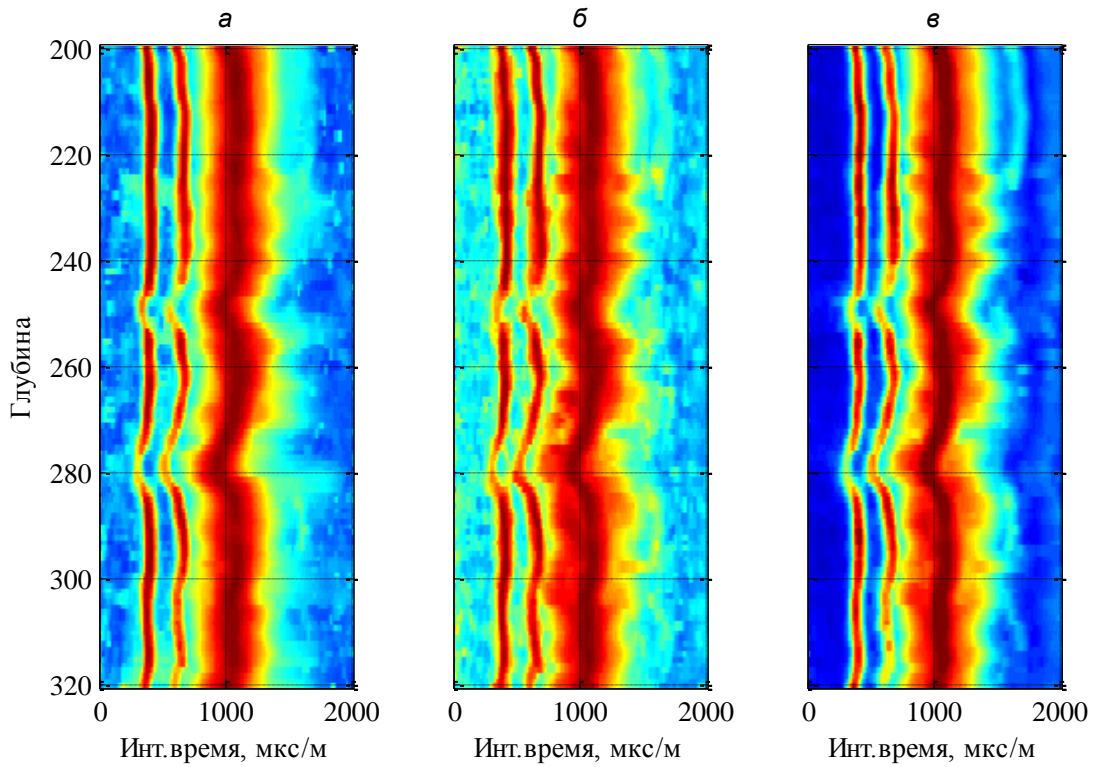


Рис. 3.6. Пример 1. Проекция сембланс: а) Традиционный сембланс ( $T=384$  мкс); б) Гильберт сембланс; в) Гильберт сембланс после фильтрации при  $k=4$ .

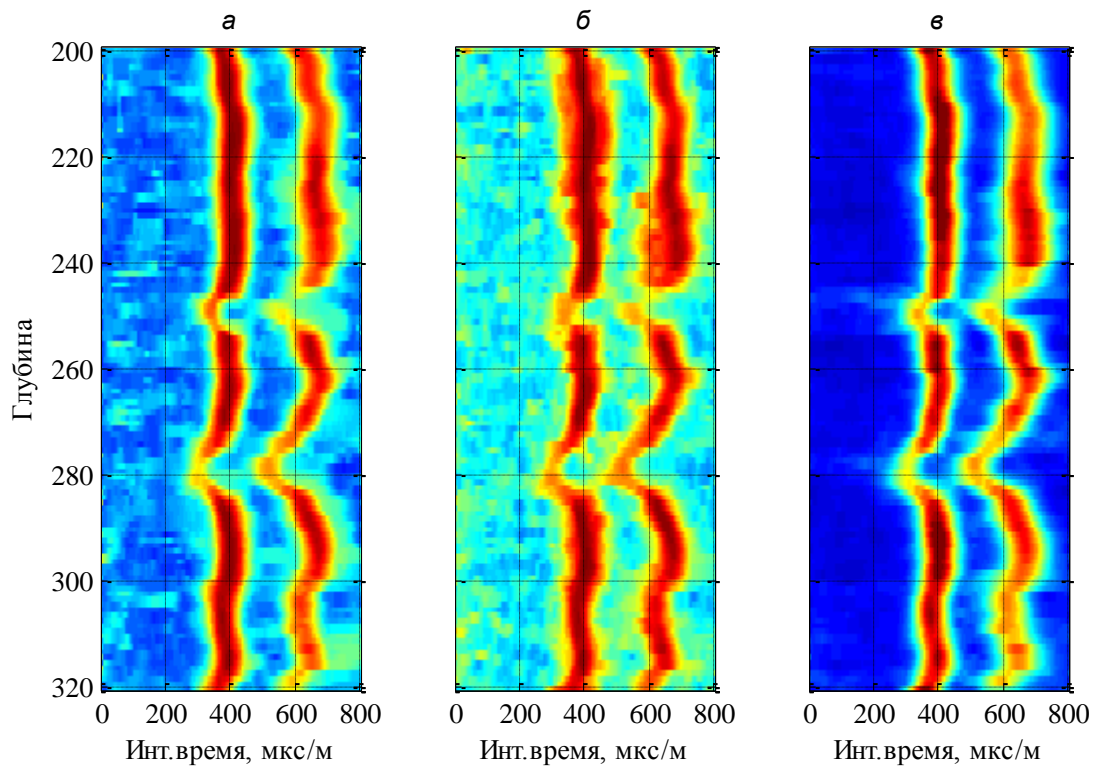


Рис. 3.7. Пример 1. Проекция блока сембланс: а) традиционный сембланс; б) Гильберт сембланс; в) Гильберт сембланс после фильтрации при  $k=2$ .

### 3.2 Критерии оценки ранга матриц сембланс

Популярными подходами к отбору главных компонент являются правило Крамера и правило сломанной трости [108]. Критерии оценки ранга матриц можно сформулировать на основе информационного критерия Акаике (ИКА, AIC, Akaike Information Criterion) и принципа минимальной длины описания (МДО, MDL, Minimum Description Length) [265].

Значения  $STCH(\tau, p)$  представим в виде матрицы  $\mathbf{X}$  размером  $N \times M$ , где  $N$  – количество точек по времени пробега волны  $\tau$ ,  $M$  – количество точек по интервальному времени (*slowness*)  $p$ . Сформируем матрицу ковариаций

$$\mathbf{C} = \mathbf{X}^T \mathbf{X}.$$

Матрица ковариаций  $\mathbf{C}$  имеет размер  $M \times M$  и собственные числа  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \dots \geq \lambda_M$ . ИКА определяется как [95]

$$AIC(W) = -2 \log \left( \frac{\prod_{m=W+1}^M \lambda_m^{1/(M-W)}}{\frac{1}{M-W} \sum_{m=W+1}^M \lambda_m} \right)^{(M-W)N} + 2W(2M - W), \quad (3.2)$$

а МДО

$$MDL(W) = -2 \log \left( \frac{\prod_{m=W+1}^M \lambda_m^{1/(M-W)}}{\frac{1}{M-W} \sum_{m=W+1}^M \lambda_m} \right)^{(M-W)N} + W(2M - W) \log(N). \quad (3.3)$$

Минимумы этих критериев соответствуют оптимальному значению  $W$  как ранга матрицы сембланс.

На рис. 3.8 представлены значения критериев (3.2) и (3.3) для Примера 1 на отметке 288. Минимум критериев соответствует значению ранга аппроксимирующей матрицы  $k=3$ .

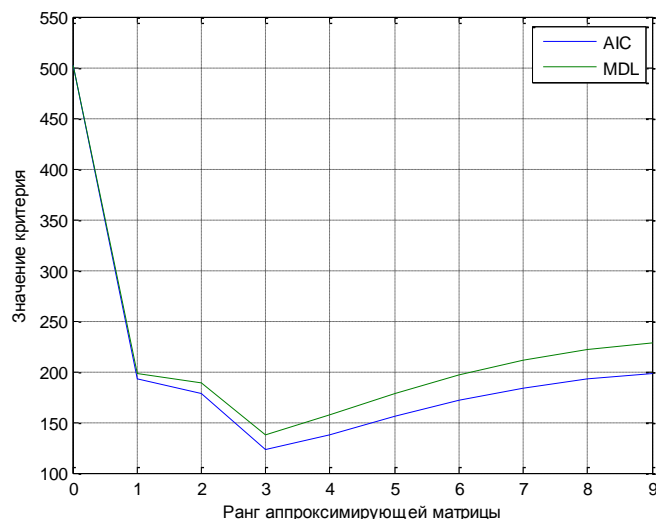


Рис. 3.8. Пример 1, отметка 288, критерии оценки ранга матрицы Гильберт сембланс

### 3.3 Основные результаты и выводы по главе

1. Предложена фильтрация Гильберт сембланс в  $(\tau - p)$ -области на основе разложения Карунена-Лоэва. Предложенная фильтрация позволяет не только консолидировать размытую когерентную мощность, но и определять в  $(\tau - p)$ -области количество «пятен» консолидированной когерентной мощности, задавая тем самым количество выделяемых составляющих волн. Фильтрация позволяет регулировать количество сохраняемых облаков-пятен за счет задания параметра фильтра  $k$ . Так, если в записи волнового пакета присутствует только P-волна, то параметр фильтра следует выбирать  $k=1$  (одна главная компонента – направление максимального изменения данных – параллельно оси *Travel\_Time*). Если присутствует P- и S-волны, то  $k=2 \div 3$  (вторая главная компонента – направление, параллельное оси *Slowness*, третья – еще одно направление, параллельное оси *Travel\_Time* и т.д.). Если присутствует P-, S- и St-волны, то следует выбирать  $k=3 \div 5$ .
2. Предложена оценка ранга аппроксимирующей матрицы для матрицы сембланс на основе информационного критерия Акаике и принципа минимальной длины описания. □

## ГЛАВА 4 МЕТОД ФИЛЬТРАЦИИ ПО СКОРОСТИ НА ОСНОВЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ РАДОНА

В настоящей главе предлагается метод фильтрации по скорости записей многоэлементного ВАК на основе преобразования Радона. Отметим, где чаще всего возникает такая необходимость. Это каротаж через обсадную колонну [27, 160, 210, 253, 257] (доразведка с целью оценки изменения ФЕС). В этом случае L-волна является паразитной, однако, условиях хорошего качества цементирования она быстро затухает. При плохом же качестве цементирования L-волна практически «забывает» отклик по породе (Р-волну и даже S-волну) даже при увеличенной длине зонда. Если рассматривать по отдельности каждый зарегистрированный канал ВАК, то разделить волны не удастся – времена и частоты накладываются. Тем не менее, если волны имеют различную скорость, то применяя интегральные преобразования к массивам ВАК в  $tau-p$  области удастся выделять вступления и скорости этих волн. В настоящей главе усложним задачу – отфильтруем волны.

### 4.1 Основные соотношения

Исходным акустическим массивом является двумерный массив

$$y(k, m), \quad k = \overline{0, N-1}; \quad m = \overline{0, M-1}, \quad (4.1)$$

где  $N$  - количество точек по времени,  $M$  - количество приемников. Массиву (4.1) поставим в соответствие ограниченную пространственно-временную функцию

$$\begin{aligned} y(t, x) &\Leftrightarrow y(k, m), \\ t_{\min} &= 0; \quad t_{\max} = (N-1) \cdot \Delta t, \\ x_{\min} &= -\frac{M-1}{2} \cdot \Delta x; \quad x_{\max} = -x_{\min}, \end{aligned} \quad (4.2)$$

где  $\Delta t$  – шаг регистрации по времени,  $\Delta x$  – расстояние между приемниками антенной решетки.

#### 4.1.1 Преобразование Радона через $(\tau - p)$ -область

Идея фильтрации по скорости достаточно проста и состоит из последовательности прямого преобразования Радона [121] исходной пространственно-временной функции  $y(t, x)$  интегрированием не в бесконечных пределах, а в пределах антенной решетки  $[x_{\min}, x_{\max}]$

$$R(\tau, p) = \mathfrak{R}\{y(t, x)\} = \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} y(\tau + px, x) dx, \quad (4.3)$$

и обратного преобразования Радона [14, 15, 46, 180] интегрированием также не в бесконечных пределах, а в пределах интервального времени  $[p_{\min}, p_{\max}]$

$$\begin{aligned} y_{new}(t, x) &= \mathfrak{R}^{-1}\{R(\tau, p)\} = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \int_{p_{\min}}^{p_{\max}} R_h(t - px, p) dp \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{p_{\min}}^{p_{\max}} R_h^{(1)}(t - px, p) dp, \end{aligned} \quad (4.4)$$

где

$$R_h(\tau, p) = H\{R(\tau, p)\} = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{R(\theta, p)}{\tau - \theta} d\theta \quad (4.5)$$

преобразование Гильберта от преобразования Радона. Соотношения (4.3)-(4.5)- суть фильтрации по скорости в  $(\tau - p)$ -области. В отличие от времени пробега  $t$  в (4.2), которое привязывается к пространственным координатам наблюдения  $x$ , под  $\tau$  в (4.3) понимается приведенное время пробега т.к. пространственная координата исключается. Для ВАК  $\tau$  принято приводить к середине антенной решетки.

Предполагается, что фильтрация полосовая – по результатам в  $y_{new}(t, x)$  от исходной  $y(t, x)$  сохраняются составляющие волны с интервальными временами  $p$  (величина, обратная скорости, или *slowness*) только в диапазоне  $[p_{\min}, p_{\max}]$ . Отметим, что преобразование Радона (4.5) совместно с производной в (4.4) и знаменателем  $2\pi$  составляют идеальной «rho-фильтр» в  $(\tau - p)$ -области [269].



#### 4.1.2 Преобразование Радона через $(f-p)$ -область

Применим теперь одномерное преобразование Фурье к исходной функции  $y(t, x)$

$$Y(\omega, x) = F\{y(t, x)\} \quad (4.6)$$

и соотношению (4.3), и учитывая свойство сдвига преобразования Фурье, получим

$$R_F(\omega, p) = F\{R(\tau, p)\} = \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} Y(\omega, x) \cdot e^{j\omega \cdot p \cdot x} dx, \quad (4.7)$$

где  $\omega=2\pi \cdot f$  – круговая частота. Далее, применяя преобразование Фурье к (4.4) можно записать [217]

$$Y_{new}(\omega, x) = \frac{|\omega|}{2\pi} \cdot \int_{p_{\min}}^{p_{\max}} R_F(\omega, p) \cdot e^{-j\omega \cdot p \cdot x} dp; \quad (4.8)$$

$$y_{new}(t, x) = F^{-1}\{Y_{new}(\omega, x)\}.$$

Соотношения (4.6)-(4.8) - суть фильтрации по скорости в  $(f-p)$ -области. Отметим, что первый сомножитель перед интегралом в (4.8) и есть «идеальный» *rho*-фильтр в  $(f-p)$ -области [269].

#### 4.1.3 Применение Ram-Lak фильтров (КИХ *rho*-фильтрация)

Цифровая реализация фильтрации по скорости укладывается в схему: *наклонное суммирование – rho фильтрация – обратное\_наклонное суммирование*. В  $(\tau-p)$ -области *rho фильтрация* заключается в преобразовании Гильберта и вычислении ее производной. В компьютерной томографии вычисление преобразования Гильберта в явном виде не выполняют - *rho* фильтрацию выполняют с помощью специального КИХ (с конечной импульсной характеристикой) фильтра. Идеальная импульсная характеристика *rho* фильтра определяется как

$$\rho(\omega) = |\omega| \xrightarrow{\omega \rightarrow t} \rho(t) = \frac{1}{t^2} + \delta(t).$$

Результат фильтрации определяется интегралом свертки (без явных вычислений преобразования Гильберта и производной)

$$R_h(\tau, p) = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{d\tau} \mathcal{H}[R(\tau, p)] \Rightarrow R_h(\tau, p) = \int_0^{\infty} R(t, p) \rho(\tau - t) dt.$$

Реализация цифрового *rho* КИХ-фильтра (для свертки с проекцией во временной области – по  $\tau$  – для получения производной от преобразования Гильберта проекции) впервые исследована Г. Рамачандраном и А. Лакшминараянаном, и называется их именами (Ram-Lak). Результат свертки добавляет высокочастотный шум и может усилить помехи. Другие реализации – умножение Ram-Lak на окно Shepp-Logan, Cosine, Hann (Hanning), Hamming. На рис. 4.1 представлена импульсная характеристика КИХ *rho*-фильтра.

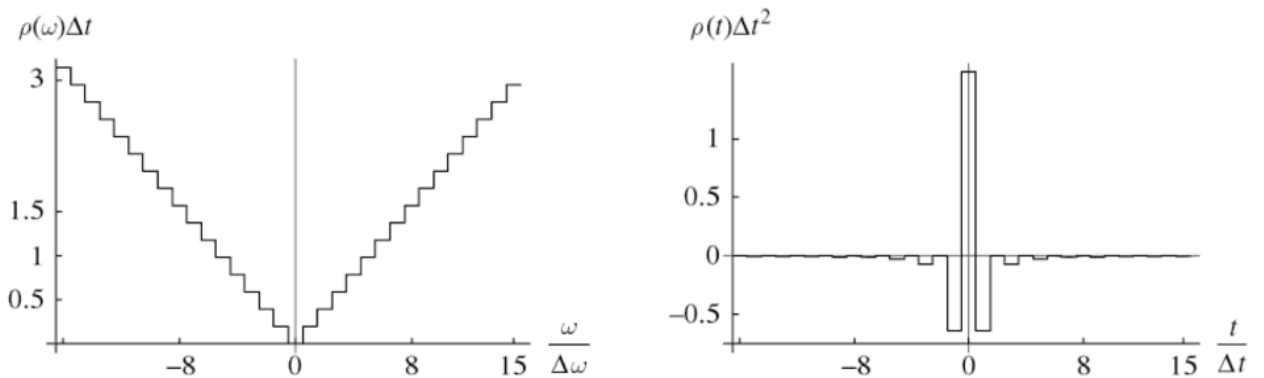


Рис. 4.1. Импульсная характеристика КИХ *rho*-фильтра.

## 4.2 Вычислительная реализация

Вернемся к исходному акустическому массиву (4.1) и рассмотрим особенности вычислительных реализаций схем (4.3)-(4.5) и (4.6)-(4.8)

### 4.2.1 Вычислительная реализация через $(\tau - p)$ -область

Диапазон интервальных времен  $[p_{\min}, p_{\max}]$  разобьем на  $(L-1)$  отрезков. Если исходный массив  $y(k, m)$  имеет размерность  $N \times M$ , то массив  $R_h(k, l) \Leftrightarrow R_h(\tau, p)$  будет иметь размерность  $N \times L$ . И так как  $L \gg M$ , применим преобразование

Гильберта к исходному массиву  $y(k, m)$  в целях снижения вычислительных затрат. Формула (4.5) не применяется в приложениях для вычисления преобразования Гильберта, вместо нее применяется вычислительная схема с использованием одномерного прямого и обратного быстрого преобразования Фурье [70]

$$y_h(k = \overline{0, N-1}, m) = FFT^{-1}\{W(k = \overline{0, N-1}) \cdot FFT\{y(k = \overline{0, N-1}, m)\}\} \quad (4.9)$$

где  $W(k)$  – фильтр, реализующий в частотной области зависимость

$$W(\omega) = \begin{cases} -j, & \omega > 0; \\ 0, & \omega = 0; \\ j, & \omega < 0. \end{cases}$$

Интеграл преобразования Радона приближается «наклонным суммированием»

$$\begin{aligned} R_h(k, l) &= \Delta x \cdot \sum_{m=0}^{M-1} y_h(\underbrace{k + l \cdot m \cdot \Delta p \cdot \Delta x / \Delta t + a, m}_q) \\ &= \Delta x \cdot \sum_{m=0}^{M-1} y_h(\underbrace{k + p(l) \cdot x(m) / \Delta t, m}_q) \end{aligned} \quad (4.10)$$

где  $\Delta p$  - шаг по интервальному времени, параметр  $a$  - приводит к середине антенной решетки и  $p_{\min}$ .

Производные в (4.4) по  $t$  приближаются разностями и центрируются сдвигом на полшага по времени

$$R_h^{(1)}(k + 1/2, l) = \frac{R_h(k + 1, l) - R_h(k, l)}{\Delta t} \quad (4.11)$$

Теперь интеграл (4.4) приближается «обратным наклонным суммированием»

$$R_h^{(1)}(k + 1/2, l) = \frac{R_h(k + 1, l) - R_h(k, l)}{\Delta t} \quad (4.12)$$

$$\begin{aligned}
y_{new}(k, m) &= \frac{\Delta p}{2\pi} \cdot \sum_{l=0}^{L-1} R_h^{(1)}(\underbrace{k - l \cdot m \cdot \Delta p \cdot \Delta x / \Delta t + a, l}_q) \\
&= \frac{\Delta p}{2\pi} \cdot \sum_{l=0}^{L-1} R_h^{(1)}(\underbrace{k - p(l) \cdot x(m) / \Delta t, l}_q).
\end{aligned} \tag{4.13}$$

Результат фильтрации - массив  $y_{new}(k, m)$  - сохраняет исходную размерность  $N \times M$ , но уже не содержит составляющих волн с интервальными временами вне полосы  $[p_{\min}, p_{\max}]$ .

#### 4.2.2 Вычислительная реализация через $(f-p)$ -область

Основным недостатком описанной выше реализации является необходимость интерполяции при сдвиге в (4.10) и в (4.12). Во второй реализуемой схеме фильтрации применяется как раз свойство сдвига преобразования Фурье.

Сначала выполняется одномерное быстрое преобразование Фурье исходных массивов

$$Y(k = \overline{0, N-1}, m) = FFT\{y(k = \overline{0, N-1}, m)\}, \tag{4.14}$$

затем по (4.7) вычисляется одномерное преобразование Фурье от преобразования Радона

$$\begin{aligned}
R_F(k, l) &= \Delta x \cdot \sum_{m=0}^{M-1} Y(k, m) \cdot \exp\{j \cdot k \cdot \Delta \omega \cdot (l \cdot m \cdot \Delta p \cdot \Delta x + a \cdot \Delta t)\} \\
&= \Delta x \cdot \sum_{m=0}^{M-1} Y(k, m) \cdot \exp\{j \cdot \omega(k) \cdot p(l) \cdot x(m)\},
\end{aligned} \tag{4.15}$$

где шаг по круговой частоте

$$\Delta \omega = \frac{2\pi}{N \cdot \Delta t}.$$

Уравнение (4.15) удобно представлять в матричной форме

$$R_F(k, l = \overline{0, L}) = \Delta x \cdot Y(k, m = \overline{0, M-1}) \cdot \mathbf{C}^T, \tag{4.16}$$

где  $\mathbf{C}$  - матрица размером  $L \times M$

$$\mathbf{C} = \exp[j \cdot \omega(k) \cdot p^T (i = \overline{0, L-1}) \cdot x(m = \overline{0, M-1})].$$

Уравнение (4.8) при вычислительной реализации в матричной форме приобретает вид

$$Y_{new}(k, m = \overline{0, M-1}) = \Delta p \cdot \frac{|\omega(k)|}{2\pi} \cdot R_F(k, i = \overline{0, L-1}) \cdot \mathbf{C}. \quad (4.17)$$

Теперь, подставляя (4.16) в (4.17), получим изящный результат

$$Y_{new}(k, m = \overline{0, M-1}) = Y(k, m = \overline{0, M-1}) \cdot \mathbf{D}, \quad (4.18)$$

где  $\mathbf{D}$  – квадратная матрица размером  $M \times M$ . Результат же самой фильтрации - после одномерного обратного быстрого преобразования Фурье по каждому приемнику

$$y_{new}(k = \overline{0, N-1}, m) = FFT^{-1}\{Y_{new}(k = \overline{0, N-1}, m)\}. \quad (4.19)$$

### 4.3 Отсечка по времени пробега

Допустим удалость методом Гильберт сембланс (методом сембланс, методом фазового суммирования) построить кривую интервального времени (*slowness*) P- (или S-) волны по глубине скважины.

Построим теперь соответствующую приведенную синтетическую кривую первоприбытия по глубине скважины как скользящее среднее величины *slowness* на отрезке между излучателем и серединой антенной решетки умноженное на длину этого отрезка. Назовем кривую как  $T_1$ .

Значение  $T_1$  для каждой точки по глубине скважины предлагается рассматривать как вертикальную отсечку в  $(\tau - p)$ -области для преобразования Радона (4.3)

$$R(\tau < T_1, p) = 0 \quad (4.20)$$

Предполагается, что после обратного преобразования Радона не только визуально начальный отрезок записей по каждому каналу будет чище, но и сама волна несколько очистится от фантомных шумов.

#### 4.4 Усиление когерентной составляющей

Для сильно зашумленных паразитной волной данных преобразование (4.4) может не привести к желаемому результату. Для усиления когерентной составляющей предлагается взвесить результат прямого преобразования Радона мерой когерентности (2.7) – Гильберт сембланс

$$y(x, \tau) = \mathfrak{R}_{p_x}^{-1} \{R(\tau, p) \cdot STCH^q(\tau, p)\} \quad (4.21)$$

где  $q$  рекомендуется выбирать в интервале  $(0 \div 1]$ .

Кроме того, автор предполагает, что предварительное применение к Гильберт сембланс в (4.21) фильтрации на основе сингулярного разложения (см. Глава 3) дополнительно позволит подавить и «фантомные» шумы в диапазоне  $[p_{\min} p_{\max}]$ . Эти шумы связаны с оставшимися проявлениями когерентных событий при пропуске пар полуволин для составляющих, которые отсекается вне диапазона  $[p_{\min} p_{\max}]$ . Если эти проявления после прямого преобразования Радона не подавить, то после обратного преобразования Радона они остаются не компенсированными и проявляются шумами. Фантомные проявления можно явно наблюдать на безоконном спектральном сембланс (см рис. 1.36 – эти проявления на тех же частотах, что и «несущая» составляющая), на традиционном оконном сембланс они не наблюдаются (см. рис. 1.31), а на безоконном Гильберт сембланс (см. рис. 2.4) – «вееерными» шумами. Эти «вееерные» шумы вместе другими шумами удаётся подавить фильтрацией на основе сингулярного разложения практически без изменения локализации (вступление, продолжительность) пятен всплесков когерентной мощности оставшихся составляющих

Итак, по результатам фильтрации по скорости новый массив  $y_m(t)$  уже не будет содержать составляющих волн, интервальные времена которых расположены вне диапазона  $[p_{\min} p_{\max}]$ .

Проиллюстрируем работу предлагаемого метода на примерах.

## 4.5 Примеры

### 4.5.1 Пример 2. Каротаж в процессе бурения.

Данные для примера любезно предоставлены фирмой Baker Hughes. Запись прибора акустического каротажа в процессе бурения (LWD) SoundTrak. Из условия обеспечения жесткости прибора LWD, передающего нагрузку на долото, щели (рис. 4.2), увеличивающие пробег волны по корпусу не предусмотрены. Поэтому корпусная волна забивает Р- и даже S-волну если не применять специальные приемы, которые составляют предмет ноу-хау (в данном случае компании Baker Hughes).

Излучатель - цилиндрический пьезоэлектрический кристаллический, состоящий из трех продольных секций. Передатчик представляет собой группу из 4-х излучателей (угол между ними -  $90^\circ$ ). Основные режимы работы передатчика: монополюсный (для изучения Р-волн в низкоскоростных разрезах или Р- и S-волн в высокоскоростных разрезах) и квадрупольный (для изучения S(изгибных)-волн). Частота возбуждения Р и S-волн задается в диапазоне 2-15 кГц. Приемник представляет собой ортогональный пьезоэлектрических датчик (поршень). Прибор имеет 6 групп приемников по 4 в каждой группе (угол между приемниками -  $90^\circ$ ). Группы составляют антенную решетку с шагом 0,75 фута = 0,2286 м. Расстояние от передатчика до первого приемника составляет 11 футов. В процессе бурения по гидравлическому каналу каждые 30 секунд передаются всего три параметра: интервальные времена первых двух пиков проекции традиционного сембланс и оценка соотношения полезный\_сигнал/шум. Волновые картины только записываются в память прибора, оцифровка 32 бита. Режим излучения – монополюсный. Запись проблемная – мощность волны по корпусу самого прибора многократно превышает мощности составляющих волны по породе. Это не типичная ситуация, или просто брак: конструкция изолятора, размещенного между антенной решеткой и передатчиком, обеспечивает ослабление корпусной волны

до - 42 dB в диапазоне частот 10-15 кГц. Причина проблемы автору неизвестна, возможно, применялся полимерный раствор. Однако, в силу ряда причин, было принято решение продолжить бурение без поднятия компоновки.

На рис. 4.3а,б представлены ФКД по 1 и 6-му приемникам (группам приемников). На них с большим трудом угадывается проявление Р-волны на фоне высокой корпусной волны. Применение частотной фильтрации и традиционного сембланс тогда не позволили провести бурение по *online* оценкам интервального времени Р-волны. Хотя при этом оценка интервального времени волны по корпусу прибора составляла 220 мкс/м, а интервальное времени Р-волны было в диапазоне [320 560] мкс/м. По завершению бурения, на этом интервале был выполнен каротаж на кабеле, на рис. 4.3в прорисована соответствующая кривая оценки интервального времени Р-волны. Для сопоставления результатов фильтрации выберем сигнал по 3-му приемнику на отметке глубины 520.



Рис. 4.2. Прибор ВАК для LWD.

На рис. 4.4а представлен Гильберт сембланс для диапазона интервального времени [0 600] мкс/м. Основная часть когерентной мощность находится в диапазоне [200 300] мкс/м, где та самая паразитная волна по корпусу прибора, которую и необходимо удалить. Полезная Р-волна может располагаться в диапазоне [300 600] мкс/м. До 200 мкс/м информативного сигнала нет.



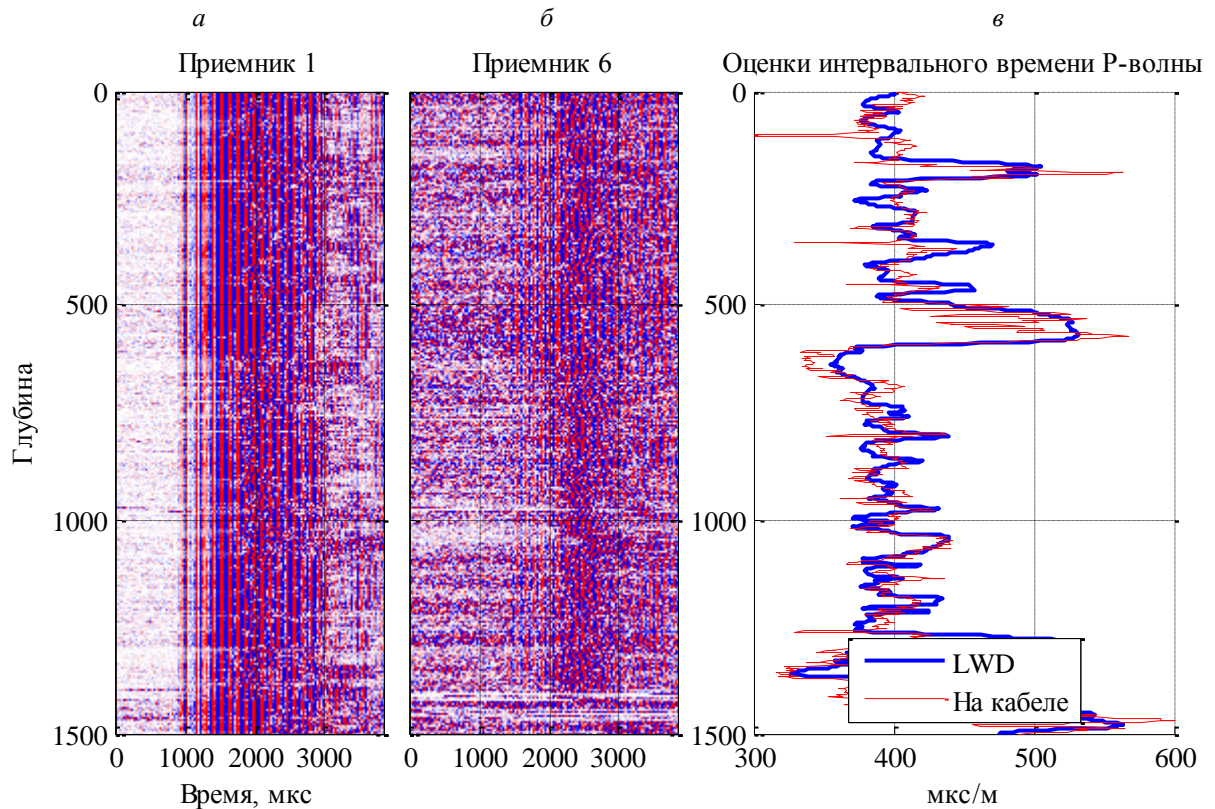


Рис. 4.3. Пример 2: а) ФКД по приемнику 1; б) ФКД по приемнику 6 (последний); в) оценки интервального времени Р-волны.

Отбросим когерентную мощность в диапазоне  $[0\ 300]$  мкс/м. В этом заключается основная идея метода – фильтрация в полосе в диапазоне  $[p_{\min}, p_{\max}]$ . На рис. 4.4б приведен сигнал по 3-му приемнику после такой фильтрации. Несмотря на то, что волна по корпусу значительно подавлена, шумы не позволяют оценить даже первоприбытие оставшейся Р-волны. Однако оценку интервального времени Р-волны все же удастся сделать, только не с помощью традиционного сембланс (рис. 4.5а), а с помощью Гильберт сембланс и фильтрации с применением сингулярного разложения при  $k=1$  (должна остаться только одна Р-волна) (рис. 4.5б). На рис. 4.3в приведена кривая оценок интервального времени Р-волны по глубине. Несмотря на проблему каротажа при бурении, оценка хорошо совпадает оценкой по каротажу на кабеле. На отметке глубины оценка 416 мкс/м, а на кабеле – 409 мкс/м. Возникает вопрос – зачем нужна дальнейшая обработка, если основная задача оценки интервального времени выполнена? Ответ – чтобы выделить Р-волну, например, для оценки затухания.

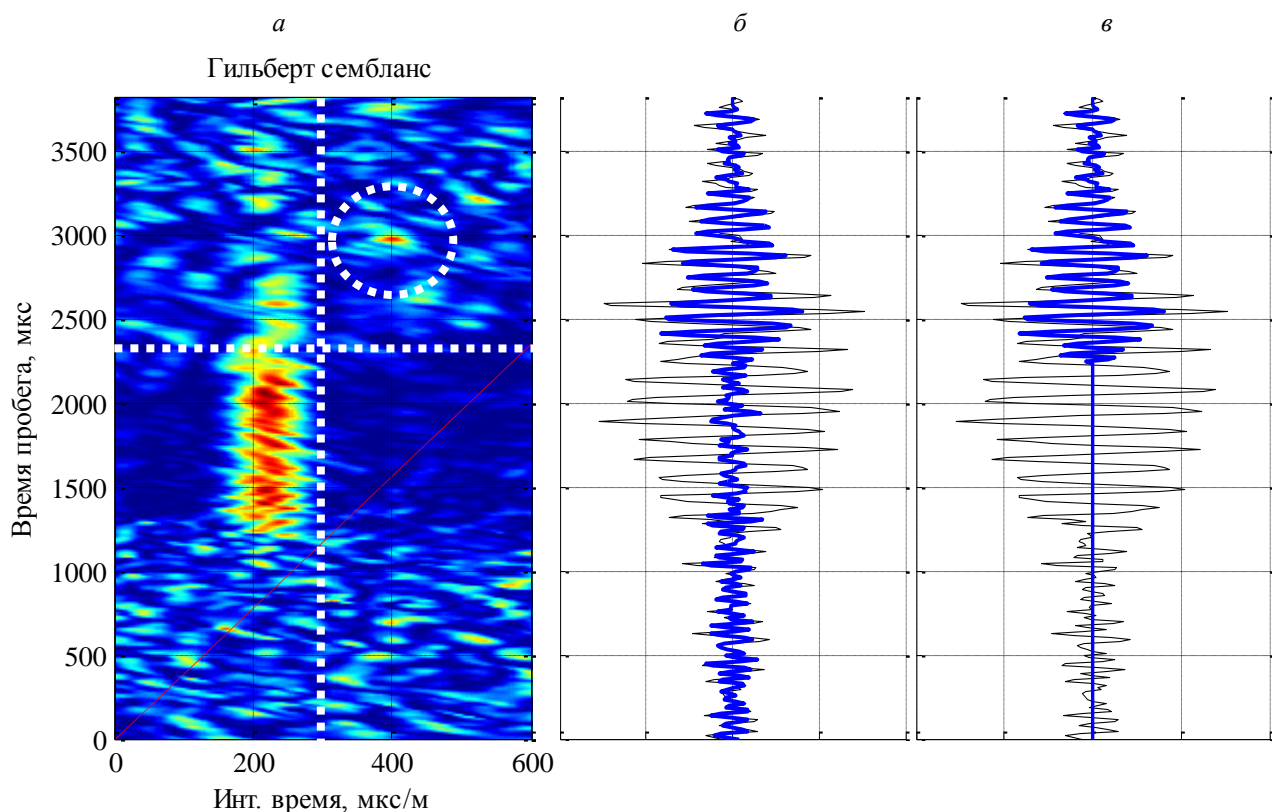


Рис. 4.4. Пример 2. Отметка 520: а) Гильберт сембланс; б) Приемник 3, исходный сигнал и после отсечки сигнала по корпусу  $[p_{\min}, p_{\max}]$ ; в) Приемник 3 после дополнительной отсечки по первоприбытию к середине антенной решетки.

Очень важный момент предлагаемого метода фильтрации – предварительная оценка интервального времени должна быть выполнена для всех точек каротажа. По ним как скользящая сумма вычисляется синтетическая кривая времени первоприбытия к середине антенной решетки. Эта кривая – приближенная – добавим к ее значениям удвоенную оценку времени пробега в жидкости от прибора до стенки скважины (рис. 4.6в). Только теперь можно приступить ко второй полосовой фильтрации в  $(\tau - p)$ -области - по приведенному времени пробега  $\tau$  в диапазоне  $[\tau_{\min}, \tau_{\max}]$ . На отметке глубины эта полоса -  $[0 \ 2321]$  мкс. На рис. 4.4в приведен результат такой дополнительной фильтрации. Будем считать, что мы выделили Р-волну (это доступно по каждому приемнику) и можем оценивать ее параметры. На рис. 4.6а,б представлены ФКД по 1 и 6-му приемникам (группам приемников) после предлагаемой фильтрации.

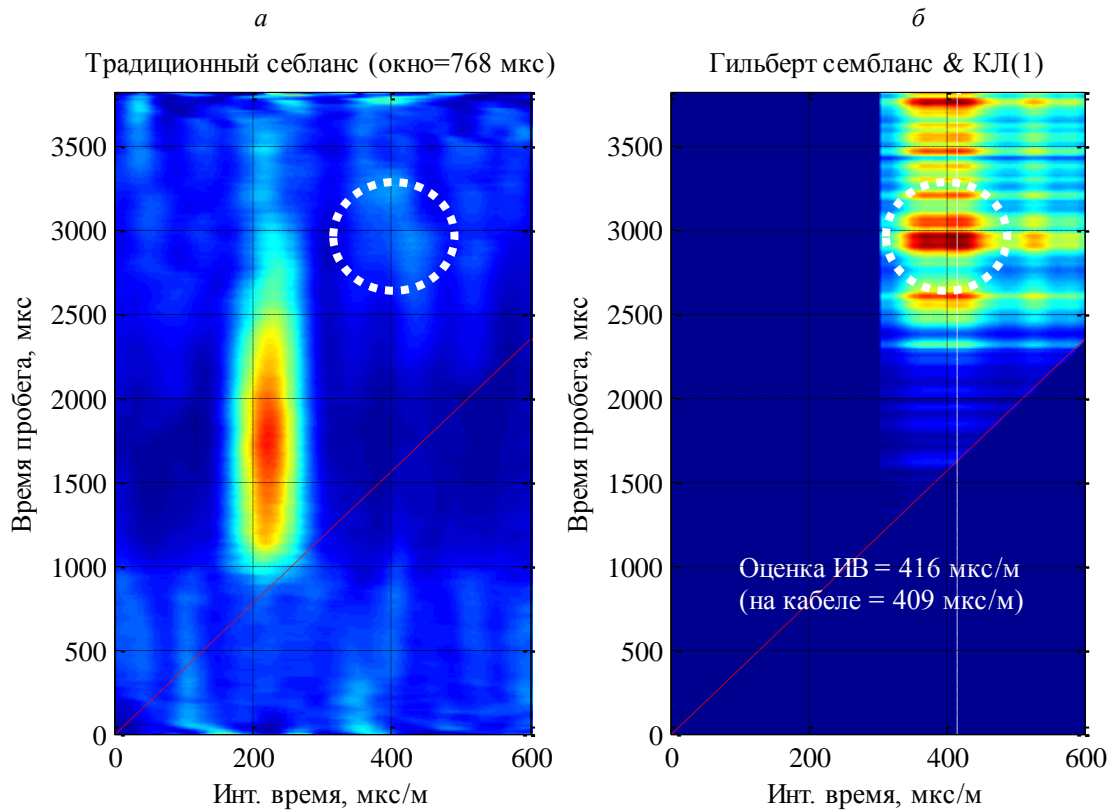


Рис. 4.5. Пример 2. Отметка 520: а) Традиционный себланс; б) Гильберт себланс и фильтрации на основе сингулярного разложения.

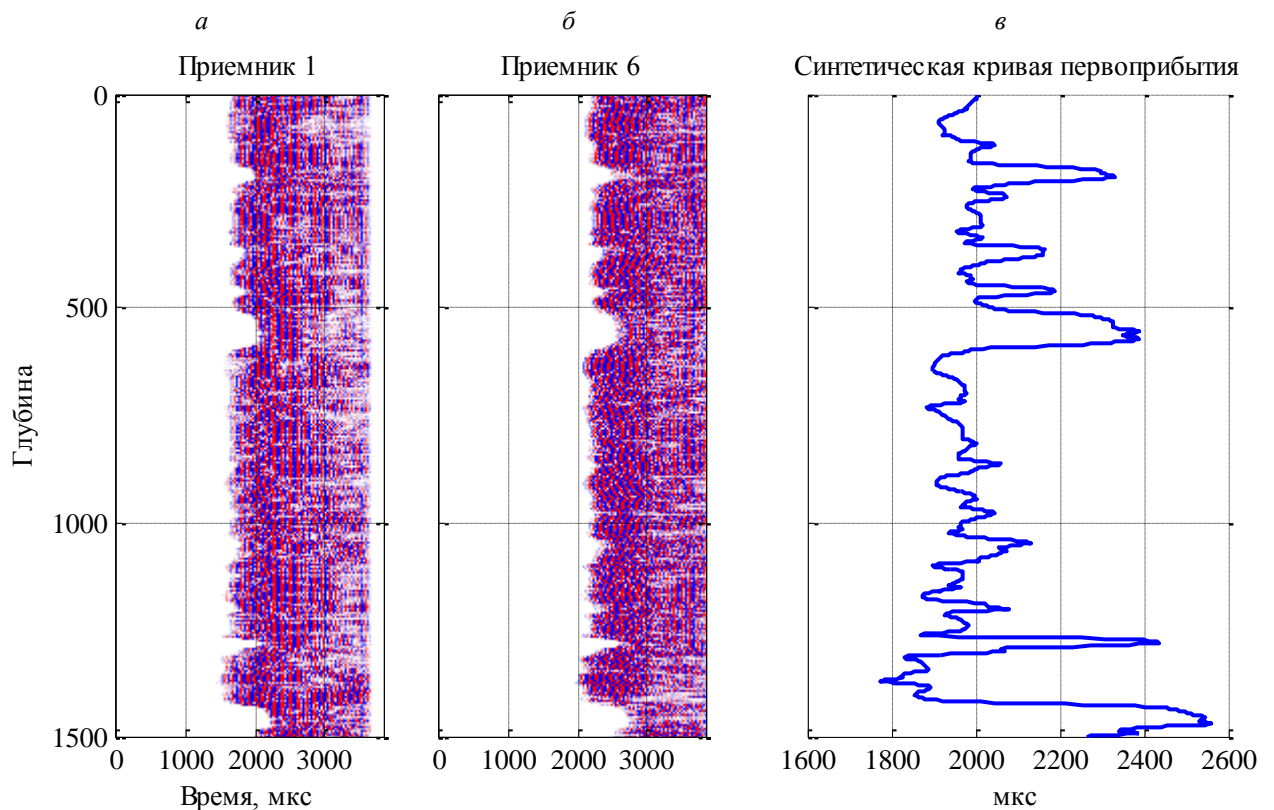


Рис. 4.6. Пример 2. Результат фильтрации: а) ФКД по приемнику 1; б) ФКД по приемнику 6 (последний); в) синтетическая кривая первоприбытия.

#### 4.5.2 Пример 3. Каротаж через обсадную колонну.

Проблема – волна по обсадной колонне «забивает» Р-волну. Данные для примера любезно предоставлены фирмой Baker Hughes. ВАК выполнен на действующей скважине (более 30 лет) с целью доразведки в терригенных отложениях. Серийный прибор ХМАС F1 содержит 8 приемников. Расстояние от передатчика до первого приемника 11 футов  $\approx 3,35$  м, расстояние между приемниками 0,5 фута  $\approx 0,15$  м, частота возбуждения около 8 кГц, оцифровка динамическая – 32 бита. На рис. 4.7а,б представлены ФКД по 1-му и 8-му приемникам после частотной фильтрации [6 20] кГц. На рис. 4.7в представлены проекции традиционного сембланс по глубине.

На начальном интервале скважина хорошо цементирована и волна по обсадной колонне практически отсутствует. Ниже отметки  $\sim 160$ , мощность волны Лэмба проходящей по плохо схваченной цементом обсадной колонне, превышает мощность Р-волны, проходящей к приемникам от горной породы.

Интервальное время волны Лэмба по колонне составляет  $\sim 184$ -194 мкс/м, а диапазон исследуемой Р-волны [280 380] мкс/м. Поэтому зададим полосу подавления интервального времени [0 280] мкс/м. На рис. 4.7г приведены проекции по глубине Гильберт сембланс с дополнительной фильтрацией по сингулярному разложению, а также оценка интервального времени Р-волны по этим проекциям. По оценкам интервального времени построена синтетическая кривая первого вступления, приведенного к середине антенной решетки. Значения этой синтетической кривой являются верхним пределом второй полосы фильтрации - в  $(\tau - p)$ -области - по приведенному времени пробега  $\tau$  в диапазоне  $[0, \tau_{\max}]$ . На рис. 4.7д,е представлены ФКД после фильтрации (уже возможно проводить интерпретацию данных ВАК и оценку ФЕС).

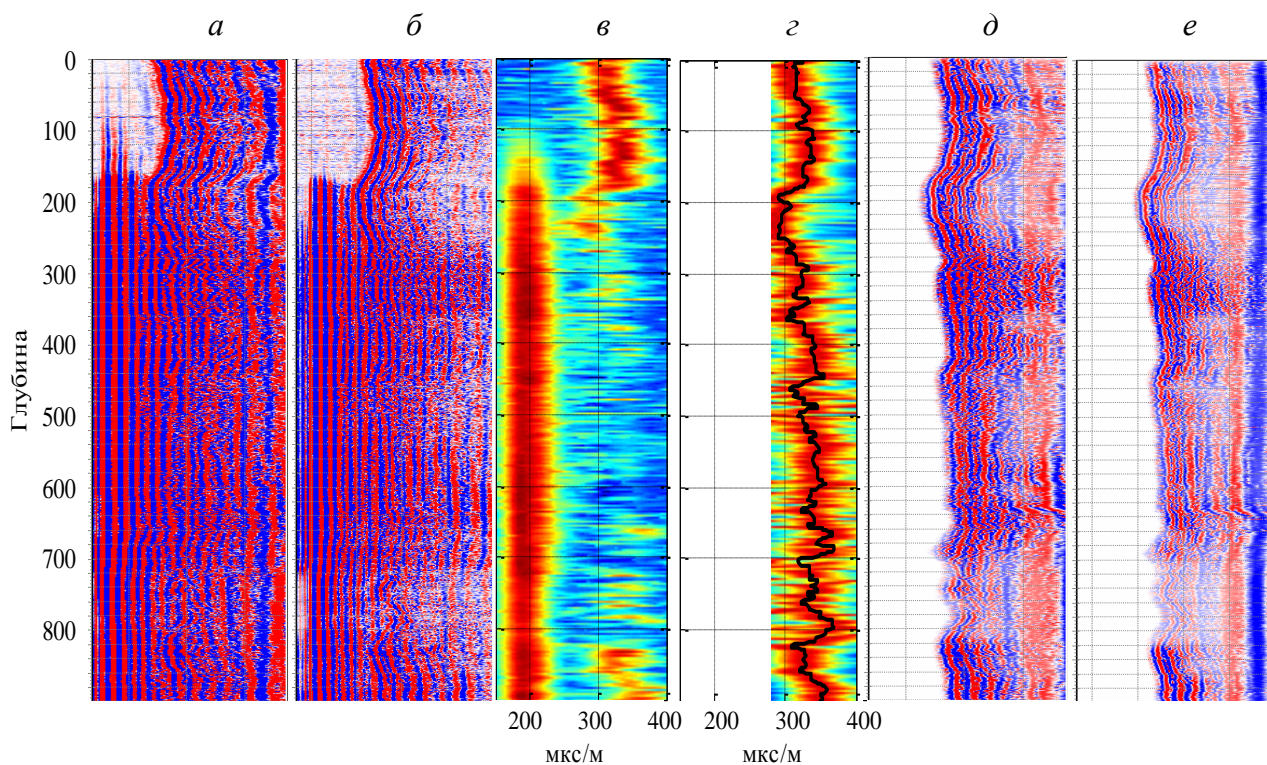


Рис. 4.7. Пример 3: а) ФКД по приемнику 1; б) ФКД по приемнику 8 (последний); в) проекция традиционного сембланс; г) проекция Гильберт сембланс и оценка интервального времени Р-волны; д) ФКД по приемнику 1 после фильтрации; е) ФКД по приемнику 8 после фильтрации.

На рис. 4.8 результаты фильтрации по 8-му приемнику представлены более детально. Здесь можно обратить внимание, что «проявилась» гидроволна

На рис. 4.10 представлены образы Гильберт сембланс и когерентной мощности на отметках 50 (25 футов) (хорошее цементирование) и 650 (325 футов) (плохое цементирование). На рис. 4.11 и рис. 4.12 представлены когерентная мощность, сигнал по 4-му приемнику и его спектрограмма на отметках 50 и 650 соответственно. В случае плохого качества цементирования отделить волну Р-волну от волны по колонне по частоте или времени прибытия практически невозможно – их частотные и временные диапазоны перекрываются (рис. 4.12). На отметке 650 (рис. 4.10в) волна по колонне распространяется с оцененным интервальным временем (*slowness, p*) 192 мкс/м, а Р-волна около 370 мкс/м и имеет примерно в 8 раз меньшую когерентную мощность (рис. 4.10г).

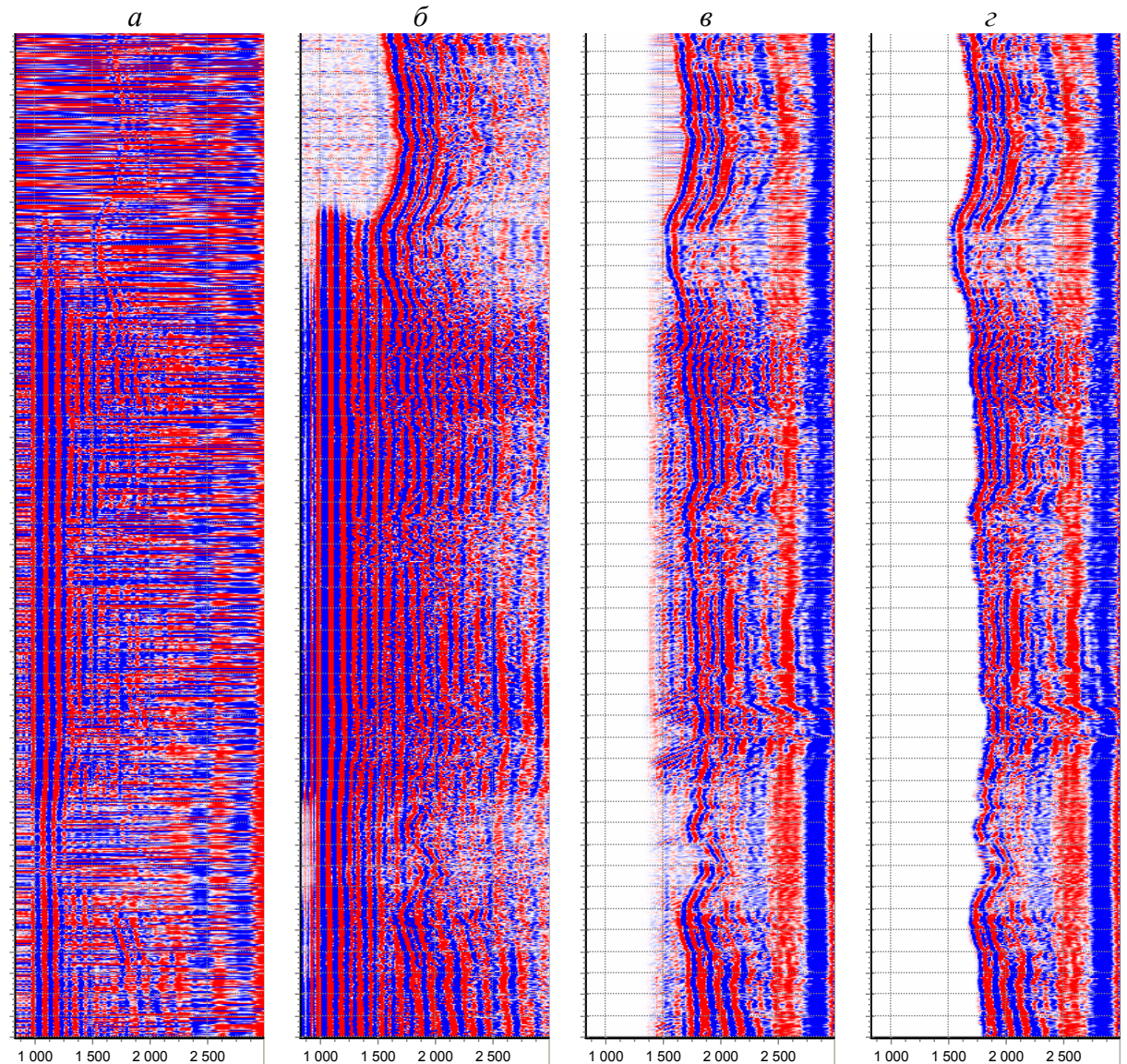


Рис. 4.8. Пример 3. ФКД по 8-му приемнику; а) исходная; б) после частотной фильтрации; в) после фильтрации по Радону; г) после интерактивной трассировки и повторной фильтрации с отсечкой

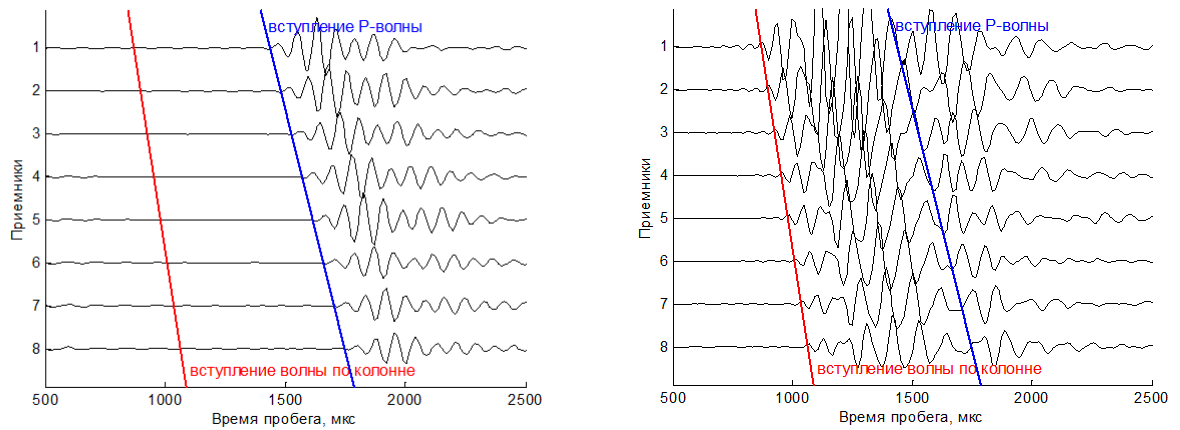


Рис. 4.9. Пример 3. Массивы ВАК исходные на отметках глубины: а) 50; б) 650.

Гильберт сембланс (2.7) как мера когерентности мощности позволяет нивелировать (привести) когерентную мощность и различить эти волны (рис. 4.10в). В рассматриваемом примере интервальное время Р-волны оценивалось за пределами скорости по колонне в диапазоне [260 450] мкс/м (см. рис. 4.10а).

Теоретически, волна по обсадной колонне должна исчезнуть после фильтрации по скорости, если отбросить когерентную мощность за пределами [260 450] мкс/м. В этом и заключается смысл основной фильтрации (рис. 4.13а). Однако, во-первых, для преобразования Радона присуще появление фантомных следов, если пределы интегрирования в (1.55) и (1.58) не бесконечные [121]. Во-вторых, приемников всего 8, что не вполне достаточно для приближения к интегральному преобразованию. Поэтому полностью исключить следы волны по обсадной колонне не удастся (рис. 4.13). Тем не менее, волна по колонне значительно подавлена. Свой вклад в подавление фантомов волны по обсадной колонне может внести взвешивание на значение Гильберт сембланс после *rank-k* аппроксимации. Такой вес усилит когерентную составляющую и подавит шумы сигналов по приемникам и шумы когерентных фантомных событий, связанных с пропуском пар полуволн.

Далее можно осуществить фильтрацию по времени пробега. Метод Гильберт сембланс позволил нам оценить интервальное время Р-волны, и теперь мы можем построить синтетическую кривую первопробытия, приведенного к середине антенной решетки. Делается это следующим образом – усредняется оцененное интервальное время (рис. 4.15б) между излучателем и серединой антенной решетки и далее умножается на это расстояние. На рис. 4.15в приведена синтетическая кривая ее первопробытия, рассчитанная таким образом.

Дополнительная фильтрация по времени пробега заключается в отбрасывании когерентной мощности в  $(\tau - p)$ -области до значения приведенного времени первопробытия (рис. 4.14).

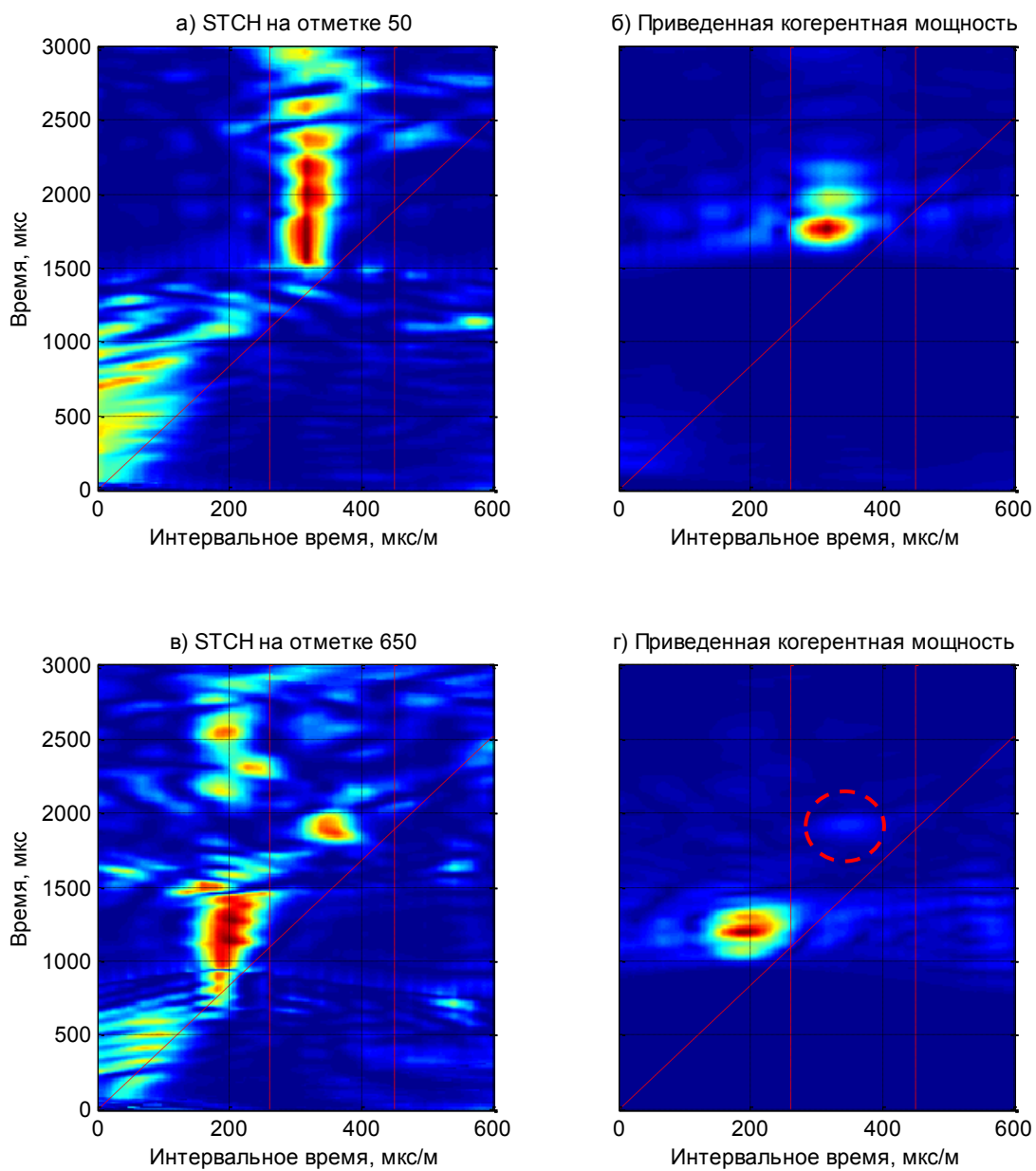


Рис. 4.10. Пример 3. Гильберт сембланс и когерентная мощность на отметках 50 (хорошее цементирование) и 650 (плохое цементирование)



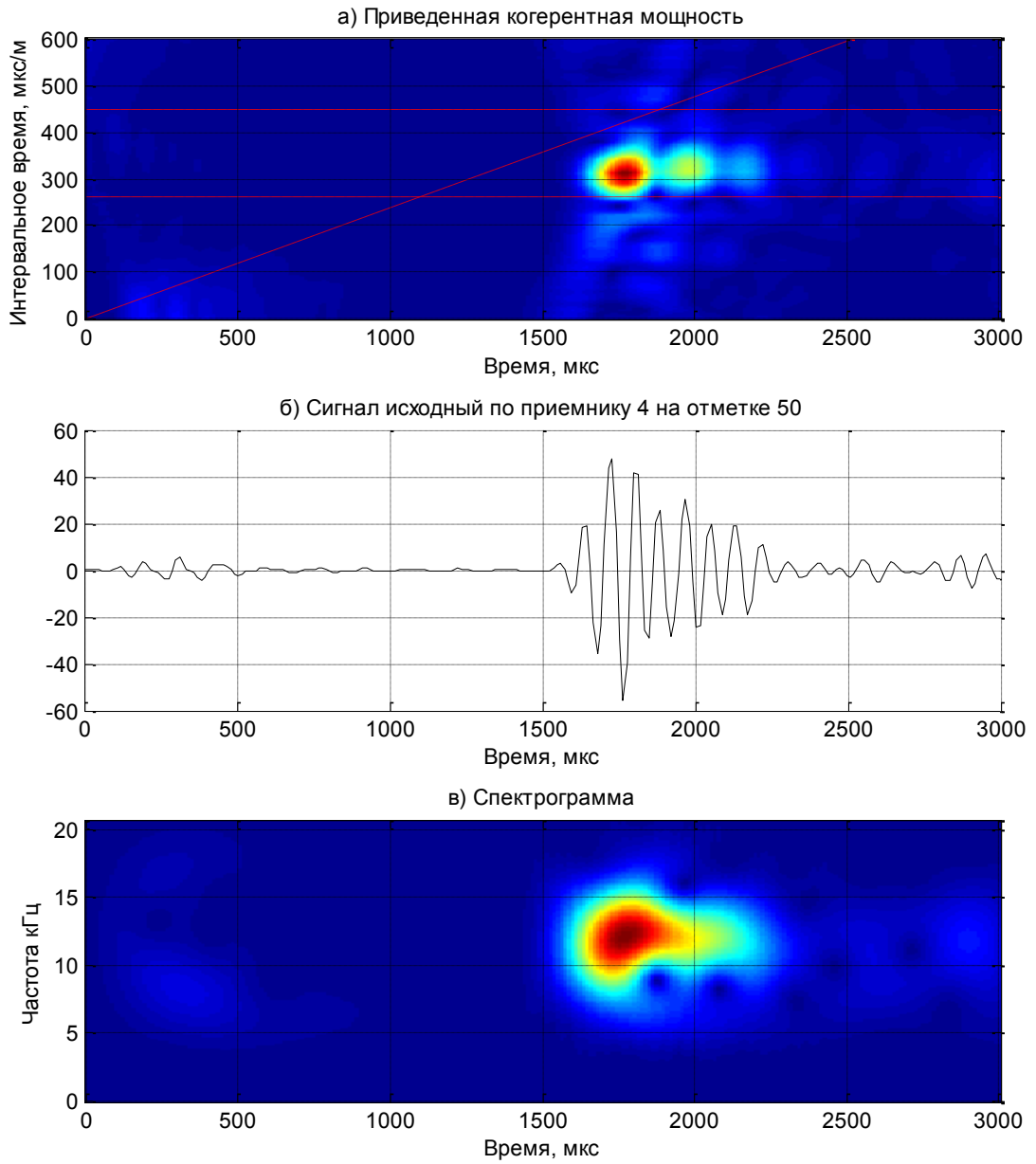


Рис. 4.11. Пример 3. Приведенная когерентная мощность, сигнал по 4-му приемнику и его спектрограмма на отметке 50 до фильтрации по скорости (после частотной фильтрации).

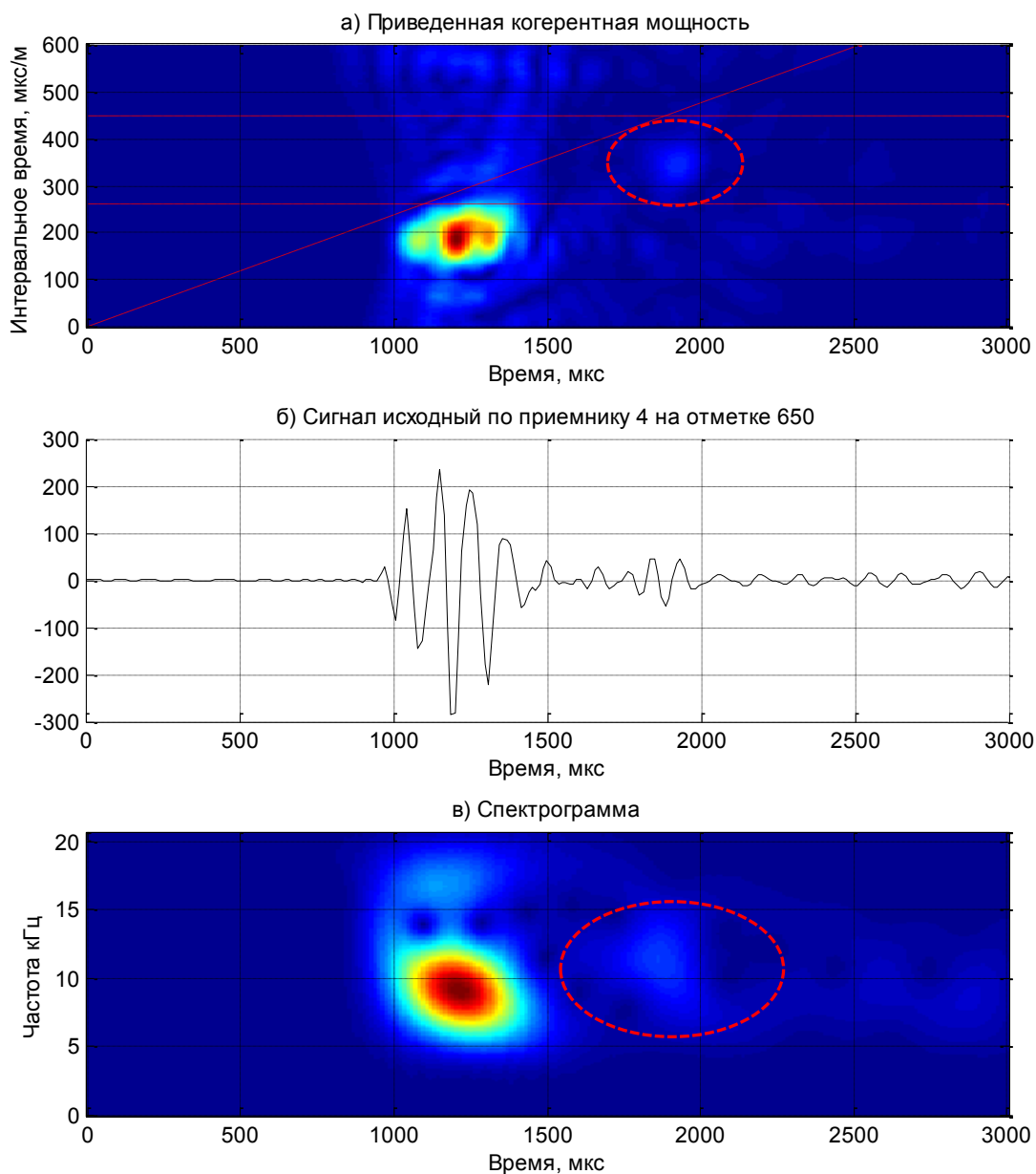


Рис. 4.12. Пример 3. Приведенная когерентная мощность, сигнал по 4-му приемнику и его спектрограмма на отметке 650 до фильтрации по скорости (после частотной фильтрации).

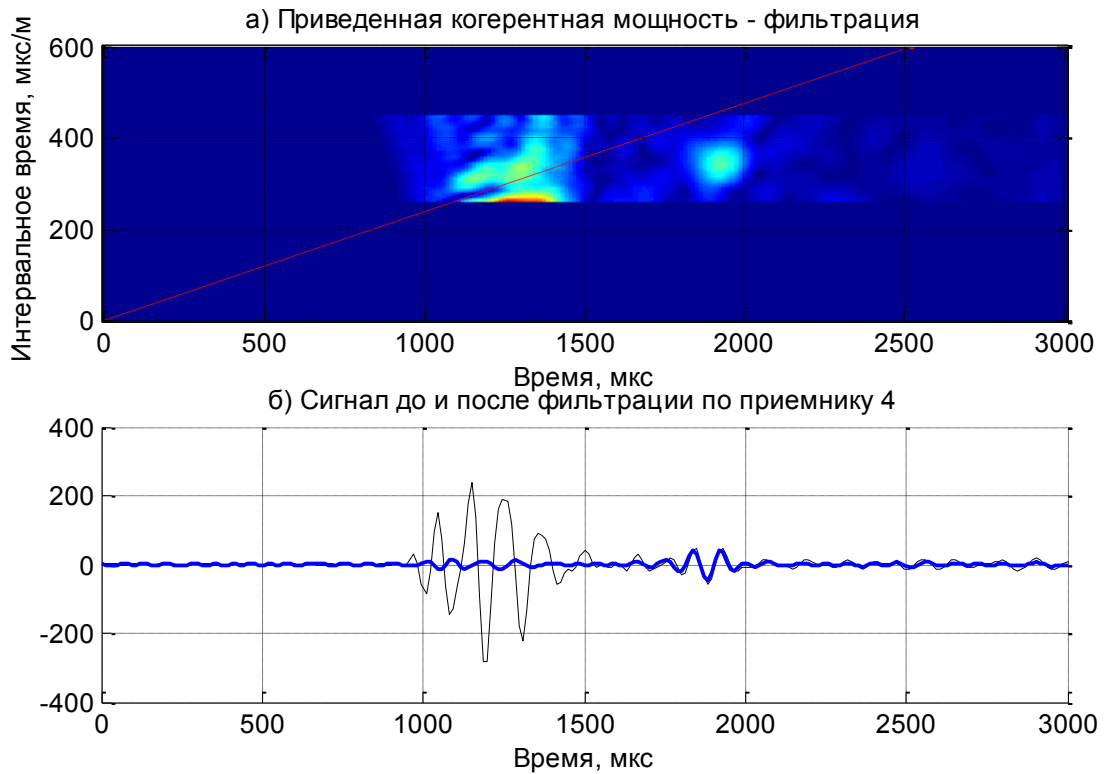


Рис. 4.13. Пример 3. Основная фильтрация по скорости [260 450] мкс/м на отметке 650 и результирующий сигнал по 4-му приемнику

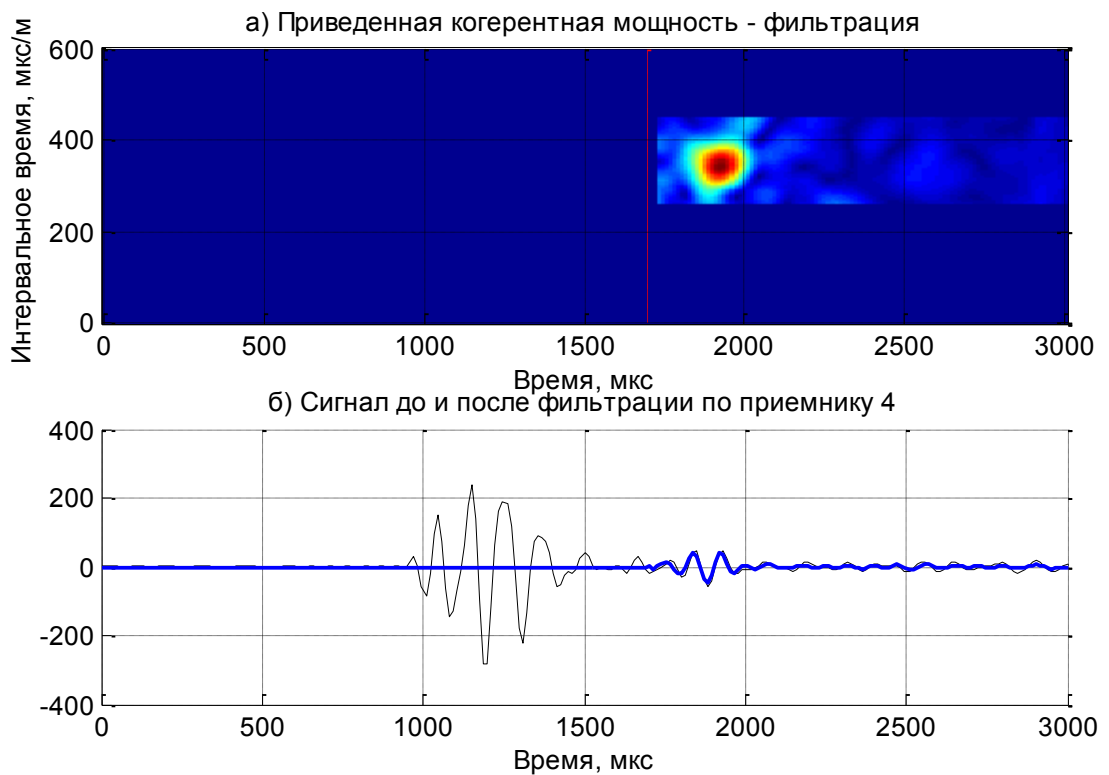


Рис. 4.14. Пример 3. Дополнительная фильтрация по времени пробега на отметке 650 и результирующий сигнал по 4-му приемнику

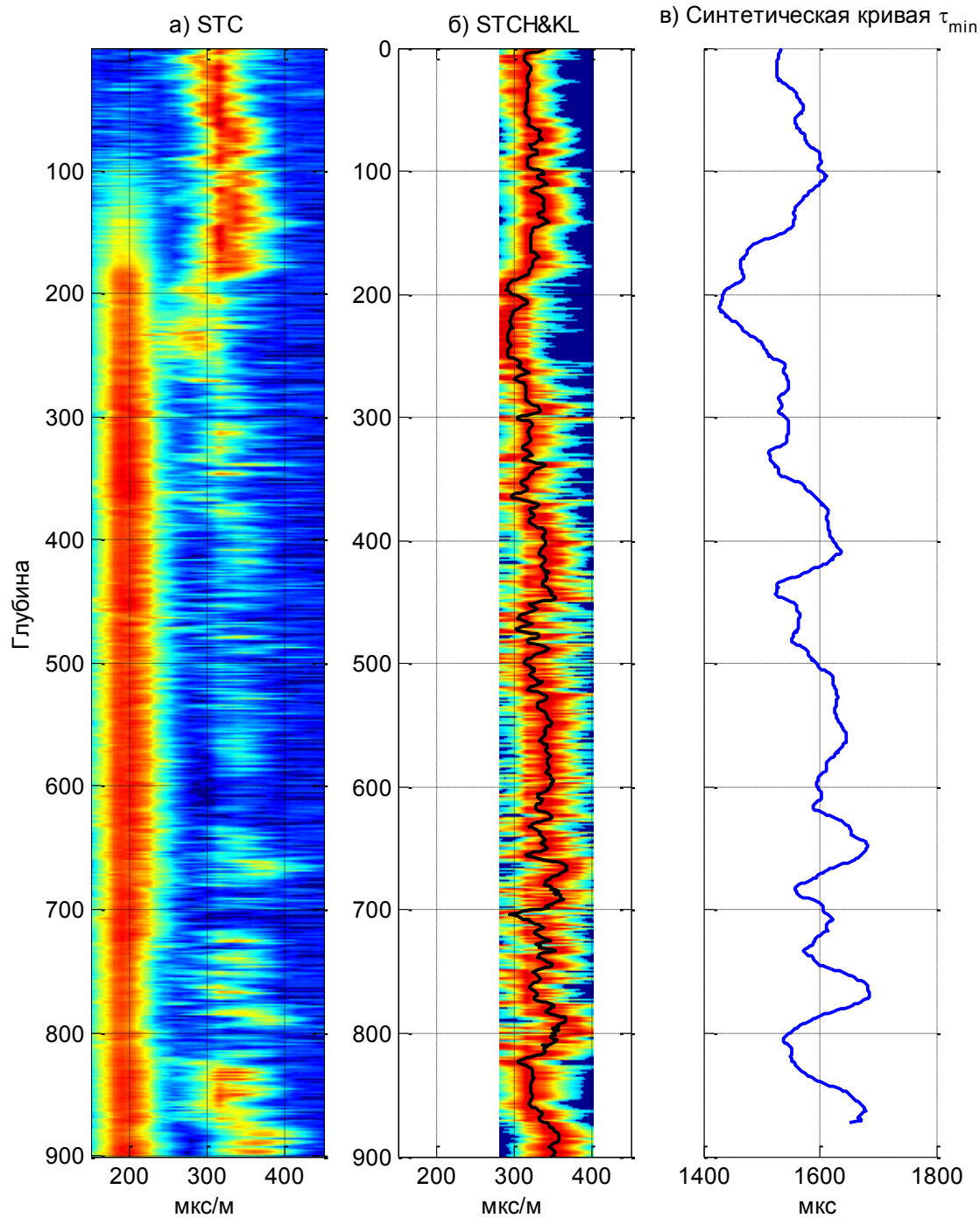


Рис. 4.15. Пример 3. а) проекция сембланс по глубине; б) оценка интервального времени Р-волны по проекции Гильберт сембланс; в) синтетическая кривая времени первопробытия Р-волны, приведенного к середине антенной решетки

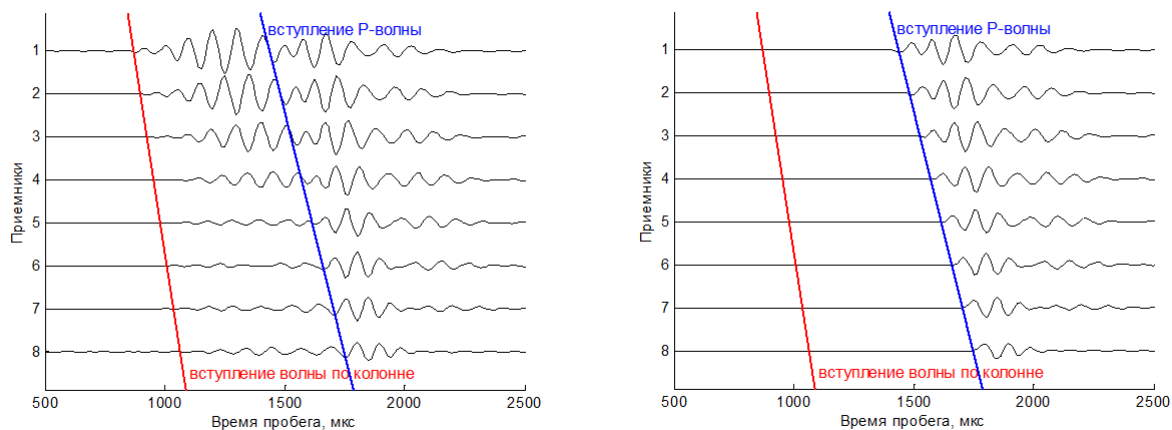


Рис. 4.16. Пример 3. Массив ВАК на отметке 650 после фильтрации по интервальному времени: а) без отсечки по  $\tau$ , б) с отсечкой по  $\tau$ .

На рис. 4.16 представлены массивы ВАК на одной из отметок по глубине до и после отсечки по приведенному времени пробега приведенному к середине антенной решетки. Отсечка очищает сигналы по приемникам левее некоторого луча, проведенного из точки  $\tau$ .

На рис. 4.17 представлены результаты прямого – обратного преобразования Радона с максимально возможными окнами в  $(\tau - p)$  и  $(f - p)$ -областях для приемника 4 на отметке глубины 650 с целью иллюстрации того, что применение  $\rho$ -фильтрации между прямым и обратным наклонным суммированием приводит к обращаемости. Здесь следует отметить, что без  $\rho$ -фильтрации обращаемость невозможна, хотя фазовые переходы (что важно для сейсмоки) сохраняются.

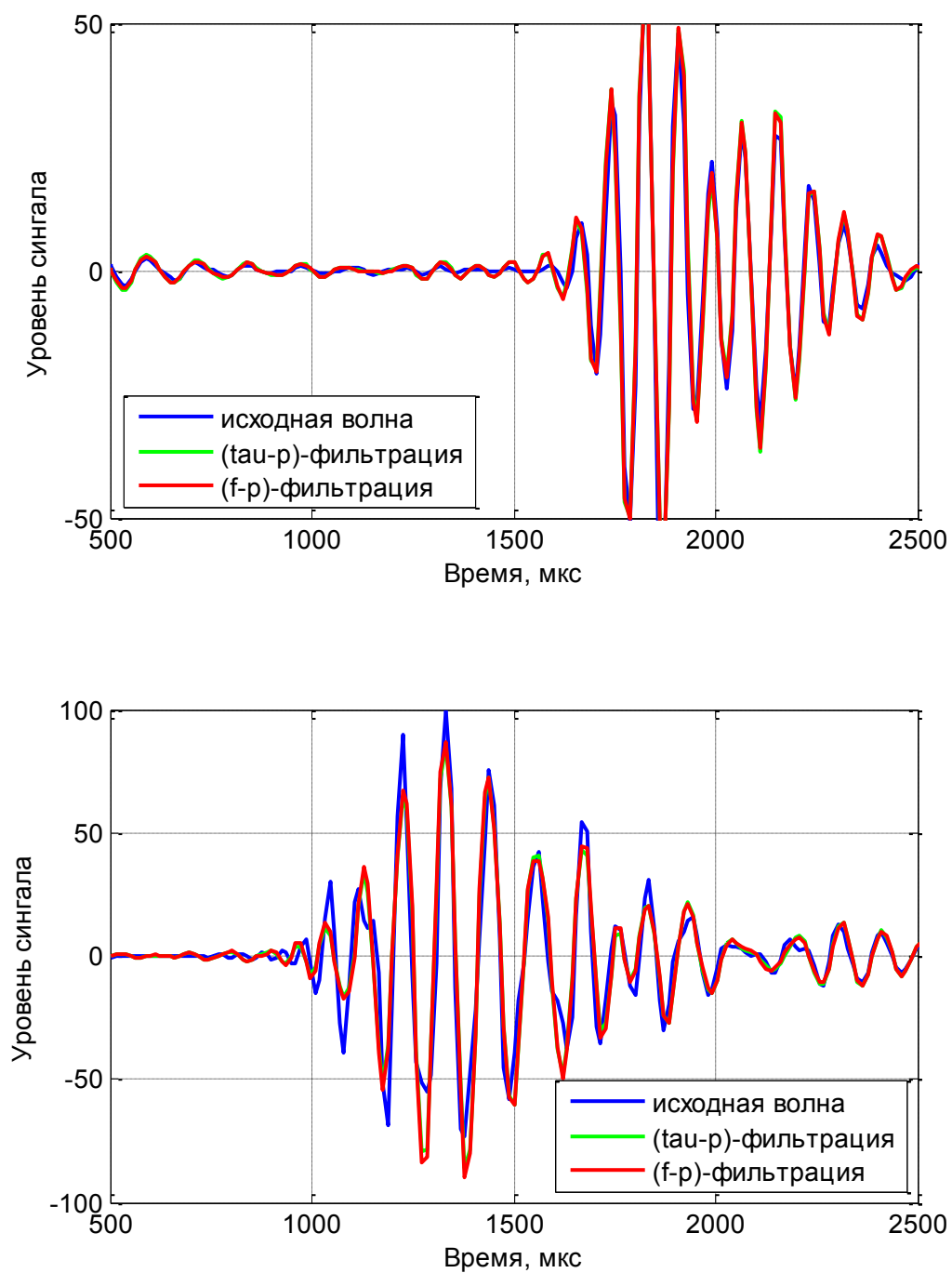


Рис. 4.17. Пример 3. Обращаемость фильтрации при максимально возможных прямоугольниках  $[\tau_{min} \tau_{max}]$ - $[p_{min} p_{max}]$  и  $[f_{min} f_{max}]$ - $[p_{min} p_{max}]$ .

#### 4.5.3 Пример 4. Каротаж через обсадную колонну.

Еще пример каротажа через обсадную колонну.

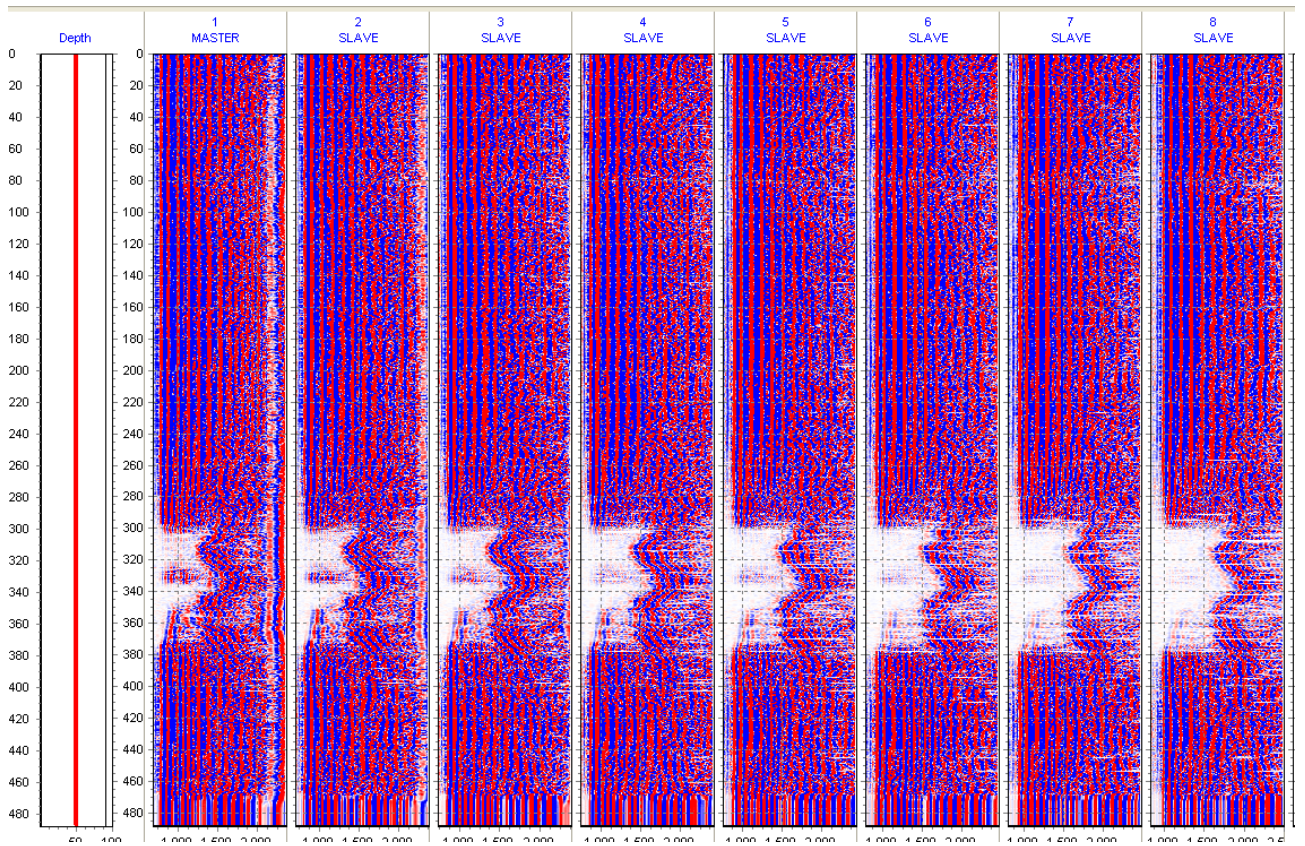


Рис. 4.18. Пример 4. Каротаж через обсадную колонну, до фильтрации.

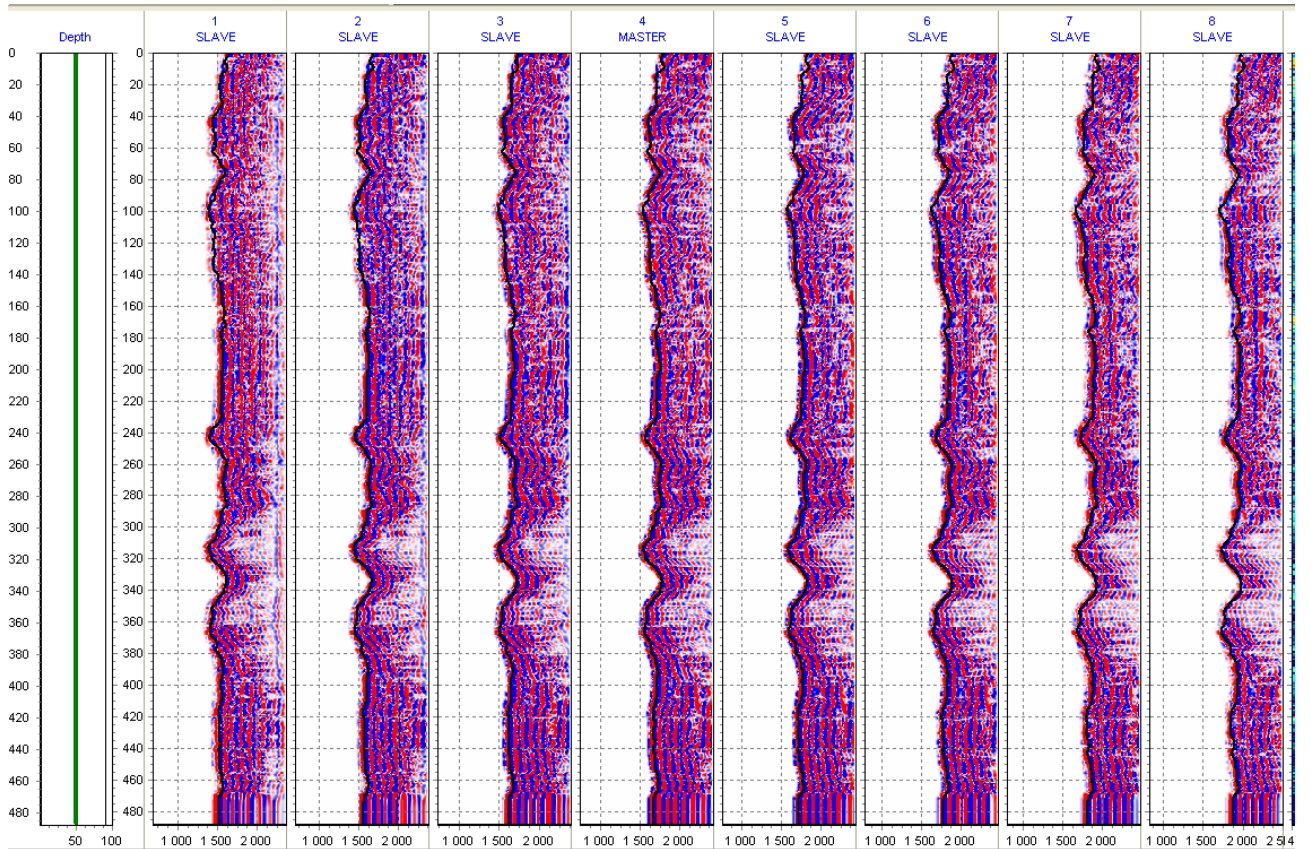


Рис. 4.19. Пример 4. Каротаж через обсадную колонну, после фильтрации.

Скважина в эксплуатации с 1974 года, в связи с выработанностью и заводнением пласта – продуктивность упала. На рис. 4.18 представлены ФКД по 8-ми приемникам до фильтрации. На рис. 4.19 представлены ФКД после фильтрации – удалена волна по обсадной колонне. По результатам интерпретации и сопоставления с ГИС в открытом стволе (от 1974 года, по скорости Р-волны) выделен новый перспективный объект (пласт-коллектор). После ремонтно-изоляционных работ (установки цементного моста) и реперфорации был получен приток нефти.

#### **4.6 Основные результаты и выводы по главе**

1. Для фильтрации массивов ВАК по скорости предложен метод на основе прямого и обратного преобразования Радона с выделением интервала интересующих скоростей в  $(\tau - p)$ -области.
2. Для дополнительной фильтрации предлагается отсекаать в  $(\tau - p)$ -области перед обратным преобразованием Радона интервал времени пробега от нуля до времени первопробытия интересующей волны, приведенного к середине антенной решетки времени. Время первопробытия синтезируется по предварительной оценке интервального времени интересующей волны.
3. Для дополнительной фильтрации слабокогерентных шумов предлагается перед обратным преобразованием Радона взвесить  $(\tau - p)$ -область значением Гильберт сембланс.
4. Метод позволяет эффективно подавлять неинформативные и выделять информативные волны.
5. Целесообразно применение метода для подавления волны по обсадной колонне при каротаже в целях доразведки и для подавления волны по стальному корпусу LWD приборов ВАК.
6. Опыт применения метода показал, что эффективность зависит числа от приемников (не менее 6-ти) и разрядности оцифровки (не менее 18-ти двоичных разрядов, при динамическом коэффициенте усиления).□



## ГЛАВА 5 РЕАЛИЗАЦИЯ ДИСПЕРСИОННОГО СЕМБЛАНС

Дисперсию проиллюстрируем на Примере 1 по волне Стоунли. На рис. 1.30 представлена запись многоэлементного ВАК в монопольном режиме (прибор ХМАС F1, 8 приемников, частота возбуждения  $f \approx 8$  кГц,  $dt=12$  мкс,  $N=432$  точки, «мертвое время»=360 мкс), на рис. 1.31 представлено изображение традиционного сембланс, на рис. 2.4 – изображение Гильберт сембланс, а на рис. 1.36 - изображение спектрального сембланс. На рис. 1.31 и рис. 2.4 отчетливо видны пятна когерентной мощности, соответствующие P-, S- и St-волнам. Комментируя рис. 1.36 отметим, что P-волна (как и следовало ожидать) не диспергирует - ее когерентная мощность распределена на одной скорости (интервальном времени). Как «P(фантом)» обозначены фантомные когерентные события P-волны, связанные с пропуском волн [266]. В представленном примере S-волна также не диспергирует. Для P- и S-волн в монопольном режиме характерно совпадение всплесков когерентности по параметру  $p$  (интервальное время, *slowness*) на изображениях традиционного и спектрального сембланс.

В рассматриваемом примере разрез низкоскоростной и для St-волны характерна нормальная дисперсия (рис. 1.35г) выше частоты  $f \approx 2$  кГц, однако начиная с частоты  $f \approx 1.5$  кГц (и вплоть до нулевой частоты) наблюдается перегиб на обратную дисперсию [242]. В результате когерентная мощность St-волны распределена (или размыта) по скорости и частоте «в форме запятой» (на рис. 5.1 масштаб для изображения спектрального сембланс St-волны увеличен). Это и является причиной широкого пятна когерентности St-волны на изображении традиционного и Гильберт сембланс (см. рис. 1.31 и рис. 2.4). Но расширенное пятно не является проблемой - формально максимум когерентности по параметру  $p$  для St-волны на изображении традиционного сембланс всегда можно найти. Проблема в том, что такой максимум не отражает распределение когерентной мощности по параметру  $p$  на

спектральном сембланс. Как результат - ошибка (или неопределенность) в оценке скорости St-волны для последующей интерпретации.

По смыслу, дисперсионный сембланс является объединением традиционного и спектрального сембланс. Суть его заключается в консолидации когерентной мощности диспергирующих волн по интервальному времени  $p$  в зависимости от частоты  $f$  по набору экспериментальных или теоретических дисперсионных кривых. Можно считать, что дисперсионный сембланс - это традиционный сембланс с поправкой по дисперсионным кривым.

Выбор в качестве опорной частоты St-волны  $f_{St}=0$  кГц нецелесообразно по двум причинам. Во-первых, St-волна диспергирует как в дипольном, так и монопольном режимах возбуждения. Во-вторых, на частоте  $f_{St}=0$  дисперсионные кривые St-волны имеют максимальный градиент и разброс [242]. Общепринятой опорной частоты для St-волны не существует, и мы считаем целесообразным принять  $f_{St}=2$  кГц.

Представим теперь формулы сембланс. Два представления традиционного сембланс (*Slowness-Time-Coherence*) - через наклонное суммирование (*slant stack*) [153] и через прямое и обратное преобразование Фурье [154]

$$STC(\tau, p) = \frac{\sum_{t=\tau-T}^{\tau+T} \left[ \sum_{m=1}^M y(t + px_m, m) \right]^2}{M \cdot \sum_{t=\tau-T}^{\tau+T} \sum_{m=1}^M y^2(t + px_m, m)} = \frac{\sum_{t=\tau-T}^{\tau+T} \left| F^{-1} \left\{ \sum_{m=1}^M Y(f, m) e^{j \cdot 2\pi \cdot f \cdot p \cdot x_m} \right\} \right|^2}{M \cdot \sum_{t=\tau-T}^{\tau+T} \sum_{m=1}^M \left| F^{-1} \left\{ Y(f, m) e^{j \cdot 2\pi \cdot f \cdot p \cdot x_m} \right\} \right|^2}. \quad (5.1)$$

Спектральный сембланс (*Slowness-Frequency-Coherence*) [97] с окном

$$SFC(f, p) = \frac{\sum_{f=f_0-\Delta f}^{f_0+\Delta f} \left| \sum_{m=1}^M Y(f_0, m) e^{j \cdot 2\pi \cdot f_0 \cdot p \cdot x_m} \right|^2}{M \cdot \sum_{f=f_0-\Delta f}^{f_0+\Delta f} \sum_{m=1}^M |Y(f_0, m)|^2}. \quad (5.2)$$

Дисперсионный сембланс [154]

$$DSTC(\tau, p) = \frac{\sum_{t=\tau-T}^{\tau+T} \left| F^{-1} \left\{ \sum_{m=1}^M Y(f, m) e^{j \cdot 2\pi \cdot f \cdot p_d(f, p) \cdot x_m} \right\} \right|^2}{M \cdot \sum_{t=\tau-T}^{\tau+T} \sum_{m=1}^M \left| F^{-1} \left\{ Y(f, m) e^{j \cdot 2\pi \cdot f \cdot p_d(f, p) \cdot x_m} \right\} \right|^2}. \quad (5.3)$$

Исходный двумерный акустический массив на одной точке по глубине  $y(t, m)$ ,  $m = \overline{1, M}$ , ( $N$  точек по времени с шагом регистрации  $dt$ );  $M$  - количество приемников, расположенных с координатами относительно середины антенной решетки из массива  $x_m, m = \overline{1, M}$ ;  $Y(f, m) = F[y(t, m)]$  – преобразование Фурье;  $F^{-1}[\cdot]$  – оператор обратного преобразования Фурье;  $T$  – полуокно усреднения по времени;  $\Delta f$  в (5.2) – полуокно усреднения по частоте.

Двумерная функция  $p_d(f, p)$  в (5.3) – возвращает значение параметра  $p$  с коррекцией на дисперсию.

Отличие дисперсионного сембланс (5.3) от традиционного сембланс в представлении через прямое и обратное преобразование Фурье (5.1) заключается в замене параметра  $p$  на функцию  $p_d(f, p)$ .

Дисперсионное представление спектрального сембланс (5.2) можно записать как

$$DSFC(f, p) = \frac{\sum_{\gamma=f-\Delta f}^{\gamma+\Delta f} \left| \sum_{m=1}^M Y(\gamma, m) e^{j \cdot 2\pi \cdot \gamma \cdot p_d(\gamma, p) \cdot x_m} \right|^2}{M \cdot \sum_{\gamma=f-\Delta f}^{\gamma+\Delta f} \sum_{m=1}^M |Y(\gamma, m)|^2}. \quad (5.4)$$

Несмотря на большое количество публикаций по исследованию дисперсии при ВАК, примеры изображений дисперсионного сембланс (5.3) и дисперсионного спектрального сембланс (5.4) в литературе не представлены, и в известных программных реализациях оценка ИВП осуществляется по максимуму не (5.1), а другой (одномерной) функции [154, 220]

$$S(p) = \frac{\sum_f \left| \sum_{m=1}^M Y(f, m) e^{j \cdot 2\pi \cdot f \cdot p_d(f, p) \cdot x_m} \right|^2}{M \cdot \sum_f \sum_{m=1}^M |Y(f, m)|^2}, \quad (5.5)$$

которая теперь отождествляется с понятием дисперсионный сембланс. Нам представляется, что причина здесь в более простой реализации. Во-первых, в нет обратного преобразования Фурье. Во-вторых, в (5.5) расчеты для значений ИВП вне области дисперсионных кривых не выполняются. Для формулы (5.3) значения ИВП задаются во всей области исследования интервального времени и обычно выходят за область ИВП дисперсионных кривых. При этом происходит «накладка» оценок когерентности для ИВП по дисперсионным кривым с оценками для повторяющихся значений НФИВ.

### 5.1 Вычислительная схема

Сформируем  $M$  векторов-столбцов длины  $N$  из исходного акустического массива

$$y_m = \|y(n, m)\|, n = \overline{1, N}.$$

По этим векторам вычислим  $M$  комплексных векторов-столбцов длины  $N_{FFT}$  быстрого преобразования Фурье

$$\mathbf{Y}_m = FFT\{y_m\}$$

и сформируем матрицу размером  $N_{FFT} \times L$

$$\mathbf{Y}_m^* = (\underbrace{\mathbf{Y}_m \mid \mathbf{Y}_m \mid \dots \mid \mathbf{Y}_m}_L).$$

Сформируем вектор-строку из  $L$  значений интервального времени в интервале представления  $[p_{\min} p_{\max}]$

$$\mathbf{p} = linspace(p_{\min}, p_{\max}, L)$$

и матрицу размером  $N_{FFT} \times L$

$$\mathbf{P} = \left( \begin{array}{c} \mathbf{p} \\ \mathbf{p} \\ \vdots \\ \mathbf{p} \end{array} \right)_{N_{FFT}}.$$

Сформируем вектор-столбец частот

$$\mathbf{f} = \left\| (n-1)/(N_{FFT} \cdot dt) \right\|, n = \overline{1, N_{FFT}}.$$

и матрицу размером  $N_{FFT} \times L$

$$\mathbf{F} = \underbrace{(\mathbf{f} \mid \mathbf{f} \mid \dots \mid \mathbf{f})}_L.$$

Введем матрицу ИВП  $\mathbf{D}$ , которая имеет тот же размер, что и матрица НФИВ  $\mathbf{P}$ . Элементы матрицы  $\mathbf{D} = \|d(n, l)\|$  определим как  $d(n, l) = p(l)$ , когда соответствующее значение  $p(l)$ , принимаемое в качестве ИВП – вне диапазона определения дисперсионных кривых, и

$$d(n, l) = p_d(f(n), p(l)), \quad (5.6)$$

для значений  $p(l)$  в диапазоне ИВП дисперсионных кривых. Матрицы  $\mathbf{P}$  и  $\mathbf{D}$  совпадают если дисперсия не учитывается (при НФИВ = ИВП).

Далее вычислим  $M$  матриц размером  $N_{FFT} \times L$  следующего вида

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}_m &= \mathbf{Y}_m^* \circ \exp\{j \cdot 2 \cdot \pi \cdot x_m \cdot \mathbf{F} \circ \mathbf{D}\} \\ &= \|Z_m(n, l)\|, n = \overline{1, N_{FFT}}; l = \overline{1, L}, \end{aligned} \quad (5.7)$$

где как « $\circ$ » обозначено Адамарово (поэлементное) перемножение матриц. Выполним по столбцам (5.7) обратное быстрое преобразование Фурье. В результате получим  $M$  матриц размером  $N \times L$

$$\mathbf{z}_m = IFFT\{\mathbf{Z}_m\} = \|z_m(n, l)\|, n = \overline{1, N}; l = \overline{1, L}$$

Дисперсионный сембланс (5.3) вычисляется как

$$DSTC(n, l) = \frac{\sum_{k=n-T}^{n+T} \left[ \sum_{m=1}^M z_m(k, l) \right]^2}{M \cdot \sum_{k=n-T}^{n+T} \sum_{m=1}^M z_m^2(k, l)}, n = \overline{1, N}; l = \overline{1, L}. \quad (5.8)$$

Дисперсионный спектральный сембланс (5.4) вычисляется как

$$DSFC(n, l) = \frac{\sum_{k=n-\Delta f}^{n+\Delta f} \left| \sum_{m=1}^M Z_m(k, l) \right|^2}{M \cdot \sum_{k=n-\Delta f}^{n+\Delta f} \sum_{m=1}^M |Y_m(k)|^2}, n = \overline{1, N_{FFT}/2}; l = \overline{1, L}. \quad (5.9)$$

Отметим, что если в (5.7) вместо матрицы  $\mathbf{D}$  подставить матрицу  $\mathbf{P}$ , то (5.8) будет соответствовать вычислению традиционного сембланс (5.1), а (5.9) - вычислению спектрального сембланс (5.2).

## 5.2 Вычисление дисперсионного Гильберт сембланс

Сформируем вектор-столбец длины  $N_{FFT}$  вида

$$\mathbf{h} = \underbrace{(1 \mid 2 \mid \dots \mid 2 \mid 1 \mid 0 \mid \dots \mid 0)}_{N_{FFT}/2}^T$$

И матрицу размером  $N_{FFT} \times L$

$$\mathbf{H} = \underbrace{(\mathbf{h} \mid \mathbf{h} \mid \dots \mid \mathbf{h})}_L$$

Теперь вычислим

$$\mathbf{z}_{am} = IFFT\{\mathbf{H} \circ \mathbf{Z}_m\} = \|z_{am}(n, l)\|, n = \overline{1, N}; l = \overline{1, L}$$

Дисперсионный Гильберт сембланс вычисляется как

$$DSTCH(n, l) = \frac{\left| \sum_{m=1}^M z_{am}(n, l) \right|^2}{M \cdot \sum_{m=1}^M |z_{am}(n, l)|^2}, n = \overline{1, N}; l = \overline{1, L}. \quad (5.10)$$

с окном усреднения – комплексный функционал когерентности (1.49)

$$C(n, l) = \frac{\sum_{k=n-T}^{n+T} \left| \sum_{m=1}^M z_{am}(k, l) \right|^2}{M \cdot \sum_{k=n-T}^{n+T} \sum_{m=1}^M |z_{am}(k, l)|^2}, n = \overline{1, N}; l = \overline{1, L}. \quad (5.11)$$

## 5.3 Пример коррекции волны Стоунли

Пример 1. Записи ВАК в песчаниках берега (*Berea*, свита миссисипской системы) [36], одна из которых приведена на рис. 1.30 любезно предоставлены компанией Baker Hughes. Автор не располагает экспериментальными исследованиями дисперсионных кривых St-волны для этого разреза. Этот пробел попытаемся восполнить, вооружившись знаниями о характере

дисперсионных кривых из источников [211, 242]. Автоматизированное построение дисперсионных кривых это тема отдельных исследований [176, 245], которая в настоящей работе не рассматривается. Поэтому по спектральному сембланс St-волны, представленному на рис. 5.1, семейство дисперсионных кривых проведем вручную. Без особого труда мы выделили 5 таких кривых. Примем опорную частоту  $f_{St}=2$  кГц. Путем интерполяции дисперсионных кривых по частоте  $f$ , а затем интерполяции по интервальному времени  $p$  сформируем матрицу ИВП  $\mathbf{D}$  из значений (5.6). Для лучшей наглядности отображения на рис. 5.2 приведены значения разности матриц ( $\mathbf{D}-\mathbf{P}$ ), которые могут быть ненулевыми только в прямоугольном окне ИВП [899 1358] мкс/м и по частоте [0 2.7] кГц в  $(f-p)$ -области, определенному по дисперсионным кривым. На рис. 5.3 представлен фрагмент «исправленной» St-волны на спектральном сембланс (сопоставление с рис. 5.1). По рис. 5.4 можно сделать сопоставление с «полным» спектральным сембланс рис. 1.36. На рис. 5.5 приведен дисперсионный сембланс. Сопоставляя с традиционным сембланс рис. 1.31 можно отметить – пятно St-волны сузилось в почти в 2 раза.

Оценка интервального времени St-волны по традиционному сембланс составила  $p_{St}=1138$  мкс/м. По дисперсионному сембланс оценка стала ниже и составила  $p_{St}=1086$  мкс/м, однако она уже соответствует распределению когерентной мощности по параметру  $p$  на спектральном сембланс.

Однако, «накладки» (или «остатки» исходного пятна St-волны) на рис. 5.3, рис. 5.4 и рис. 5.5 мешают целостному восприятию результата. Эти «накладки» - обусловлены фрагментарным переходом от матрицы ФНИВ к матрице ИВП - в пределах прямоугольного блока, соответствующего прямоугольному окну в  $(f-p)$ -области. Нарушен принцип построения матрицы - значения интервального времени по строкам матрицы должны быть возрастающими - петли интервального времени приводят к повторному отображению когерентной мощности.

В настоящей работе, для случая, когда область определения ФНИВ выходит за прямоугольное окно ИВП предлагается расширить само окно на область определения ФНИВ. Недостающие элементы матрицы  $\mathbf{D}$  предлагается определить из условия не убывания значений по строкам матрицы  $\mathbf{D}$  (при сохранении значений в прямоугольном блоке). На рис. 5.7, рис. 5.8, рис. 5.9, рис. 5.10 приведены результаты такого перехода от ФНИВ к ИВП.

На рис. 2.4 и рис. 5.11 приведены Гильберт сембланс и дисперсионной Гильберт сембланс. Оценка интервального времени  $St$ -волны изменилась с  $p_{St}=1144$  мкс/м на  $p_{St}=1087$  мкс/м (или на 5%). Если же выбрать опорную частоту 1.5 кГц, то разница превысила бы 20%.

В Приложении ПЗ.6 приведен MATLAB-скрипт функции вычисления дисперсионного и спектрального сембланс по описанной вычислительной схеме.



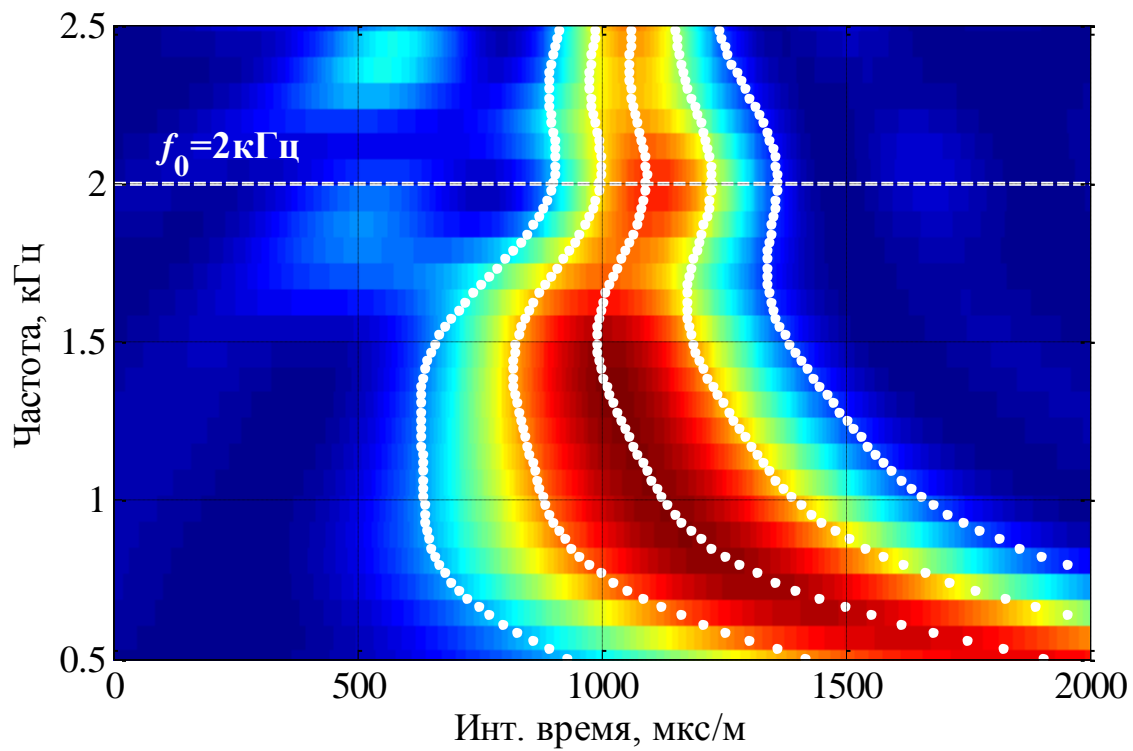


Рис. 5.1. Спектральный сембланс и дисперсионные кривые St-волны

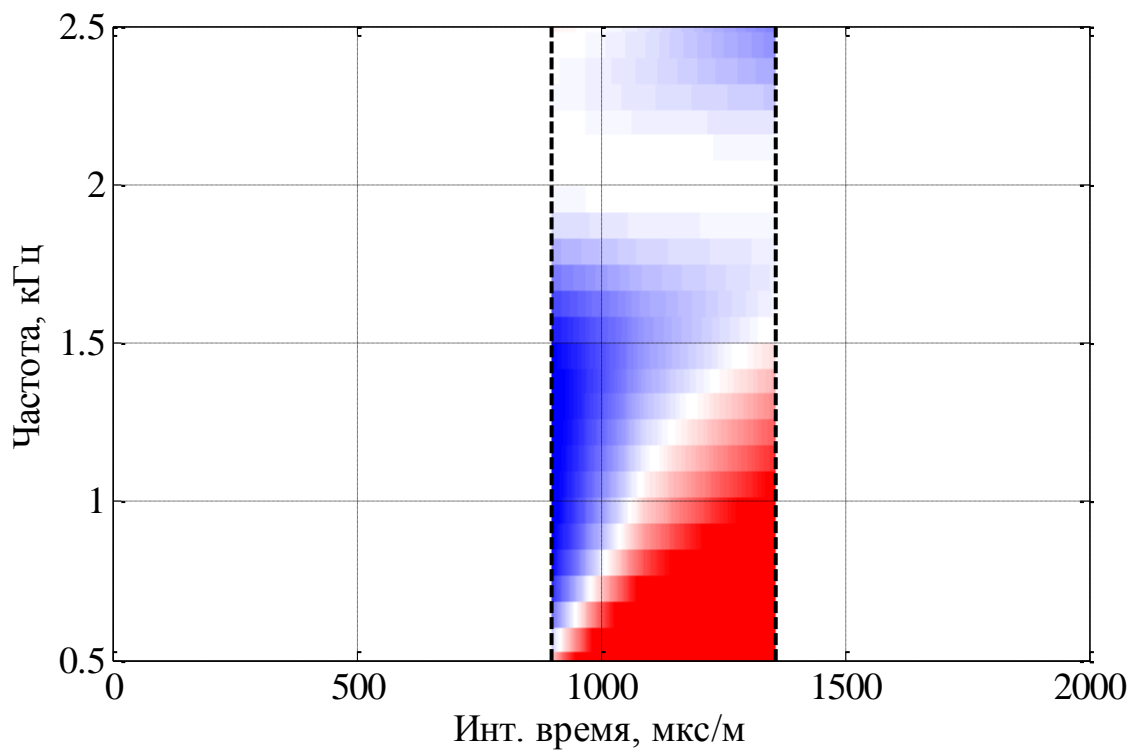


Рис. 5.2. Изображение матрицы коррекции на дисперсию St-волны

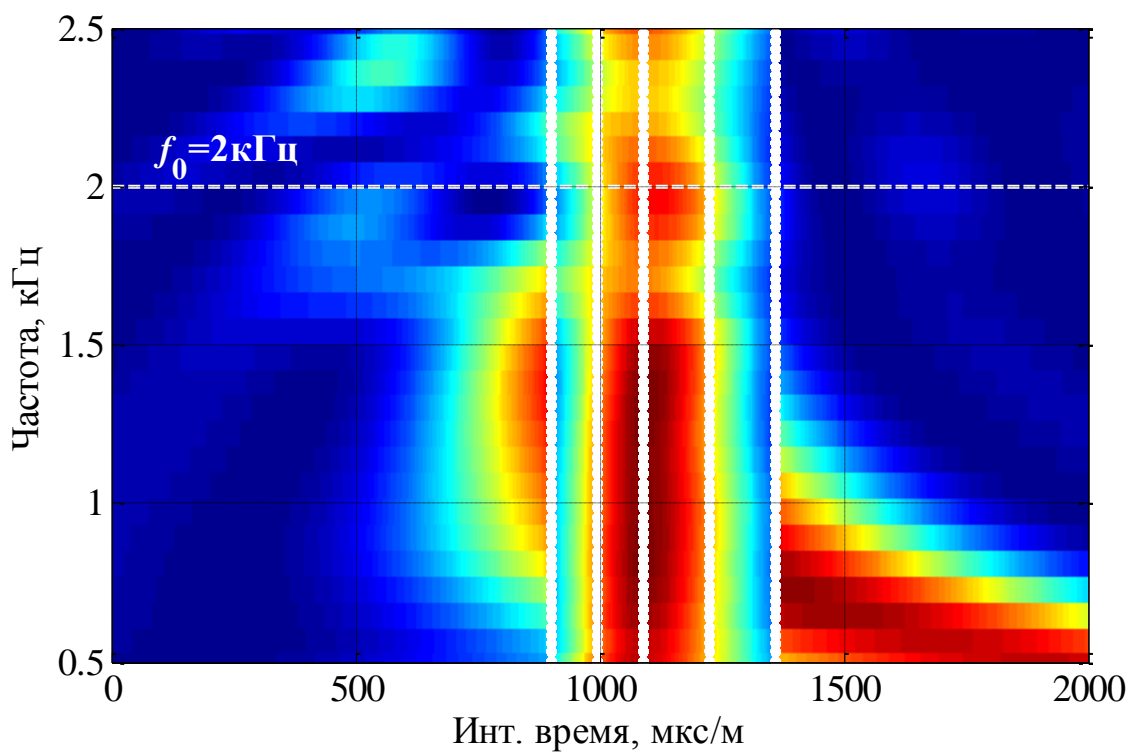


Рис. 5.3. Спектральный сембланс после коррекции на дисперсию St-волны

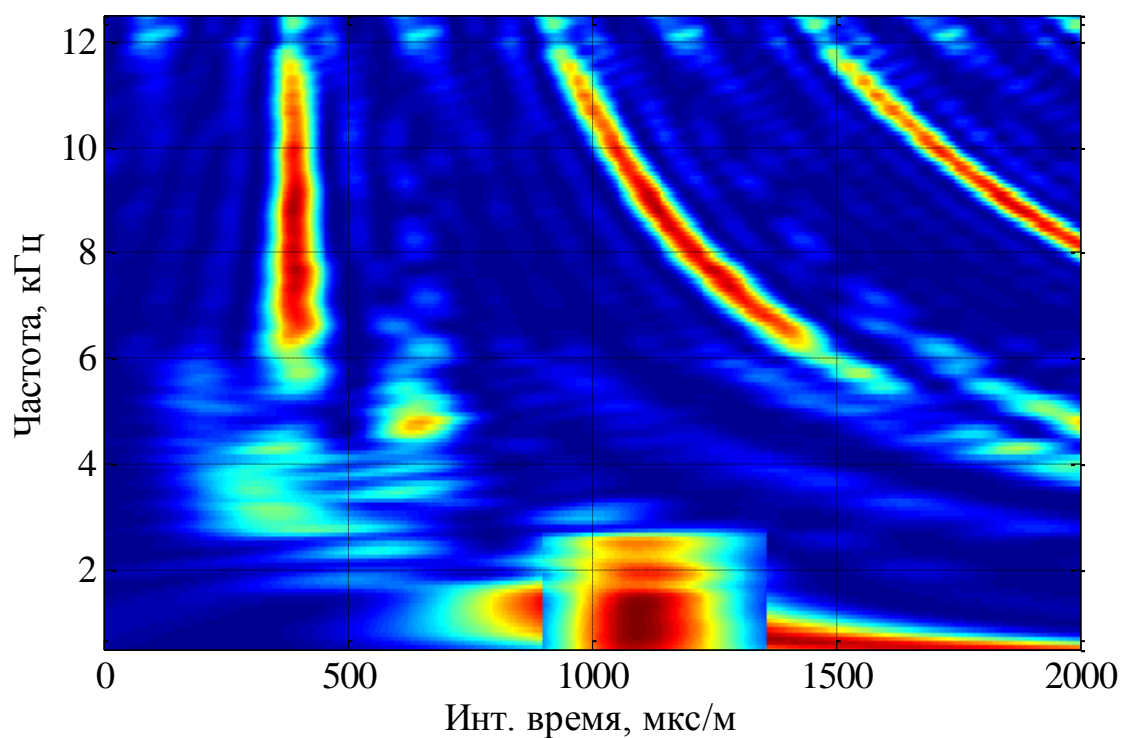


Рис. 5.4. Спектральный сембланс после коррекции на дисперсию St-волны (диапазон частот - 0,5÷12,5 кГц)

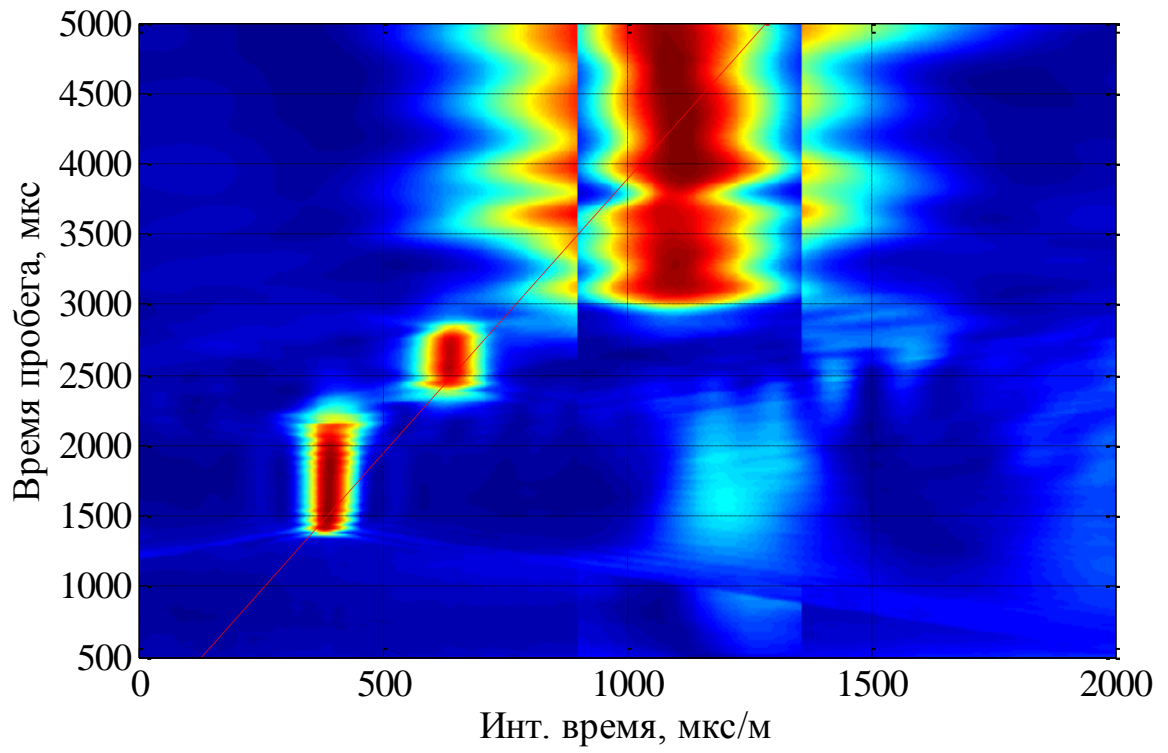


Рис. 5.5. Дисперсионный сембланс

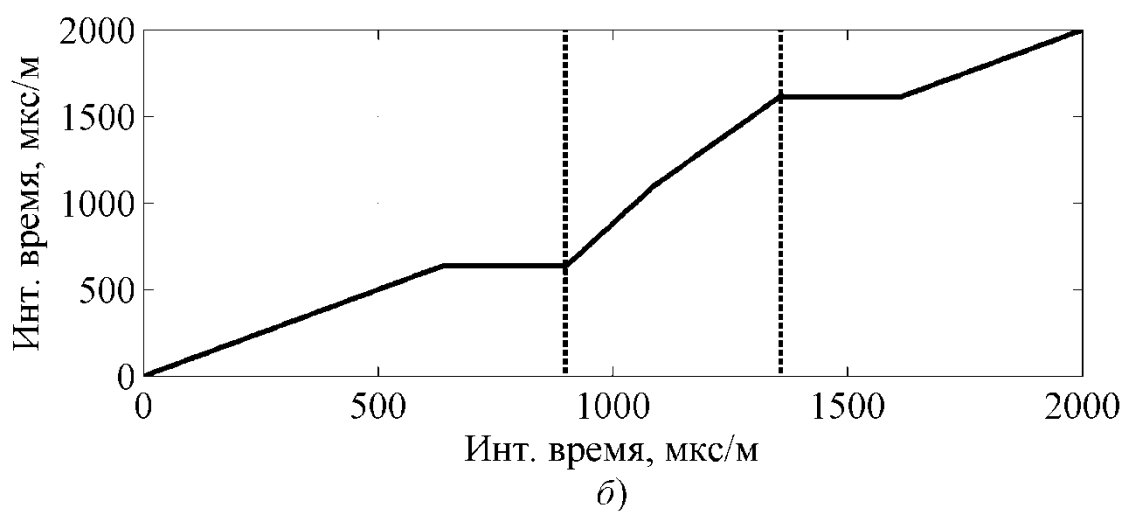
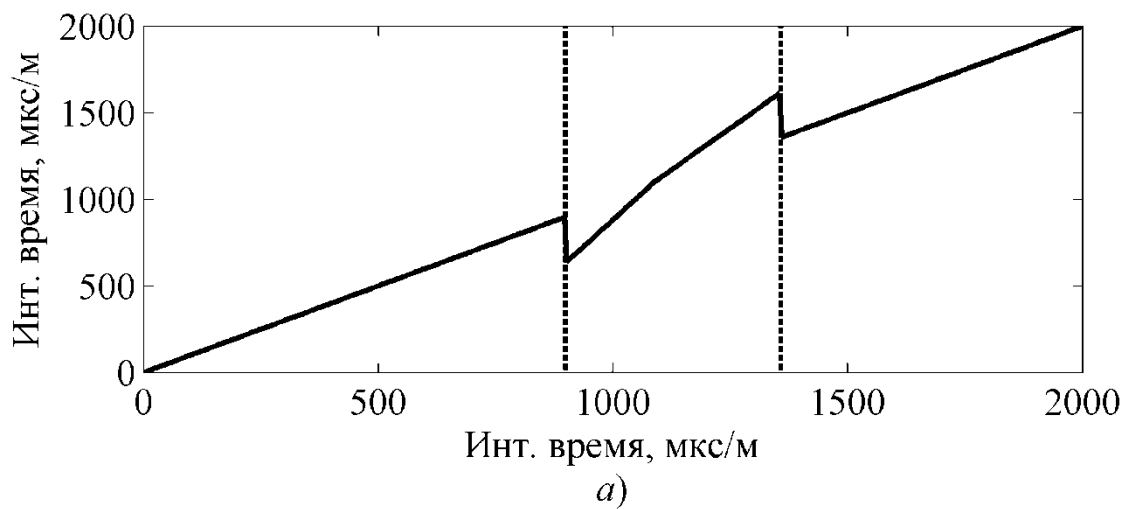


Рис. 5.6. Значения строки матрицы  $D$ , соответствующей 1 кГц: а) пересчет по в диапазоне ИВП; б) приведение к условию не убывания

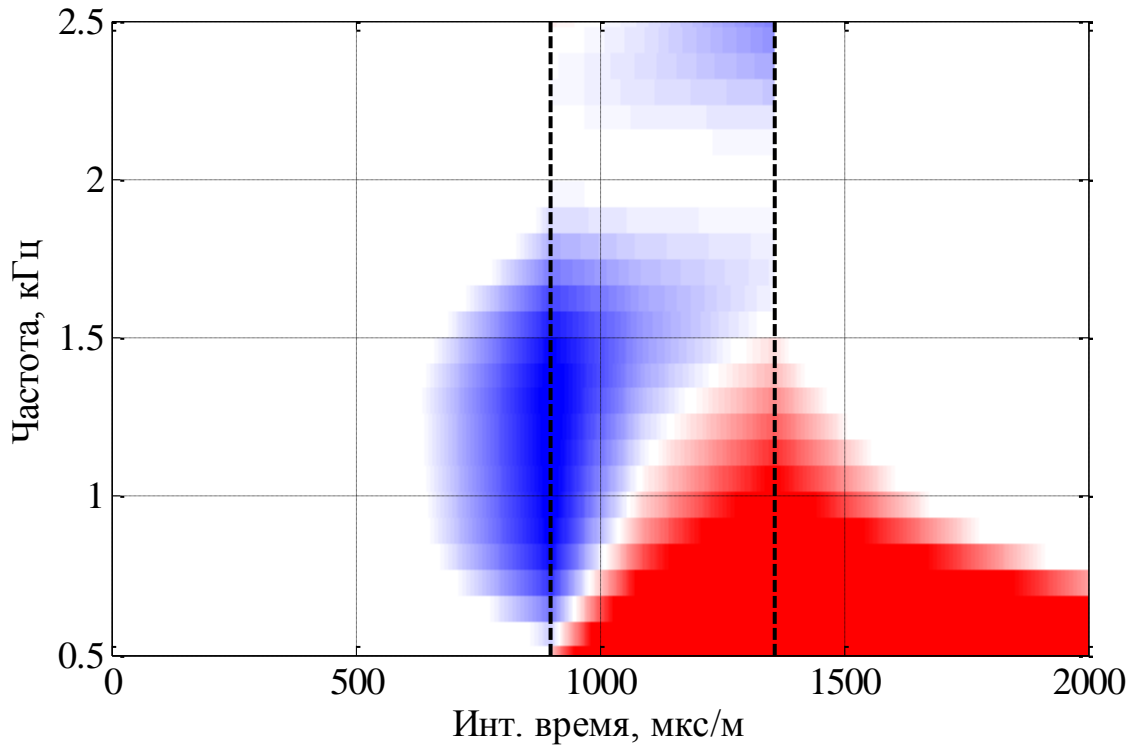


Рис. 5.7. Изображение матрицы коррекции на дисперсию St-волны

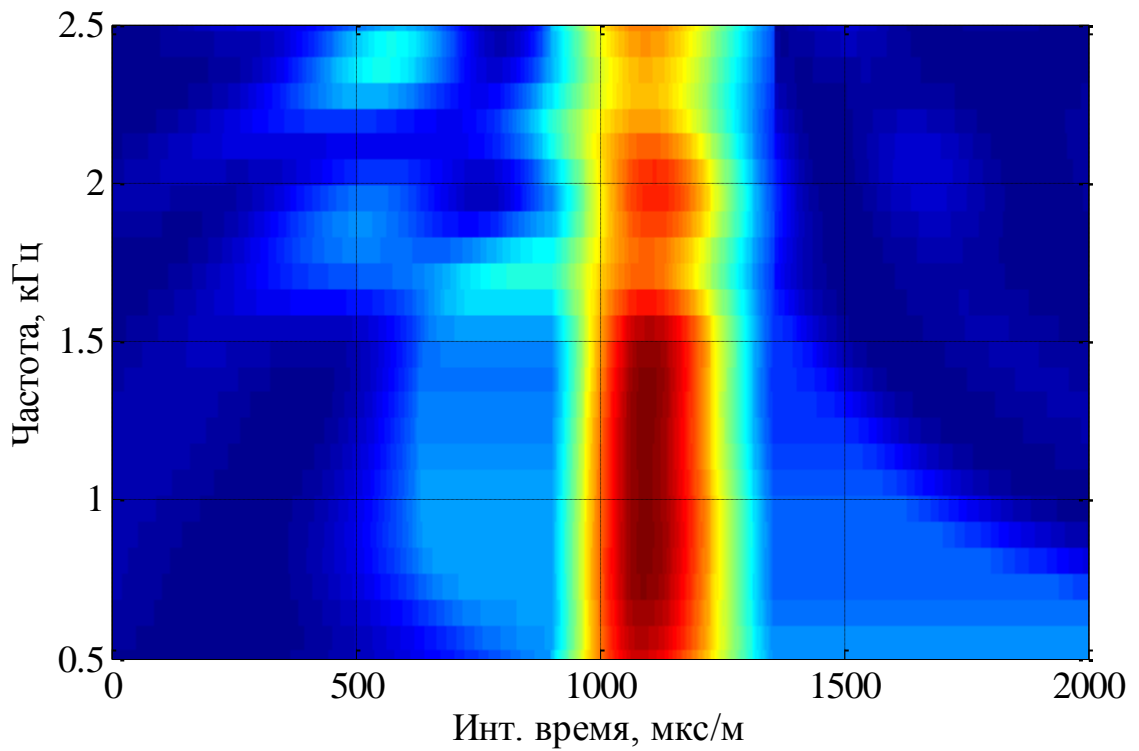


Рис. 5.8. Спектральный сембланс после коррекции на дисперсию St-волны

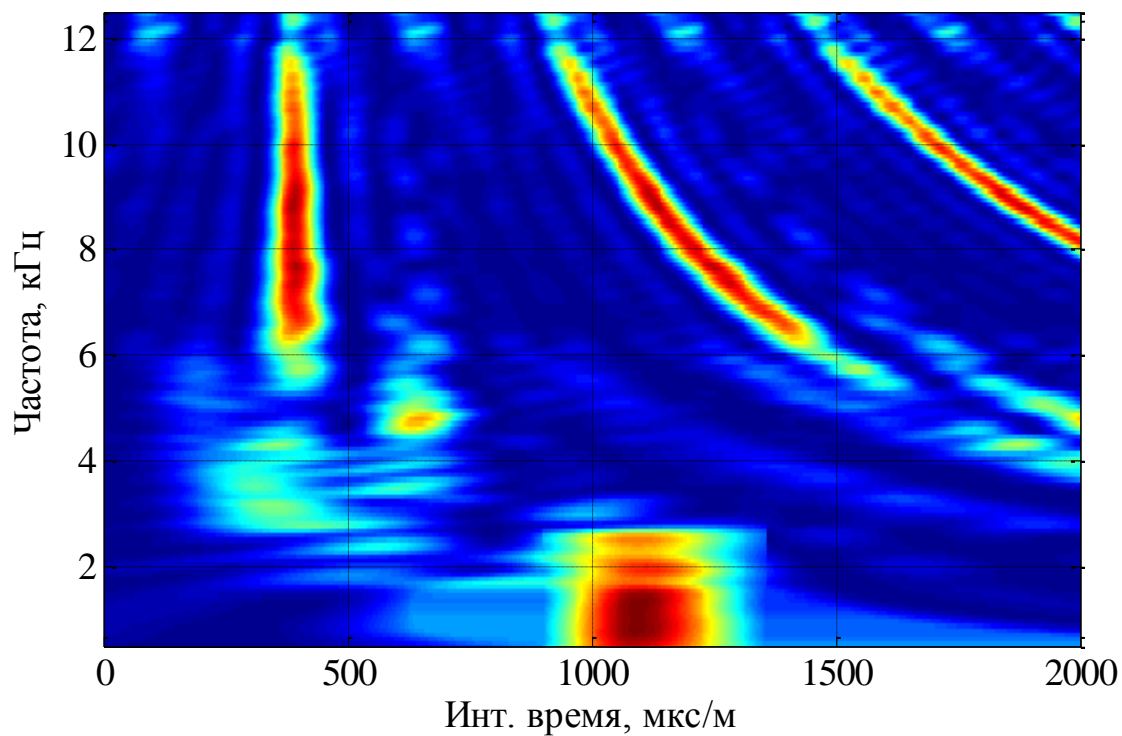


Рис. 5.9. Спектральный сембланс после коррекции на дисперсию St-волны (диапазон частот - 0,5÷12,5 кГц)

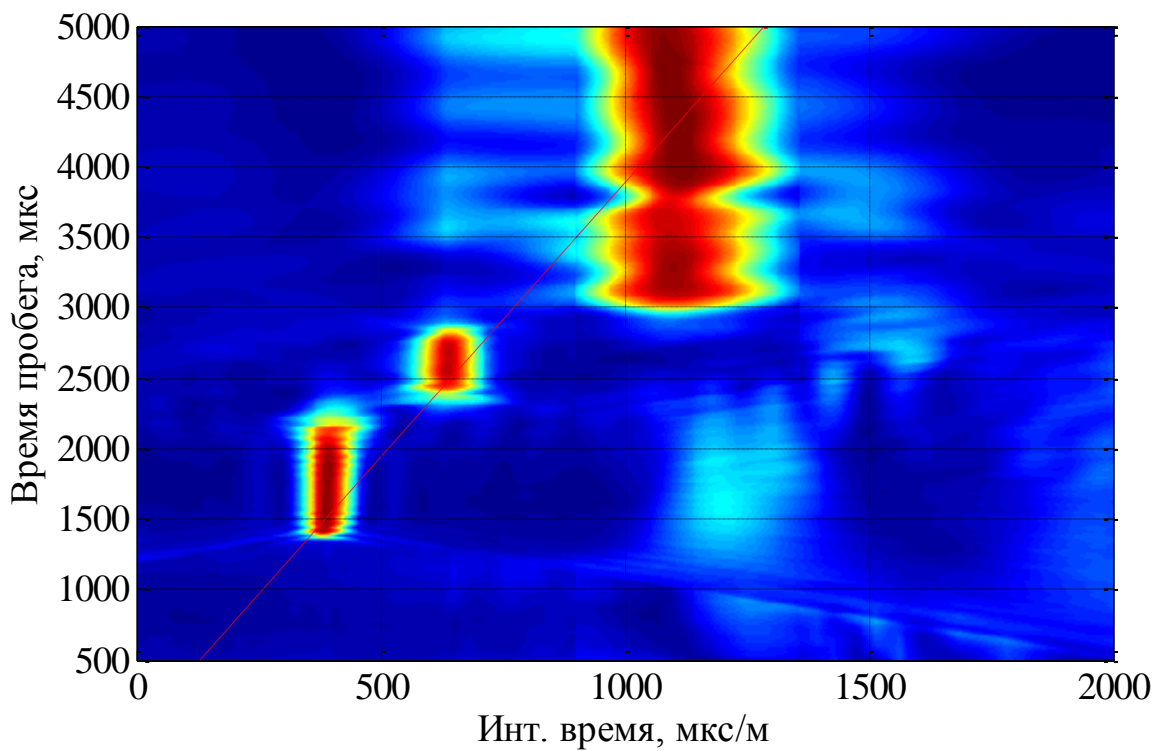


Рис. 5.10. Дисперсионный сембланс

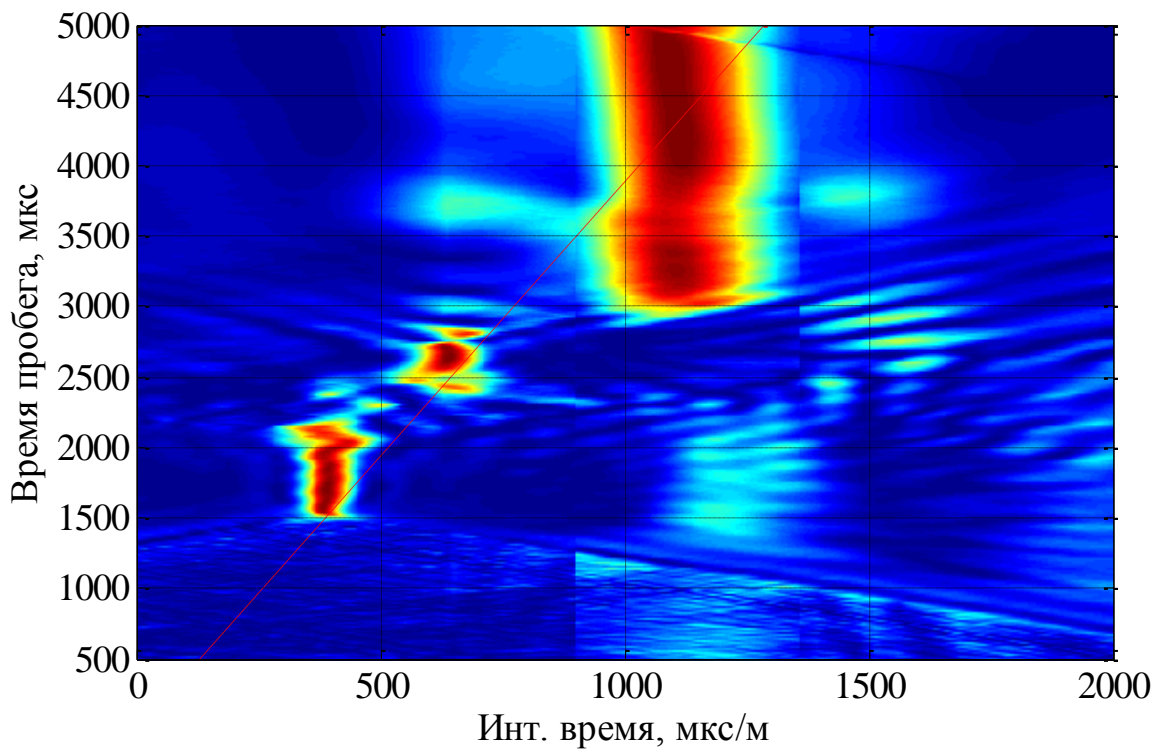


Рис. 5.11. Дисперсионный Гильберт сембланс

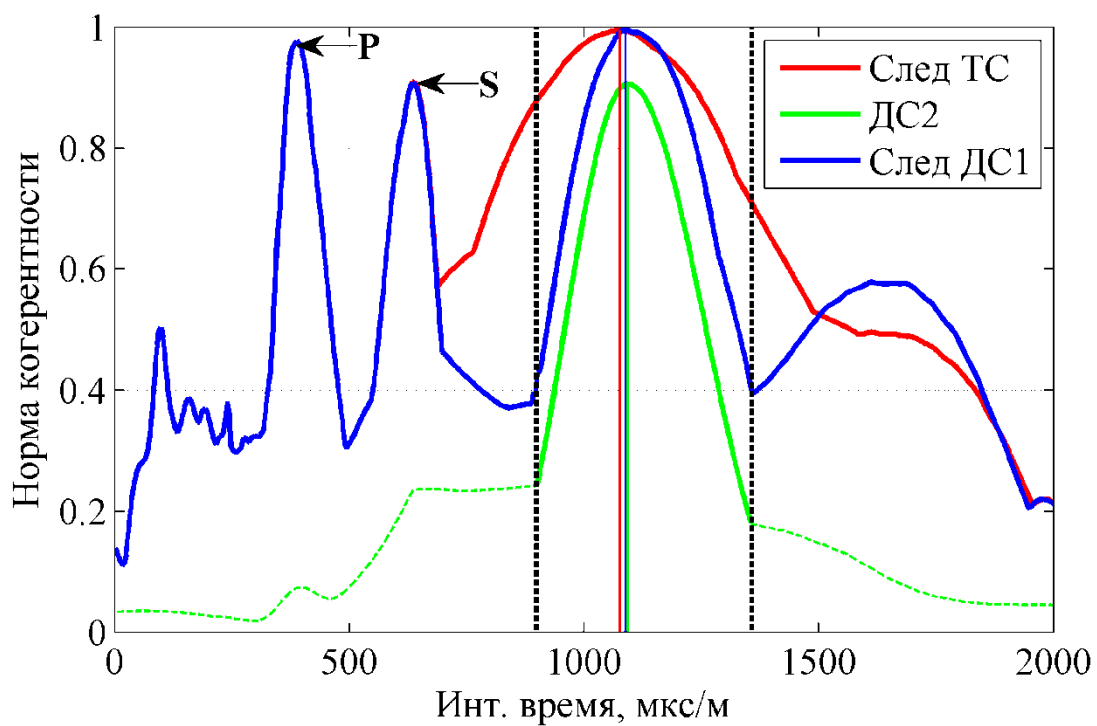


Рис. 5.12. Оценка интервального времени по максимумам сембланс

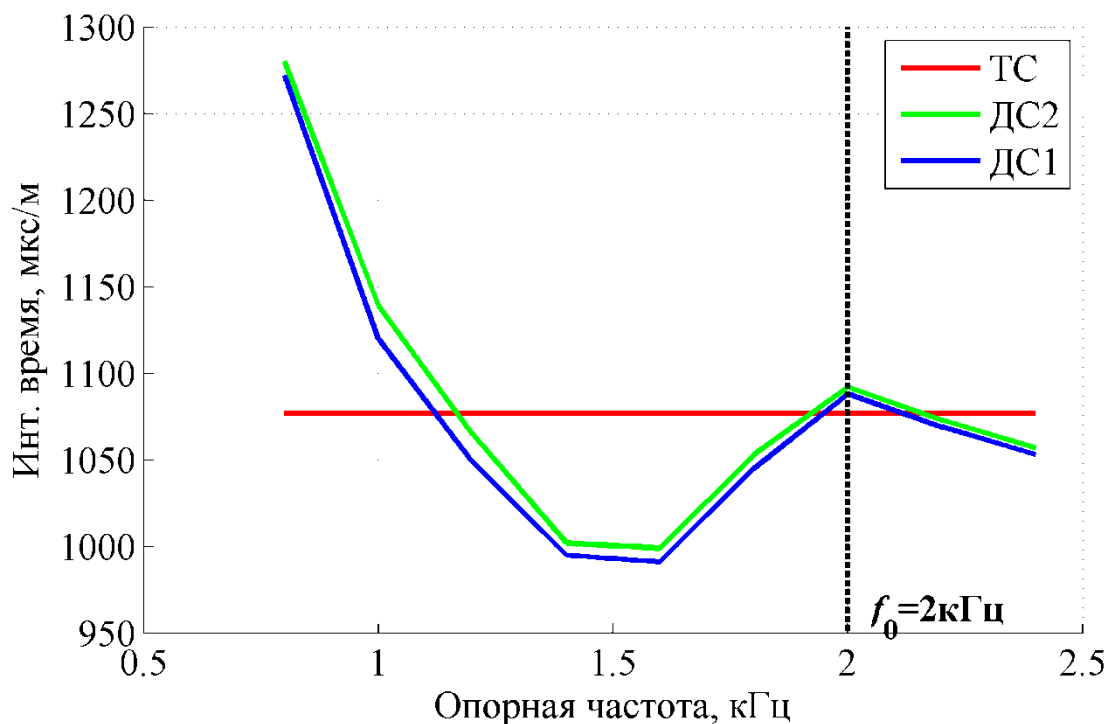


Рис. 5.13. Оценка интервального времени по максимумам сембланс в зависимости от опорной частоты

#### 5.4 Рекомендации по применению дисперсионного сембланс

В предлагаемой реализации целесообразно применять спектральный сембланс с минимальным окном усреднения по частоте (можно вообще отказаться от окна), т.к. окно усреднения вносит искажения, которые проявляются при построении дисперсионных кривых.

Матрица **D** с элементами (5.6) должна охватывать ( $f - p$ )-область проявления диспергирующей волны изучаемого разреза (рис. 5.7). Нецелесообразно осуществлять коррекцию на дисперсию изгибной волны и волны Стоунли в одной матрице – возможны перекрытия результирующих диапазонов ИВП в ( $f - p$ )-области.

Для волны Стоунли при низкочастотных возбуждениях сообществу геофизиков целесообразно принять единую опорную частоту приведения дисперсии по параметру  $p$  (мы предлагаем  $f_0 = 2$  кГц).



### 5.5 Основные результаты и выводы по главе

1. Предложена вычислительная реализация метода дисперсионный сембланс по формуле (5.3), заключающаяся в замене НФИВ на ИВП по семейству дисперсионных кривых. В отличие от (5.5) дисперсионный сембланс (5.3) обеспечивает методическую преемственность традиционному сембланс при обработке и интерпретации ВАК. Дисперсионный спектральный сембланс (5.4) может применяться для оценки результативности коррекции на дисперсию.
2. Предложена схема расширения прямоугольного окна ИВП в  $(f - p)$ -области для исключения повторного отображения когерентной мощности за пределами этого окна при замене НФИВ на ИВП.
3. В качестве развития метода Гильберт сембланс представлена вычислительная реализация дисперсионного Гильберт сембланс.
4. Представлены рекомендации по применению метода дисперсионный сембланс.

□

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Прежде чем сформулировать пункты заключения, автор отмечает четыре момента обсуждения.

Первый момент – это фантомы преобразования Радона. Вернемся к геометрической интерпретации Гильберт сембланс (рис. 2.6). «Точечные» когерентные события на луче при пропуске пар полуволн также имеют место. Они отражаются «веерными» шумами на безоконном Гильберт сембланс (рис. 2.4) и проявляются «фантомами» на безоконном спектральном сембланс (см. рис. 1.36 для Р-волны). На традиционном сембланс (с окном усреднения) эти «веерные» шумы удаляются вместе с шумами самих сигналов (рис. 1.31). Следуя теореме Парсеваля исследователи ставят в соответствие традиционному сембланс в  $(\tau - p)$ -области оконное представление спектрального сембланс в  $(f - p)$ -области. На оконном спектральном сембланс эти фантомы также подавляются. Поэтому эти проявления не были описаны при исследовании волновых полей, и автор взял на себя смелость назвать их «фантомами составляющих волн». С одной стороны это хорошо окно усреднения подавляет фантомы – они не являются информативными. С другой стороны эти фантомы проявляют себя шумами при обратном преобразовании Радона. Например, если «обнулить» провление Р-волны ниже 500 мкс/м (рис. 2.4) и выполнить обратное преобразование Радона (где по определению нет окна усреднения), то возникает вопрос – как проявят себя «некомпенсированные» фантомы? Ответ очевиден – шумами. Можно попытаться взвесить преобразование Радона на традиционный сембланс, чтобы подавить эти проявления. Однако окно усреднения искажает пятно всплеска когерентной мощности как по вступлению, так и продолжительности. На взгляд автора более эффективно подавить фантомы может взвешивание на Гильберт сембланс после *rank-k* аппроксимации.

Второй момент. Как дополнительная опция к оценке интервального времени в условиях дисперсии, теоретически существует возможность

восстановить сигналы по приемникам с учетом коррекции на дисперсию. Однако, такое восстановление сигнала автор считает нецелесообразным, т.к. при этом не корректируется на дисперсию время прохождения волны от излучателя до антенной решетки.

Третий момент. Автор рекомендует в качестве опорной частоты приведения интервального времени диспергирующей St-волны значение в 2 кГц. Эта частота представляется некоторым компромиссом для нормальной и аномальной дисперсии St-волны в мягких и твердых горных породах по градиентам дисперсионных кривых. Представляется, что опорной частоте в 2 кГц есть и геологическое обоснование.

Четвертый момент. В представлении автора целостность и завершенность (или комплексный подход) работы можно отразить следующей таблицей.

Решения автора	Оценка скоростей - интервальных времен (ИВ) составляющих	Фильтрация по скорости	Дополнительная возможность
Гильберт сембланс (ГС) (см. Глава 2)	Повышается разрешающая способность в тонкослоистых разрезах. Не искажаются вступление и длительность.	Вес на ГС усиливает когерентные составляющие при ПР в полосе пропускания по скорости.	Возможно представление приведенных фазовых переходов. Безоконный сембланс отражает «фантомы» ПР.
Фильтрация сембланс на основе <i>rank-k</i> аппроксимации (см. Глава 3)	Удаляет шумы изображения сембланс перед оценкой ИВ, при этом практически не искажаются вступление и длительность.	Вес на ГС после <i>rank-k</i> подавляет и «фантомы» ПР от составляющих вне полосы пропускания по скорости.	Позволяет контролировать количество «главных» пятен.
Прямое/обратное преобразование Радона (ПР) с доп. опциями (см. Глава 4)	Возможна оценка первых вступлений (и по ним ИВ) в условиях интерференции.	Подавляет составляющие вне полосы пропускания по скорости, а также помехи и шумы.	Возможность комбинации двух реализаций: в ( $\tau$ - $p$ ) и ( $f$ - $p$ )-областях (время-частота-скорость).
Дисперсионный Гильберт сембланс (ДГС) (см. Глава 5)	Оценка ИВ диспергирующих составляющих приведением когерентной мощности к опорной частоте.	Формально существует возможность построить сигналы по приемникам с поправкой на дисперсию.	Вычислительная схема позволяет оценивать ДС(1), ДС(2), ДГС и дисперсионный спектральный сембланс.

1. В диссертации получила развитие применительно к записям многоэлементного ВАК методология, известная в сейсмике как метод регулируемого направленного приема (РНП, Л.А. Рябинкин), *slant-stack* (F.Rieber), *tau-p (slowness-time) mapping*, а по существу - преобразование Радона.

2. Решены поставленные целью диссертационного исследования задачи:

2.1. На основе анализа отечественных и зарубежных достижений сформулированы требования по составу программных реализаций в части обработки массивов записей ВАК по оценке скоростей составляющих волн.

2.2. Впервые предложен и разработан метод преобразования двумерных массивов записей (матриц) ВАК названный автором как Гильберт сембланс, основанный на преобразованиях Радона и Гильберта.

2.3. Разработаны методы фильтрации составляющих волн за счет различия диапазонов их интервальных времен

2.3.1. Впервые предложен и разработан метод нелинейной фильтрации матриц значений сембланс, основанный на преобразовании Карунена-Лоэва (метод главных компонент) и заключающийся в аппроксимации матриц сембланс матрицами меньшего ранга.

2.3.2. Предложена вычислительная реализация фильтрации массивов записей ВАК по скорости на основе преобразования Радона в  $(\tau - p)$ -области.

2.4. Предложена вычислительная реализация дисперсионного сембланс в  $(\tau - p)$ -области. Дисперсионный сембланс вычисляется по следующей схеме:  $(t - x) \rightarrow$  Преобразование Радона  $\rightarrow (\tau - p) \rightarrow$  Преобразование Фурье  $\rightarrow (f - p) \rightarrow$  Коррекция на дисперсию по дисперсионным кривым  $\rightarrow (f - p) \rightarrow$  Обратное преобразование Фурье  $\rightarrow (\tau - p)$ .

2.5. Разработанные методы реализованы автором в виде программ на MATLAB.

3. Результаты диссертационного исследования могут найти применение как в отечественных системах автоматизированной интерпретации данных ГИС (Gintel, ПРАЙМ, КАМЕРТОН, ГЕОПОИСК и др.), так и в зарубежных.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология: Теория и методы. Т 1. - М.: Мир, 1983. - 520 с.
2. Андреев А.Ф., Красавин С.В. Использование волн Лэмба для исследования горных пород в скважинах// Вопросы технологии геохимических и геофизических исследований при геологоразведочных работах и охране окружающей среды. М.: ВНИИГеоинформсистем. 1989. - С. 28-35.
3. Аркадьев Е.А. Измерительная установка для многозондового акустического каротажа нефтегазовых скважин // Современные тенденции развития техники и технологии ядерно-геофизических и геоакустических исследований скважин. М.: ВНИИГеоинформсистем. 1987. - С. 11-18.
4. Арсеньев-Образцов С.С., Жукова Т.М. Применение преобразования Радона для выделения помех в поле многоволновой акустики // Труды Российского государственного университета нефти и газа им. И.М. Губкина. 2010. № 2. - С. 107-114.
5. Ахметсафин Р.Д., Булгаков А.А. Дополнительное уплотнение геофизических файлов // НТВ «Каротажник» № 85, 2001. - С. 78-82.
6. Ахметсафин Р.Д., Булгаков А.А. Частотно-временное разделение волн акустического каротажа // НТВ «Каротажник» № 90, 2002. - С. 46-50.
7. Ахметсафин Р.Д., Булгаков А.А. Сжатие данных при акустическом каротаже // НТВ «Каротажник» № 90, 2002. - С. 51-56.
8. Ахметсафин Р.Д., Виниченко А.Д. Применение метода конечных элементов для моделирования работы установок электрического каротажа // Геофизика. 2004. № 4. - С 27-34.
9. Ахметсафин Р.Д., Ардаширов А.Р., Булгаков А.А., Габдрахманов И.Р., Дворкин В.И., Иванов В.Я., Сулейманов М.А., Служаев В.Н., Лаздин А.Р. Автономная геофизическая система «Горизонталь» с доставкой на

- бурильных трубах // НТВ «Каротажник». Тверь: Изд. АИС. 2005. №10–11. - С. 39–46.
10. **Ахметсафин Р.Д.**, Булгаков А.А. О сжатии двумерных геофизических данных // НТВ «Каротажник». – №10-11, 2005. – С. 187-193.
  11. **Ахметсафин Р.Д.**, Сулейманов Т.М. Применение аппарата нечетких моделей при геофизической и петрофизической интерпретации // НТВ «Каротажник». – №10-11, 2005. – С. 194-198.
  12. **Ахметсафин Р.Д.**, Дубинский В., Паттерсон Д. Метод разделения волн волнового акустического каротажа с помощью преобразований Радона и Гильберта // НТВ «Каротажник», №11 (164), 2007. - С. 82-96.
  13. **Ахметсафин Р.Д.**, Дубинский В., Паттерсон Д. Метод Гильберт-сембланс. Обработка данных акустического каротажа // Геология и геофизика, 2008, т. 49 (9). - С. 919-925.
  14. **Ахметсафин Р.Д.** О возможности многоэлементного акустического каротажа для подавления эффекта «звенящей» колонны // Геофизика, 2009, № 1, - С. 44-47.
  15. **Ахметсафин Р.Д.** Цифровая фильтрация акустических массивов волнового каротажа // НТВ «Каротажник», №9(231), 2013, - С. 110-116.
  16. **Ахметсафин Р.Д.**, Ахметсафина Р.З. Статистические методы оценки времен первых вступлений по записям волнового акустического каротажа // НТВ «Каротажник». 2014. № 4 (238). - С. 54-60.
  17. **Ахметсафин Р.Д.** Алгоритмические основы сейсмолокации бурового долота. // НТВ «Каротажник», №5(239), 2014, - С. 67-73.
  18. **Ахметсафин Р.Д.**, Ахметсафина Р.З. О повышении разрешающей способности трехэлементных зондов акустического каротажа // Геофизика. 2014. №6. - С. 58-61.
  19. **Ахметсафин Р.Д.** Применение разложения Карунена-Лозва для фильтрации меры когерентности многоканальных записей акустического каротажа // Геофизика. 2015. №1. - С. 78-81.

20. **Ахметсафин Р.Д., Ахметсафина Р.З.** Две вычислительные реализации фильтрации по кажущимся скоростям массивов записей многоэлементного волнового акустического каротажа // *Геофизика*, 2016, № 3. - С. 78-84.
21. **Ахметсафин Р.Д., Ахметсафина Р.З.** Сембланс – инструмент оценки скоростей составляющих пакета волнового акустического каротажа // *НТВ «Каротажник»*. – 2016. - №8 (266). - С. 98-118.
22. **Ахметсафин Р.Д., Паттерсон Д., Дубинский В.** Новый метод улучшения точности измерений в анализе тонких слоев // *SEG/EAGE/EAGO 3-я Международная конференция и выставка «Санкт-Петербург – 2008. Геонауки: От новых идей к новым открытиям»*, Russia, 7-10 April 2008, CD-Rom, B036.
23. **Ахметсафин Р.Д.** Фильтрация по скорости данных акустического каротажа через обсадную колонну // *Научно-практическая конференция «Новая техника и технологии для геофизических исследований скважин»*. Тезисы докладов конференции в рамках XVI международной специализированной выставки «Газ. Нефть. Технологии-2008» г. Уфа, 21 мая 2008 г. - С. 227-229.
24. **Ахметсафин Р.Д., Дубинский В., Паттерсон Д., Ли Ч.** Использование преобразования Радона для эффективного разделения волновых составляющих по скоростям при акустическом каротаже на кабеле и в процессе бурения // *Tyumen 2009 – International Conference and Exhibition*, 02 March 2009, EAGE.
25. **Базин В.В., Пивоварова Н.Е.** Обработка данных многоэлементного акустического зонда // *НТВ «Каротажник»*. Тверь: ГЕРС. 1998. Вып. 53. С. 82-86.
26. **Баяк И.О., Рыжков В.И.** Определение параметров трещин и пор карбонатных коллекторов по данным волнового акустического каротажа // *Технологии сейсморазведки*. – 2010. – № 03. – С. 32-42.

27. Белоконь Д.В., Козяр Н.В., Смирнов Н.А. Акустические исследования нефтегазовых скважин через обсадную колонну // НТВ «Каротажник». Тверь: ГЕРС. 1996. Вып. 29. - С. 8-30.
28. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных. – М.: Книга по Требованию, 2012. – 541 с.
29. Борисенко Г. Т., Исмаилова Г. А. Анализ возможностей акустического каротажа при изучении тонкослоистых разрезов // Вестник КазНТУ, серия геологическая. – 2012. – № 4. – С. 118-120.
30. Брыксин А.А. и др. Сравнение двух томографических методов при локализации гидроразрыва пласта // Всероссийская конференция «Геофизические методы исследования земной коры», посвященная 100-летию со дня рождения академика НН Пузырева. – Изд-во ИНГТ СО РАН, 2014, Новосибирск, 2014. – С. 109-111.
31. Вершинин А.Г., Вершинин С.А., Добрынин С.В. Разработка современной аппаратуры волнового кросс-дипольного акустического каротажа с применением компьютерного моделирования // Технологии сейсморазведки, № 1, 2013. - С. 87–95.
32. Виленкин Н.Я. и др. Справочная математическая библиотека. Функциональный анализ / ред. Крейн С. Г.. - М. : Наука, 1964. - 424 с.
33. Голуб Д. Матричные вычисления / Д. Голуб, Ч. Ван Лоун; пер. с англ. – М.: Мир, 1999. – 548 с. – ISBN 5-03-002406-9
34. Горгун В.А., Косарев В.Е., Утемов Э.В. Дисперсионный метод определения скоростей по данным многоэлементного волнового акустического каротажа // Георесурсы 6(42) 2011. - С. 44-47.
35. Городнов А.В., Черноглазов В.Н., Митин А.В. Способ ослабления акустической волны по колонне // НТВ Каротажник. 2011. № 9. - С. 47-52.
36. Доровский В.Н., Подбережный М.Ю., Нефедкин Ю.А. Зависимость длины поглощения волны Стоунли от концентрации солей в жидкости,



- насыщающей пористую среду // Геология и геофизика. – 2011. – Т. 52. – № 2. – С. 312-321.
37. Дубинский В., Танг К., Паттерсон Д., Петписит К. Новые разработки в области акустического каротажа в процессе бурения (LWD) для измерения продольной и поперечной скоростей в горных породах при изменяющихся условиях бурения // Тезисы докл. секции В VII Конгресса нефтегазопромышленников России. Уфа, 2009. - С. 25-32.
38. Дьяконов В. MATLAB и SIMULINK для радиоинженеров. – ДМК Пресс, 2011. – 976 с.
39. Зингерман К. М. Оценка погрешности приближенной формулы для вычисления скорости распространения волны Стоунли // НТВ «Каротажник». – 2007. – № 7. – С. 85-89.
40. Иберла К. Факторный анализ. Пер. с нем. В. М. Ивановой. - М. : Статистика, 1980. - 398 с.
41. Ивакин Б.Н., Карус Е.В., Кузнецов О.Л. Акустический метод исследования скважин. – Недра, 1978. 320 с.
42. Казанский Н.Л., Серафимович П.Г., Харитонов С.И. Адаптивный итеративный алгоритм для выделения различных типов волн в данных акустического каротажа // Компьютерная оптика. – 2002. – № 22. – С. 41-46.
43. Каптелини В., Константиноидис А. Дж., Эмилиани П. Цифровые фильтры и их применение. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 360 с.
44. Кауфман А.А., Левшин А.Л. Введение в теорию геофизических методов. Часть 5. Акустические и упругие волновые поля в геофизике // М.: ООО «Недра-Бизнесцентр». 2006. 663 с.
45. Кашуба Г.А., Стельмах В.Г. Возможности аппаратурно-методического комплекса многозондового волнового акустического каротажа АМАК-2 при решении геологических задач в нефтяных и газовых скважинах // НТВ «Каротажник». Тверь: Изд. АИС. 2008. Вып. 5 (170). - С. 30-41.

46. Клаербоут Д.Ф. Сейсмическое изображение земных недр. - М.: Недра, 1989. - 405 с.
47. Климочкин А.В. Использование алгоритма фильтрации Калмана для повышения разрешающей способности трехэлементных акустических приборов // НТВ «Каротажник». Тверь: Изд. АИС. 1997. Вып. 39. С. 99-104.
48. Князев А.Р. Оценка трещиноватости низкопористых карбонатных нефтенасыщенных пород по результатам геофизических исследований скважин: Автореферат дис. на соискание ученой степени канд. геол. мин. наук: Пермь. – 2009.
49. Кондратьев И.К. К теории веерной фильтрации // Прикладная геофизика. – 1971. – № 64. – С. 24-39.
50. Методические указания по обработке и интерпретации материалов акустического каротажа нефтяных и газовых скважин / В.Ф. Козяр, Д.В. Белоконь, Л.Н. Грубова и др. М.: изд. ВНИИЯГТ. 1986. - 119 с.
51. Козяр В.Ф., Белоконь Д.В., Козяр Н.В., Смирнов Н.А. Акустические исследования в нефтегазовых скважинах - состояние и направления развития // НТВ «Каротажник». – 1999. – №63. – С. 47-56.
52. Козяр В.Ф., Глебочева Н.К., Медведев Н.Я. Выделение проницаемых пород-коллекторов по параметрам волны Стоунли (результаты промышленных испытаний) // НТВ «Каротажник». Тверь: ГЕРС. 1999. Вып. 56. - С. 52-59.
53. Козяр В.Ф., Козяр Н.В.. Форма головных волн акустического каротажа // НТВ «Каротажник». – 2014. – №2. Вып. 236, – С. 60-68.
54. Козяр Н.В. Идентификация и определение характеристик упругих волн, распространяющихся в скважинах при акустическом каротаже // НТВ «Каротажник». Тверь: ГЕРС. 1999. Вып. 56. - С. 73-80.
55. Козяр Н.В., Коробченко В. В. Практические аспекты оценки упругих параметров пород и контроль результатов гидроразрыва пласта по материалам прибора АВАК // НТВ «Каротажник». – 2013. – № 3. – С. 49-56.

56. Кокшаров В.З. Волна Лэмба и ее связь с проницаемостью // Исследования по многоволновому акустическому каротажу и сейсмомоделированию. Новосибирск: изд. ИГиГ СО АН СССР. 1990. - С. 3-12.
57. Колесников Ю.И., Игнатов А.Ю., Кокшаров В.З. О точности оценок поглощения Р-волн по данным акустического каротажа. Результаты физического моделирования // Геология и геофизика – 1992. – №9. – С. 134-141.
58. Колесников Ю.И., Игнатов А.Ю. Физическое моделирование акустических волновых полей в скважине с радиальной неоднородностью // Геология и разведка. 1994. V. 35. №3. - С. 137-143.
59. Котельников В.А. О пропускной способности эфира и проволоки в электросвязи — Всесоюзный энергетический комитет. // Материалы к I Всесоюзному съезду по вопросам технической реконструкции дела связи и развития слаботочной промышленности, 1933. - Репринт статьи в журнале // Успехи физических наук — 2006. — № 7. — С. 762-770.
60. Косарев В.Е., Горгун В.А., Шерстюков О.Н., Горбачев В.Н., Михеев М.Л. Сравнение методов оценки интервальных времен по данным многоэлементного волнового акустического каротажа // Нефтяное хозяйство. - 2016. - №2. - С. 24-27.
61. Косарев В. Е. и др. Учет влияния децентрирования прибора в скважине при обработке данных многоэлементного волнового акустического каротажа // Geomodel 2016-18th Science and Applied Research Conference on Oil and Gas Geological Exploration and Development. – 2016.
62. Крауклис П. В., Крауклис Л. А. Волновое поле точечного источника в скважине // Вопросы динамической теории распространения сейсмических волн. – 1976. – Т. 16. – С. 41-53.
63. Крутин В.Н., Марков М.Г., Юматов А.Ю. Скорость и затухание волны Лэмба-Стоунли в скважине, окруженной насыщенной пористой средой // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. М.: Наука. 1987. №9. - С. 33-38.

64. Крутин В.Н., Марков М.Г., Юматов А.Ю. Волна Лэмба-Стоунли в кольцевом зазоре между каротажным прибором и проницаемой стенкой скважины / Новосибирск, СО АН СССР Изд. "Наука". 1988. №9. - С. 96-101.
65. Кузнецов Д. С. Специальные функции. – Издательство «Высшая Школа», 1965.
66. Нахамкин С.А. О веерной фильтрации // Известия АН СССР. Физика Земли. – 1969. – № 11. – С. 24-35.
67. Николаев А.В., Троицкий П.А, Чеботарева И.Я. Изучение литосферы сейсмическими шумами // Доклады АН СССР. 1986. Т. 286, № 3. - С. 586–591.
68. Пергамент А.Х., Ф.А. Петренко, Б.Д. Плющенко, В.И. Турчанинов, Численное моделирование акустического каротажа скважин / Препринт ИПМ РАН, №70, 1997, Москва. 28 с.
69. Пименова А.В., Белов С.В., Шумилов А.В. Селекция волн при акустическом каротаже на основе преобразования Радона // Геофизика. 2015. № 5. - С. 19-22.
70. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и практика цифровой обработки сигналов. - М.: Мир. 1978. - 848 с.
71. Рябинкин Л.А. Основы разрешающей способности регулируемого направленного приема (РНП) сейсмических волн // Прикладная геофизика. – 1957. – № 16. - С. 3-16.
72. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. – СПб.: Питер, 2003. – 608 с.
73. Синев А. В., Роменский Е. И., Доровский В. Н. Влияние глинистой корки на волновое поле вблизи скважины в пористой насыщенной среде // Геология и геофизика. – 2012. – Т. 53. – № 8. – С. 1070-1077.
74. Смирнов Н.А. Обоснование параметров и разработка основных узлов аппаратуры акустического каротажа для отдельного возбуждения и регистрации продольной, поперечной и Лэмба-Стоунли волн: Автореф. дис-

- серт. на соиск. уч. степени канд. техн. наук / АООТ НПП "ГЕРС". Тверь. 1996. - 25 с.
75. Сулейманов М.А., Семенов Е.В., Иванов В.Я., **Ахметсафин Р.Д.** Комплекс АМК-2000 для контроля технического состояния и качества цементирования скважин // НТВ «Каротажник», - 2003, - №111-112, - С. 39–53.
76. Сыресин Д. Е., Жарников Т. В., Петров И. Б. Метод расчета дисперсионных кривых, волновых полей и упругих параметров среды в скважинах с радиально-неоднородной зоной нарушения // Труды МФТИ. – 2012. – Т. 4. – № 4. – С. 169-176.
77. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука. 1979. 288 с.
78. Ту Дж. и Гонсалес Р. Принципы распознавания образов. - М. : Мир, 1978. - 414 с.
79. Финк Л.М. Сигналы, помехи, ошибки. – М.: Радио и связь, 1984. – 256 с.
80. Яковлев И. В. и др. Применение преобразования  $\tau$ - $p$ - $q$  для селекции волн по скоростям в данных МОГ // Материалы научно-практической конференции «Гальперинские чтения». – 2004. – Т. 2004. – С. 74-77.
81. Aeron S., Bose S., Valero H. P. Robust Detection and Estimation for Logging While Drilling Monopole Acoustic Data // Signal Processing, IEEE Transactions on. – 2015. – Т. 63. – № 12. – С. 3062-3075.
82. Akaike H. Information theory and an extension of the maximum likelihood principle // Selected Papers of Hirotugu Akaike. – Springer New York, 1998. – С. 199-213.
83. Akbar N., Dvorkin J., Nur A. Relating P-wave attenuation to permeability // Geophysics. – 1993. – Т. 58. – № 1. – С. 20-29.
84. **Akhmetzafin R.**, Dubinsky V., Patterson D.J. Wave analysis using phase velocity processing: пат. 7646673 США. – 2010.

85. Aki K., Richards P.G., Quantitative Seismology, New York: Freeman and Company, 1980.
86. Alford J. et al. Sonic Logging While Drilling-Shear Answers // Oilfield Review. – 2012. – T. 24.– №1.
87. Al-Yahya K.M. Application of the partial Karhunen-Loeve transform to suppress random noise in seismic sections // Geophysical prospecting. – 1991. – T. 39.– №1. – C. 77-93.
88. Andrews H.C., Patterson C.L. Singular value decompositions and digital image processing // Acoustics, Speech and Signal Processing, IEEE Transactions on. – 1976. – T. 24. – № 1. – C. 26-53.
89. Auger F., Flandrin P. Improving the readability of time-frequency and time-scale representations by the reassignment method // Signal Processing, IEEE Transactions on. – 1995. – T. 43.– №5. – C. 1068-1089.
90. Assous S., Elkington P. Borehole acoustic array processing methods: A review // The Journal of the Acoustical Society of America. – 2014. – T. 136. – № 4. – C. 2255-2255.
91. Bała M., Cichy A. Comparison of P-and S-waves velocities estimated from Biot-Gassmann and Kuster-Toksöz models with results obtained from acoustic wavetrains interpretation // Acta Geophysica. – 2007. – T. 55.– №2. – C. 222-230.
92. Barros T. et al. Implementation aspects of eigenstructure-based velocity spectra // 74th EAGE Conference and Exhibition incorporating EUROPEC 2012. – 2012.
93. Bekara M., Van der Baan M. Local singular value decomposition for signal enhancement of seismic data // Geophysics. – 2007. – T. 72.– №2.– C. V59-V65.
94. Bing W. et al. Extracting near-borehole P and S reflections from array sonic logging data // Journal of Geophysics and Engineering. – 2011. – T. 8.– №2. – C. 308-315.
95. Biondi B. L., Kostov C. High-resolution velocity spectra using eigenstructure methods // Geophysics. – 1989. – T. 54. – № 7. – C. 832-842.

96. Biot M.A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. Low-frequency range // The Journal of the acoustical Society of America. – 1956. – T. 28.– №2. – C. 168-178.
97. Blanch J.O. et al. Processing for sonic waveforms: пат. 6453240 CIIIA. – 2002.
98. Blanch J.O. et al. Processing for sonic waveforms: пат. 6691036 CIIIA. – 2004.
99. Blanchet G., Charbit M. Digital signal and image processing using Matlab. – London : Iste, 2006. – T. 4. - 764 c.
100. Block L.V., Cheng C.H., Duckworth G.L. Velocity Analysis of Multi-Receiver Full Waveform Acoustic Logging Data In Open and Cased Holes. – Massachusetts Institute of Technology. Earth Resources Laboratory, 1987. – C. 365-404.
101. Bolshakov A., Li C., Achmetsafin R., Dubinsky V., Patterson D. Field Examples of Effective Common Mode Noise Reduction in Acoustic Data by Utilizing Radon Transform // 71st EAGE Conference & Exhibition. – 2009 SPE EUROPEC. Amsterdam, Netherlands. T040.
102. Bose S. Performance bounds on shear anisotropy azimuth estimation using borehole sonic logging tools // Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop Proceedings, 2002. – IEEE, 2002. – C. 174-178.
103. Bradshaw A., Ng M. Multiple attenuation by parabolic stack Radon transform: Geo-X Systems internal paper. – 1987.
104. Brie A. et al. Practical dipole sonic dispersion correction // Trans. Soc. Expl. Geophys. – 1996. – T. 6. – C. 178-181.
105. Brie A. et al. New directions in sonic logging // Oilfield Review. – 1998. – T. 10. – №1. – C. 40-55.
106. Brie A. et al. Quantitative formation permeability evaluation from Stoneley waves // SPE Reservoir Evaluation & Engineering. – 2000. – T. 3.– №02. – C. 109-117.
107. Cao Z., Bancroft J. C. Multiple attenuation by semblance weighted Radon transform: CREWES Research Report. – 2004.

108. Cangelosi R., Goriely A. Component retention in principal component analysis with application to cDNA microarray data // *Biology direct*. – 2007. – T. 2. – № 1. – C. 1-22.
109. Capon J. High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis // *Proceedings of the IEEE*. – 1969. – T. 57. – № 8. – C. 1408-1418.
110. Chabot L. et al. Single-well imaging using full-waveform sonic data. – University of Calgary, Department of Geology and Geophysics, 2003.
111. Chapman C. H. A new method for computing synthetic seismograms // *Geophysical Journal International*. – 1978. – T. 54. – № 3. – C. 481-518.
112. Chapman C.H. Generalized Radon transforms and slant stacks // *Geophysical Journal International*. – 1981. – T. 66.– №2. – C. 445-453.
113. Chauris H., Noble M., Podvin P. Testing the behavior of differential semblance for velocity estimation // *68th Annual International SEG Meeting, New Orleans. Society of Exploration Geophysicists. Expanded Abstract*. – 1998.
114. Chen Y., Liu T., Chen X. Velocity analysis using similarity-weighted semblance // *Geophysics*. – 2015. – T. 80. – № 4. – C. A75-A82.
115. Cheng C.H., Toksöz M.N. Elastic wave propagation in a fluid-filled borehole and synthetic acoustic logs // *Geophysics*. – 1981. – T. 46.– №7. – C. 1042-1053.
116. Close D. et al. The Sound of Sonic: A Historical Perspective and Introduction to Acoustic Logging // *CSEG Recorder*. – 2009. – C. 34-43.
117. Cohen L. Time-frequency analysis. – Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall PTR, 1995.- 299 c.
118. Cohen G. Higher-order numerical methods for transient wave equations. – Springer Science & Business Media, 2013. – 349 c.
119. Crain E.R. "How Many Acoustic Waves Can Dance On The Head Of A Sonic Log?" *Canadian Logging Society*: 2004.-C. 10-16.



120. Davison M.E. A singular value decomposition for the Radon transform in n-dimensional Euclidean space // Numerical Functional Analysis and Optimization. – 1981. – Т. 3. – № 3. – С. 321-340.
121. Deans S.R. The Radon transform and some of its applications. – Dover Publications, Incorporated, 2007.-295 с.
122. Donderici B., Cheng A. Joint time-frequency processing for borehole acoustic arrays: пат. 20150137987 CIIA. – 2015.
123. Done W., Kirilin R.L., Moghaddamjoo A. Two-dimensional coherent noise suppression in seismic data using eigendecomposition // Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on. – 1991. – Т. 29.– №3. – С. 379-384.
124. Dunne J., Beresford G. A review of the  $\tau$ -p transform, its implementation and its applications in seismic processing // Exploration Geophysics. – 1995. – Т. 26. – № 1. – С. 19-36.
125. Duarte L.T. et al. Seismic wave separation by means of robust principal component analysis // Signal Processing Conference (EUSIPCO), 2012 Proceedings of the 20th European. – IEEE, 2012. – С. 1494-1498.
126. Ellefsen K. Elastic wave propagation along a borehole in an anisotropic medium: дис. – Massachusetts Institute of Technology, 1990. 272 с.
127. Ellis D.V., Singer J.M. Well logging for earth scientists. – Dordrecht : Springer, 2007. – Т. 692.
128. Fomel S. Velocity analysis using AB semblance // Geophysical Prospecting. – 2009. – Т. 57. – № 3. – С. 311-321.
129. Foster D. J., Mosher C. C. Suppression of multiple reflections using the Radon transform // Geophysics. – 1992. – Т. 57. – № 3. – С. 386-395.
130. Foster M., Hicks W., Nipper J. Optimum inverse filters which shorten the spacing of velocity logs // GEOPHYSICS, 1962, 27(3), 317–326. doi: 10.1190/1.1439017

131. Frassetto A. et al. Improved imaging with phase-weighted common conversion point stacks of receiver functions // *Geophysical Journal International*. – 2010. – T. 182. – № 1. – C. 368-374.
132. Freire S.L. M., Ulrych T.J. Application of singular value decomposition to vertical seismic profiling // *Geophysics*. – 1988. – T. 53. – №6. – C. 778-785.
133. Fukunaga K., Koontz W. L. G. Application of the Karhunen-Loeve Expansion to Feature Selection and Ordering // *IEEE Transactions on Computers*. – 1970. – № 4. – C. 311-318.
134. Gan S. et al. Structure-oriented singular value decomposition for random noise attenuation of seismic data // *Journal of Geophysics and Engineering*. – 2015. – T. 12. – № 2. – C. 262.
135. Gan W.S. *Acoustical Imaging: Techniques and Applications for Engineers*. – John Wiley & Sons, 2012, - 426 c.
136. Garat J. et al. A petrophysical interpretation using the velocities of P and S waves (full-waveform sonic) // *The Log Analyst*. – 1990. – T. 31. – № 06.
137. Gassmann F. Elasticity of porous media // *Vierteljahrsschrder Naturforschenden Gessellschaft*. – 1951. – T. 96. – C. 1-23.
138. Gelchinsky B., Landa E., Shtivelman V. Algorithms of phase and group correlation // *Geophysics*. – 1985. – T. 50. – № 4. – C. 596-608.
139. Gerbrands J.J. On the relationships between SVD, KLT and PCA // *Pattern recognition*. – 1981. – T. 14. – № 1. – C. 375-381.
140. Gulunay N. et al. High-resolution CVS: Generalized covariance measure // 1991 SEG Annual Meeting. – Society of Exploration Geophysicists, 1991.
141. Haldorsen J.B.U. et al. Borehole acoustic waves // *Oilfield Rev*. – 2006. – T. 18. – №1. – C. 34-43.
142. Haldorsen J.B.U. et al. Borehole acoustic reflection survey for high resolution imaging // 2006 SEG 76<sup>th</sup> Annual International Meeting. – Society of Exploration Geophysicists, 2006. Expanded abstract, - C. 314-318.

143. Hampson D. et al. Inverse velocity stacking for multiple elimination // 1986 SEG Annual Meeting. – Society of Exploration Geophysicists, 1986.
144. Han L., Wong J., Bancroft J.C., Stewart R.R. Automatic time picking and velocity determination on full waveform sonic well logs: Technical Report 20, 2008, CREWES, University of Calgary.
145. Harding A.J. Slowness-time mapping of near offset seismic reflection data // Geophysical Journal International. – 1985. – T. 80. – № 2. – C. 463-492.
146. Harrison A.R. et al. Acquisition and analysis of sonic waveforms from a borehole monopole and dipole source for the determination of compressional and shear speeds and their relation to rock mechanical properties and surface seismic data // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – Society of Petroleum Engineers. – 1990. SPE 20557. – C. 267-282.
147. Hicks W.G., Berry J.E. Application of continuous velocity logs to determination of fluid saturation of reservoir rocks // Geophysics. – 1956. – T. 21. – №3. – C. 739-754.
148. Houston L.M. A comparison of velocity and wavelet-based tube-wave suppression methods // Journal of Geophysics and Engineering. – 2005. – T. 2. – №1. – C. 75-79.
149. Hsu K. Wave separation and feature extraction of acoustic well-logging waveforms using Karhunen-Loeve transformation // Geophysics. – 1990. – T. 55. – №2. – C. 176-184.
150. Jones I. F., Levy S. Signal-to-noise ratio enhancement in multichannel seismic data via the Karhunen-Loève transform // Geophysical prospecting. – 1987. – T. 35. – № 1. – C. 12-32.
151. Keller J.D. Acoustic wave propagation in composite fluid-saturated media // Geophysics. – 1989. – T. 54. – №12. – C. 1554-1563.
152. Kerkyacharian G. et al. Inversion of noisy Radon transform by SVD based needlets // Applied and Computational Harmonic Analysis. – 2010. – T. 28. – № 1. – C. 24-45.

153. Kimball C.V., Marzetta T.L. Semblance processing of borehole acoustic array data // *Geophysics*. – 1984. – Т. 49. – №3. – С. 274-281.
154. Kimball C.V. Sonic well logging methods and apparatus utilizing dispersive wave processing: пат. 5278805 США. – 1994.
155. Kimball C.V. et al. Dispersive Wave Processing of the Borehole Flexural Mode // 1996 SEG Annual Meeting. – Society of Exploration Geophysicists, 1996.
156. Kimball C.V. Shear slowness measurement by dispersive processing of the borehole flexural mode // *Geophysics*. – 1998. – Т. 63. – № 2. – С. 337-344.
157. Kinoshita T. et al. LWD sonic tool design for high-quality logs // 2010 SEG Annual Meeting. – Society of Exploration Geophysicists, 2010.
158. Kinoshita T., Yamamoto H., Fukushima T. Methods, Systems and Devices for Generating Slowness-Frequency Projection Logs: заяв. пат. 14/341,847 США. – 2014.
159. Kirlin R.L. The relationship between semblance and eigenstructure velocity estimators // *Geophysics*. - 1992. - Т. 57. - № 8. - С. 1027–1033.
160. Kitazawa M., Valero H. P. Processing of pseudo-Rayleigh waves in cased hole // *Proceedings of the 10th SEGJ International Symposium*. – 2011. – С. 137-140.
161. Klimentos T., McCann C. Relationships among compressional wave attenuation, porosity, clay content, and permeability in sandstones // *Geophysics*. – 1990. – Т. 55. – № 8. – С. 998-1014.
162. Klimentos T. Attenuation of P-and S-waves as a method of distinguishing gas and condensate from oil and water // *Geophysics*. – 1995. – Т. 60. – № 2. – С. 447-458.
163. Kozak M., Boonen P., Siefert D. Phase velocity processing for acoustic logging-while-drilling full waveform data // *SPWLA 42nd Annual Logging Symposium*. – Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts, 2001.

164. Kozak M., Williams J. Instantaneous frequency-slowness analysis applied to borehole acoustic data // ASEG Extended Abstracts. – 2015. – T. 2015. – № 1. – C. 1-5.
165. Kravis S. The Nth root slant stack-a new method of coherency enhancement // First Break. – 1990. – T. 8. – № 9. – C. 339-344.
166. Kumar R. et al. Seismic data interpolation and denoising using svd-free low-rank matrix factorization // 75th EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2013. – 2013.
167. Kurkjian A. L., Lang S. W., Hsu K. Slowness estimation from sonic logging waveforms // Geoexploration. – 1991. – T. 27. – № 3. – C. 215-256.
168. Kuster G.T., Toksöz M.N. Velocity and attenuation of seismic waves in two-phase media: Part I. Theoretical formulations // Geophysics. – 1974. – T. 39.– №5. – C. 587-606.
169. Lang S.W. et al. Estimating slowness dispersion from arrays of sonic logging waveforms // Geophysics. – 1987. – T. 52. – № 4. – C. 530-544.
170. Lee M.W. Biot-Gassmann theory for velocities of gas hydrate-bearing sediments // Geophysics. – 2002. – T. 67.– №6. – C. 1711-1719.
171. Lee S.Q. et al. Model-based dispersive processing of borehole dipole wave data using an equivalent-tool theory // Geophysics. – 2015. – T. 81. – № 1. – C. D35-D43.
172. Leven J.H. et al. A semblance-weighted slowness-filter in the time domain // 1984 SEG Annual Meeting. – Society of Exploration Geophysicists, 1984.
173. Li J., Stoica P. An adaptive filtering approach to spectral estimation and SAR imaging // Signal Processing, IEEE Transactions on. – 1996. – T. 44. – № 6. – C. 1469-1484.
174. Li J., Innanen K. A., Lines L. R., Pan W. Reflection Extraction from Sonic Log Waveforms Using Karhunen-Loeve Transform // GeoConvention, Calgary, Alberta. – 2016.

175. Li W. et al. Enhanced dispersion analysis of borehole array sonic measurements with amplitude and phase estimation method // 2012 SEG Annual Meeting. – Society of Exploration Geophysicists, 2012.
176. Li W. et al. Forward and backward amplitude and phase estimation method for dispersion analysis of borehole sonic measurements // *Geophysics*. – 2015. – T. 80. – № 3. – C. D295-D308.
177. Lin W., Cui H. Anomalous dispersion of Stoneley waves in fluid-filled boreholes // *Ultrasonics Symposium (IUS), 2015 IEEE International*. – IEEE, 2015. – C. 1-4.
178. Liu Y., Su Y., Tang X. Numerical simulation of logging-while-drilling multipole acoustic propagation // *The 21st International Congress on Sound and Vibration, ICSV 21, 13-17 July. Beijing/China*. – 2014.
179. Luo S., Hale D. Velocity analysis using weighted semblance // *Geophysics*. – 2012. – T. 77. – № 2. – C. U15-U22.
180. Luo Y. et al. Rayleigh-wave mode separation by high-resolution linear Radon transform // *Geophysical Journal International*. – 2009. – T. 179. – № 1. – C. 254-264.
181. Lyle Jr W. D. Method of increasing the vertical resolution of well log data : пат. 4535625 CIIA. – 1985.
182. Ma J. et al. Joint processing of forward and backward extended Prony and weighted spectral semblance methods for robust extraction of velocity dispersion data // *SPWLA 51st Annual Logging Symposium*. – Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts, 2010.
183. Maass P. Singular value decompositions for Radon transforms // *Mathematical Methods in Tomography*. – Springer Berlin Heidelberg, 1991. – C. 6-14.
184. Maeda N. A method for reading and checking phase times in auto-processing system of seismic wave data // *Zisin= Jishin*. – 1985. – T. 38. – №3. – C. 365-379.

185. Mandal B. Acoustic signal processing method using array coherency: пат. 6907349 CIIA. – 2005.
186. March D.W., Bailey A.D. March D. W., Bailey A.D. A review of the two-dimensional transform and its use in seismic processing // First break. – 1983. – T. 1. – №1. – C. 9–21.
187. Mari J.L., Glangeaud F., Coppens F. Signal processing for geologists & geophysicists. – Technip, 1999. – C. 458.
188. Mari J.L. Seismic wave separation by SVD and (FK) combined filters // Proc. Extended Abstracts 2006 2nd Int. Symp. Communications, Control and Signal Processing. – 2006.
189. Market J. et al. Processing and Quality Control of LWD Dipole Sonic Measurements, paper PP // Trans., 2002 Annual Logging Symposium, SPWLA. – 2002. – C. 1-14.
190. McClellan J. H. Two-dimensional spectrum analysis in sonic logging // Acoustics, Speech, and Signal Processing, IEEE International Conference on ICASSP'86. – IEEE, 1986. – T. 11. – C. 3105-3112.
191. McFadden P. L., Drummond B. J., Kravis S. The N<sup>th</sup>-root stack: Theory, applications, and examples // Geophysics. – 1986. – T. 51. – № 10. – C. 1879-1892.
192. McMechan G.A., Ottolini R. Direct observation of a p- $\tau$  curve in a slant stacked wave field // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1980. – T. 70. – № 3. – C. 775-789.
193. McMechan G. A., Yedlin M. J. Analysis of dispersive waves by wave field transformation // Geophysics. – 1981. – T. 46. – № 6. – C. 869-874.
194. Minear J. W. et al. Full Wave sonic logging: a brief perspective // SPWLA 27th Annual Logging Symposium. – Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts, 1986.

195. Mojica O. F., Porsani M. J., da Silva M. G. Using SVD filters for velocity analysis and ground-roll attenuation // *Revista Brasileira de Geofísica*. – 2013. – T. 31. – № 1. – C. 75-84.
196. Moran T.L., Sheen D.M., Schenkel T. Evaluation of non-nuclear techniques for well logging: Technology evaluation. – PNNL-19867, Pacific Northwest National Laboratory, Richland, Washington, 2010.
197. Mousa W.A., Al-Shuhail A.A. Enhancement of first arrivals using the  $\tau$ - $p$  transform on energy-ratio seismic shot records // *Geophysics*. – 2012. – T. 77. – № 3. – C. V101-V111.
198. Mulder W.A., Ten Kroode A.P.E. Automatic velocity analysis by differential semblance optimization // *Geophysics*. – 2002. – T. 67. – № 4. – C. 1184-1191.
199. Neidell N.S., Taner M.T. Semblance and other coherency measures for multichannel data // *Geophysics*. – 1971. – T. 36. – № 3. – C. 482-497.
200. Nolte B., Huang X. J. Dispersion analysis of split flexural waves: Annual report of borehole acoustics and logging and reservoir delineation consortia // *Massachusetts Institute of Technology*. – 1997.
201. Paillet F.L., Cheng C.H. *Acoustic Waves in Boreholes*, CRC Press, Boca Raton, Fla., 1991. – 265 c.
202. Pardo D. et al. Influence of borehole-eccentred tools on wireline and logging-while-drilling sonic logging measurements // *Geophysical Prospecting*. – 2013. – T. 61. – № 1. – C. 268-283.
203. Park C.B. et al. Imaging dispersion curves of surface waves on multi-channel record // *SEG Expanded Abstracts*. – 1998. – T. 17. – № 1. – C. 1377-1380.
204. Park C.B., Miller R.D., Xia J. Multichannel analysis of surface waves // *Geophysics*. – 1999. – T. 64. – № 3. – C. 800-808.
205. Paulus C., Mars J.I. New multicomponent filters for geophysical data processing // *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*. – 2006. – T. 44. – № 8. – C. 2260-2270.



206. Peterson E.W. Acoustic wave propagation along a fluid-filled cylinder // *Journal of Applied Physics*. – 1974. – T. 45. – №8. – C. 3340-3350.
207. Phinney R.A., Chowdhury K.R., Frazer L.N. Transformation and analysis of record sections // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978–2012). – 1981. – T. 86. – №B1. – C. 359-377.
208. Pistre V. et al. A Modular Wireline Sonic Tool For Measurements Of 3D (Azimuthal, Radial, And Axial Formation Acoustic Properties // *SPWLA 46th Annual Logging Symposium*. – Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts, 2005.
209. Plona T. et al. Slowness-Frequency projection logs: A New QC Method for accurate sonic slowness evaluation // *46th SPWLA Symposium*. – 2005.
210. Qi X., Tang X., Su Y., Li S. A novel signal processing technique for cased-hole acoustic logging in the presence of pipe waves // *The 21st International Congress on Sound and Vibration, ICSV 21, 13-17 July. Beijing/China*. – 2014.
211. Rao R.V.N., Toksoz M.N. *Dispersive Wave Analysis—Method and Applications*. – Massachusetts Institute of Technology. Earth Resources Laboratory, 2005.
212. Raymer L.L, Hunt E.R., Gardner J.S. An improved sonic transit time-to-porosity transform // *Trans. SPWLA 21st Annu. Log. Symp.* – 1980. – C. P1-P13.
213. Reiter E.C., Toksoz M.N., Purdy G.M. A semblance-guided median filter // *Geophysical prospecting*. – 1993. – T. 41. – № 1. – C. 15-41.
214. Rieber F. A new reflection system with controlled directional sensitivity // *Geophysics*. – 1936. – T. 1. – № 1. – C. 97-106.
215. Rost S., Thomas C. *Array seismology: Methods and applications* // *Reviews of geophysics*. – 2002. – T. 40. – № 3.
216. Sacchi M. D., Ulrych T. J. High-resolution velocity gathers and offset space reconstruction // *Geophysics*. – 1995. – T. 60. – № 4. – C. 1169-1177.
217. Sacchi M. D. *Aperture compensated Radon and Fourier transforms: дис.* – University of British Columbia, 1996.

218. Saito N. Classification of geophysical acoustic waveforms using time-frequency atoms // Proc. Am. Statist. Assoc. Statist. Computing. – 1996. – C. 322-7.
219. Sarkar D., Baumel R.T., Lerner K.L. Velocity analysis in the presence of amplitude variation // Geophysics. – 2002. – T. 67. – № 5. – C. 1664-1672.
220. Scheibner D. et al. Slow Formation Shear from An LWD Tool: Quadrupole Inversion with A Gulf of Mexico Example //SPWLA 51st Annual Logging Symposium. – Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts, 2010.
221. Schimmel M., Paulssen H. Noise reduction and detection of weak, coherent signals through phase-weighted stacks // Geophysical Journal International. – 1997. – T. 130. – № 2. – C. 497-505.
222. Schimmel M., Stutzmann E., Gallart J. Using instantaneous phase coherence for signal extraction from ambient noise data at a local to a global scale // Geophysical Journal International. – 2011. – T. 184. – № 1. – C. 494-506.
223. Schmidt R. O. Multiple emitter location and signal parameter estimation // Antennas and Propagation, IEEE Transactions on. – 1986. – T. 34. – № 3. – C. 276-280.
224. Schoenberg M. et al. Space–time dependence of acoustic waves in a borehole // The Journal of the Acoustical Society of America. – 1981. – T. 70.– №5. – C. 1496-1507.
225. Schultz P.S., Claerbout J.F. Velocity estimation and downward continuation by wavefront synthesis // Geophysics. – 1978. – T. 43. – № 4. – C. 691-714.
226. Seismic Lab. - Department of Physics, University of Alberta. - <http://seismic-lab.physics.ualberta.ca/>.
227. Sguazzero P., Vesnaver A. A comparative analysis of algorithms for stacking velocity estimation // Bernabini M., Carrin P., Jacovitti G., Rocca F., Treitel S., Worthington MH, Eds. Deconvolution and Inversion: Proceedings of a Workshop Sponsored by the European Association of Exploration Geophysicists, the Society of Exploration Geophysicists, the National Research

- Council of Italy and the National Science Foundation in The United States, Rome, 3-5 September 1986. – Blackwell. – 1987. – C. 267-286.
228. Sharma B.K., Kumar A., Murthy V.M. Evaluation of seismic events detection algorithms // *Journal of the Geological Society of India*. – 2010. – T. 75.– №3. – C. 533-538.
229. Shen P. et al. Differential semblance velocity analysis by wave-equation migration // *SEG Expanded Abstracts*. – 2003. – T. 22. – C. 2132-2135.
230. Silvestrov I., Tcheverda V. SVD analysis in application to full waveform inversion of multicomponent seismic data // *Journal of Physics: Conference Series*. – IOP Publishing, 2011. – T. 290.– №1.– C. 012014.
231. Sinha B. K. Sensitivity and inversion of borehole flexural dispersions for formation parameters // *Geophysical Journal International*. – 1997. – T. 128. – № 1. – C. 84-96.
232. Sinha B. K., Şimşek E., Asvadurov S. Influence of a pipe tool on borehole modes // *Geophysics*. – 2009. – T. 74. – № 3. – C. E111-E123.
233. Spagnolini U. et al. Velocity analysis by truncated singular value decomposition // *Expanded Abstracts 63rd Ann. Internat. Meeting, Soc. Explor. Geophys.*, Washington. – 1993. – C. 26-30.
234. Stevens J.L., Day S.M. Shear velocity logging in slow formations using the Stoneley wave // *Geophysics*. – 1986. – T. 51. – № 1. – C. 137-147.
235. Stoffa P.L. et al. Direct mapping of seismic data to the domain of intercept time and ray parameter-A plane-wave decomposition // *Geophysics*. – 1981. – T. 46. – № 3. – C. 255-267.
236. Stoffa P.L. *Tau-p, a Plane Wave Approach to the Analysis of Seismic Data: A Plane Wave Approach to the Analysis of Seismic Data*, Springer, 1989, T.8, ISBN 0792300386, - 178 c.
237. St-Onge A. et al. Akaike information criterion applied to detecting first arrival times on microseismic data // *GOPH701 project report*, Department of Geoscience, University of Calgary. – 2010. -C. 1658-1662.

238. Sun F., Milkereit B., Campbell A. Continuous Mapping of Velocity Dispersion Using Full-waveform Multi-channel Sonic Logging Data // EAGE Workshop on Seismic Attenuation. – 2013.
239. Symes W.W., Carazzone J.J. Velocity inversion by differential semblance optimization // Geophysics. – 1991. – Т. 56. – № 5. – С. 654-663.
240. Taner M.T., Koehler F. Velocity spectra-digital computer derivation applications of velocity functions // Geophysics. – 1969. – Т. 34. – № 6. – С. 859-881.
241. Taner M.T., Koehler F., Sheriff R.E. Complex seismic trace analysis // Geophysics. – 1979. – Т. 44. – № 6. – С. 1041-1063.
242. Tang X. M., Cheng C. H., Toksöz M. N. Dynamic permeability and borehole Stoneley waves: A simplified Biot–Rosenbaum model // The Journal of the Acoustical Society of America. – 1991. – Т. 90. – № 3. – С. 1632-1646.
243. Tang X.M., Cheng C.H. Fast inversion of formation permeability from Stoneley wave logs using a simplified Biot-Rosenbaum model // Geophysics. – 1996. – Т. 61. – №3. – С. 639-645.
244. Tang X.M., Cheng C.H. A. Quantitative borehole acoustic methods. – Gulf Professional Publishing, 2004. – Т. 24. - 261 с.
245. Tang X.M., Li C., Patterson D.J. Curve-fitting technique for determining dispersion characteristics of guided elastic waves: пат. 8456952 США. – 2013.
246. Tao B., Chen D., Wang X. M. Wave simulations for cementing quality sonic logging using a finite difference method // Piezoelectricity, Acoustic Waves and Device Applications (SPAWDA), 2013 Symposium on. – IEEE, 2013. – С. 1-4.
247. Tao G., King M.S. Porosity and Pore Structure from Acoustic Well Logging DATA1 // Geophysical Prospecting. – 1993. – Т. 41. – № 4. – С. 435-451.
248. Thorson J.R. Velocity stack and slant stack inversion methods: дис. – Stanford University, 1984. 290 с.

249. Todorov T.I., Margrave G.F., Bancroft J.C. Radon transforms via truncated singular value decomposition // CREWES Research Report. - 2008. -T. 20. -C. 1-9.
250. Toksöz M.N., Cheng C.H., Timur A. Velocities of seismic waves in porous rocks // Geophysics. – 1976. – T. 41. – №4. – C. 621-645.
251. Tognarelli A. et al. High-resolution coherency functionals for velocity analysis: An application for subbasalt seismic exploration // Geophysics. – 2013. – T. 78. – № 5. – C. U53-U63.
252. Trickett S., Burroughs L. Prestack rank-reduction-based noise suppression // CSEG Recorder. – 2009. – T. 34. – № 9. – C. 24-31.
253. Tubman K.M., Cheng C. H., Toksoez M. N. Synthetic full waveform acoustic logs in cased boreholes // Geophysics. – 1984. – T. 49. – №7. – C. 1051-1059.
254. Ulrych T.J., Sacchi M.D., Graul J.M. Signal and noise separation: Art and science // Geophysics. – 1999. – T. 64. – № 5. – C. 1648-1656.
255. Ursin B., Silva M. G., Porsani M. J. Generalized semblance coefficients using singular value decomposition // 13th International Congress of the Brazilian Geophysical Society & EXPOGEF, Rio de Janeiro, Brazil, 26–29 August 2013. – Society of Exploration Geophysicists and Brazilian Geophysical Society, 2013. – C. 1544-1549.
256. Ursin B., Silva M. G., Porsani M. J. Signal and traveltime parameter estimation using singular value decomposition // Geophysics. – 2014. – T. 79. – № 5. – C. U1-U14.
257. Valero H., Skelton O., Almeida M. Processing of monopole sonic waveforms through cased hole // 73rd Ann. Internat. Mtg.: Soc. of Expl. Geophys. 2003, – C. 285-288.
258. van der Baan M., Paul A. Recognition and reconstruction of coherent energy with application to deep seismic reflection data // Geophysics. – 2000. – T. 65. – № 2. – C. 656-667.

259. Ventosa S., Simon C., Schimmel M. Window length selection for optimum slowness resolution of the local-slant-stack transform // *Geophysics*. – 2012. – T. 77. – №2. – C. V31-V40.
260. Virieux J. P-SV wave propagation in heterogeneous media: Velocity-stress finite-difference method // *Geophysics*. – 1986. – T. 51. – № 4. – C. 889-901.
261. Vrabie V.D. et al. SVD-ICA: A new tool to enhance the separation between signal and noise subspaces // *Signal Processing Conference, 2002 11th European*. – IEEE, 2002. – C. 1-4.
262. Wang H., Tao G., Fehler M. C. Investigation of the high-frequency wavefield of an off-center monopole acoustic logging-while-drilling tool // *Geophysics*. – 2015. – T. 80. – № 4. – C. D329-D341.
263. Wang R. et al. Interpretation of Sonic Waveforms Acquired in High-Angle and Horizontal Wells // *56th SPWLA Symposium*. - 2015.
264. Watson P. K. Kalman filtering as an alternative to Ordinary Least Squares—Some theoretical considerations and empirical results // *Empirical Economics*. – 1983. – T. 8. – № 2. – C. 71-85.
265. Wax M., Kailath T. Detection of signals by information theoretic criteria // *Acoustics, Speech and Signal Processing, IEEE Transactions on*. – 1985. – T. 33. – № 2. – C. 387-392.
266. Willis M.E., Toksoez M. N. Automatic P and S velocity determination from full waveform digital acoustic logs // *Geophysics*. – 1983. – T. 48. – №12. – C. 1631-1644.
267. Wyllie M.R.J., Gregory A.R., Gardner L.W. Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media // *Geophysics*. – 1956. – T. 21. – №1. – C. 41-70.
268. Xia J., Xu Y., Miller R. D. Generating an image of dispersive energy by frequency decomposition and slant stacking // *Pure and Applied Geophysics*. – 2007. – T. 164. – № 5. – C. 941-956.

269. Yilmaz Ö. Velocity-stack processing // *Geophysical Prospecting*. – 1989. – T. 37. – № 4. – C. 357-382.
270. Yilmaz Ö. Seismic data analysis. – Tulsa, OK: Society of exploration geophysicists, 2001. – T. 1. – C. 74170-2740.
271. Zemanek J., Williams D. M., Schmitt D. P. Shear-wave logging using multipole sources // *The Log Analyst*. – 1991. – T. 32. – № 3. – C. 233-241.
272. Zhang Z. et al. Shear slowness estimation by inversion of LWD borehole quadrupole mode // *2010 SEG Annual Meeting*. – Society of Exploration Geophysicists, 2010.
273. Zhou B., Greenhalgh S. A. Linear and parabolic  $\tau$ -p transforms revisited // *Geophysics*. – 1994. – T. 59. – № 7. – C. 1133-1149.
274. Zhu Z. et al. Experimental studies of the acoustic wave field near a borehole // *2013 SEG Annual Meeting*. – Society of Exploration Geophysicists, 2013. □

## ПРИЛОЖЕНИЯ

## Приложение А Сингулярное разложение матриц

Действительная матрица  $A$  размером  $n \times m$  может быть представлена как

$$A = U\Lambda V^T = [u_1, u_2, \dots, u_r] \begin{bmatrix} \lambda_1 & & & 0 \\ & \lambda_2 & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & \lambda_r \\ & & & & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1^T \\ v_2^T \\ \vdots \\ v_r^T \end{bmatrix} \quad (\text{ПА.1})$$

$$[n \times m] = [n \times r] [r \times r] [r \times m]$$

где  $r$  – ранг матрицы  $A$ ;  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \lambda_r$  – сингулярные числа матрицы  $A$  (равны квадратам собственных чисел квадратной матрицы  $AA^T$  и  $A^T A$ );  $u_1, u_2, \dots, u_r$  – левые сингулярные вектора матрицы  $A$  (соответствуют собственным векторам  $AA^T$ );  $v_1, v_2, \dots, v_r$  – правые сингулярные вектора матрицы  $A$  (соответствуют собственным векторам  $A^T A$ ).

Представление (ПА.1) можно записать суммой

$$A = \sum_{i=1}^r \lambda_i u_i v_i^T$$

Аппроксимация ранга  $k$  ( $k < r$ ) матрицы  $A$  ( $A_k$ )

$$A \approx A_k = \sum_{i=1}^k \lambda_i u_i v_i^T \quad (\text{ПА.2})$$

Соответствует минимуму нормы Фробениуса

$$A_k = \arg \min_{B: \text{rank}(B)=k} \|A - B\|_F^2$$

$$\|A - B\|_F^2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (a_{ij} - b_{ij})^2$$

Таким образом, исходную матрицу  $A$  ранга  $r$  приближают матрицей  $A_k$  ранга  $k = \text{rank}(A_k)$ .



Приложение Б Вывод формулы обратного преобразования Радона

Вывод формулы обратного преобразования Радона через преобразование Фурье представлен работах [111,112,148,207].

Прямое двумерное преобразование Фурье пространственно-временной функции  $y(t, x)$  [186]

$$F_2[y(t, x)] = Y_2(f, k) = \iint y(t, x) e^{-j2\pi(kx+ft)} dx dt \quad (\text{ПБ.1})$$

Пространственная частота или волновое число  $k$  определяется через интервальное время (*slowness*)  $p$  и временную частоту  $f$  как  $k = -p \cdot f$  ( $\tau = t - p \cdot x$ ,  $d\tau = dt$ ). Тогда двумерное преобразование Фурье можно связать с преобразованием Радона

$$R(\tau, p) = \int y(\tau + px, x) dx \quad (\text{ПБ.2})$$

как

$$Y_2(f, -pf) = \iint y(\tau + px, x) e^{-j2\pi \cdot f \cdot \tau} dx d\tau = \int R(\tau, p) e^{-j2\pi \cdot f \cdot \tau} d\tau \quad (\text{ПБ.3})$$

Теперь, учитывая обратное двумерное преобразование Фурье

$$y(t, x) = \iint Y_2(f, k) e^{j2\pi(kx+ft)} dk df \quad (\text{ПБ.4})$$

и функцию  $y(x, t)$  можно выразить через прямое преобразование Радона

$$\begin{aligned} y(t, x) &= \iint |y| Y_2(f, -pf) e^{j2\pi \cdot f \cdot \tau} dp df \\ &= \int \left[ \int |y| e^{j2\pi \cdot f \cdot \tau} df * \int Y_2(f, -pf) e^{j2\pi \cdot f \cdot \tau} df \right] dp \\ &= -\frac{1}{2\pi^2} \int \frac{1}{\tau^2} * R(\tau, p) dp \Big|_{\tau=t-px} \end{aligned} \quad (\text{ПБ.5})$$

где знак \* означает свертку. По сути, формула (ПБ.5) и есть искомое обратное преобразование Радона. Однако для практической вычислительной реализации эта формула неприемлема.

Преобразуя (ПБ.5) к виду

$$\begin{aligned}
y(t, x) &= -\frac{1}{2\pi^2} \iint \frac{R(\bar{\tau}, p)}{(\tau - \bar{\tau})^2} d\bar{\tau} dp \\
&= \frac{1}{2\pi^2} \frac{d}{d\tau} \iint \frac{R(\bar{\tau}, p)}{\tau - \bar{\tau}} d\bar{\tau} dp \Big|_{\tau=t-px} \\
&= \frac{1}{2\pi^2} \frac{d}{dt} \iint \frac{R(\bar{t}, p)}{t - px - \bar{t}} d\bar{t} dp \\
&= \frac{1}{2\pi^2} \frac{d}{dt} \iint \frac{R(\hat{t} - px, p)}{t - \hat{t}} d\hat{t} dp
\end{aligned} \tag{ПБ.6}$$

можно выделить составляющую, которая представляет собой преобразование Гильберта по  $\tau$  от преобразования Радона

$$H[R(\tau, p)] = R_H(\tau, p) = \frac{1}{\pi} \int \frac{R(\bar{\tau}, p)}{\tau - \bar{\tau}} d\bar{\tau}. \tag{ПБ.7}$$

Результирующая формула обратного преобразования Радона

$$\begin{aligned}
y(t, x) &= \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} H \left[ \int R(t - px, p) dp \right] \\
&= \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \int R_H(t - px, p) dp \\
&= \frac{1}{2\pi} \int \frac{d}{dt} R_H(t - px, p) dp
\end{aligned} \tag{ПБ.8}$$

Вторая реализуемая форма – через одномерное преобразование Фурье. Сначала выполняется одномерное преобразование Фурье исходного массива волн

$$Y(f, x) = F[y(t, x)] = \int y(t, x) e^{-j2\pi ft} dt, \tag{ПБ.9}$$

затем по нему на основании свойства сдвига вычисляется одномерное преобразование Фурье преобразования Радона (ПБ.2)

$$R(f, p) = F[R(\tau, p)] = \int R(\tau, x) e^{-j2\pi f\tau} d\tau = \int Y(f, x) e^{j2\pi \cdot f \cdot p \cdot x} dx. \tag{ПБ.10}$$

Обратный переход

$$Z(f, x) = \int R(f, p) e^{-j \cdot 2\pi \cdot f \cdot p \cdot x} dp, \tag{ПБ.11}$$

$$Y(f, x) = |f| \cdot Z(f, x), \tag{ПБ.12}$$

$$y(t, x) = F^{-1}[Y(f, x)]. \tag{ПБ.13}$$

## Приложение В Матлаб-скрипты

### В.1 Гильберт-сембланс

```
function Semb = STCH(y,t,dT,x,LWindow,kKL)
% Вход:
% y - массив ВАК на точке глубины
%   размерности NxM, где
%   N - число точек по времени,
%   M - кол-во приемников;
% t - массив времени длины N
%   { t = (0:N-1)'*dt };
% dT - массив интервального времени
%   { dT = linspace(dT1,dT2,ndT)' };
% x - массив расстояний от приемников до центра антенной решетки
%   { x = (0:M-1)'*RR-(M-1)*RR/2 }
% T2 - длина полуокна усреднения по времени (0 - нет окна)
% kKL - параметр фильтра Карунена-Лоэва (0 - нет фильтрации)
% Выход:
% Semb - Гильберт сембланс
%   размерности ndTxN, где
%   ndT длина массива dT;
% akhmetsafinrd@mail.ru (Rais D. Akhmetsafin, 2015)
%
yH = hilbert(y); %Преобразование Гильберта;
B = (abs(slantstack(yH,t,x,dT))).^2;
A = slantstack(abs(yH).^2,t,x,dT);
[N,M] = size(y); ndT = length(dT);
if T2 ~= 0
    Semb = zeros(N,ndT);
    for i=1+T2:N-T2
        Semb(i,:) = sum(B(i-T2:i+T2,:))./sum(A(i-T2:i+T2,:));
    end
else
    Semb = B./A;
end
if kKL ~= 0
    Semb = kl(Semb,kKL);
End
%%
```

#### В.1.1 Наклонное суммирование

```
function R = slantstack(A,X,Z,T);
% slant-stack
% akhmetsafinrd@mail.ru (Rais D. Akhmetsafin, 2015)
%
[N,M] = size(A); K = length(X); L = length(T);
B = zeros(K,M); R = zeros(K,L);
for j = 1:L
    for i = 1:M
        B(:,i) = interp1(X,A(:,i),X+T(j)*Z(i));% Interpolation
    end
    B(find(isnan(B))) = 0;
    R(:,j) = sum(B')'; % Integral is replaced by the sum
end
R = R*(Z(2)-Z(1)); % The amount is multiplied by step time
```

### В.1.2 Фильтрация на основе разложения Карунена-Лоэва

```
function Y = kl(X,K);  
[U,S,V] = svds(X,K); % Singular value decomposition with the K largest  
% singular values  
Y = U*S*V';
```

## В.2 Спектральный сембланс

```

function [dT,FArray,Semb] = FS(f,RR,tS,dT1,dT2,ndT,LWindow,FreqMax)
% Input:
% Спектральный сембланс
% f      -   Acoustic array on the same depth
%          with dimension NxM, where
%          N - the number of points in time,
%          M - number of receivers;
% dT1,dT2 - Limits of slowness;
% ndT - Number of slowness point;
% RR - Distance between receivers;
% tS - Step in time;
% Output:
% Semb Hilbert semblance (ndTxN)/
% akhmetsafinrd@mail.ru (Rais D. Akhmetsafin, 2013)
%
[N,M] = size(f);
N_FFT = 2*(2^nextpow2(N));
Fd = 1/tS;
FArray = (1:N_FFT)*(1/(N_FFT*tS));
Y = fft(f,N_FFT,1); % БПФ
A = abs(Y).^2; A = sum(A')'; A = M*repmat(A,1,ndT);
z = (0:M-1)*RR-(M-1)*RR/2;
dT = linspace(dT1,dT2,ndT);% Array of slowness (ndT point);
j = sqrt(-1); % Мнимая единица;
ilow = 1; ihigh = N_FFT/2;
B = zeros(N_FFT, ndT);
for ifreq=ilow:ihigh
    temp = Y(ifreq,:)*exp(j*2*pi*FArray(ifreq)*z'*dT);
    temp = abs(temp)'.^2;
    B(ifreq,:) = temp;
    B(N_FFT+1-ifreq,:) = temp;
end
if LWindow ~=0
    for i=1+LWindow:N-LWindow
        Semb(i,:) = sum(B(i-LWindow:i+LWindow,:))./sum(A(i-LWindow:i+LWindow,:));
    end
    for i=2:LWindow
        Semb(i,:) = sum(B(1:2*i-1,:))./sum(A(1:2*i-1,:));
    end
    Semb(1,:) = sum(B(1,:))./sum(A(1,:));
else
    Semb = B./A;
end
Ind = find(FArray*1000<=FreqMax);
FArray = FArray(Ind);
Semb = Semb(Ind,:);

```

### В.3 Сембланс

```

function Semb = STC(y,t,dT,x,LWindow,kKL)
% Вход:
% y - массив ВАК на точке глубины
%   размерности NxM, где
%   N - число точек по времени,
%   M - кол-во приемников;
% t - массив времени длины N
%   { t = (0:N-1)'*dt };
% dT - массив интервального времени
%   { dT = linspace(dT1,dT2,ndT)' };
% x - массив расстояний от приемников до центра антенной решетки
%   { x = (0:M-1)'*RR-(M-1)*RR/2 }
% T2 - длина полуокна усреднения по времени (обязательный)
% kKL - параметр фильтра Карунена-Лоэва (0 - нет фильтрации)
% Выход:
% Semb - Гильберт сембланс
%   размерности ndTxN, где
%   ndT длина массива dT;
% akhmetsafinrd@mail.ru (Rais D. Akhmetsafin, 2015)
%
B = (abs(slantstack(y,t,x,dT))).^2;
A = slantstack(abs(y).^2,t,x,dT);
[N,M] =size(y); ndT = length(dT);
Semb =zeros(N,ndT);
for i=1+T2:N-T2
    Semb(i,:) = sum(B(i-T2:i+T2,:))./sum(A(i-T2:i+T2,:));
end
if kKL ~= 0
    Semb = kl(Semb,kKL);
end
%%

```

## В.4 Фазовое суммирование

```

function Semb = PS(y,t,dT,x,LWindow,kKL)
% Вход:
% y - массив ВАК на точке глубины
%   размерности NxM, где
%   N - число точек по времени,
%   M - кол-во приемников;
% t - массив времени длины N
%   { t = (0:N-1)'*dt };
% dT - массив интервального времени
%   { dT = linspace(dT1,dT2,ndT)' };
% x - массив расстояний от приемников до центра антенной решетки
%   { x = (0:M-1)'*RR-(M-1)*RR/2 }
% T2 - длина полуокна усреднения по времени (0 - нет окна)
% kKL - параметр фильтра Карунена-Лоэва (0 - нет фильтрации)
% Выход:
% Semb - Гильберт сембланс
%   размерности ndTxN, где
%   ndT длина массива dT;
% akhmetsafinrd@mail.ru (Rais D. Akhmetsafin, 2015)
%
yH = hilbert(y);           % (1) Hilbert transform;
FI = atan2(imag(yH),y);
B = exp(sqrt(-1)*FI);
A = (abs(slantstack(B,t,z,dT))/M).^1.5;
if LWindow ~= 0
    Semb = zeros(N,ndT);
    for i=1+LWindow:N-LWindow
        Semb(i,:) = sum(A(i-T2:i+T2,:))/(2*T2+1);
    end
else
    Semb = A;
end
if kKL ~= 0
    Semb = kl(Semb,kKL);
end
%%

```

## В.5 Фильтрация по скорости

### В.5.1 Фильтрация по скорости через ( $\tau$ - $p$ ) область

```
function y_new = radon_filter_tau_p(y,dt,dx,p_min,p_max,t_min,t_max,s_l)
% Фильтрация массивов ВАК по скорости через ( $\tau$ - $p$ )-область
% akhmetsafinrd@mail.ru (Rais D. Akhmetsafin, 2015)
% Вход:
% y - исходный массив ВАК размером NxM (N точек времени, M приемников);
% dt - квант времени регистрации (мкс);
% dx - шаг расстояния между приемниками (м);
% p_min,p_max - границы сохраняемых после фильтрации значений
% интервального времени (мкс/м);
% t_min,t_max - параметры дополнительной фильтрации по приведенному
% времени пробега  $0 \leq t_{min} < t_{max} \leq (N-1) * dt$  (мкс);
% s_l - параметр для скользящего среднего  $3 \leq s_l \leq 11$ ;
% Выход:
% y_new - результирующий массив ВАК размером NxM.
[N,M] = size(y);
x = (0:M-1)*dx-(M-1)*dx/2;
L = 100; % Число точек массива p (можно вынести в заголовок функции);
p = linspace(p_min,p_max,L)'; dp = p(2)-p(1);
t = (0:N-1)'*dt;
yh = imag(hilbert(y)); % Преобразование Гильберта;
R = slantstack(yh,t,t,x,p)*dx; % (1) Slant-stack;
dt = t(2)-t(1); % Квант времени;
R = diff(R)/dt/(2*pi); % (2) Rho-filter;
t_new = t(1:end-1)+dt/2; % Коррекция массива времени;
Ind = (t_new>=t_min) & (t_new<=t_max); % Дополнительная
Ind = repmat(Ind,1,size(R,2)); % фильтрация по приведен-
R = R.*Ind; % ному времени пробега;
y_new = slantstack(R,t_new,t,p,-x)*dp; % (3) Inverse slant-stack;
for k=1:M % Выходная
    y_new(:,k) = smooth(y_new(:,k),s_l); % фильтрация сколь-
end % зящее среднее
%-----
function R = slantstack(A,X,Y,Z,T);
% akhmetsafinrd@mail.ru (Rais D. Akhmetsafin, 2015)
[N,M] = size(A); K = length(Y); L = length(T);
B = zeros(K,M); R = zeros(K,L);
for j = 1:L
    for i = 1:M
        B(:,i) = interp1(X,A(:,i),Y+T(j)*Z(i));
    end
    B(find(isnan(B))) = 0;
    R(:,j) = sum(B')';
end
```



## В.5.2 Фильтрация по скорости через (f-p) область

```

function y_new = radon_filter_f_p(y,dt,dx,p_min,p_max,f_min,f_max,s_1)
% Фильтрация массивов ВАК по скорости через (f-p)-область
% akhmetsafinrd@mail.ru (Rais D. Akhmetsafin, 2015)
% Вход:
% y - исходный массив ВАК размером NxM (N точек времени, M приемников);
% dt - квант времени регистрации (мкс);
% dx - шаг расстояния между приемниками (м);
% p_min,p_max - границы сохраняемых после фильтрации значений
% интервального времени (мкс/м);
% f_min,f_max - параметры дополнительной фильтрации по
% частоте  $1/(N*dt) < f_{min} < f_{max} < 1/(2*dt)$  (МГц!!!);
% s_1 - параметр для скользящего среднего  $3 \leq s_1 \leq 11$ ;
% Выход:
% y_new - результирующий массив ВАК размером NxM.
[N,M] = size(y);
x = (0:M-1)*dx-(M-1)*dx/2;
L = 100; % Число точек массива p (можно вынести в заголовок функции);
p = linspace(p_min,p_max,L); dp = p(2)-p(1);
N_FFT = 2*(2^nextpow2(N)); Y = fft(y,N_FFT,1); % БПФ
j = sqrt(-1); % Мнимая единица;
ilow = 2; ihigh = N_FFT/2;
dfreq = 1/(N_FFT*dt); freq = dfreq*(ilow-1);
dC = exp(-j*2*pi*dfreq*p'*x); C = exp(-j*2*pi*freq*p'*x);
Y_new = zeros(N_FFT, M);
for ifreq=ilow:ihigh
    if (freq>=f_min) && (freq<=f_max)
        D = C'*C;
        temp = freq*Y(ifreq,:)*D;
        Y_new(ifreq,:) = temp;
        Y_new(N_FFT+2-ifreq,:) = conj(temp);
    end
    freq = freq+dfreq; C = C.*dC;
end
y_new = real(ifft(Y_new,[],1)); % Обратное БПФ
y_new = dp*dx*y_new(1:N,:);
for k=1:M
    y_new(:,k) = smooth(y_new(:,k),s_1);
end

```

## В.6 Дисперсионный сембланс

```

function [p,t,f,STC,STH,SFC] = DS(y,x,dt,p_min,p_max,L,T1,T2,T3,D)
% Дисперсионный и спектральный сембланс
% Ахметсафин Р.Д. 2016 akhmetsadinrd@mail.ru
% Вход:
% y - двумерный акустический массив размером NxM
% x - массив координат приемников
% dt - шаг по времени
% p_min,p_max,L - пределы и количество точек по slowness
% T1 - длина окна усреднения сембланс
% T2 - длина окна усреднения Гильберт сембланс
% T3 - длина окна усреднения спектрального сембланс
% P_d - матрица коррекции на дисперсию
%      размером N_FFT2xL (P_D=0 - нет коррекции на дисперсию)
% Выход
% p - массив slowness (инт. время)
% t - массив приведенного времени пробега
% f - массив частот
% STC - дисперсионный сембланс
% STH - дисперсионный Гильберт сембланс
% SFC - дисперсионный спектральный сембланс
[N,M] = size(y);
t = (0:N-1)*dt;
x = x - mean(x); % приведение к середине решетки
N_FFT = 2^nextpow2(N);      N_FFT2 = N_FFT/2;
p = linspace(p_min,p_max,L);      P = repmat(p,N_FFT2,1);
f = (0:N_FFT2-1)*(1/(N_FFT*dt)); F = repmat(f,1,L);
j = sqrt(-1); % Мнимая единица
if D == 0, D = P; end
%%%%%% Вычисления
Y = fft(y,N_FFT,1);
B_STC = zeros(N,L);      A_STC = B_STC;
B_STH = zeros(N,L);      A_STH = B_STC;
B_SFC = zeros(N_FFT2,L); A_SFC = B_SFC;
Z = zeros(N_FFT,L);
for m = 1:M
    temp0 = repmat(Y(1:N_FFT2,m),1,L);
    temp1 = temp0.*exp(j*2*pi*x(m)*F.*D);
    Z(1,:) = temp1(1,:);
    Z(2:N_FFT2,:) = 2*temp1(2:N_FFT2,:);
    Z = ifft(Z,[],1);
    temp2 = Z(1:N,:);
    B_STC = B_STC + real(temp2); A_STC = A_STC + real(temp2).^2;
    B_STH = B_STH + temp2;      A_STH = A_STH + abs(temp2).^2;
    B_SFC = B_SFC + temp1;      A_SFC = A_SFC + abs(temp0).^2;
end
B_STC = B_STC.^2; B_STH = abs(B_STH).^2; B_SFC = abs(B_SFC).^2;
STC = zeros(N,L); STH = zeros(N,L); SFC = zeros(N_FFT2,L);
for i = 1:L
    STC(:,i) = smooth(B_STC(:,i),T1)./smooth(A_STC(:,i),T1)/M;
    STH(:,i) = smooth(B_STH(:,i),T2)./smooth(A_STH(:,i),T2)/M;
    SFC(:,i) = smooth(B_SFC(:,i),T3)./smooth(A_SFC(:,i),T3)/M;
end
end
end

```

```

function [P,D] = matrixPD(DF,DC,f0,y,dt,p_min,p_max,L,key)
% Расчет матриц ИВП и НФИБ (ПРИМЕР)
% Ахметсафин Р.Д. 2016 akhmetsadinrd@mail.ru
% Вход:
% DF - вектор-столбец частот дисперсионных кривых длины N1;
% DC - матрица значений дисперсионных кривых (значений НФИБ)
%       размером N1xM1 (M1 кривых);
% f0 - опорная частота;
% y - двумерный акустический массив размером NxM;
% dt - шаг по времени;
% p_min,p_max,L - пределы и количество точек по slowness;
% key - = 0 без расширения на НФИБ,
%       = 1 с расширением ИВП на НФИБ.
% Выход
% P - матрица P размером N_FFT2xL;
% D - матрица D размером N_FFT2xL.
[N,M] = size(y);
N_FFT = 2^nextpow2(N);
N_FFT2 = N_FFT/2;
f = (0:N_FFT2-1)*(1/(N_FFT*dt));
p = linspace(p_min,p_max,L);
%% Вычисления матриц
P = repmat(p,N_FFT2,1);
D = P;
p0 = interp1(DF,DC,f0,'linear');
Ind = find((p>=p0(1)) & (p<=p0(end)));
p11=p(Ind);
for i = 1:N_FFT2
    if (f(i)>=DF(1)) && (f(i)<=DF(end))
        p1 = interp1(DF,DC,f(i),'linear');
        p2 = interp1(p0,p1,p11,'linear');
        D(i,Ind) = p2;
        if key == 1 % Расширение ИВП на НФИБ
            for k = 1:L
                q1 = p(k);
                if (q1 > p2(1)) && (q1 < p11(1))
                    D(i,k) = p2(1);
                end
                if (q1 > p11(end)) && (q1 < p2(end))
                    D(i,k) = p2(end);
                end
            end
        end
    end
end
end
end
end

```

## V.7 F-k преобразование

```

function [S,k,f] = fk_spectra(d,dt,dx,L);
%FK_SPECTRA: FK spectrum of a seismic gather.
%
% [S,k,f] = fk_spectra(d,dt,dx,L);
%
% IN   d:      data (traces in columns)
%      dt:     time interval
%      dx:     spatial increment between traces
%      L:      apply spectral smoothing using a separable
%              2D Hamming window of LxL samples
%
% OUT  S:      FK spectrum
%      f:      freq axis in Hz
%      k:      wave-number spectrum in cycles/m (if dx is in meters)
%
% Note: when plotting spectra (S) use log(S) or S.^alpha (alpha=0.1-0.3) to
%        increase the visibility of small events
%
% Example:
%
% [d,h,t] = linear_events; dt = t(2)-t(1); dx = h(2)-h(1);
% [S,k,f] = fk_spectra(d,dt,dx,6); imagesc(k,f,S);
%
% Copyright (C) 2008, Signal Analysis and Imaging Group
% For more information: http://www-geo.phys.ualberta.ca/saig/SeismicLab
% Author: M.D.Sacchi
%
% This program is free software: you can redistribute it and/or modify
% it under the terms of the GNU General Public License as published
% by the Free Software Foundation, either version 3 of the License, or
% any later version.
%
% This program is distributed in the hope that it will be useful,
% but WITHOUT ANY WARRANTY; without even the implied warranty of
% MERCHANTABILITY or FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. See the
% GNU General Public License for more details: http://www.gnu.org/licenses/
%
[nt,nx]=size(d);

nk = 16*(2^nextpow2(nx));
nf = 16*(2^nextpow2(nt));

S = fftshift( abs(fft2(d,nf,nk)) );
H = hamming(L)*hamming(L)';
S = conv2(S,H,'same');
S = S(nf/2:nf,:);

f = (0:1:nf/2)/nf/dt*1000;
k = (-nk/2+1:1:nk/2)/nk/dx;

return;

```

## В.8 Повышение разрешающей способности трехэлементного зонда

```

function [Depth_n,DeltaT] = mak2(Depth,t1,t2,Alpha)
% Входные параметры
% Depth - массив глубин (с шагом 0.1 м);
% t1, t2 - массивы первоприбытий по двум
% приемникам, приведенные к излучателю;
% Alpha - регуляризирующий параметр.
% Выходные параметры
% Depth_n - массив глубин (с шагом 0.1 м)
% DeltaT - интервальное время.
n1 = 10-1; n2 = 15-1;% для МАК-2
a1 = ones(1,n1+1); a2 = ones(1,n2+1);
n0 = n2-n1; dh = 0.1; % Шаг по глубине
dt = t2-t1; Alpha2 = sqr(Alpha);
N = length(Depth); NS = n1+(n2-n1+1)/2;
NE = N-(n2-n1+1)/2; Nx = NE-NS;
A = zeros(3*Nx-n1-n2,Nx+1);
b = zeros(3*Nx-n1-n2);
k = 0;
% Первый приемник
for i = 1:Nx-n1
    A(i+k,i:i+n1) = a1;
    b(i+k) = t1(i+NStart);
end
k = k+ Nx-n1;
% Второй приемник
for i = 1:Nx-n2
    A(i+k,i:i+n2) = a2;
    b(i+k) = t2(i+NStart);
end
k = k+ Nx-n2;
A(1:k,Nx+1) = 1;
% Для регуляризации
for i = 1:Nx
    A(i+k,i) = Alpha2;
    b(i+k) = Alpha2*dt(i+NStart)/n0;
end
% Результат
x = A \ b;
DeltaT = x(1:Nx)*dh; % Интервальное время
Depth_n = Depth(NS+1:NEnd);
% Опционально для проверки
b = A(1:k,:)*x;
t1_n = t1; t2_n = t2;
t1_n(NS+(1:Nx-n1)) = b(1:Nx-n1);
t2_n(NS+(1:Nx-n2)) = b(Nx-n1+(1:Nx-n2));

```

□