

## ОТЗЫВ

### официального оппонента

на диссертационную работу

Ахметсафина Раиса Дахиевича «Математические решения оценки скоростей и разделения составляющих волн многоэлементного волнового акустического каротажа», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 25.00.10 - Геофизика, геофизические методы поисков полезных минералогических ископаемых

Диссертационная работа Ахметсафина Р.Д. посвящена разработке и практическим приложениям методов обработки данных (записей) многоэлементного волнового акустического каротажа (ВАК) для оценки скоростей продольных и поперечных волн на основе модификаций функционала «сембланс».

Актуальность работы определяется следующими обстоятельствами:

1. Волновой акустический каротаж является источником достоверной информации о скоростях продольных и поперечных волн в окрестности скважины и, таким образом, представляет собой один из ключевых элементов технологии, необходимой для успешной реализации инверсий сейсмических данных в количественную характеристику коллекторских свойств и насыщения продуктивных пластов.

2. Развитие приборов акустического каротажа характеризуется увеличением количества используемых в них приемных и излучающих элементов. Это позволяет целенаправленно излучать и принимать специфические типы волн и использовать их для более точного и всестороннего определения характеристик среды в окрестности скважины.

3. Многоканальный прием в ВАК позволяет использовать способы обработки данных, развиваемые в антенных технологиях для выделения полезных сигналов на фоне случайных и когерентных помех, такие, например, как мера когерентности «сембланс». В качестве когерентной

помехи, мешающей выделению головных продольных и поперечных волн могут быть, например, интерферирующие с ними волны, бегущие по обсадной колонне, которые эффективно возбуждаются при плохом контакте между обсадной колонной и цементным камнем. В результате под воздействием излучателя прибора ВАК колонна «звенит» и «забивает» информативный сигнал по породе. В качестве специфического типа когерентной помехи также можно рассматривать и дисперсию волн, свойственную собственным модам слоистого цилиндрического волновода, которым является скважина. В этом случае также возникают определенные трудности с их выделением.

Таким образом, разработка технологичных методов разделения волн в записях многоканального ВАК, а также методов, повышающих точность оценки их скоростей для последующей интерпретации в условиях интерференции и дисперсии, представляется актуальной задачей.

Диссертация изложена на 197 страницах, состоит из введения, 5 глав, заключения, библиографии из 274 ссылок и трех приложений.

В **первой главе** дано представление об основах ВАК и конструкции приборов многоэлементного ВАК, а также представлен обзор существующих методов обработки записей многоканального ВАК. Автор проанализировано большое количество публикаций. Автор классифицирует методы оценки скоростей составляющих волн на две категории. К первой автор относит «индивидуальные» методы, в которых по отдельности обрабатываются одномерные записи по каждому каналу на предмет выделения первого вступления составляющих волн. Ко второй автор относит «групповые» методы обработки данных, в частности, приводится обзор различных модификаций оценки скоростей волн на основе меры когерентности «сембланс».

Во **второй главе** автор предлагает новые соотношения для оценки меры когерентности сембланс, в которой реальный сигнал (запись) заменяется его комплексным аналогом, а временное окно, в котором



производится суммирование сигнала, сокращается до одного отсчета. Автор назвал эти соотношения как Гильберт сембланс, т.к. в них вместо исходных сигналов по приемникам представлены построенные на их основе с применением преобразования Гильберта комплексные аналитические сигналы. В результате формулы для функционала сембланс выражаются через преобразования Радона и Гильберта. Такой подход аналогичен ранее предложенному в [227] комплексному функционалу когерентности в частном случае отсутствия усреднения по временному окну, что, по мнению автора, позволяет повысить разрешающую способность при оценке проявлений когерентной мощности составляющих волн (и, соответственно, их выделения).

Повышение разрешающей способности (по мнению автора) имеет обратную сторону – возрастает влияние шумов (в том числе методических). Следует отметить, что возникающие дополнительные шумы устраняются при традиционном введении окна усреднения в функционале сембланс. Однако, в **третьей главе** для подавления шумов автор выбирает другой подход – непараметрическую фильтрацию на основе известного укороченного сингулярного разложения матриц (SVD). Такой подход представляется хотя и вынужденным, но вполне обоснованным – SVD фильтрация убирает мелкомасштабные детали картины функционала сембланса.

В **четвертой главе** для разделения волн по их скорости в данных многоканального ВАК автор предлагает метод фильтрации, основанный на прямом и обратном преобразовании Радона. Такой подход аналогичен веерной фильтрации данных, но имеет более фундаментальную математическую основу, связанную, в частности, с обратимостью преобразования Радона. В работе Р.Д. Ахметсафина впервые приведены две вычислительные реализации фильтрации по скорости с «полным» обратным преобразованием Радона, и показано, что 8-ми приемников уже достаточно для численной реализации этого интегрального преобразования.



В пятой главе автор развивает технику дисперсионного сембланса на примере диспергирующей волны Стоунли. Суть подхода заключается в корректировке фазовых множителей в спектральном представлении традиционного сембланса на дисперсию рассматриваемого типа волн. Автору удалось реализовать компактную вычислительную схему для дисперсионного сембланса в области приведенное время пробега ( $\tau$ ) – интервальное время ( $p$ ). Кроме исходных массивов ВАК для дисперсионного сембланса необходим набор дисперсионных кривых в области частота ( $f$ ) – интервальное время ( $p$ ). Автор обратился к первоисточнику дисперсионного сембланса (Kimball C.V., 1994) и попытался разобраться в проблемах, возникающих при численной реализации дисперсионный сембланса.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертации.

Несомненным достоинством диссертационной работы является последовательное и систематическое использование строгих математических преобразований (интегральные преобразования Гильберта, Радона, Фурье, а также сингулярного разложения Карунена-Лозва) для численной реализации методов обработки данных многоканального ВАК на основе меры когерентности сембланса.

Вместе с тем диссертация не лишена ряда недостатков:

1. Выбранное автором название диссертации вызывает вопросы как с точки зрения соответствия сути работы, так и русского языка. «Математические решения оценки скоростей...» ? Могут быть математические решения какой-то задачи или математические оценки чего-то, но сочетание «решения оценки» вызывает некоторое напряжение. Более адекватным названием, отражающим суть работы, было бы, например: «Методы обработки данных многоканального волнового акустического каротажа для разделения составляющих волн и оценки их скоростей».



2. В основе развиваемых автором подходов к выделению волн по записям многоканального ВАК лежат модификации меры когерентности (подобия, похожести) на основе функционала сембланс. Функционал сембланс представляет собой отношение когерентной части энергии, связанной с некоторым сигналом, к полной энергии в некотором временном окне. Когерентная часть энергии, связанная с некоторым сигналом, выделяется из случайного шума путем сложения записей на разных приемниках с соответствующими фазовыми сдвигами, т.е. при так называемом наклонном суммировании. При этом оптимальной является длительность временного окна, совпадающая с длительностью искомого сигнала (волнового пакета). Соответственно, для выделения специфических волновых пакетов в полной волновой картине должны использоваться различные временные окна с длительностью, соответствующей таким пакетам. Функционал сембланс является эффективным способом выделения слабых сигналов на фоне случайных помех при большом количестве регистрирующих приемников. В этой связи имеется неточность в интерпретации формулы для сембланса (1.28) на стр.64 как отношения мощностей, а не энергий, и, соответственно, не вполне корректное утверждение на стр.65 о том, что «К недостатку метода сембланс можно отнести необходимость выбора величины временного окна усреднения [259], которое, по сути, загроубляет распределение когерентной мощности.»

3. Автором заявляется, что Гильберт сембланс имеет более высокую разрешающую способность, чем, например, обычный «оконный» сембланс, однако количественные оценки разрешающей способности метода в диссертации не приведены. Более того, результаты, приведенные, например, на рис.3.6., говорят скорее об обратном.

4. Преимущества новых методов обработки данных ВАК, таких как Гильберт сембланс, должны доказываться путем сравнения получаемых с их



помощью результатов с аналогичными результатами, получаемыми при традиционной обработке для тех же исходных данных. К сожалению, в диссертации систематически отсутствует сопоставление примеров обработки на основе предлагаемых автором подходов с результатами обработки традиционными методами. Например, в главе 2, посвященной Гильберт семблансу, такое сравнение хотелось бы иметь для тех двух примеров, имеющихся в этой главе, которые представлены на рис. 2.4 и рис. 2.5.

5. Сомнения в преимуществе предлагаемого в главе 2 подхода формулирует и сам автор на стр. 100:

«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?!»

Даваемые после этого абзаца ответы на поставленный вопрос не выглядят достаточно убедительными.

6. В диссертации основное внимание уделено использованию критерия сембланс при наличии в основном когерентных помех от других типов волн и практически отсутствует анализ влияния случайных помех на эффективность обработки данных с использованием этого критерия, для чего он в первую очередь и предназначен. Автор сам отмечает актуальность ВАК в процессе бурения, где уровень случайных помех может быть весьма высок. Соответственно картина, представляемая функционалом сембланс будет характеризоваться большим количеством дополнительных максимумов, обусловленных шумом. В таких условиях традиционный оконный сембланс, связанный с энергией волнового пакета, имеет существенные преимущества по сравнению с предлагаемым безоконным Гильберт сембланс, основанном



на локальной мощности, которая менее стабильна при существенном уровне помех. Более того, в таких условиях для выделения самого события (волнового пакета) становится важным не только наличие максимума в функционале сембланса, но и его численное значение. Обсуждение этих вопросов в диссертации полностью отсутствует.

7. Использование так называемого «дисперсионного» сембланса, развиваемого в главе 5, выглядит как несколько искусственная и надуманная процедура. По своей сути сембланс (в переводе подобие, похожесть) это способ выделения похожих друг на друга сигналов на множестве различных записей без знания модели, описывающей детали распространение такого сигнала. По существу сембланс - это метод статистической обработки данных, направленный на выделение похожих друг на друга волновых пакетов (сигналов) по совокупности большого числа записей. Основная задача, решаемая с помощью сембланса – это выделения самого события (общего волнового пакета) на совокупности записей. Дальнейший анализ характеристик выделенного волнового пакета может проводиться различными методами, в том числе и на модельной основе. При наличии существенной дисперсии волновые пакеты, соответствующие волнам определенного типа, перестают быть похожими друг на друга. И поэтому простая статистическая обработка, основанная на критерии похожести (сембланс), перестает быть эффективной уже на начальном этапе выделения самого когерентного события. Тем не менее, введение в обработку на основе функционала сембланс поправок на заданную модель дисперсии может оказаться эффективным методом выделения сильно диспергирующих волновых пакетов на фоне больших случайных помех. Однако, если волна уже выделена (без этого нельзя получить ее экспериментальные дисперсионные характеристики, на основе которых производятся построения в главе 5), то, как представляется, более простым и эффективным способом уточнения ее свойств (дисперсионных характеристик) является решение



оптимизационной задачи по согласованию (подгонке) волновых профилей данной волны для всей совокупности записей путем менее затратной вариации по ограниченному числу параметров модели.

8. Имеются замечания технического порядка. Так, например, на стр. 103 приведен рисунок 3.1, ссылка на который отсутствует в тексте диссертации, поэтому остается не ясным, что хотел проиллюстрировать автор этим рисунком. На стр. 72 появляется странный термин «Трубные волны Рэля». В разделе 1.3.2, стр. 43 режет слух название «коротко-временное Фурье-преобразование», являющееся калькой перевода с английского (Short-Time Fourier Transform), аналогом которого по существу является хорошо известный спектрально-временной анализ (СВАН).

Указанные замечания, тем не менее, не уменьшают практическую ценность полученных автором результатов, которые позволяют раздвинуть границы применения многоканального ВАК, повысить качество и достоверность получаемых с его помощью данных на основе эффективных методов их обработки. Автором предприняты систематические усилия в разработке и адаптации групповых методов обработки данных и сделан важный вклад по привнесению современных математических методов в практику обработки данных многоканального ВАК.

Диссертация Ахметсафина Р.Д. представляет собой завершенную научно-квалификационную работу на актуальную тему. Основные положения отражены в 16-ти публикациях в рецензируемых изданиях. Работа хорошо оформлена, снабжена солидной библиографией. Диссертационная работа соответствует положению п. 9 ВАК и отражает вклад Ахметсафина Р.Д. в решение теоретической проблемы, важной для повышения достоверности исследования скважин методом волнового акустического каротажа. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.



Считаю, что работа отвечает требованиям ВАК, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, Р.Д. Ахметсафин, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых.

Начальник отдела Геоакустики  
АО «Акустический институт имени  
академика Н.Н. Андреева», д.ф.-м.н.

Г.А. Максимов

Подпись Г.А. Максимова заверяю

Нач. отдела кадров  
АО «Акустический институт имени  
академика Н.Н. Андреева»



В.Ю. Рыжов

117036, Москва, ул. Шверника, д.4,  
тел.: 8 (499) 126-74-01  
факс: 8 (499) 126-84-11  
[www.akin.ru](http://www.akin.ru),  
e-mail: [bvp@akin.ru](mailto:bvp@akin.ru)

06.10.2017г.