

*На правах рукописи*

**Никульников Алексей Юрьевич**

**Интерпретация данных сейсморазведки 3D на основе спектральной  
декомпозиции и нелинейных зависимостей динамических атрибутов  
с целью прогноза нефте-газонасыщенных коллекторов**

**Специальность 25.00.10**

**Геофизика, геофизические методы поисков и разведки полезных  
ископаемых**

**Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

**Москва - 2012**

Работа выполнена в ООО «Геофизические системы данных»

Научный руководитель:	кандидат геолого-минералогических наук Ермолаева Галина Михайловна
Официальные оппоненты:	доктор технических наук, Потапов Олег Александрович
	доктор технических наук, Кириллов Сергей Александрович
Ведущая организация	ФГУП «ВНИИГЕОСИСТЕМ»

Защита состоится 26 апреля 2012 года в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 212.121.07 при Российском Государственном Геолого-разведочном университете им. Серго Орджоникидзе по адресу: 117997 Москва ул. Миклухо-Маклая д.23.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке РГГРУ.

Автореферат разослан «26» марта 2012 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор физико-  
математических наук



А.Д. Каринский

## **Общая характеристика работы**

### **Актуальность**

В настоящее время запасы углеводородов уникальных и крупных месторождений на территории Российской Федерации и стран СНГ выработаны уже более чем на 50 %. В этих условиях все большую роль приобретает освоение небольших залежей с трудно извлекаемыми запасами.

Развитие методики прогноза флюидонасыщенности при поиске и разведке, а также эксплуатации нефте-газовых месторождений с использованием атрибутивного анализа и повышение его геологической эффективности являются актуальными задачами. Их решение в значительной степени зависит от совершенствования существующих и создания новых, более надежных математических методов обработки и интерпретации наблюдаемых данных.

Учитывая сложность геологического строения подобных резервуаров, недостаточный объем геолого-промысловой информации, ухудшенные фильтрационные и емкостные свойства, требуется применение современных подходов к извлечению дополнительной информации из геофизических данных, что и определяет актуальность цели применения новейшего алгоритма спектрального разложения (спектральной декомпозиции) данных сейсморазведки 3D. Существующие методы спектрального разложения, основанные на преобразовании Фурье, вследствие алгоритмических особенностей их выполнения имеют некоторые ограничения. Поэтому использование алгоритма вейвлет-преобразования является первым ключевым моментом повешения эффективности и информативности спектральной декомпозиции. Так же, немаловажную роль играют новые методы интерпретации ее результатов.

## **Объекты исследований**

Объектами исследований являлись:

- экспериментальная модель песчаного тела, учитывающая структуру и флюидодинамическое состояние реальных тонких песчаных пластов осадочного комплекса;
- данные сейсморазведки 3D ряда площадей Западной Сибири.

## **Цель исследования**

Развитие экспериментальных и методических основ прогноза флюидонасыщенности с помощью применения алгоритма спектральной декомпозиции.

## **Задачи исследования**

1. Анализ существующих алгоритмов спектральной декомпозиции (спектрального разложения).
2. Разработка методик интерпретации сейсмических данных с использованием спектральной декомпозиции.
3. Интеграция результатов спектральной декомпозиции в существующие стандартные комплексы интерпретации данных сейсморазведки.
4. Повышение эффективности прогноза коллекторских свойств на основе атрибутивного анализа и результатов спектральной декомпозиции с помощью анализа нелинейных зависимостей сейсмических атрибутов.

## **Защищаемые положения**

1. Спектральная декомпозиция позволяет повысить определения пространственного положения тонких пластов и линз по сейсмическим данным, что невозможно при использовании стандартных атрибутов.
2. Применение спектральной декомпозиции обеспечивает независимую количественную оценку мощности тонких пластов по сейсмическим данным, что эффективно при изучении сложно построенных природных резервуаров в районах, плохо охарактеризованных бурением.

3. Комплексный анализ стандартных сейсмических атрибутов в сочетании с результатами спектральной декомпозиции существенно повышает эффективность и надежность интерпретации сейсморазведки 3D.

#### **Научная новизна**

2. Типизация разрезов на основе данных спектральной декомпозиции и стандартных атрибутов сейсмической записи.

1. Использование результатов спектральной декомпозиции совместно с атрибутивным анализом, повышение на этой основе точности прогноза коллекторов

3. Применение алгоритмов нелинейного регрессионного анализа для поиска зависимостей результатов спектральной декомпозиции и ФЭС коллекторов.

4. Внедрение методики спектральной декомпозиции в существующие стандартные подходы к интерпретации данных сейсморазведки.

#### **Методы исследования и фактический материал**

В основу работы положены материалы более чем 10-ти летних теоретических и экспериментальных разработок ряда исследователей. Практическая реализация алгоритма спектральной декомпозиции и анализа нелинейной регрессии выполнена в рамках программного комплекса Transform.

Выполнено моделирование клиноформного песчаного пласта с целью обоснования эффективности применения спектральной декомпозиции при расчете временной мощности геологических объектов.

Собран фактический материал по геологическому строению нефтегазовых месторождений различного генезиса, проведен анализ взаимосвязи сейсмических атрибутов с флюидонасыщенностью резервуаров углеводородов.

Для анализа корреляционных связей между атрибутами применен алгоритм нелинейного регрессионного анализа.

## **Практическая значимость результатов**

1. Выполнена оценка эффективности алгоритмов спектральной декомпозиции и обоснование использования вейвлет-преобразования.

2. Разработаны методические основы спектральной декомпозиции - технология интерпретации сейсмических данных с целью прогноза коллекторских свойств в интервалах осадочного чехла.

3. Обоснованы новые возможности и эффективность прогноза коллекторских свойств в задачах разведки и разработки месторождений нефти и газа, существенно повышающие точность интерпретации данных сейсморазведки.

## **Реализация работы в производстве**

В работе приведены примеры использования алгоритма спектральной декомпозиции как зарубежными исследователями, так и автором. Результаты автора диссертации получены в сейсмогеологических условиях северо-востока Западной Сибири. Апробация работы проводилась на материалах сейсморазведки МОВ ОГТ 3D двух лицензионных участков. Объектами исследований являлись газонасыщенные отложения сеноманского и туронского комплексов. Автор доказывает, что прогрессивный алгоритм анализа результатов спектральной декомпозиции и стандартных сейсмических атрибутов позволяет в значительной степени повысить детализацию исследуемых объектов по сравнению со стандартной интерпретацией.

## **Публикации**

По теме диссертации опубликованы три работы.

### **Объем и структура работы**

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения общим объемом 114 страниц, включая 20 рисунков, и список литературы.

### **Благодарности**

Автор выражает благодарность научному руководителю, доценту кафедры геофизики, кандидату геолого-минералогических наук Ермолаевой Галине Михайловне за помощь на всех стадиях выполнения работы, профессору, доктору физико-математических наук Никитину Алексею Алексеевичу, сделавшего ценные замечания по диссертации.

Автор благодарит коллектив ООО «Геофизические Системы Данных» за интересные идеи, советы и поддержку при написании диссертационной работы.

## СОДЕРЖАНИЕ

### 1. Введение.

Современное состояние запасов и темпов освоения месторождений углеводородов обуславливает необходимость существенного повышения разрешенности и точности методов сейсморазведки для изучения продуктивных пластов мелких залежей и доизучения старых площадей, что достигается с помощью динамической обработки данных сейсморазведки 3D. В настоящее время именно динамическая обработка является ведущим направлением развития новых методов и алгоритмов камеральных сейсморазведочных исследований.

Прогноз коллекторских свойств на основе оптимизированного комплекса сейсмических атрибутов является современной важной темой исследований. Задача оптимизации сейсмических атрибутов стоит в том, чтобы обосновать выбор некоторого количества, желательно физически осмысленных и связанных с коллекторскими свойствами, атрибутов сейсмической записи. Развитие методики прогноза флюидонасыщенности при поиске и разведке, а также эксплуатации нефте-газовых месторождений с использованием атрибутивного анализа и повышение его геологической эффективности являются актуальными задачами. Существуют многие подходы к прогнозу коллекторских свойств с помощью атрибутивного анализа. Количество вовлеченных в анализ атрибутов сейсмической записи достигло двух сотен. Одновременно повышаются плотность сейсмической съемки, количество скважин с прямыми определениями коллекторских свойств, требования к качеству прогноза при все более возрастающей сложности геологических условий нефте-газовых месторождений, где используется атрибутивный анализ. В настоящее время, несмотря на широкое применение атрибутивного анализа для прогноза коллекторских свойств, качество прогноза невысоко. В то же время, этот способ представляется наиболее перспективным. Ряд проблем, связанных с повышением качества прогноза

требует максимально быстрого разрешения. Разработанные в последние годы технологии спектральной декомпозиции позволяют изучать спектральные характеристики сейсмической записи, сохраняя при этом детальную привязку исследуемых объектов во времени. Такие технологии успешно применяются ведущими геофизическими компаниями для выделения песчаных линз и каналов.

Основным достоинством спектральной декомпозиции является то, что она позволяет интерпретатору выявить в сейсмическом волновом поле хорошо известные из теории эффекты зависимости пиковой частоты сейсмического сигнала от временной мощности тонкого пласта и контролировать таким образом поведение тонких пластов-коллекторов мощностью менее  $\frac{1}{4}$  длины сейсмической волны.

Личный вклад автора состоит в оценке эффективности существующих алгоритмов спектрального разложения, разработки методик обработки и интерпретации результатов спектральной декомпозиции, а также внедрении данных методик в стандартные графы интерпретации данных сейсморазведки 3D.

## **2. Алгоритмы спектральной декомпозиции.**

Сейсмические данные имеют изменчивый частотный состав во времени. Частотно-временное разложение (спектральная декомпозиция) сейсмического сигнала преследует цель параметризации переменной во времени упругой волны, прошедшей через различные породы и природные резервуары. Ключевым моментом было использование спектральной декомпозиции и когерентности для интерпретации сложно построенных погребенных долин Пейтоном (Peuton) (1998). Патика (Partyka) (1999) в своей практике использовал спектральный анализ в окне для получения кубов энергии единичных частот для применения их при описании резервуаров. Харди (Hardy) (2003) показывает как атрибут общей частоты, полученный из

сейсмической записи, однозначно коррелируется с наличием залежей сланцеватой глины. Кастанья (Castagna) (2003) использовал спектральную декомпозицию для спектрального анализа с целью определения низкочастотных амплитудных аномалий гидрокарбонатных резервуаров.

С тех пор как частотно-временное преобразование приобрело распространение, появилось большое количество методов спектрального анализа нестационарных сигналов. Широко используемый метод быстрого преобразования Фурье (STFT) рассчитывал частотно-временной спектр с помощью преобразования Фурье в выбранном временном окне (Cohen, 1995). В STFT частотно-временное решение фиксировано в едином частотно-временном пространстве с помощью предварительно выбранного окна. Вследствие этого, разрешенность анализа сейсмических данных становится зависима от длины окна, выбранного интерпретатором.

За прошедшие десять лет, вейвлет-преобразование применялось для множества задач в науке и инженерии. Непрерывное вейвлет-преобразование (CWT) дает возможность применять различные подходы к частотно-временному анализу. Вместо расчета частотно-временного спектра, строятся масштабированные по времени карты, называемые шкалограммами (Rioul, Vetterli, 1991). Так как масштаб представляет собой полосу частот, интерпретация частотного состава сигнала не является интуитивной. Вследствие этого некоторые разработчики использовали масштаб обратно пропорциональным центральной частоте сигнала и представляли шкалограмму как частотно-временную карту.

Позднее был сформирован новый подход к преобразованию масштабированных ко времени карт в частотно-временные карты. Частотно-временное непрерывное вейвлет-преобразование (TFCWT; Sinha, 2002) позволяет получать большую частотную разрешенность на низкочастотных интервалах временного разреза и высокое временное разрешение при анализе высоких частот. Оптимальные частотно-временные параметры

разрешенности метода TFCWT делают его незаменимым при анализе сейсмических данных.

Пересчет данных в область Фурье с помощью метода TFCWT обеспечивает быструю реализацию процедур обработки. Более того, TFCWT это инвертируемый процесс, как и обратное преобразование Фурье, который воссоздает исходный сигнал с помощью обратного вейвлет-преобразования. Для целей спектральной декомпозиции вполне достаточно только прямого вейвлет-преобразования, обратное не является строгим требованием.

Анализ сейсмических данных в некоторых случаях предполагает исследование низкочастотных «теней», ассоциированных с резервуарами углеводородов. «Тень» как правило, вызвана подавлением высокочастотной составляющей внутри резервуара, так как локальная доминантная частота сдвигается в сторону низких частот. Поэтому, низкочастотные аномалии находятся в пределах или под уровнем резервуара. В большинстве случаев низкие частоты не вызваны увеличением акустической жесткости. Хорошее высокочастотное разрешение на низкочастотном отражении позволяет находить интересующие интерпретатора объекты. С другой стороны, высокая временная разрешенность на высоких частотах помогает выделять тонкие стратиграфические элементы на сейсмической записи. Была выявлена зависимость того как частоты соотносятся с мощностью и выработан подход к расчету временной мощности тонких пластов с помощью спектрального разложения данных.

Исходя из данного анализа алгоритмов спектральной декомпозиции, следуют, что именно частотно-временная модификация вейвлет-преобразования является наиболее надежным и информативным алгоритмическим средством спектральной декомпозиции.

### 3. Применение спектральной декомпозиции.

Обычно сейсмические данные имеют ширину спектра порядка 60-80 Гц. Таким образом, сейсмическая запись содержит энергию отраженных волн большого диапазона частот. При определенных условиях, особенно при сложном стратиграфическом строении и малоамплитудных разрывных нарушениях, полезно иметь представление об амплитуде и фазе сигнала на конкретных частотах. Эти амплитуды напрямую связаны с распределением физических свойств в разрезе. Анализ результатов спектральной декомпозиции позволяет разделять амплитудные изменения по частоте, тем самым понять истинное распределение акустических свойств резервуаров углеводородов.

Существует несколько основных способов применения спектральной декомпозиции. Первый способ заключается в трансформации амплитуд в частотный диапазон (другими словами, результатом являются кубы частот, где по направлению  $Z$  отображены амплитуда или фаза в диапазоне от 1 до 100 Гц). Такой объем называется «тюнинг кубом». По отдельности эти результаты трудно интерпретируемы, особенно количественно. Интерпретация тюнинг-куба оптимизируется с помощью RGB-смешивания, что предоставляет возможность интерпретатору оценить резервуар надежнее, в некоторых случаях давать количественную оценку его характеристикам (рис. 1). Так же, этот подход позволяет выделять структуры при наличии на территории исследований тонких песчаных газо- и нефтенасыщенных линз и каналов.

Второй способ позволяет определить временную мощность пластов. Карта временной мощности легко получается из атрибута частоты первого амплитудного пика на спектре для каждой трассы. Простое арифметическое преобразование этого атрибута позволяет получать карты временной мощности. Данный результат является независимым измерением мощности пластов, тем самым снижая геологические риски. Этот подход является

особенно актуальным вместе с моделированием и/или кроссплотингом расчетных мощностей с данными бурения.

Данные подходы позволяют детально рассматривать строение продуктивных интервалов. Особенно это актуально в условиях развития сложных геологических структур, состоящих из тонких пластов, линз и палеорусел.

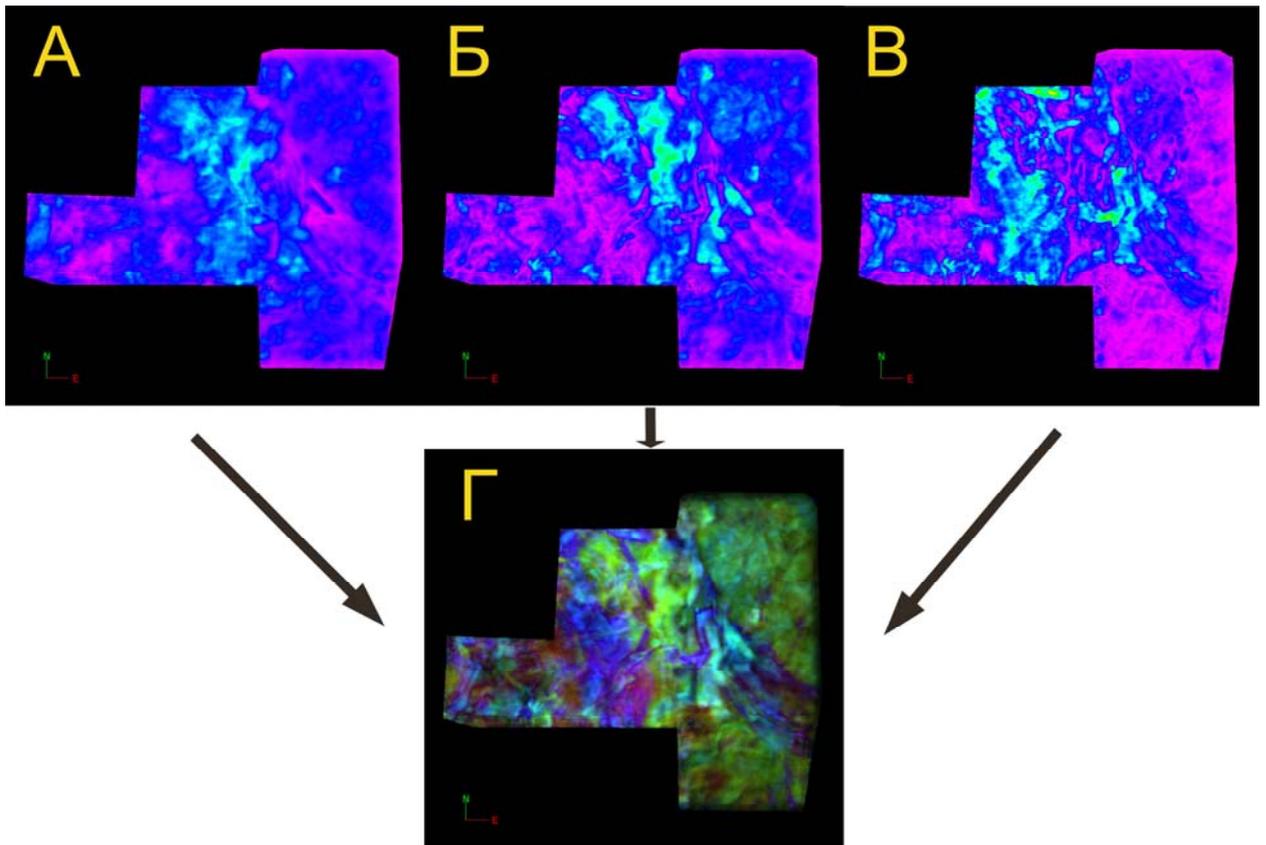


Рис. 1. Пример анализа результатов спектральной декомпозиции. а) амплитуды на частоте 20 Гц; б) амплитуды на частоте 40 Гц; в) амплитуды на частоте 60 Гц; г) результат RGB-смешивания.

Полноценная интерпретация данных спектральной декомпозиции невозможна без качественной и количественной параметризации полученных результатов. Описанные выше методики интерпретации отвечают этим требованиям и позволяют получать ценную информацию о строении геологических объектов из сейсмической записи.

#### 4. Расчет временной мощности тонкого пласта.

Спектральная декомпозиция предоставляет новые возможности для изображения и картирования тонких пластов и геологических нарушений с помощью данных 3Д сейсморазведки.

Теория спектральной декомпозиции заключается в том, что отражение от тонкого слоя имеет характеристику в частотном диапазоне, которая описывает его временную мощность. Например, простой однородный тонкий слой имеет предсказуемую и периодичную последовательность пиков в амплитудном спектре суммарного отражения от кровли и подошвы этого пласта. Сейсмическая трасса обычно включает в себя отражения от множества геологических объектов. Эта интерференционная система включает в себя множество единичных отражений, каждое из которых имеет свое уникальное выражение в частотном диапазоне (Рис. 2).

Амплитудный спектр показывает отношение интерференционная отражения и акустических свойств единичных пластов, которые входят в это отражение. Изменчивость толщины пласта рассчитывается через амплитудные максимумы, которые определяются локальными изменениями мощности породы. Эффект амплитудного спектра позволяет интерпретатору быстро и эффективно определить и закартировать локальные изменения мощности пластов в пределах съемки 3Д.

Разница в частоте отражения между амплитудным спектром, рассчитанным в большом и коротком окне (рис. 3) очевидна. Преобразование в большом окне характеризуется спектром близким к импульсу, в то время как преобразование в коротком включает в себя только модель локальной интерференционной системы отражений от кровли и подошвы одного пласта, тем самым показывая реальное распределение акустических свойств и мощности геологического слоя.

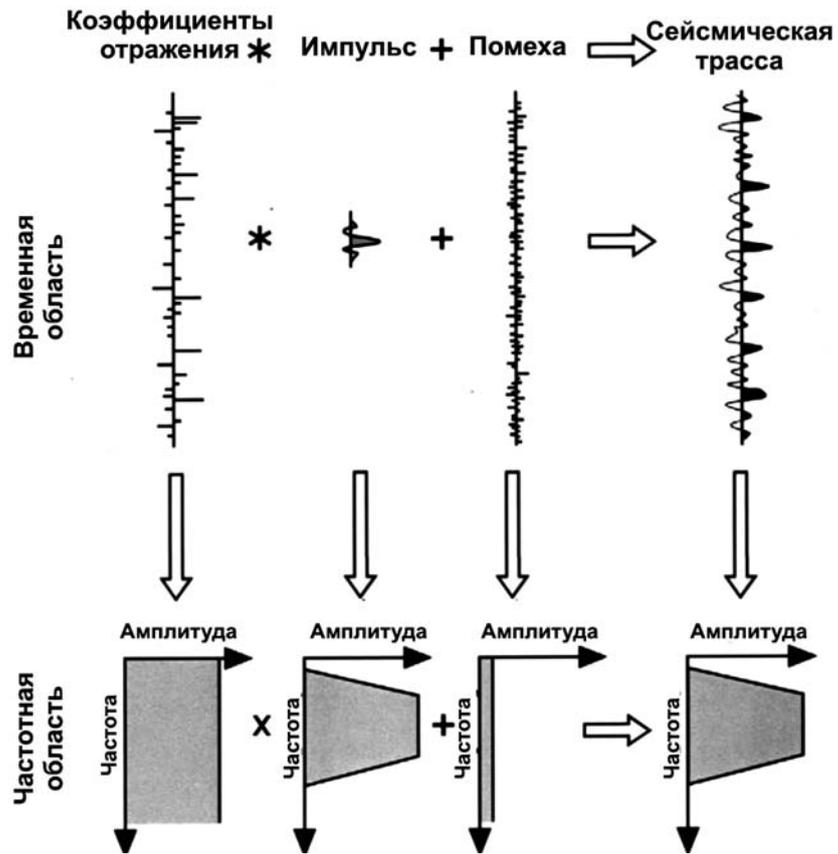


Рис. 2. Модель сейсмической трассы. Переход в частотную область по всей длине.

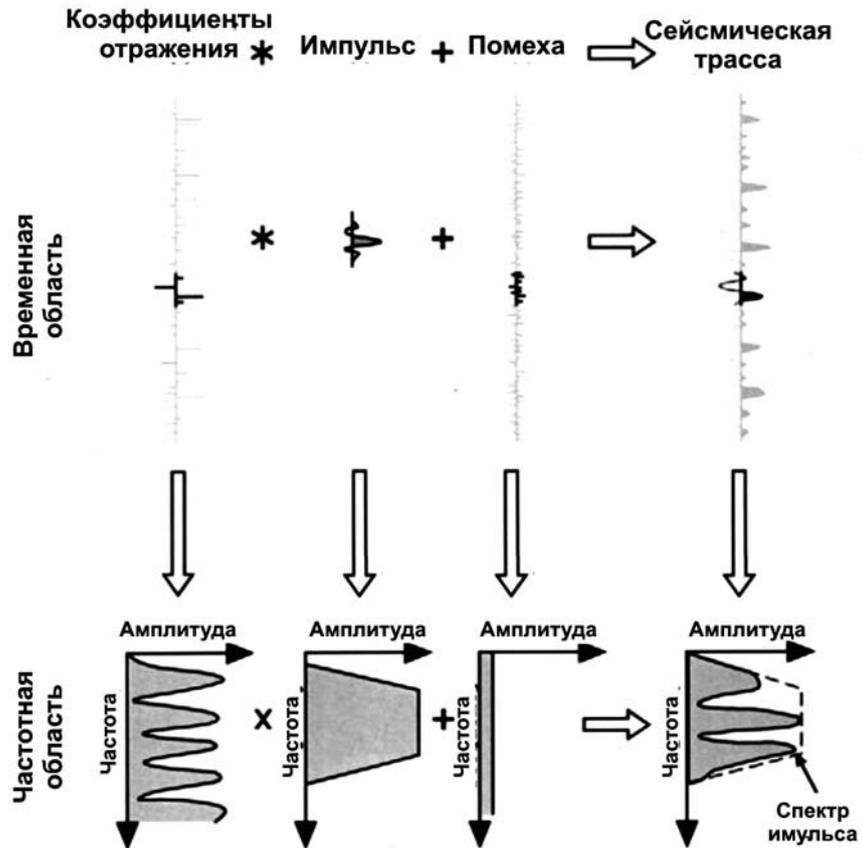


Рис. 3. Модель сейсмической трассы. Переход в частотную область с использованием короткого временного окна (Partika 1999).

За исключением нескольких случаев, большое окно анализа включает в себя множество изменений геологической среды, которые статистически придают случайный характер интерференционным моделям от тонких слоев. Результирующий спектр в широком окне является "плоским", повторяющим спектр сигнала. Свертка исходного импульса с коэффициентами отражения множества границ создает амплитудный спектр, который имеет сходство со спектром импульса.

Отклик в узком окне зависит от акустических свойств и мощности слоев, входящих в это окно. Чем короче окно, тем проще выявить особенности строения пласта. В таком коротком окне акустические характеристики горной породы влияют на отраженный импульс, трансформируя его в периодичную систему максимумов спектра в области Фурье. Результирующий амплитудно-частотный спектр показывает геологическую картину в пределах выбранного окна.

Фазовый спектр в коротком окне также полезен для картирования локальных характеристик породы. Так как фаза чувствительна к неявным изменениям сейсмоакустических свойств, это идеальный инструмент для определения латеральных нарушений. Если порода в пределах окна латерально стабильна, ее фаза так же будет стабильна. Если латеральные неоднородности проявляются, фаза становится нестабильной вкост нарушении. Когда литология пласта стабилизируется, то и фаза, как правило, тоже.

Спектральная декомпозиция и свойства наложения отражений от тонких пластов может быть проиллюстрирована с помощью простой модели клина (рис. 4). Временное отражение состоит из двух пиков одинаковой, но противоположной амплитуды. Кровля клина отмечена отрицательным коэффициентом отражения, а подошва положительным. Мощность клина изменяется от 0 до 50 метров. При свертке геологической модели с импульсом (8-10-40-50 Гц) происходит эффект наложения, вызванный изменением в мощности. Отражения от кровли и подошвы разделяются при

большой мощности и накладываются в одно отражение при истончении клина.

Амплитудный спектр (рис. 5) в коротком окне был рассчитан для каждой трассы. Временная мощность клина определяет период максимумов амплитудного спектра в зависимости от частоты.  $t=1/P$ , где  $P$  (Гц) - период максимумов амплитудного спектра от частоты, и  $t$  (с) - мощность пласта.

Даже относительно низкочастотная компонента, такая как 10 Гц может определять изменчивость мощности тонкого пласта.

Модель клина демонстрирует применение этого подхода к очень простой модели с двумя отражающими границами. Усложнение модели отражения приведет к более сложной интерференционной модели.

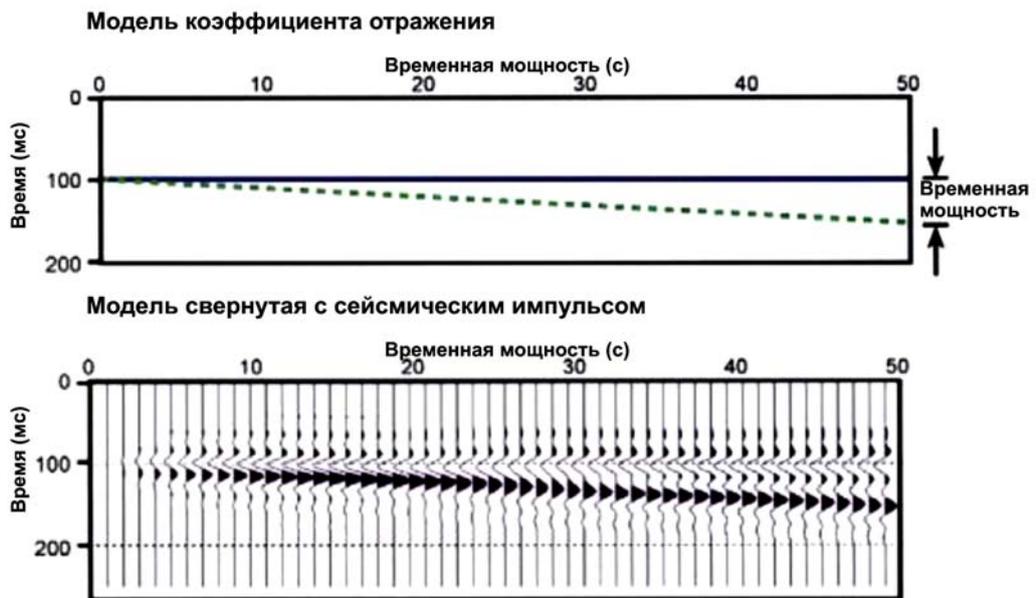


Рис. 4. Сейсмическая модель клинообразного пласта.

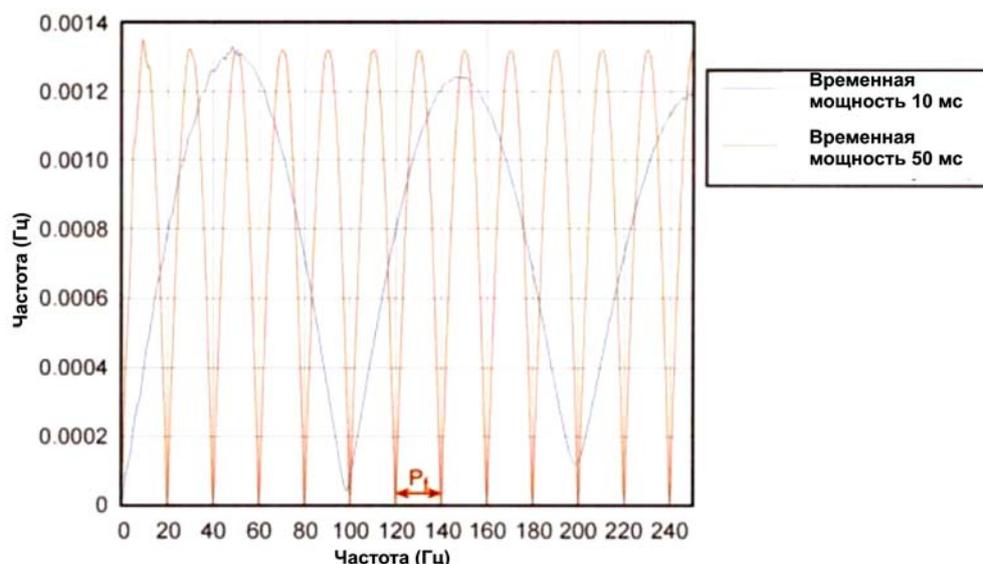


Рис. 5. Амплитудно-частотный спектр сейсмической модели.

В районах, плохо охарактеризованных данными бурения, подобная информация, извлеченная из сейсмической записи, позволяет существенно дополнить картину строения геологических объектов и понизить геологические риски при дальнейшем изучении природного резервуара.

## 5. Визуализация и анализ результатов спектральной декомпозиции с помощью RGB-смешивания.

Результаты спектральной декомпозиции могут быть представлены в виде карты или среза куба амплитуд на нескольких единичных частотах. Для этого используется способ RGB-смешивания. В этом случае интерпретатор выделяет три основных частоты, способных охарактеризовать интересующий геологический объект. После чего, с помощью определенного алгоритма, амплитуды в каждой точке анализируются исходя из преобладания той или иной компоненты, рассчитывается значение цвета пикселя в красно-зелено-синем спектре. Результатом является карта амплитуд трех частот в каждой конкретной точке.

На рис. 6 представлен пример использования данной методики. Целевой объект является тонким песчаным пластом сеноманского комплекса.

Учитывая сложность геологического строения подобных газовых залежей, недостаточный объем геолого-промысловой информации, ухудшенные фильтрационные и емкостные свойства, требуется применение современных подходов к извлечению дополнительной информации из геофизических данных, что и определяет актуальность цели применения новейшего алгоритма спектральной декомпозиции данных сейморазведки 3D. Задачей исследований являлось выделение и картирование системы каналов, по которым в шельфовую часть пласта доставлялся обломочный материал. Результат RGB-смешивания при использовании спектральной декомпозиции обладает гораздо большей информативностью по сравнению с другими атрибутами, например среднеквадратичной амплитудой. Рис. 7 показывает что результаты RGB-смешивания гораздо точнее соответствуют распределению линиментов на срезе куба когерентности, нежели стандартные среднеквадратичные амплитуды. Как видно из этой иллюстрации, стандартные амплитуды, рассчитанные вдоль горизонта, не обладают достаточной информативностью, потому что, в отличие от спектральной декомпозиции, в это изображение амплитуд вносит вклад весь диапазон частот сейсмической записи. Низкие частоты, не имеющие отражения физических свойств тонкого пласта, «фонят». Из-за этого выделение системы каналов на подобных атрибутах затруднено. Особенно сильно разница видна при наложении на изображения полученных атрибутов значений когерентности. Видно, что когерентность органично дополняет картину результатов спектральной декомпозиции, в то время как стандартный атрибут на части изучаемой площади ей противоречит.

Технология RGB смешивания, в отличие от стандартных сейсмических атрибутов (амплитуда, импеданс, когерентность), позволяет однозначно определять пространственное положение таких важных геологических объектов, как: палеоруслы, песчаные линзы и каналы, конусы выноса и т.д.

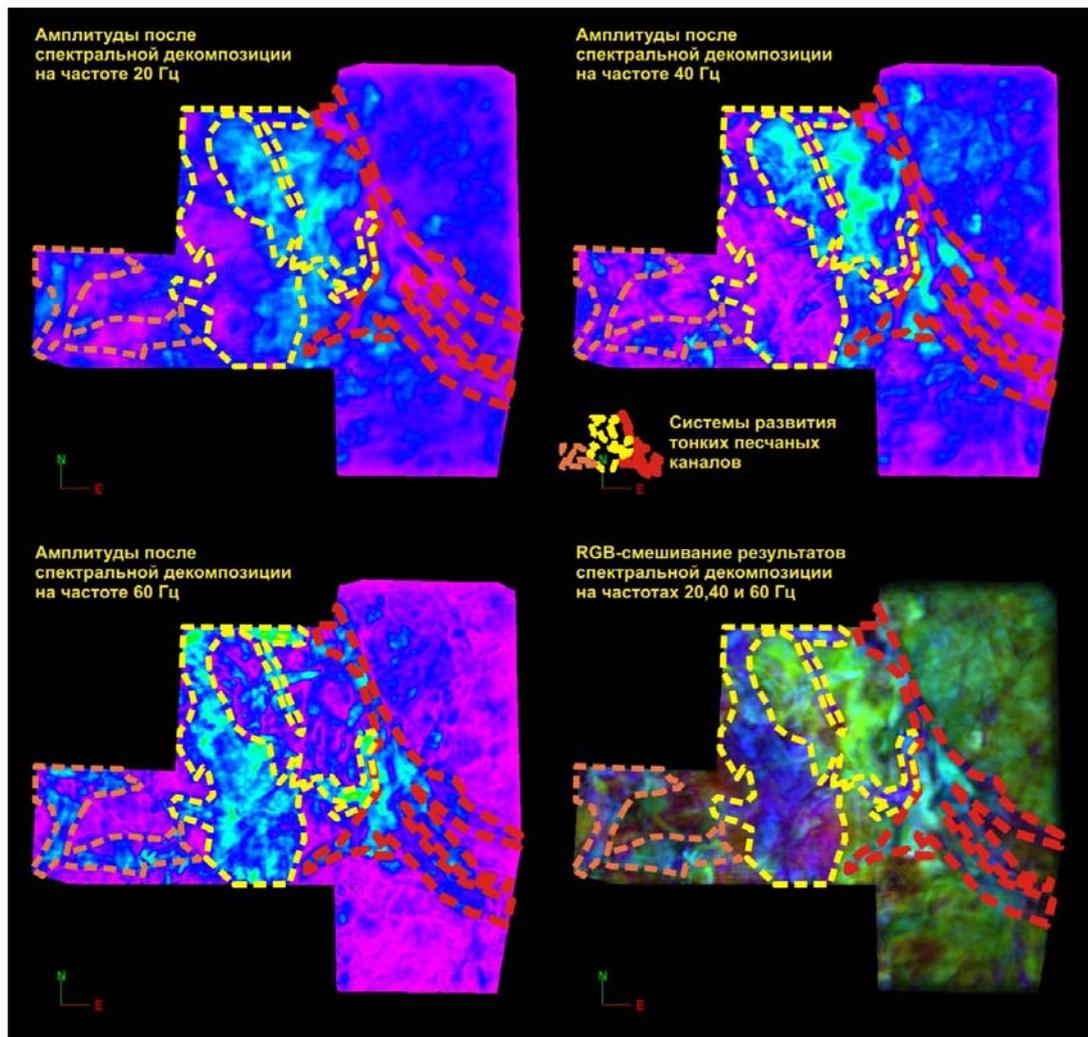


Рис. 6. Результаты спектральной декомпозиции. RGB-замешивание.

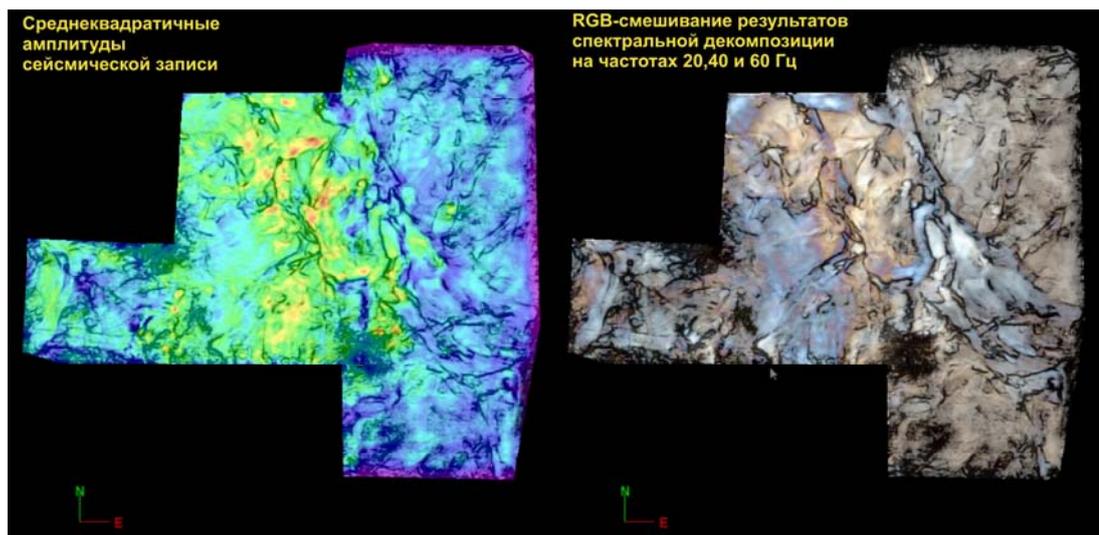


Рис. 7. Сравнение результатов спектральной декомпозиции и среднеквадратичных амплитуд вдоль горизонта. Черным цветом наложены значения когерентности.

## **6. Типизация геологического разреза с помощью атрибутивного анализа.**

По данным многих исследователей туронские продуктивные отложения имеют региональное распространение, однако их изучению уделялось недостаточно много внимания. К наиболее изученным из них относятся газовые залежи газсалинской пачки Южно-Русского, Заполярного, Харампурского, Новочасельского, Тэрельского и Ленского месторождений.

Ресурсная база залежей достаточно высока. Начальные запасы газа по категориям  $C_1+C_2$  превышают 1,3 трлн.м<sup>3</sup>, что позволяет рассматривать их как потенциальные источники промышленной добычи углеводородного сырья.

Учитывая сложность геологического строения туронских газовых залежей, недостаточный объем геолого-промысловой информации, ухудшенные фильтрационные и емкостные свойства, требуется применение современных подходов к извлечению дополнительной информации из геофизических данных, что и определяет актуальность цели применения новейшего алгоритма спектрального разложения (спектральной декомпозиции) данных сейсморазведки 3D.

В данном случае, анализ был проведен для горизонта T2 туронского комплекса с целью выделения участков пласта с повышенными фильтрационными и емкостными свойствами. На предварительной стадии работы были выделены три атрибута, исходя из их геологической представительности: акустический импеданс, пористость и амплитуды на 60 Гц после спектральной декомпозиции. Конечной целью являлось выделение геологических тел по данным сейсморазведки, соответствующих участку пласта с искомыми физическими свойствами. На первом этапе был произведен корреляционный анализ значений всех трех атрибутов. Априорно известно, что газонасыщенный песчаный пласт имеет низкий акустический импеданс и высокую пористость, однако для более детального анализа необходим третий атрибут. Как правило, амплитудные аномалии на высоких

частотах связаны с наличием углеводорода в пласте, поэтому третьим компонентом атрибутивного анализа была выбрана амплитуда на частоте 60 Гц, как наиболее представительная для данного отражения.

Классификация облака точек в трех измерениях с помощью метода наименьших квадратов наглядно показывает эффективность применения результатов спектральной декомпозиции при анализе сейсмических атрибутов. Именно амплитуды на единичной частоте позволили разделить близкие по значениям импеданса и пористости типы коллекторов, что наглядно демонстрирует рис. 8а. Карта типов геологического разреза, исходя из данной классификации, представлена на рис. 8б.

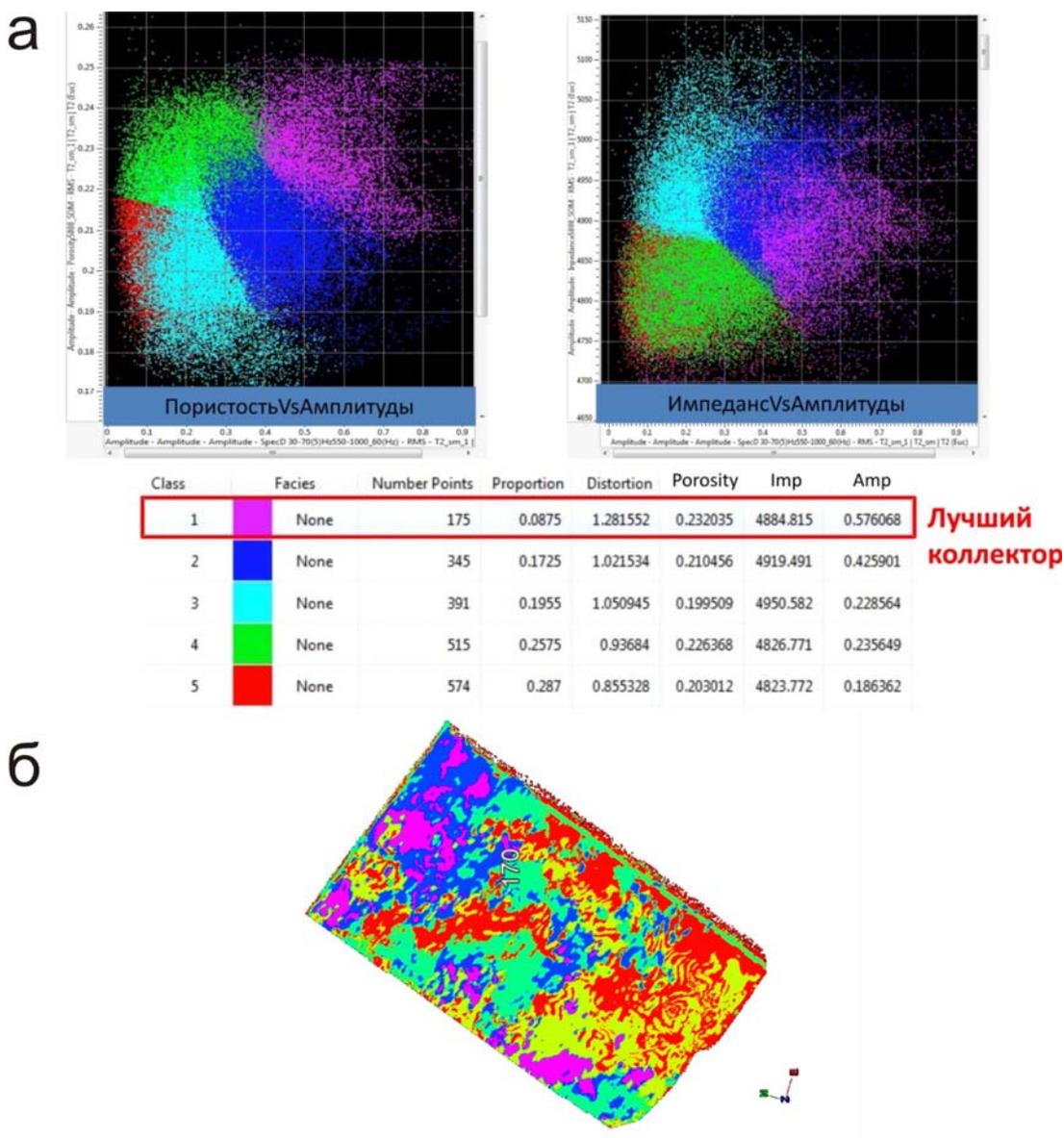


Рис. 8. Классификация точек в трехмерном пространстве атрибутов.

## 7. Поиск нелинейных зависимостей результатов спектральной декомпозиции совместно со стандартными атрибутами сейсмической записи.

В некоторых практических случаях моделирование геологических процессов линейными уравнениями дает удовлетворительный результат и может использоваться для анализа и прогнозирования физических свойств горной породы. Однако в силу многообразия и сложности физических процессов ограничиться рассмотрением лишь линейных регрессионных моделей невозможно. Многие зависимости не являются линейными по своей сути, и поэтому их моделирование линейными функциями, безусловно, не даст положительного результата.

Различают два класса нелинейных регрессий:

- 1) регрессии, нелинейные относительно включенных в анализ переменных, но линейные по оцениваемым параметрам. К таким функциям относятся квазилинейные функции.

Например, это полиномы различных степеней

$$y = b_0 + b_1x + b_2x^2 + u,$$
$$y = b_0 + b_1x + b_2x^2 + b_3x^3 + u$$
$$y = b_0 + \frac{1}{x} + u$$

Равносторонняя гипербола

- 2) регрессии нелинейные по оцениваемым параметрам. К таким регрессиям относятся нелинейные функции второго класса.

$$y = b_0x^b + u$$

Например, степенная функция

Показательная

$$y = b_0b^x + u$$

$$y = e^{b_0+b_1x} \cdot u$$

Экспоненциальная

Нелинейная регрессия по включенным переменным не таит каких-либо сложностей в оценке ее параметров. Она определяется, как и в линейной

$$y = b_0 + b_1x + b_2x^2 + u,$$

регрессии, методом наименьших квадратов, так как эти функции линейны по параметрам. Так, например, в полиноме второй степени заменив  $x = x_1$ ,  $x^2 = x_2$ , получим  $y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + u$ . Применяв метод наименьших квадратов для оценки коэффициентов этого полинома, получим следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \sum y = nb_0 + b_1 \sum x + b_2 \sum x^2 \\ \sum yx = b_0 \sum x + b_1 \sum x^2 + b_2 \sum x^3 \\ \sum yx^2 = b_0 \sum x^2 + b_1 \sum x^3 + b_2 \sum x^4 \end{cases}$$

Ее решение возможно методом Крамера.

Наглядно данный математический аппарат можно представить на примере анализа трех атрибутов: амплитуды, акустического импеданса и пористости (Рис. 9). Здесь представлены соотношение независимой переменной от пористости (Рис. 9а) и импеданса (Рис. 9б). Рис. 9в показывает корреляцию фактических значений пористости и рассчитанных с помощью данного алгоритма. Этот график используется для контроля качества рассчитанной модели. Коэффициент корреляции близкий к 1 показывает практически полное соответствие результирующего параметра исходному, что является крайне важным показателем корректности проведенного регрессионного анализа. В данном случае коэффициент линейной корреляции позволяет говорить о том, что анализ был выполнен успешно и расчетная модель практически идентична исходной.

Применение регрессионного анализа является важным моментом при интерпретации данных атрибутивного анализа. Их использование предоставляет возможность предсказания какого-либо атрибута исходя из его статистических зависимостей с другими данными динамической

интерпретации данных сейсморазведки, а так же, в некоторых случаях позволяет проводить анализ геологических процессов.

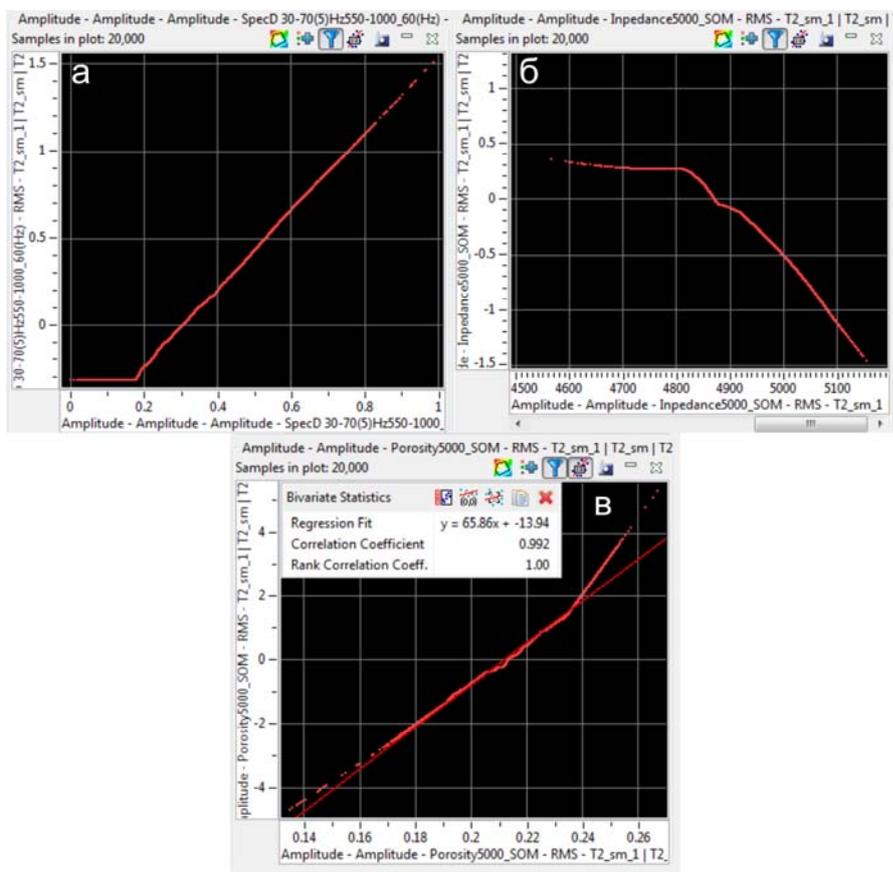


Рис. 9. Пример регрессионного анализа сейсмических атрибутов.

## 8. Заключение.

Автором предложена методика прогнозирования залежей углеводородов, базирующаяся на применении спектральной декомпозиции сейсмических данных.

1. Спектральная декомпозиция с помощью частотно-временной модификации вейвлет-преобразования является наиболее надежным способом спектрального разложения сейсмической записи.

2. Данные спектральной декомпозиции позволяют давать количественную характеристику природным резервуарам исходя из представления сейсмической записи в частотно-временной области.

3. Технология RGB-смешивания энергии единичных частот позволяет в значительной степени повысить надёжность определения положения стратиграфических элементов геологической среды в пространстве.

4. Использование результатов спектральной декомпозиции совместно со стандартными атрибутами сейсмической записи при типизации геологического разреза позволяет надежнее разделять участки горных пород с различными фильтрационно-емкостными свойствами.

5. Применение регрессионного анализа для данных спектрального разложения и стандартных сейсмических атрибутов дает возможность получения дополнительной информации в процессе интерпретации.

В заключение необходимо отметить, что полученные данные с помощью спектральной декомпозиции, позволяют существенно дополнить картину строения природных резервуаров. Достоинством методики является возможность получения как количественной, так и качественной характеристики изучаемых объектов. Таким образом, комплексный последовательный подход к совместной интерпретации данных сейсморазведки с использованием последних разработок алгоритма спектральной декомпозиции позволяет существенно повысить достоверность прогноза свойств коллекторов.

## **9. По теме диссертации опубликованы следующие работы:**

1. Никульников А.Ю., 2011, Применение спектральной декомпозиции для повышения эффективности совместной интерпретации данных сейсморазведки 3D и ГИС: Международная научная конференция «Молодые – наукам о Земле» – Москва.

2. Никульников А.Ю., 2012, Обзор алгоритмов спектральной декомпозиции: Геофизика, 2.

3. Никульников А.Ю., 2012, Применение атрибутного анализа сейсмических данных с использованием результатов спектральной декомпозиции: Геоинформатика, 2.