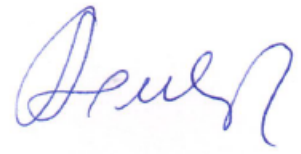


На правах рукописи



УДК 550.832.441

**Ахметсафин Раис Дахиевич**

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

Специальность: 25.00.10 Геофизика, геофизические методы поисков полезных  
ископаемых

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Москва -2017

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе» (МГРИ-РГГРУ)

Научный консультант                      Афанасьев Виталий Сергеевич, доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты  
Владов Михаил Львович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой сейсмологии и геоакустики МГУ имени М.В. Ломоносова

Максимов Герман Адольфович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник АО «Акустический институт имени академика Н.Н. Андреева» (АКИН)

Козяр Валерий Федорович, доктор технических наук, главный научный сотрудник ООО «Нефтегазгеофизика», г. Тверь

Ведущая организация                      Публичное акционерное общество Научно-производственное предприятие «ВНИИГИС», г. Октябрьский (ПАО НПП «ВНИИГИС»)

Защита состоится 19 октября 2017 г. в 15-00 часов в ауд. 4-73 на заседании Диссертационного совета Д 212.121.07 при Российском государственном геологоразведочном университете имени Серго Орджоникидзе, по адресу: 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Российского государственного геологоразведочного университета.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.121.07.

Автореферат разослан

Ученый секретарь диссертационного совета,  
к.т.н., доцент



В.В.Романов

## 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования.

Волновой акустический каротаж (ВАК) - метод геофизических исследований в скважинах, основанный на изучении акустических свойств горных пород (скоростей распространения и затухания упругих волн), пересеченных скважиной. ВАК применяется для оценки как упругих, так и фильтрационно-емкостных свойств горных пород. ВАК применяется также и в обсаженных скважинах для оценки характера заполнения и сцепления цементного камня с колонной и породой.

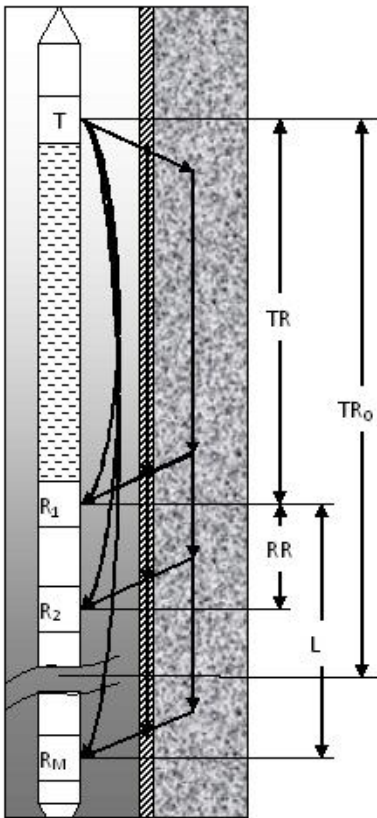


Рис. 1.1. Прибор ВАК

Типовая аппаратура многоэлементного ВАК содержит акустические излучатели и приемники, расположенные вдоль оси прибора (рис. 1.1). Полный волновой пакет ВАК содержит волны, распространяющиеся непосредственно по породе – это продольную (P, *Prima* – первая), поперечную (S, *Second* – вторая), поверхностные волны Стоунли (St) и Рэлея (R). Кроме этих волн присутствуют корпусная волна (*collar wave*) – распространяющаяся от излучателя до приемников по корпусу прибора, гидроволна (*mud wave*) – распространяющаяся по жидкости, заполняющей скважину, и в обсаженной скважине присутствует волна Лэмба, распространяющаяся по обсадной колонне (*casing wave*). В так называемом дипольном режиме излучения современные приборы ВАК генерируют поляризованные изгибные волны (SV, SH). Современные методики интерпретации ВАК предполагают предварительную оценку характеристик составляющих волн, к которым относят скорость  $v$  (или интервальное время *slowness*,  $p$ ,  $\Delta t = 1/v$ ), амплитуду  $A$  и

эффективное затухание  $\alpha$ . В зависимости от решаемой задачи, составляющие волны могут быть информативными и паразитными. По своей физической сущности составляющие волны отличаются поляризацией, скоростью распространения, частотой и продолжительностью. Поэтому для идентификации и разделения волн применяют как конструктивные приемы (расстояние между излучателем и приемниками; поляризованные и узкополосные приемники), так и аналитические методы (фильтрация сигналов в частотной и временной области). Аппаратура и методы обработки постоянно совершенствуются, и в целом справляются с задачей разделения и оценки скоростей составляющих волн. Однако существуют актуальные проблемы (рис. 1.2).

Диссертационная работа посвящена проблемам в двух направлениях развития - скоростной анализ (оценка интервальных времен составляющих волн, идентификация и разделение волн по скорости) и дисперсионный анализ (компенсация дисперсии изгибной волны и волны Стоунли).



Рис. 1.2. Актуальные направления развития многоэлементного ВАК

Рассматриваемые проблемы в скоростном анализе 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 «звенящей» 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 - пересчет наблюдаемой фазовой скорости пакета диспергирующей волны в скорость, которая может характеризовать горную породу для дальнейшей (геофизической, петрофизической) интерпретации.

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 дис-

пергируют, 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 и 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 обработки 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.

на, 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-Лоэва (*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.

В диссертационной работе изложены новые математические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие технологии геофизических исследований нефтегазовых скважин (ГИС). Совокупность материалов, содержащихся в диссертации, соответствует требованиям п. 9 Положения ВАК о присуждении ученых степеней.

#### **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 защищаемых результатов** обеспечена строгостью математических преобразований, отсутствием дополнительных допущений, сопоставлением результатов обработки массивов записей ВАК.

Табл. 1. Применяемые математические преобразования.

1	$y(k, m) \Leftrightarrow y(t, m) \Leftrightarrow y(t, x);$	<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-Лоэва
9	$R = U \Lambda V^T = \sum_{i=1}^K \lambda_i u_i v_i^T.$	Сингулярное разложение матриц

Табл. 2. Основные 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	$I_j(\mathbf{p}_{new}, t_{mud}, \alpha) =$ $= \left\  \mathbf{T}_j - \mathbf{A}_j \begin{pmatrix} \mathbf{p}_{new} \\ t_{mud} \end{pmatrix} \right\ ^2 + \alpha \ \mathbf{p} - \mathbf{p}_{new}\ ^2; j = 1 \vee 2.$	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	$STCH_1(\tau, p) = \frac{\left  \sum_{m=1}^M y_a(\tau + px_m, m) \right }{\sum_{m=1}^M  y_a(\tau + px_m, m) } =$ $= \frac{ H^*[\Re\{y(\tau, x)\}] }{\Re\{ H^*[y(\tau, x)] \}};$ $STCH(\tau, p) = \frac{\left  \sum_{m=1}^M y_a(\tau + px_m, m) \right ^2}{M \cdot \sum_{m=1}^M  y_a(\tau + px_m, m) ^2} =$ $= \frac{ H^*[\Re\{y(\tau, x)\}] ^2}{M \cdot \Re\{ H^*[y(\tau, x)] ^2\}}.$	Гильберт сембланс на основе преобразований Радона и Гильберта.

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	$DSTCH(\tau, p) = \frac{\left  \sum_{m=1}^M y_{as}(\tau + px_m, m) \right ^2}{M \cdot \sum_{m=1}^M  y_{as}(\tau + px_m, m) ^2};$ $y_{as}(\tau, m) = H^*[y_s(\tau, m)];$ $y_s(t + px_m, m) = F^{-1}\{Y(f, m) \cdot e^{j \cdot 2\pi \cdot f \cdot s(f, p, d) \cdot x_m}\}.$	<p>Дисперсионный сембланс. Гильберт</p>

### Апробация и внедрение результатов исследования.

Основные положения диссертационного исследования, выносимые на защиту, обсуждены и получили одобрение на 4 международных конференциях, прошедших с 2008 по 2009 годы. В их числе: SEG/EAGE/EAGO 3-я Международная конференция и выставка «Санкт-Петербург – 2008. Геонауки: От новых идей к новым открытиям», Russia, 7-10 April 2008; Научно-практическая конференция «Новая техника и технологии для геофизических исследований скважин» в рамках XVI международной специализированной выставки «Газ. Нефть. Технологии-2008» г. Уфа, 21 мая 2008 г.; EAGE Tyumen 2009 - International Conference and Exhibition, 02 March 2009; 71st EAGE Conference & Exhibition. – 2009 SPE EUROPEC.8-11 June2009, Amsterdam, The Netherlands.

**Публикации.**

Основные положения и результаты исследования отражены в 21 научных публикациях, из них 16 в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК Минобрнауки России и в одном патенте США.

**Структура диссертационной работы.**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 274 наименований и приложений. Диссертация изложена на 197 страницах и содержит 91 рисунок, 6 таблиц и 124 формулы.

В первой главе приведен обзор. Оригинальными результатами автора в первой главе являются: (1) статистический метод оценки времен первых вступлений волн на основе информационного критерия Акаике и преобразования Гильберта; (2) метод пересчета интервальных времен по оценкам времен первых вступлений волн на основе регуляризации по Тихонову. Методы не являются «групповыми» или методами обработки массивов записей ВАК, поэтому не выделены в основные результаты. Основные оригинальные результаты автора работы представлены во второй, третьей, четвертой и пятой главах.

Во второй главе описан 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 изложен 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 составляющих волн и оценке их скоростей.

### **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.

## **2. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

### **Глава 1. ПРИБОРЫ МНОГОЭЛЕМЕНТНОГО АКУСТИЧЕСКОГО КАРОТАЖА И МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ АКУСТИЧЕСКИХ (СЕЙСМИЧЕСКИХ) МАССИВОВ**

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. Тогда способ не удалось реализовать – не позволяли технологии. Возможность регистрации появилась лишь спустя 15 лет. В 1951 году впервые был реализован каротаж скорости – регистрировалась разница времени прибытия сигнала на два приемника. Позже стали регистрировать и сами сигналы по приемникам с привязкой по глубине – это получило название волновой акустический каротаж (ВАК). С тех пор обработка записей ВАК является одним из наиболее ярких и интересных направлений развития геофизики. Здесь переплетаются методы обработки сигналов и изображений (или массивов сигналов) с одной стороны, и методы описания механизмов возникновения, а также методы решения прямых и обратных задач распространения упругих волн в скважине и около-скважинном пространстве с другой стороны.

Большой теоретический вклад в развитие методов обработки ВАК внесли А.А. Кауфман, Б.Н. Ивакин, В.Ф. Козяр, Д.В. Белоконь. В настоящее время исследования в области разработки аппаратуры и методов обработки многоэлементного ВАК выполняют Н.В. Козяр, А.В. Городнов, В.Н. Черноглазов, С.В. Добрынин, А.Г. Вершинин, М.А. Сулейманов, Н.А. Смирнов, В.Е. Косарев, В.А. Горгун, А.В. Шумилов. Из зарубежных исследователей выделяются работы С.V. Kimball, Т.L. Marzetta, Х.М. Tang, М.N. Toksöz. Основные достижения по обработке массивов ВАК внесены из обработки сейсмики. Здесь можно выделить работы Л.А. Рябинкина, С.А. Нахамкина, И.К. Кондратьева, F.Rieber, N.S. Neidell, М.Т. Taner, М.D. Sacchi, Т.J. Ulrych, М. Schimmel, P.L. Stoffa, J.F. Claerbout и др. Классической задачей обработки массивов ВАК является оценка скоростей информативных составляющих волн. Сначала задача решалась выделением первого вступления этих составляющих индивидуально по каждому приемнику. Такой подход оправдан, когда всего два приемника (или две группы приемников). Когда приемников больше (4-6-8-16), то стало заметно, что ошибки оценок времен первых вступлений составляющих по каждому приемнику накапливаются при вычислении по ним (интервальных времен) скоростей. Нужны были групповые методы – обрабатывающие записи по всем приемникам (массивы записей) ВАК на одной отметке глубины.

Отправной точкой применения метода *сембланс* для обработки массивов записей ВАК с целью оценки скоростей составляющих волн считается работа С.V. Kimball и Т.L. Marzetta «*Semblance processing of borehole acoustic array data*», опубликованная в 1984 (хотя еще в 1971 году N.S. Neidell, и М.Т. Taner опубликовали статью «*Semblance and other coherency measures for multichannel data*» для обработки сейсмических данных). С тех пор метод *сембланс* и связанные с ним такие понятия как «когерентность в области значений интервального\_времени – времени\_пробега\_волны» (*Slowness-Time Coherence*), «наклонное суммирование» (*slant-stack*),  $(\tau-p, \tau - p)$ -преобразование (или преобразование

Радона) прочно вошли в инструментарий обработки ВАК современных программ интерпретации.

Формула, которая отождествляется с методом традиционный сембланс, имеет вид

$$STC(\tau, p) = \frac{\sum_{t=\tau}^{\tau+T} \left[ \sum_{m=1}^M y(t + px_m, m) \right]^2}{M \cdot \sum_{t=\tau}^{\tau+T} \sum_{m=1}^M y^2(t + px_m, m)}, \quad (2.1)$$

или при центрированном окне усреднения

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

где  $x_m$ -расстояния от центра антенной решетки до  $m$ -го приемника,  $M$  – количество приемников,  $y(t, m)$  – сигналы ВАК по приемникам,  $p$  – интервальное время (*slowness*) – величина, обратная скорости,  $T$  – окно усреднения по времени. Считается, что формула (2.1) характеризует когерентность мощности сигналов по времени и скорости (замедлению). При этом числитель (2.1) 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. В отличие от времени пробега  $t$  в  $y(t, m)$ , которое привязывается к пространственным координатам наблюдения  $x$ , под  $\tau$  в (2.1) понимается приведенное время пробега, т.к. пространственная координата исключается. Для ВАК  $\tau$  принято приводить к середине антенной решетки.

Для отображения сембланс по глубине на геофизических планшетах строят одномерную проекцию на ось  $p$ - находят максимум по  $\tau$

$$STC_{1D}(p) = \max_{\tau} STC(\tau, p), \quad (2.2)$$

а значение  $p$ , соответствующее локальному максимуму (2.2) принимается за оценку интервального времени интересующей волны.

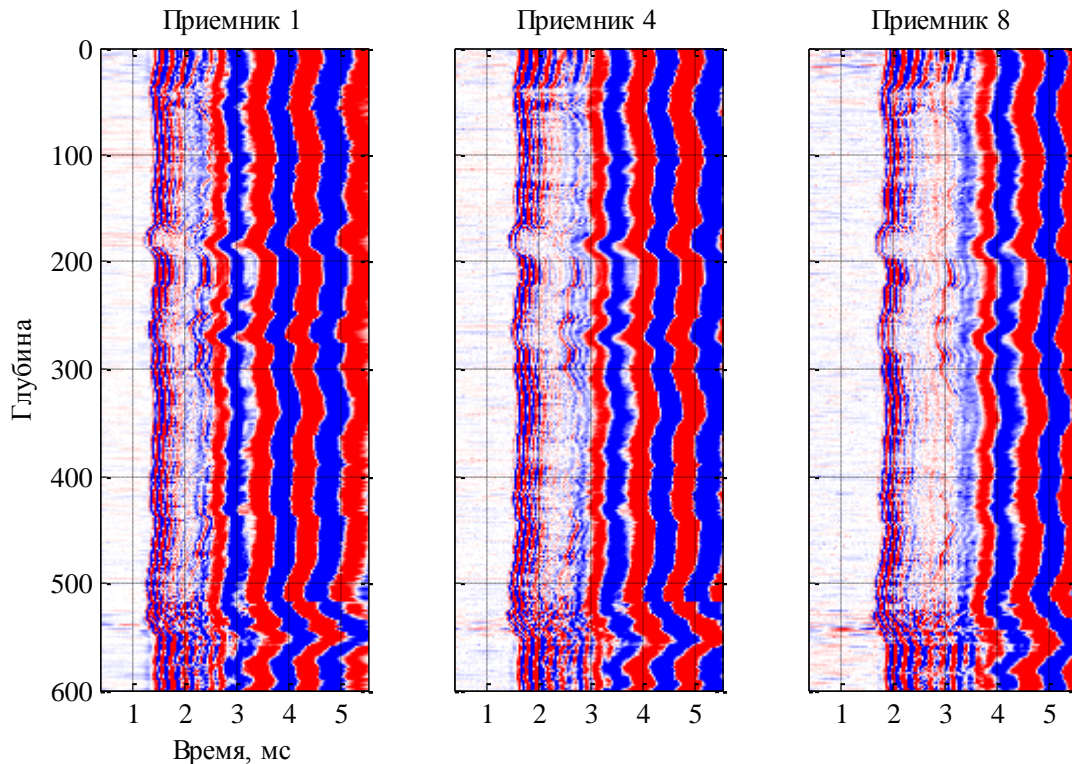


Рис. 2.1. Пример 1. Запись волнового акустического каротажа: фазо-корреляционные диаграммы по 1-,4-,8-му приемникам.

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. 1.1) составляет 11 футов  $\approx 3,35$  м, расстояние между приемниками ( $RR$ , см. рис. 1.1) 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. 2.1 представлены исходные ФКД по 1-, 4-, 8-му приемникам. На рис. 2.2а представлен регистрируемый массив данных по приемникам на отметке глубины 288. На рис. 2.2б представлено изображение традиционного сембланс в  $(\tau - p)$ -области: отчетливо видны пятна когерентной мощности, соответствующие P-, S- и St-волнам. На рис. 2.2г 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.

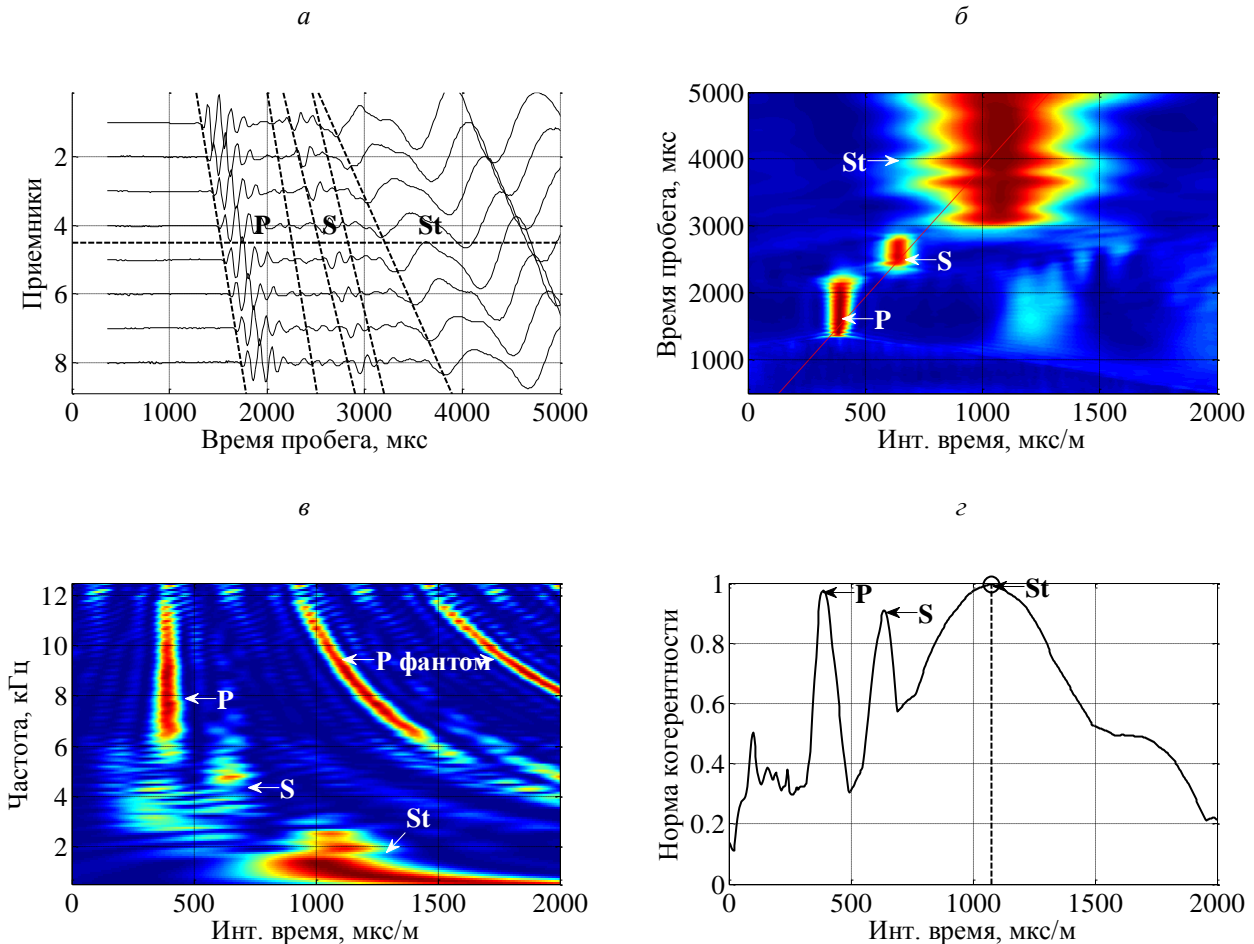


Рис. 2.2. Пример 1. Запись волнового акустического каротажа на отметке 288: а) акустический массив (выделены P-, S- и St-волны); б) традиционный сембланс (окно 384 мкс); в) спектральный сембланс; г) проекция традиционного сембланс.

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

1. Помехи в зарегистрированных сигналах;
2. Методическая причина – когерентные события при пропуске нескольких циклов (*coherent multiple cycle skipping events*);
3. Изменение скоростных свойств разреза в пределах антенной решетки;
4. Дисперсия волн (изгибные (SH, SV), St-волна).

Зашумление и размытие максимумов сембланс приводит к ошибке (или смещению) оценки интервального времени. Чтобы решить эти проблемы появилось множество вариаций формул (2.1), также отождествляемых с понятием сембланс. Вычисление по формулам (2.1) принято называть «традиционный сембланс» (*traditional semblance, conventional semblance*).

Переходя к индексам и матрице значений сембланс, (2.1) можно записать

$$STC(\tau, p) \Rightarrow STC(i, j) = \frac{\|\mathbf{D} \cdot \mathbf{e}\|^2}{M \cdot \|\mathbf{D}\|^2} \quad (2.3)$$

где  $\mathbf{D}$  матрица размером  $N_T \times M$

$$\mathbf{D} = \{y(k \cdot \Delta t + j \cdot m \cdot \Delta p \cdot \Delta x + b, m)\}; k = \overline{i, i + N_T - 1}; m = \overline{1, M} \quad (2.4)$$

$\mathbf{e}$  – единичная вектор строка длины  $M$ ;  $\Delta p$  - шаг по *slowness*;  $\Delta x$  - шаг расстояния между приемниками;  $\Delta t$  - шаг по времени пробега (квант времени);  $N_T$  - длина окна в квантах времени (при этом окно усреднения по времени  $T = N_T \cdot \Delta t$ );  $b$  - коэффициент приведения к середине антенной решетки и к началу диапазона *slowness*.

## **Глава 2. ГИЛЬБЕРТ СЕМБЛАНС - ОЦЕНКА ИНТЕРВАЛЬНЫХ ВРЕМЕН И ВРЕМЕН ПЕРВЫХ ВСТУПЛЕНИЙ СОСТАВЛЯЮЩИХ ВОЛН**

К недостатку традиционного сембланс можно отнести необходимость выбора величины временного окна, которое, по сути, загрубляет распределение когерентной мощности. На рис. 2.3 представлены изображения традиционного сембланс на отметке глубины 288 Примера 1 с различной длиной окна в формуле (2.1).

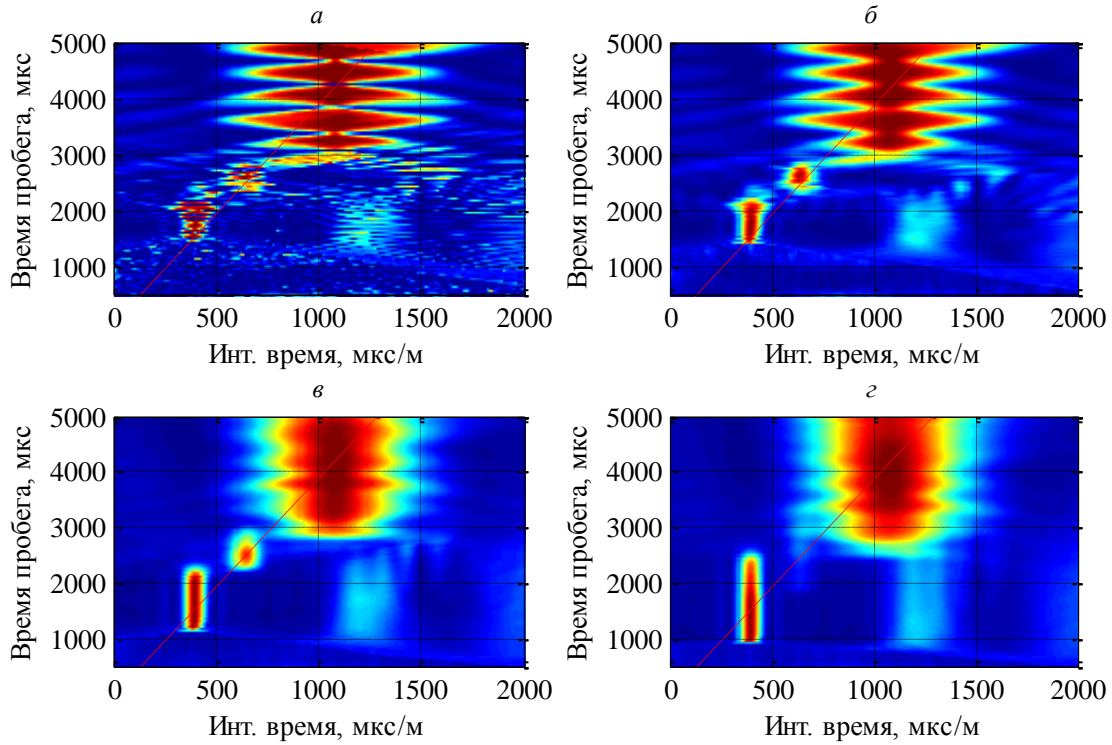


Рис. 2.3. Пример 1. Традиционный сембланс на отметке 288 при различной длине окна: а) 12 мкс (минимальное); б) 192 мкс; в) 768 мкс; г) 1536 мкс.

В диссертационной работе предлагается безоконный сембланс представляемый через аналитический сигнал и названный автором как Гильберт сембланс:

$$STCH_1(\tau, p) = \frac{\left| \sum_{m=1}^M y_a(\tau + px_m, m) \right|}{\sum_{m=1}^M |y_a(\tau + px_m, m)|} \quad (2.5)$$

и

$$STCH(\tau, p) = \frac{\left| \sum_{m=1}^M y_a(\tau + px_m, m) \right|^2}{M \cdot \sum_{m=1}^M |y_a(\tau + px_m, m)|^2} \quad (2.6)$$

где  $y_a(t, m)$  - аналитическое представление сигнала  $y(t, m)$

$$y_a(\tau, m) = H^*[y(\tau, m)] = y(\tau, m) + j \cdot H[y(\tau, m)],$$

и  $H[\cdot]$  - преобразование Гильберта. Если представить массив  $y(t, m)$  как пространственно-временную функцию  $y(t, x)$ , то (2.6) можно представить как

$$STCH(\tau, p) = \frac{|\Re\{H^*[y(\tau, x)]\}|^2}{M \cdot \Re\{|H^*[y(\tau, x)]|^2\}} = \frac{|\Re\{y_a(\tau, x)\}|^2}{M \cdot \Re\{|y_a(\tau, x)|^2\}}, \quad (2.7)$$

где

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

- преобразование Радона.

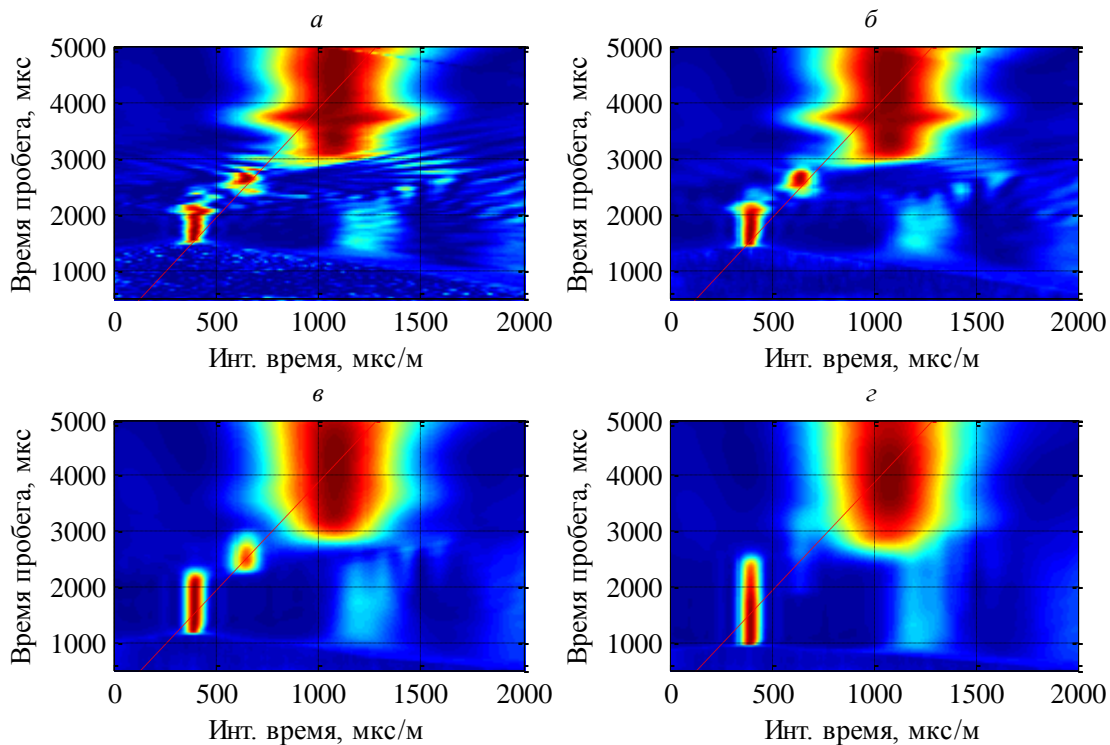


Рис. 2.4. Пример 1. Гильберт сембланс на отметке 288 при различной длине окна: а) без окна (0 мкс); б) 192 мкс; в) 768 мкс; г) 1536 мкс.

Также как и в традиционном сембланс (2.1) значения (2.6) не имеют размерности, определены в интервале  $(0, 1]$ , и являются мерой когерентности мощности сигналов по скорости распространения составляющих. На рис. 2.4а информативные P-, S- и St-волны также обозначены в  $(\tau - p)$ -области пятнами, характеризующими всплеск когерентной мощности.

Обязательное окно усреднения в традиционном сембланс (2.1) выполняет роль высокочастотного цифрового фильтра изображения сембланс. Однако, такая вынужденная фильтрация загрубляет и пятна составляющих волн, тем самым снижая разрешающую способность в  $(\tau - p)$ -области.

Для Гильберт сембланс (2.6) окно усреднения не является обязательным и может рассматриваться как дополнительная опция (рис. 2.4б,в,г), а баланс между высокочастотной фильтрацией и разрешающей способностью в диссертационной работе удалось найти, не вводя окно усреднения (см. Главу 3).

### Глава 3. ФИЛЬТРАЦИЯ СЕМБЛАНС НА ОСНОВЕ СИНГУЛЯРНОГО РАЗЛОЖЕНИЯ

Основная идея предлагаемой в диссертационной работе фильтрации заключается в следующем: а) визуализация матриц сембланс предполагает пятна когерентной мощности конечного числа составляющих волн, расположенные в окрестности *toolline* (линии в  $(\tau - p)$ -области вида  $\tau = p \cdot TR_0$ , где  $TR_0$  расстояние от источника до середины антенной решетки); б) в общем случае матрица сембланс по результатам регистрации имеет полный ранг –  $\min(N, M)$ , что представляется избыточным для визуальной структуры; в) желаемый или ожидаемый имидж блока матрицы сембланс (по виду и числу «пятен») может быть получен аппроксимацией матрицы сембланс матрицей меньшего ранга (реально  $k=1 \div 4$ ). Такая фильтрация позволяет улучшить соотношение сигнал/шум, консолидировать размытые пятна и удалять не главные компоненты (пятна). Кроме того, фильтрация может эффективно применяться к блокам матрицы сембланс (где свои, локальные, главные компоненты).

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  $p$ . Разложение Карунена-Лозва или метод главных компонент предполагает сингулярное разложение матрицы и сохранение в этом разложении только  $k$  главных компонент

$$(STCH(\tau, p)) \Rightarrow \mathbf{X} = \mathbf{U}\mathbf{\Lambda}\mathbf{V}^T = \sum_{i=1}^{\min(N,M)} \lambda_i u_i v_i^T \quad (2.8)$$

$$\sum_{i=1}^k \lambda_i u_i v_i^T + \sum_{i=k+1}^{\min(N,M)} \lambda_i u_i v_i^T \approx \sum_{i=1}^k \lambda_i u_i v_i^T$$

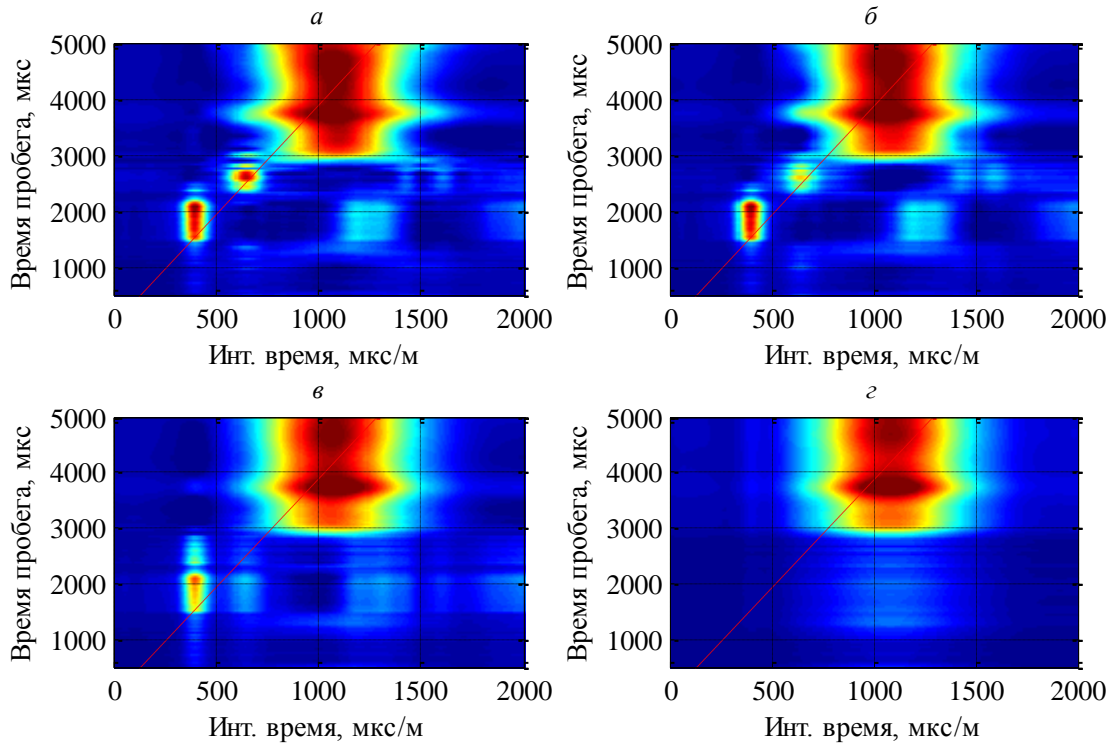


Рис. 2.5. Пример 1, отметка 288, изображение матрицы Гильберт сембланс после фильтрации: а) при  $k=4$ ; б) при  $k=3$ ; в) при  $k=2$ ; г) при  $k=1$ .

На рис. 2.5 представлены результаты предлагаемой фильтрации. При  $k=4$  и отчетливо видны 3 пятна, соответствующих P-, S- и St-волнам, и при этом удалены шумы по сравнению с исходным изображением Гильберт сембланс (рис. 2.4а). Таким образом, шумы изображения сембланс можно удалять не только с помощью окна усреднения. Далее, при  $k=2$  осталось только 2 пятна, соответствующих P- и St-волнам (рис. 2.5в). Пятно, соответствующее S-волне исчезло, так как P- и St-волны вошли в главные компоненты, а S-волна нет (даже визуально исходное пятно этой воны было наименьшим). Далее, при  $k=1$  остается только пятно St-волны, как самой главной компоненты (рис. 2.5г). На геофизических планшетах проекции вида (2.2) «нефильтрованного» Гильберт сембланс рис. 2.6б выглядят хуже проекций традиционного сембланс рис. 2.6а.

Кроме того, страдает и цифровая обработка на предмет оценки интервальных времен P-, S- и St-волн по следам проекций. Однако предлагаемая фильтрация при  $k=4$  значительно выправляет ситуацию (рис. 2.6в).

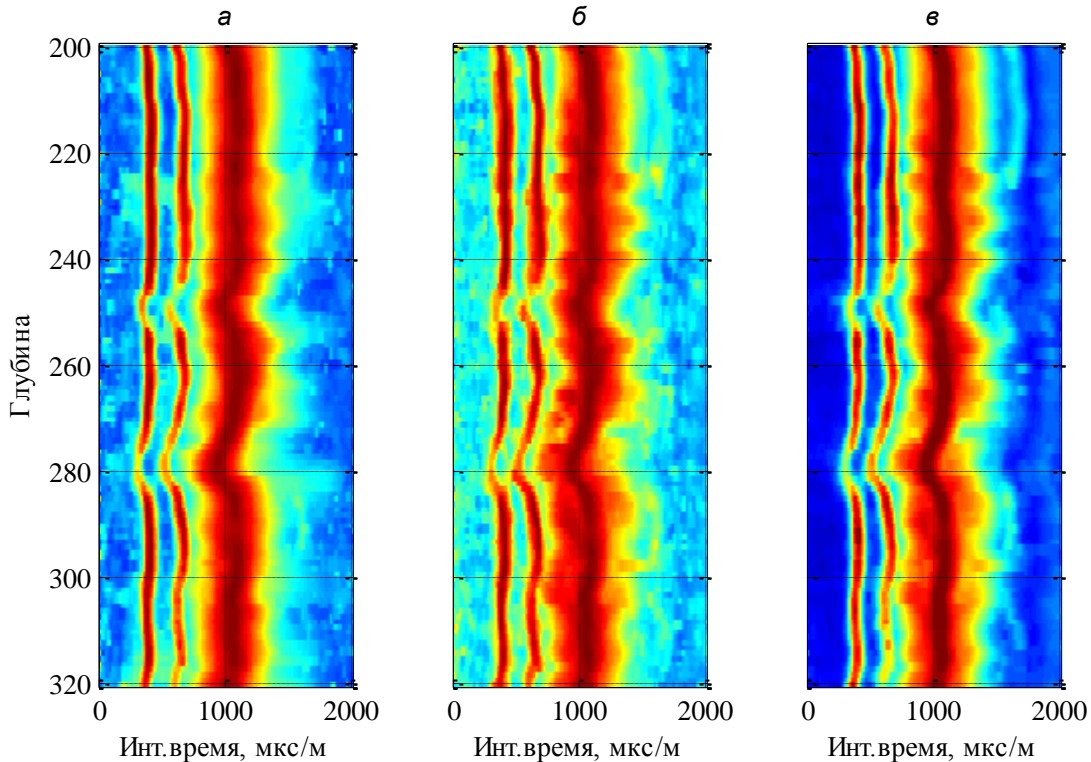


Рис. 2.6. Пример 1. Проекция сембланс: а) Традиционный сембланс ( $T=384$  мкс); б) Гильберт сембланс; в) Гильберт сембланс после фильтрации при  $k=4$ .

Предлагаемую фильтрацию можно применять и к блокам матриц сембланс. На рис. 2.7а представлено изображение блока исходной матрицы Гильберт сембланс, куда вошли только два основных пятна - соответствующие P- и S-волнам. Сразу можно предположить, что P-волна окажется «главнее», и когда задается  $k=1$  остается только пятно P-волны, как главной компоненты в исходном блоке рис. 2.7г. Отметим также хорошее шумоподавление при  $k=2$  для двух пятен волн (рис. 2.7в).

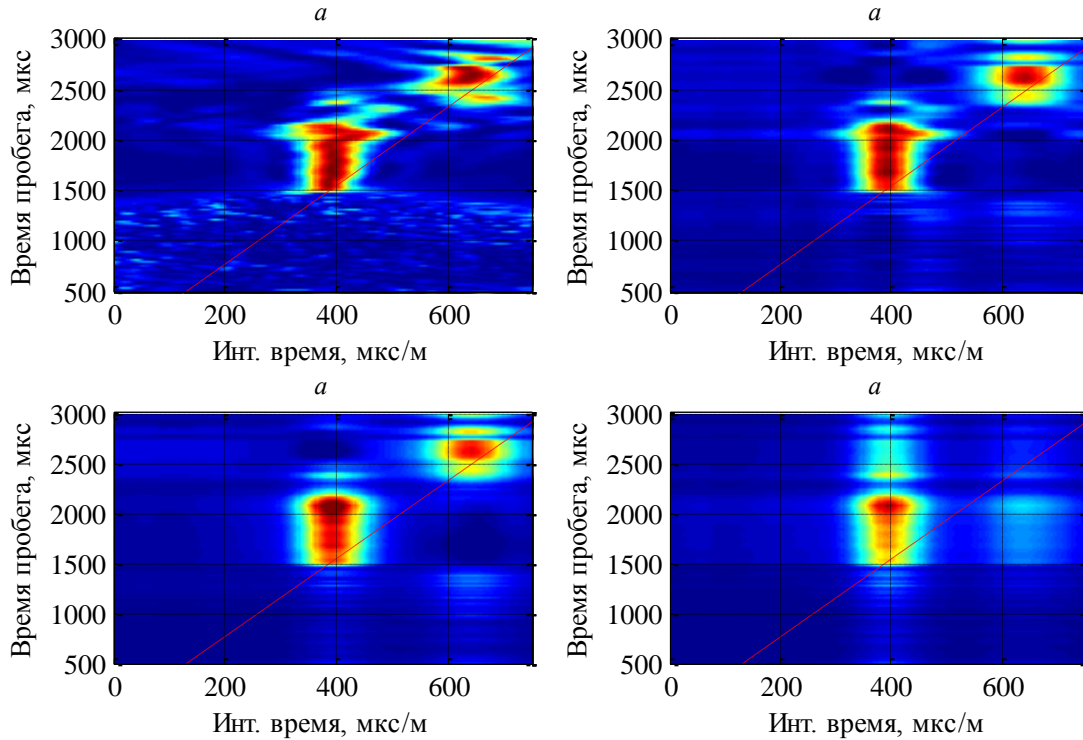


Рис. 2.7. Пример 1, отметка 288, изображение блока Гильберт сембланс:  
 а) исходный; б) после фильтрации при  $k=3$ ; в) после фильтрации при  $k=2$ ;  
 г) после фильтрации при  $k=1$ .

На рис. 2.8б представлены проекции «нефильтрованного» блока матрицы Гильберт сембланс по глубине – на фоне шумов различимы следы Р- и S-волн. Визуальное восприятие, и дальнейшая цифровая обработка по проекции традиционного сембланс с окном усреднения лучше (рис. 2.8а) «нефильтрованного» Гильберт сембланс. Предлагаемая фильтрация при  $k=2$  делает предпочтительным уже Гильберт сембланс (рис. 2.8в).



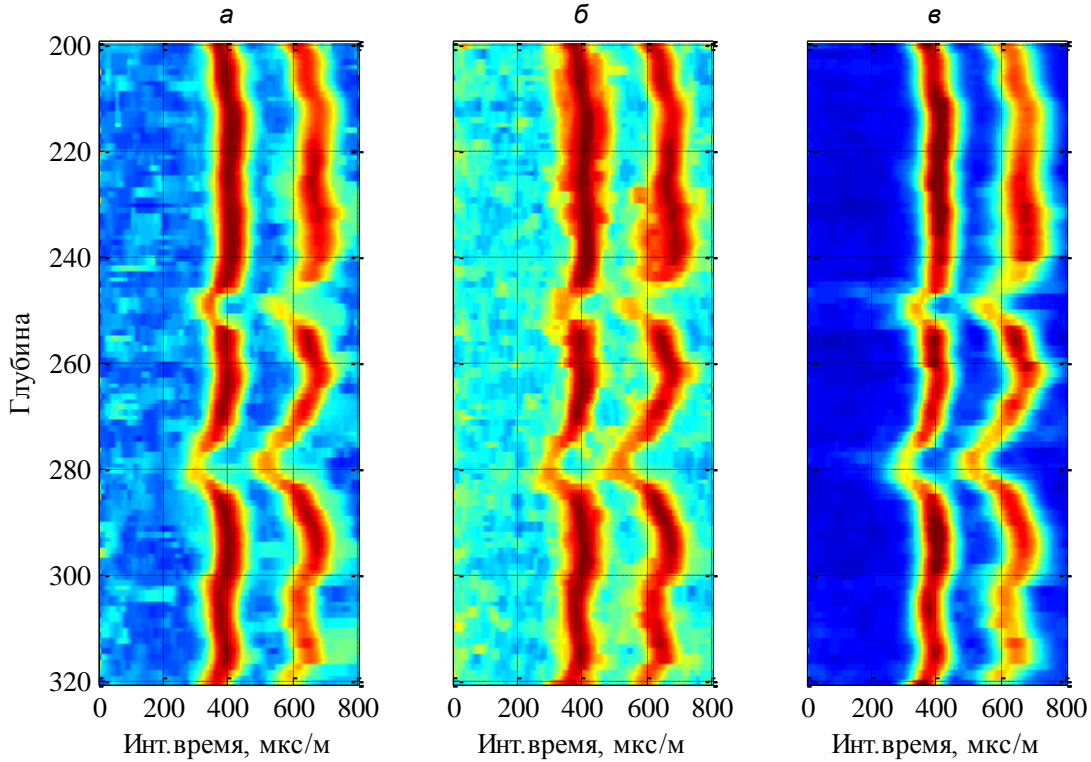


Рис. 2.8. Пример 1. Проекция блока сембланс: а) традиционный сембланс; б) Гильберт сембланс; в) Гильберт сембланс после фильтрации при  $k=2$ .

#### Глава 4. ФИЛЬТРАЦИЯ ПО СКОРОСТИ НА ОСНОВЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ РАДОНА

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

$$R(\tau, p) = \Re\{y(t, x)\} = \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} y(\tau + px, x) dx, \quad (2.9)$$

и обратного преобразования Радона путем интегрирования также не в бесконечных пределах, а в пределах интервального времени  $[p_{\min}, p_{\max}]$

$$y_{\text{new}}(t, x) = \Re^{-1}\{R(\tau, p)\} = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \int_{p_{\min}}^{p_{\max}} R_h(t - px, p) dp, \quad (2.10)$$

где

$$R_h(\tau, p) = H[R(\tau, p)] = H[\Re\{y(t, x)\}] = \Re\{H[y(t, x)]\} \quad (2.11)$$

преобразование Гильберта от преобразования Радона (или наоборот) исходного массива записи ВАК.

Соотношения (2.9)-(2.11) - суть фильтрации по скорости в  $(\tau - p)$ -области. Предполагается, что фильтрация полосовая – по ее результатам в  $y_{new}(t, x)$  от исходной  $y(t, x)$  сохраняются составляющие волны с интервальными временами  $p$  только в диапазоне  $[p_{min}, p_{max}]$ .

Однако на практике вместо (2.9)-(2.11) применяется иная вычислительная схема – через преобразование Фурье. Численное интегрирование при реализации преобразования Радона сводится к наклонному суммированию (*slant stack*) или суммированию со сдвигом, в случае дискретных отсчетов по времени массива записей  $y(t, m) \Rightarrow y(t, x)$  предполагает интерполяцию. Преобразование Фурье имеет свойство сдвига, что позволяет «изящнее» выполнить преобразования. Чтобы использовать свойство сдвига взамен интерполяции исходную пространственно-временную функцию преобразуют по Фурье

$$Y(f, x) = F\{y(t, x)\}, \quad (2.12)$$

где  $f$  - частота. Учитывая свойство сдвига преобразования Фурье, запишем

$$R_F(f, p) = F\{R(\tau, p)\} = \int_{x_{min}}^{x_{max}} Y(f, x) \cdot e^{j \cdot 2\pi \cdot f \cdot p \cdot x} dx. \quad (2.13)$$

Далее, применяя преобразование Фурье к (2.10) и (2.11), получим

$$Y_{new}(f, x) = |f| \cdot \int_{p_{min}}^{p_{max}} R_F(f, p) \cdot e^{-j \cdot 2\pi \cdot f \cdot p \cdot x} dp; \quad (2.14)$$

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

По (2.12)-(2.14) теоретически получается тот же результат, что и по (2.9)-(2.11), но «исчезли» интерполяция и численное дифференцирование. С вычислительной стороны при наличии математической библиотеки реализация (2.12)-(2.14) проще схемы (2.9)-(2.11). Тем не менее, в диссертационной работе автор

предлагает реализацию вычислительной схемы по (2.9)-(2.11). Она не будет громоздкой, если уже реализовано вычисление Гильберт сембланс по (2.7).

Автор предлагает две дополнительные опции, которые возможны при реализации фильтрации в  $(\tau - p)$ -области по (2.9)-(2.11). Первая опция – вес в (2.10) на Гильберт сембланс вида

$$y_{new}(t, x) = \Re^{-1}\{R(\tau, p) \cdot STCH^q(\tau, p)\}, \quad (2.15)$$

тем самым усиливать сохраняемую когерентность. Вторая опция - дополнить полосу по  $p$  полосой по  $\tau$  в диапазоне  $[\tau_{min}, \tau_{max}]$ .

**Пример 2.** Каротаж в процессе бурения. Проблема – высокая волна по стальному корпусу прибора «забывает» Р-волну. Запись прибора SoundTrak (Baker Hughes, 6 групп приемников) в монопольном режиме. Конструкция изолятора (ноу-хау производителя), размещенного между секцией приемников и излучателем (рис. 1.1), теоретически обеспечивает ослабление корпусной волны до - 42 dB в диапазоне частот 10-15 кГц. Проблема записи – мощность волны по корпусу прибора многократно превышает мощности составляющих волн по породе (применялся полимерный раствор). На рис. 2.9а,б представлены ФКД по 1 и 6-му приемникам (группам приемников). На них с большим трудом угадывается проявление Р-волны на фоне корпусной волны. По завершению бурения, на этом интервале был выполнен каротаж на кабеле, на рис. 2.9в прорисована соответствующая кривая оценки интервального времени Р-волны.

Для сопоставления результатов фильтрации выберем сигнал по 3-му приемнику на отметке глубины 520. На рис. 2.10а 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.

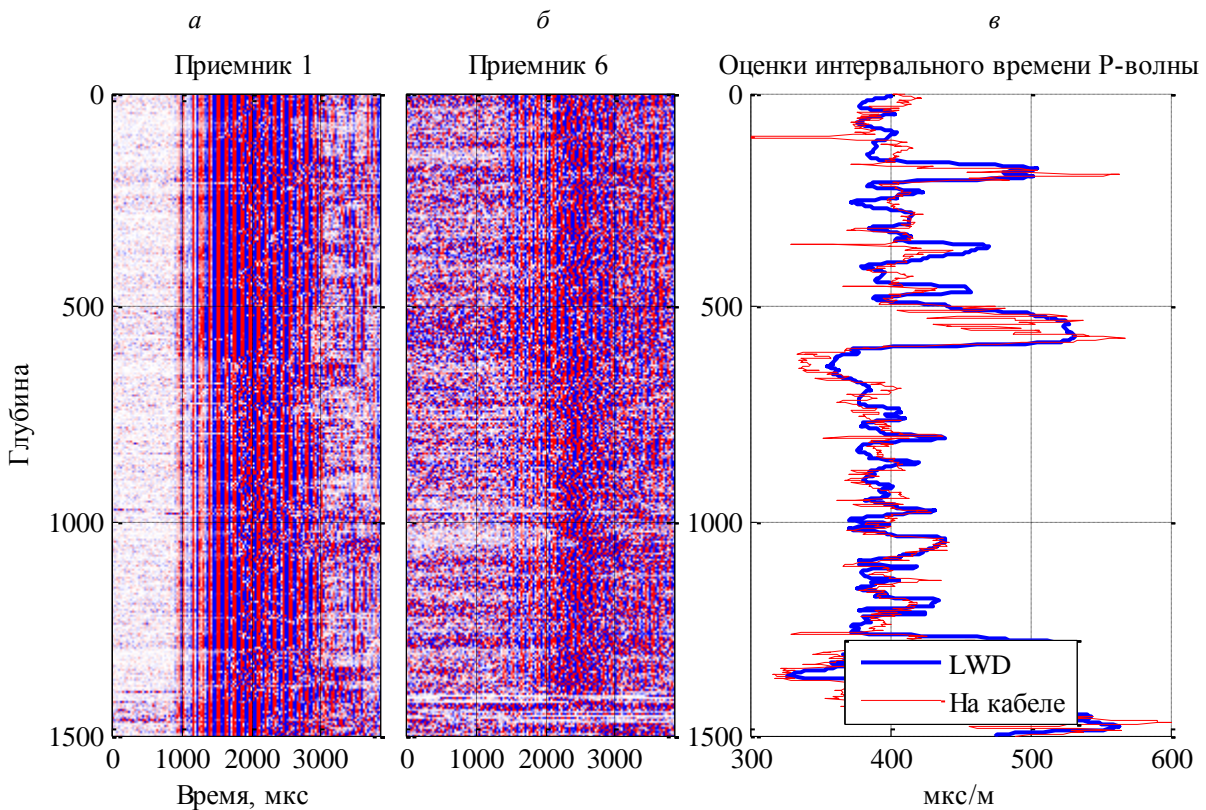


Рис. 2.9. Пример 2: а) ФКД по приемнику 1; б) ФКД по приемнику 6 (последний); в) оценки интервального времени Р-волны.

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. 2.10б приведен сигнал по 3-му приемнику после такой фильтрации. Несмотря на то, что волна по корпусу значительно подавлена, шумы не позволяют оценить даже время первого вступления оставшейся Р-волны. Однако оценку интервального времени Р-волны все же удастся сделать, только не с помощью традиционного сембланс (рис. 2.11а), а с помощью Гильберт сембланс и фильтрации с применением сингулярного разложения при  $k=1$  (должна остаться только одна Р-волна) (рис. 2.11б). На рис. 2.9в 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 вре-

мени выполнена? Ответ – чтобы выделить Р-волну, например, для оценки затухания.

Очень важный момент – предварительная оценка интервального времени должна быть выполнена для всех точек каротажа. По ним как скользящая сумма вычисляется синтетическая кривая времени первого вступления Р-волны к середине антенной решетки. Эта кривая – приближенная – добавим к ее значениям удвоенную оценку времени пробега в жидкости от прибора до стенки скважины (рис. 2.12в). 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. 2.10в приведен результат такой дополнительной фильтрации. Будем считать, что мы выделили Р-волну (это доступно по каждому приемнику) и можем оценивать ее параметры. На рис. 2.12а,б представлены ФКД по 1 и 6-му приемникам (группам приемников) после предлагаемой фильтрации.

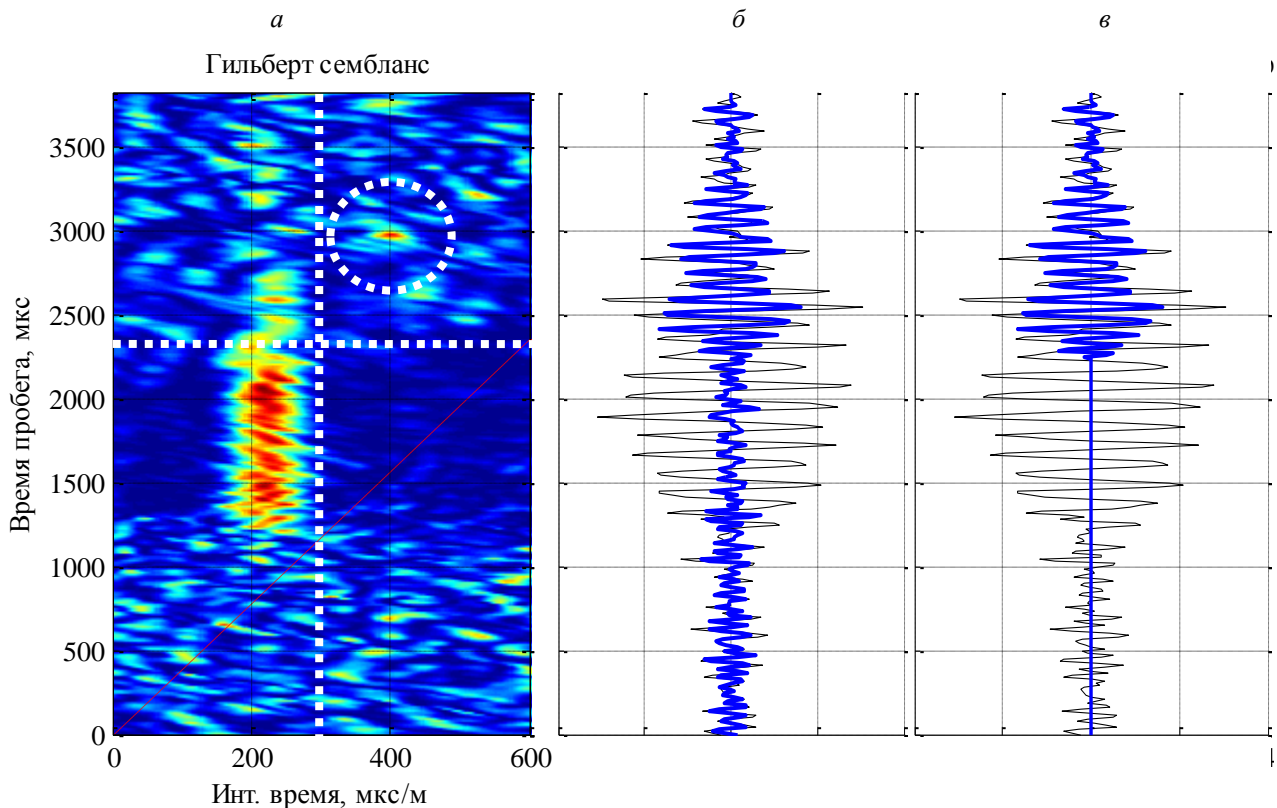


Рис. 2.10. Пример 2. Отметка 520, приемник 3: а) Гильберт сембланс; б) исходный сигнал и после отсечки сигнала по корпусу  $[p_{\min}, p_{\max}]$ ; в) после дополнительной отсечки по времени первого вступления к середине антенной решетки.

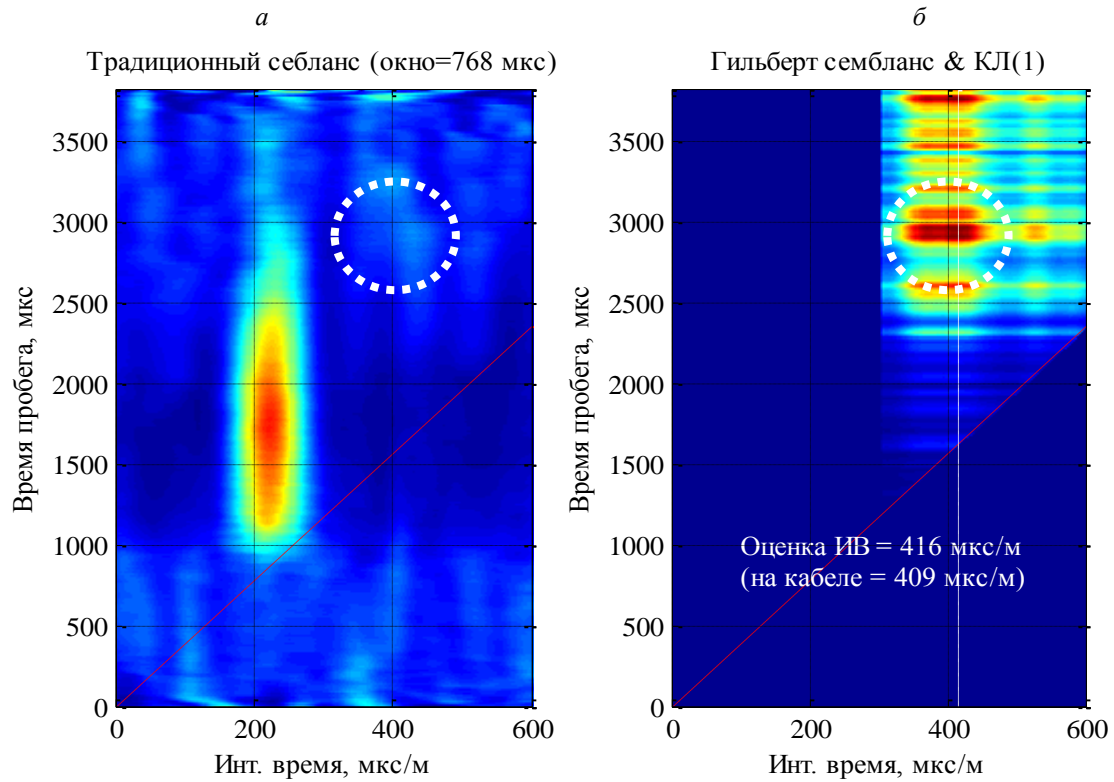


Рис. 2.11. Пример 2. Отметка 520: а) Традиционный себланс; б) Гильберт себланс и фильтрации на основе сингулярного разложения.

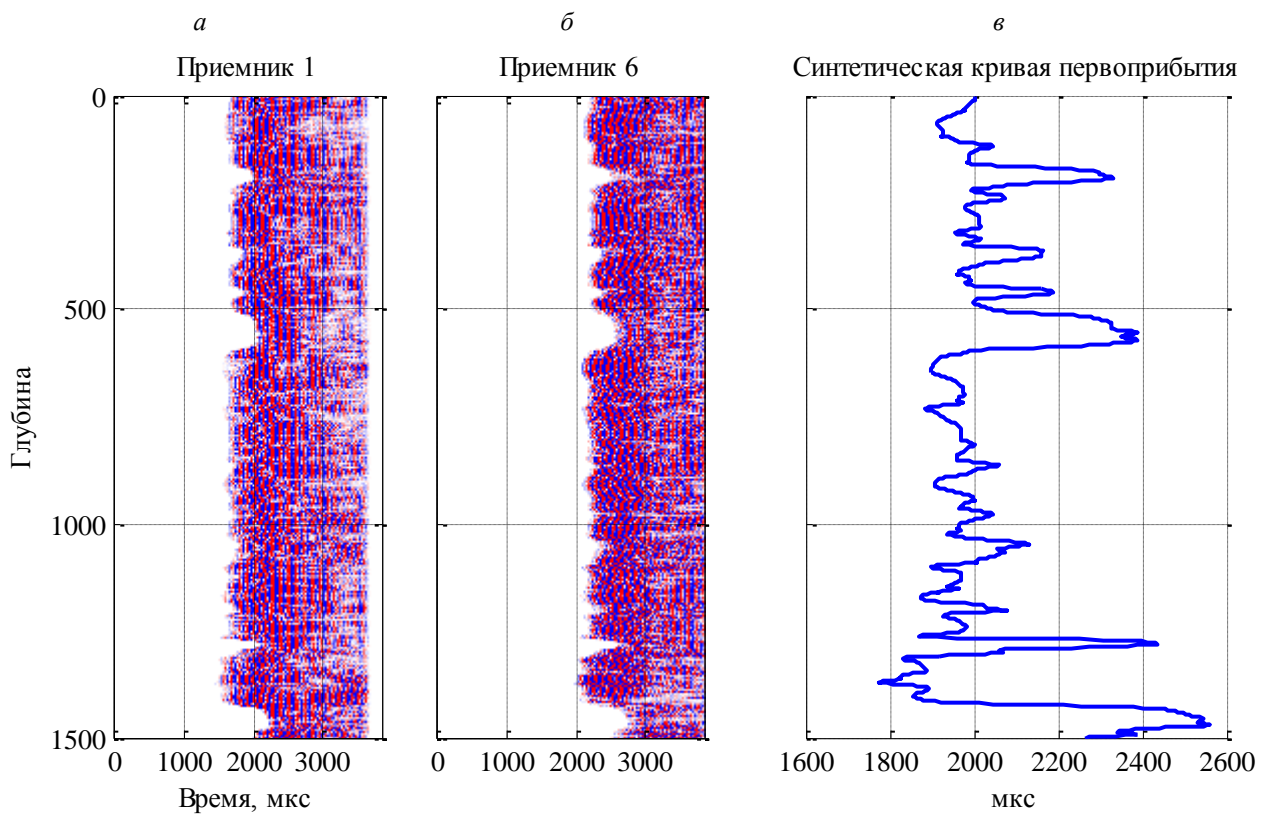


Рис. 2.12. Пример 2. Результат фильтрации: а) ФКД по приемнику 1; б) ФКД по приемнику 6 (последний); в) синтетическая времени кривая первого вступления.

**Пример 3.** Каротаж на кабеле через обсадную колонну. Проблема – волна по обсадной колонне «забивает» Р-волну. ВАК выполнен на действующей скважине (более 30 лет эксплуатации) с целью доразведки в терригенных отложениях. Прибор ХМАС содержит 8 приемников (групп приемников), частота возбуждения  $\sim 8$  кГц, режим излучения - монопольный. На рис. 2.13а,б представлены ФКД по первому и последнему (восьмому) приемникам после частотной фильтрации в полосе [5 20] кГц. На рис. 2.13в 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.

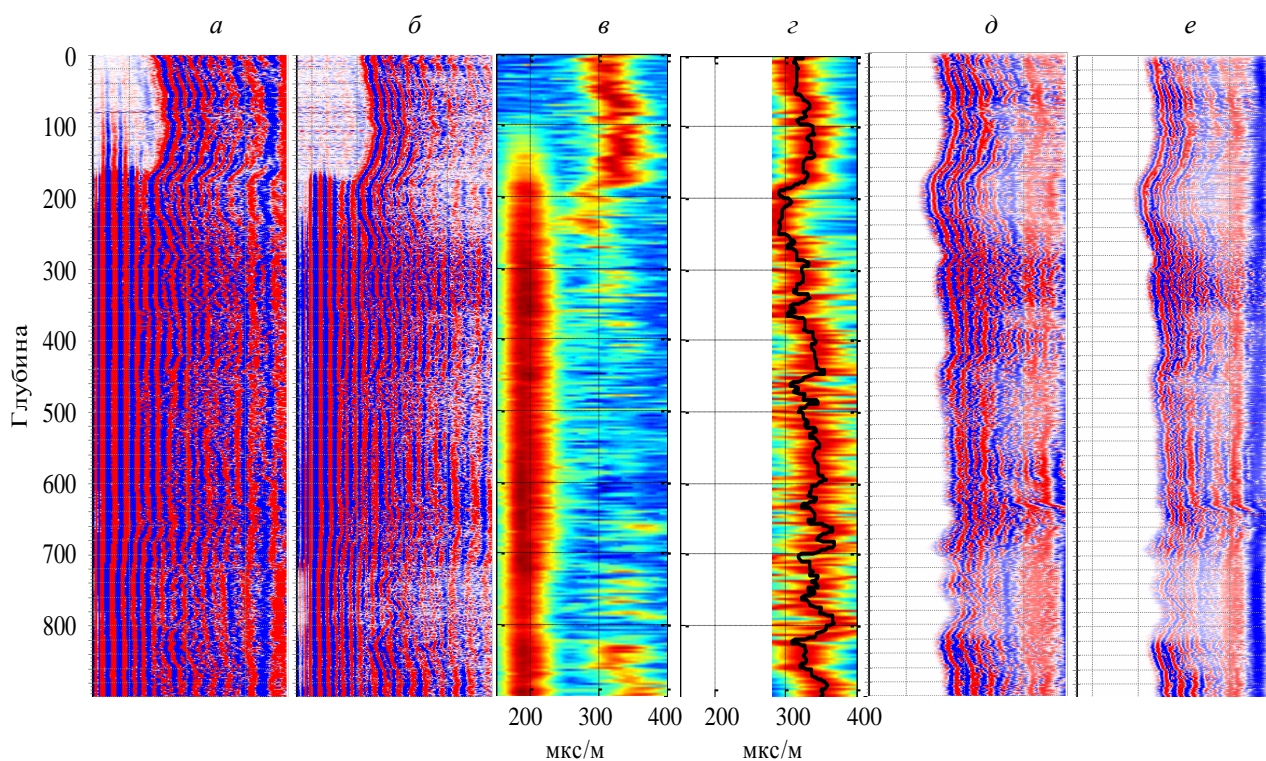


Рис. 2.13. Пример 3: а) ФКД по приемнику 1; б) ФКД по приемнику 8 (последний); в) проекция традиционного сембланс; г) проекция Гильберт сембланс и оценка интервального времени Р-волны; д) ФКД по приемнику 1 после фильтрации; е) ФКД по приемнику 8 после фильтрации.

Интервальное время волны Лэмба по колонне составляет  $\sim 184$  мкс/м, а диапазон исследуемой Р-волны [280 380] мкс/м. Поэтому зададим полосу по-

давления интервального времени  $[0 \text{ } 280]$  мкс/м. На рис. 2.13г 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. 2.13д,е представлены ФКД после фильтрации (уже возможно проводить интерпретацию данных ВАК и оценку ФЕС).

## Глава 5. ДИСПЕРСИОННЫЙ СЕМБЛАНС В (ТАУ-Р)-ОБЛАСТИ

Скорость звука зависит от частоты звуковой волны. Этот эффект называется дисперсией. Большинство акустических волн распространяются с большей скоростью на низкой частоте (это нормальная дисперсия). Интерес к дисперсии ВАК возрос с развитием аппаратуры с дипольными излучателями. Дело в том, что при дипольном режиме излучения кроме S-волны возбуждаются поляризованные изгибные (SH, SV) волны с большей амплитудой, и скорость их распространения зависит от частоты. Дисперсия изгибной волны может быть причиной ошибки оценки скорости S-волны, что в свою очередь 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. Интерес к дисперсии при ВАК добавили и достижения в методиках интерпретации проницаемости по измерениям волны Стоунли. Дисперсия или зависимость фазовой скорости от частоты волны Стоунли может быть нормальной и аномальной в твердых и мягких породах. Кроме того, скорости изгибной волны и St-волны зависят от диаметра скважины и изменяются в окрестности самого прибора. Дисперсию для каждого типа составляющих волн характеризуют дисперсионными кривыми. Каждая из таких кривых представляет зависи-



мость – наблюдаемое фазовое интервальное время (НФИВ) (или наблюдаемая фазовая скорость) от частоты. 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). Учет дисперсии при обработке ВАК предполагает решение обратной задачи - оценка ИВП по НФИВ. 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 НФИВ), и эта скорость практически совпадает со скоростью S-волны (поперечная волна или волна сдвига), возбуждаемой в монополярном режиме. Выбор в качестве опорной частоты St-волны (волна Стоунли)  $f_0=0$  кГц нецелесообразен по двум причинам. Во-первых, St-волна диспергирует как в дипольном, так и монополярном режимах возбуждения. Во-вторых, на частоте  $f_0=0$  дисперсионные кривые St-волны имеют максимальный градиент и разброс.

Проблема дисперсии при ВАК сформировалась более 25 лет назад и заключалась в поисках ответов на вопросы: а) что на самом деле оценивается при вычислении скорости диспергирующих волн по временам их первого вступления на приемники антенной решетки? б) насколько смещаются оценки диспергирующих волн в методе сембланс? в) что принимать за оценку скорости диспергирующих волн для интерпретации?

Решение проблемы отчасти было найдено в виде дисперсионного сембланс, который является развитием традиционного сембланс. Дисперсия приводит к размытию пятен когерентной мощности составляющих волн по скорости в зависимости от частоты. Основным инструментом исследования дисперсии является спектральный сембланс.

Идея дисперсионного сембланс заключается в приведении когерентной мощности диспергирующих волн от НФИВ к ИВП по дисперсионным кривым.

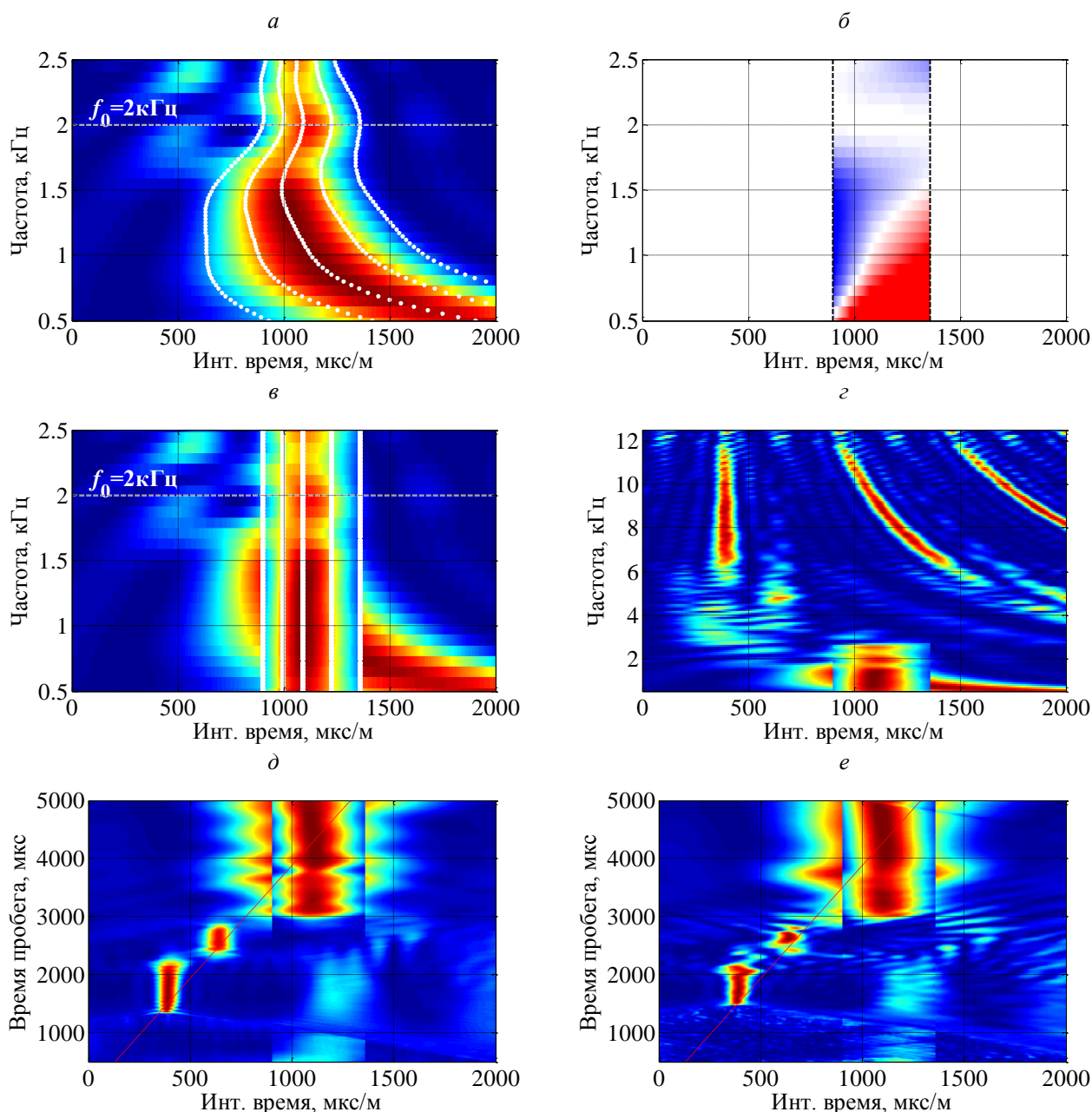


Рис. 2.14. Пример 1. Дисперсия: а) St-волна (0,5÷12,5 кГц); б) Изображение матрицы коррекции на дисперсию St-волны; в) Спектральный сембланс после коррекции на дисперсию St-волны; г) Спектральный сембланс после коррекции на дисперсию St-волны (диапазон частот - 0,5÷12,5 кГц); д) Дисперсионный сембланс; е) Дисперсионный Гильберт сембланс.

Дисперсию проиллюстрируем на Примере 1. На рис. 2.2в представлен спектральный сембланс. Р-волна не диспергирует и ее когерентная мощность распределена на одной скорости вне зависимости от частоты. Как «Р (фантом)» обозначены когерентные события Р-волны, связанные с пропуском волн, а не с дисперсией.

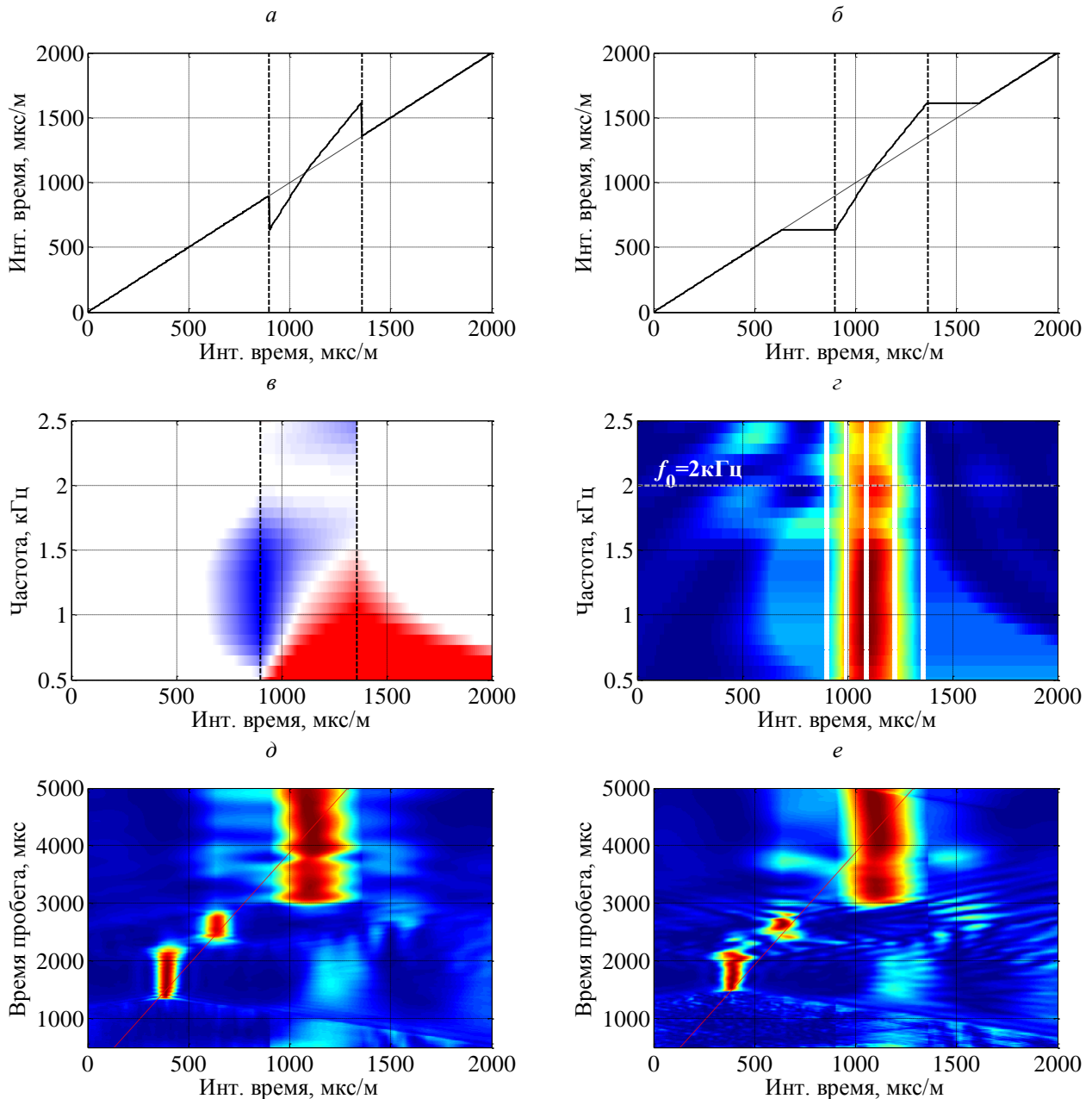


Рис. 2.15. Пример 1. Дисперсия: а) Значения строки матрицы  $\mathbf{D}$ , соответствующей частоте 1 кГц; б) Обновление значений строки матрицы  $\mathbf{D}$ ; в) Изображение матрицы обновленной  $\mathbf{D}$ ; г) Дисперсионный спектральный сембланс (фрагмент St-волны); д) Дисперсионный сембланс (ДС1); е) Дисперсионный Гильберт сембланс.

Также не диспергирует S-волна. Для P- и S-волн в монопольном режиме характерно совпадение всплесков когерентности по параметру  $p$  на изображениях традиционного и спектрального сембланс. Разрез низкоскоростной и для St-волны характерна нормальная дисперсия выше частоты  $f \approx 2$  кГц, однако начиная с частоты  $f \approx 1.5$  кГц (и вплоть до нулевой частоты) наблюдается перегиб на

аномальную дисперсию. Когерентная мощность St-волны распределена (или размыта) по НФИБ и частоте «в форме запятой» (рис. 2.2в, рис. 2.14а – увеличен масштаб), что и является причиной широкого пятна когерентности St-волны на традиционном и Гильберт сембланс (рис. 2.2б, рис. 2.4а). Но расширенное пятно не является проблемой - максимум когерентности по параметру  $p$  для St-волны на сембланс всегда можно найти. Проблема в том, что такой максимум не отражает распределение когерентной мощности на спектральном сембланс. Результат - ошибка (смещение) в оценке скорости St-волны.

Представление традиционного сембланс через прямое и обратное преобразование Фурье

$$STC(\tau, p) = \frac{\sum_{t=\tau-T}^{\tau+T} \left| F^{-1} \left[ \sum_{m=1}^M Y(f, m) e^{j2\pi \cdot f \cdot p \cdot x_m} \right] \right|^2}{M \cdot \sum_{t=\tau-T}^{\tau+T} \sum_{m=1}^M \left| F^{-1} \left[ Y(f, m) e^{j2\pi \cdot f \cdot p \cdot x_m} \right] \right|^2}; Y(f, m) = F[y(t, m)]. \quad (2.16)$$

Представление спектрального сембланс (*Slowness-Frequency-Coherence*) без усреднения по частоте

$$SFC(f, p) = \frac{\left| \sum_{m=1}^M Y(f, m) e^{j2\pi \cdot f \cdot p \cdot x_m} \right|^2}{M \cdot \sum_{m=1}^M |Y(f, m)|^2}. \quad (2.17)$$

Первоначально дисперсионный сембланс представлялся в  $(\tau - p)$ -области как (далее – ДС1)

$$DSTC(\tau, p) = \frac{\sum_{t=\tau-T}^{\tau+T} \left| F^{-1} \left[ \sum_{m=1}^M Y(f, m) e^{j2\pi \cdot f \cdot p_d(f, p) \cdot x_m} \right] \right|^2}{M \cdot \sum_{t=\tau-T}^{\tau+T} \sum_{m=1}^M \left| F^{-1} \left[ Y(f, m) e^{j2\pi \cdot f \cdot p_d(f, p) \cdot x_m} \right] \right|^2}. \quad (2.18)$$

Отличие ДС1 (2.18) от традиционного сембланс (в представлении (2.16)) заключается в замене параметра  $p$  на функцию  $p_d(f, p)$ .

Дисперсионное представление спектрального сембланс (2.17) можно записать как

$$DSFC(f, p) = \frac{\left| \sum_{m=1}^M Y(f, m) e^{j2\pi \cdot f \cdot p_d(f, p) \cdot x_m} \right|^2}{M \cdot \sum_{m=1}^M |Y(f, m)|^2}. \quad (2.19)$$

Примеры изображений дисперсионного сембланс ДС1 (2.18) и дисперсионного спектрального сембланс (2.19) в литературе не представлены, а в известных программных реализациях оценка ИВП осуществляется не по максимуму ДС1, а по максимуму другой (одномерной) функции

$$S(p) = \frac{\sum_f \left| \sum_{m=1}^M Y(f, m) e^{j2\pi \cdot f \cdot p_d(f, p) \cdot x_m} \right|^2}{M \cdot \sum_f \sum_{m=1}^M |Y(f, m)|^2}, \quad (2.20)$$

которая теперь и отождествляется с понятием дисперсионный сембланс (далее - ДС2). Причина такой подмены - в простоте программной реализации. Во-первых, кажущаяся громоздкость (2.18) - для оптимального по быстродействию вычисления нужно формировать трехмерные массивы  $(\tau \leftarrow f, p, m)$ , а для (2.20) достаточно двумерных  $(\tau \leftarrow f, m)$  (хотя и для каждого значения  $p$ ). Во-вторых, в (2.20) нет обратного преобразования Фурье. В-третьих, в (2.20) расчеты для значений ИВП вне области дисперсионных кривых не выполняются, а для (2.18) значения ИВП задаются во всей области исследования интервального времени. При этом для ДС1 возможна «накладка» оценок меры когерентности для ИВП по дисперсионным кривым с оценками для повторяющихся значений НФИВ. Без ответа остается и вопрос – расходятся ли оценки ИВП по пикам одномерной проекции вида (2.2) для ДС1 (2.18) и по одномерному ДС2 (2.20)?

Чтобы сопоставлять результаты оценок интервальных времен составляющих волн по традиционному сембланс, ДС1 и ДС2 в диссертационной работе предлагается компактная вычислительная схема.

Сформируем  $M$  векторов-столбцов длины  $N$  из 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

$$\mathbf{Y}_m = FFT\{\mathbf{y}_m\} = \|Y_m(n)\|, n = \overline{1, N_{FFT}}$$

и для каждого из таких векторов 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  $[p_{\min} p_{\max}]$

$$\mathbf{p} = linspace(p_{\min}, p_{\max}, L) = \|p(l)\|, l = \overline{1, L}$$

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

$$\mathbf{P} = \left( \begin{array}{c} \mathbf{p} \\ \vdots \\ \mathbf{p} \\ \vdots \\ \mathbf{p} \end{array} \right)_{N_{FFT}}. \text{ Назовем эту матрицу операционной матрицей НФИВ.}$$

Сформируем вектор-столбец частот

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

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

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

Введем операционную матрицу ИВП  $\mathbf{D}$ , которая имеет тот же размер, что и операционная матрица НФИВ  $\mathbf{P}$ . Элементы матрицы  $\mathbf{D} = \|d(n,l)\|$  определим как  $d(n,l) = p(l)$ , когда значение  $p(l)$  вне диапазона ИВП, и

$$d(n,l) = p_d(f(n), p(l)), \quad (2.21)$$

для значений  $p(l)$  в диапазоне ИВП дисперсионных кривых.

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

$$\mathbf{Z}_m = \mathbf{Y}_m^* \circ \exp\{j \cdot 2 \cdot \pi \cdot x_m \cdot \mathbf{F} \circ \mathbf{D}\}, \quad (2.22)$$

где как « $\circ$ » обозначено Адамарово (поэлементное) перемножение матриц. Выполним по столбцам (2.22) обратное быстрое преобразование Фурье. В результате получим  $M$  матриц размером  $N \times L$

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

ДС1 вычисляется как

$$DSTC(n, l) = \frac{\sum_{k=n-T}^{n+T} \left[ \sum_{m=1}^M z_m(k, l) \right]^2}{M \cdot \sum_{k=n-T}^{n+T} \sum_{m=1}^M z_m^2(k, l)}, n = \overline{1, N}; l = \overline{1, L}. \quad (2.23)$$

Дисперсионный спектральный сембланс (2.19) вычисляется как

$$DSFC(n, l) = \frac{\sum_{k=n-\Delta f}^{n+\Delta f} \left| \sum_{m=1}^M Z_m(k, l) \right|^2}{M \cdot \sum_{k=n-\Delta f}^{n+\Delta f} \sum_{m=1}^M |Y_m(k)|^2}, n = \overline{1, N_{FFT}/2}; l = \overline{1, L}. \quad (2.24)$$

Также отметим, что если в (2.22) вместо матрицы  $\mathbf{D}$  подставить матрицу  $\mathbf{P}$ , то (2.1) будет соответствовать вычислению традиционного сембланс (2.16), а (2.24) - вычислению спектрального сембланс (2.17).

В предлагаемой схеме есть место и вычислению ДС2

$$S(l) = \frac{\sum_{k=1}^{N_{FFT}/2} \left| \sum_{m=1}^M Z_m(k, l) \right|^2}{M \cdot \sum_{k=1}^{N_{FFT}/2} \sum_{m=1}^M |Y_m(k)|^2}, l = \overline{1, L}. \quad (2.25)$$

По спектральному сембланс рис. 2.14а, построено семейство из 5-ти дисперсионных кривых. Принята опорная частота  $f_0=2$  кГц. Интерполяцией дисперсионных кривых по частоте  $f$ , а затем интерполяцией по интервальному времени  $p$  сформируем операционную матрицу ИВП  $\mathbf{D}$  из значений (2.21). На рис. 2.14б приведены значения разности матриц  $(\mathbf{D}-\mathbf{P})$ . На рис. 2.14в представлен фрагмент «исправленной» St-волны на спектральном сембланс, а на рис. 2.14г представлен «полный» дисперсионный спектральный сембланс.

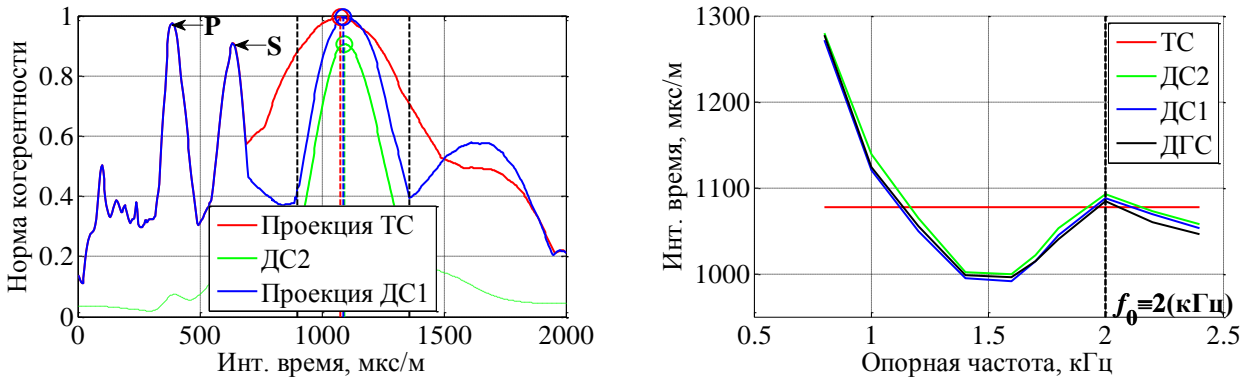


Рис. 2.16. Пример 1. Дисперсионная оценка интервального времени волны Стоунли по максимумам сембланс на отметке 288: а) для опорной частоты  $f_0=2$  кГц; б) в зависимости от опорной частоты.

На рис. 2.14д,е представлены дисперсионный сембланс (ДС1) и дисперсионный Гильберт сембланс. Отметим, что пятно  $St$ -волны сузилось примерно в  $\sim 2$  раза по сравнению исходными сембланс, и это означает, что когерентная мощность диспергирующей  $St$ -волны консолидирована по интервальному времени (скорости). Однако, остатки исходного пятна  $St$ -волны (рис. 2.14г,д,е) мешают целостному восприятию результата. Эти «остатки» обусловлены тем, что в операционной матрице  $\mathbf{D}$  нарушен принцип: значения  $p$  по строкам матрицы должны быть не убывающими. В результате петли интервального времени приводят к повторному отображению когерентной мощности. В диссертационной работе предлагается обновлять матрицу  $\mathbf{D}$ . На рис. 2.15 приведены результаты коррекции на дисперсию. На рис. 2.16 представлена дисперсионная оценка интервального времени  $St$ -волны по максимумам сембланс на отметке 288. В качестве опорной частоты приведения когерентной мощности диспергирующей  $St$ -волны можно рекомендовать  $f_0=2$  кГц.

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В диссертации получила развитие применительно к записям многоэлементного ВАК методология, известная в сейсмике как метод регулируемого направленного приема (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 в виде программ на MATLAB.

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

#### **4. ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

Публикации в научных изданиях, определенных ВАК Минобрнауки России

1. **Ахметсафин Р.Д.**, Булгаков А.А. Дополнительное уплотнение геофизических файлов // НТВ «Каротажник» № 85, 2001. - С. 78-82.

2. **Ахметсафин Р.Д.**, Булгаков А.А. Частотно-временное разделение волн акустического каротажа // НТВ «Каротажник» № 90, 2002. - С. 46-50.
3. **Ахметсафин Р.Д.**, Булгаков А.А. Сжатие данных при акустическом каротаже // НТВ «Каротажник» № 90, 2002. - С. 51-56.
4. 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» №111-112, 2003.
5. **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.
6. **Ахметсафин Р.Д.**, Булгаков А.А. О сжатии двумерных геофизических данных // НТВ «Каротажник». – №10-11, 2005. – С. 187-193.
7. **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.
8. **Ахметсафин Р.Д.**, Дубинский В., Паттерсон Д. Метод Гильберт-сембланс. Обработка данных акустического каротажа // Геология и геофизика, 2008, т. 49 (9). - С. 919-925.
9. **Ахметсафин Р.Д.** О возможности многоэлементного акустического каротажа для подавления эффекта «звонящей» колонны // Геофизика, 2009, № 1, - С. 44-47.
10. **Ахметсафин Р.Д.** Цифровая фильтрация акустических массивов волнового каротажа // НТВ «Каротажник», №9(231), 2013, - С. 110-116.
11. **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.
12. **Ахметсафин Р.Д.** Алгоритмические основы сейсмолокации бурового долота. // НТВ «Каротажник», №5(239), 2014, - С. 67-73.

13. **Ахметсафин Р.Д.**, Ахметсафина Р.З. О повышении разрешающей способности трехэлементных зондов акустического каротажа // Геофизика. 2014. № 6. - С. 58-61.

14. **Ахметсафин Р.Д.** Применение разложения Карунена-Лоэва для фильтрации меры когерентности многоканальных записей акустического каротажа // Геофизика. 2015. № 1. - С. 78-81.

15. **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.

16. **Ахметсафин Р.Д.**, Ахметсафина Р.З. Сембланс – инструмент оценки скоростей составляющих пакета волнового акустического каротажа // НТВ «Каротажник». – 2016. - №8 (266). - С. 98-118.

Научные публикации в других научных изданиях и журналах

17. **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.

18. **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.

19. **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.

20. 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.

ПАТЕНТЫ

21. **Akhmetzafin R.**, Dubinsky V., Patterson D.J. Wave analysis using phase velocity processing: пат. 7646673 США. – 2010.