

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М. В. ЛОМОНОСОВА

*на правах рукописи*

**Алексеева Полина Артемовна**

**Выделение и прогноз свойств палеорусел по сейсмическим данным с использованием нейронной сети и методов спектрального анализа**

1.6.9 – Геофизика

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Москва – 2022

Работа выполнена на кафедре сейсмометрии и геоакустики геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

**Научный руководитель** *Ампилов Юрий Петрович, доктор физико-математических наук, профессор*

**Официальные оппоненты:** *Приезжев Иван Иванович, доктор технических наук, ФГАОУ ВО «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина», кафедра разведочной геофизики и компьютерных систем, профессор*

*Ольнева Татьяна Владимировна, доктор геолого-минералогических наук, ООО "Газпромнефть НТЦ", центр регионального и сейсмического моделирования, ведущий эксперт по сейсмогеологической интерпретации*

*Сурова Наталья Дмитриевна, кандидат геолого-минералогических наук, ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский геологический нефтяной институт», сектор динамической интерпретации, заведующий сектором*

Защита диссертации состоится 24 ноября 2022 г. в 14:30 на заседании диссертационного совета МГУ.016.06(МГУ.04.03) Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, геологический факультет, ауд. 415.

E-mail: dsmsu0403@yandex.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»: <https://istina.msu.ru/dissertations/496098958/>

Автореферат разослан «\_\_» октября 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат технических наук

К.М. Кузнецов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования

Коллекторы, содержащие углеводород и приуроченные к русловым отложениям, составляют значимую часть разрабатываемых и перспективных интервалов геологического разреза, а основным методом для их выделения и прогноза свойств в межскважинном пространстве является сейсморазведка. Однако в настоящее время нет программного обеспечения, выделяющего палеоруслу в автоматическом режиме, а методы спектральной или фазовой декомпозиции применяются преимущественно для качественных оценок. Поэтому развитие методов автоматического выделения русел с использованием нейронной сети и разработка атрибутов для перехода к количественной оценке свойств на основе спектрального анализа являются актуальными задачами для повышения качества интерпретации данных сейсморазведки 3D.

### Степень разработанности

В анализ трассы отражённой волны от однослойной и многослойной модели среды с использованием спектральных особенностей записи для целей сейсмической интерпретации внесли существенный вклад Partyka G., Castagna J., Puryear C.I., Widess M., Yilmaz O., Бреховских Л. М. и многие другие. В настоящее время применение амплитуд отдельных частот отражённых волн для описания свойств геологического разреза активно разрабатывается такими учёными как Wang Sh., Marfurt K., Li X., Zhao Z., Foster D., Maurer H.

Применение нейронных сетей для целей геологической интерпретации непрерывно растёт. В настоящий момент существуют нейронные сети, которые используются как для прогноза свойств<sup>1</sup>, так и для выделения геологических объектов. Для автоматического выделения геологических объектов целесообразно использовать свёрточные нейронные сети. У истоков развития свёрточных нейронных сетей находятся такие учёные как LeCun Y., Krizhevsky A., Zeiler M., Simonyan K., He K., Ronneberger O., Fischer P., Brox T. Этот вид нейронных сетей нашёл широкое применение во многих областях науки: медицине, транспорте, киноиндустрии. В геофизике свёрточные нейронные сети используются преимущественно для выделения разрывных нарушений.

На данный момент интерес представляет разработка методов автоматизации выделения геологических объектов, в частности русел, что способствует уходу от субъективной ручной корреляции интерпретатора и сохранению временных затрат на производстве. Другим перспективным направлением остаётся развитие технологий для улучшения точности прогноза свойств маломощных пластов с применением спектрального анализа.

**Цель работы** заключается в разработке методов для выделения и прогноза свойств маломощных палеорусел на основе сейсмических данных 3D.

Для достижения поставленной цели были рассмотрены следующие **задачи**:

- Обзор современных методов для сегментации изображений;
- Выбор наиболее оптимального подхода для выделения палеорусел и его адаптация к применению на сейсмических данных;

<sup>1</sup> Приезжев И. И., Васильев М. А., Петренко Е. Н. Построение прогнозных карт эффективных газонасыщенных толщин по форме сейсмического сигнала на основе нейронных сетей Кохонен // Геофизика. – 2020. – №6. – С. 49-54.

- Рассмотрение существующих атрибутов волнового поля, нацеленных на определение свойств маломощных пластов;
- Обзор упрощенной формулы коэффициента отражения от маломощного однородного пласта с учётом сейсмического импульса;
- Разработка методологии для количественного анализа свойств маломощных пластов на основе проанализированных зависимостей амплитуды трассы от частоты;
- Апробация технологий на реальных сейсмических данных 3D.

**Объектом исследования** являются маломощные по вертикали однородные пласты мощностью от 5 до 12 м. при диапазоне частот сейсмических данных 3D от 20 Гц до 55 Гц. Латеральная ширина целевых объектов изменяется от 200 до 2500 м., глубина залегания от 2800 до 3100 м.

### **Научная новизна**

1. Впервые использована свёрточная нейронная сеть для выделения речных систем на сейсмических данных с использованием схем спутниковых снимков, основываясь только на геометрических особенностях объектов.
2. Разработаны дополнительные атрибуты волнового поля для анализа свойств маломощных пластов на основе спектрального анализа сейсмической трассы отражённых волн.
3. Созданные методологии были впервые применены на реальных сейсмических данных 3D Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна (НГБ).

### **Защищаемые положения**

1. Выделение палеорусел на горизонтальных-седиментационных срезах сейсмического куба возможно за счёт применения свёрточных нейронных сетей, при обучении которых используется комбинация различных схем спутниковых снимков с изменённой амплитудой изображения.
2. Коэффициенты при параболической аппроксимации зависимости квадрата максимальной амплитуды от квадрата циклической частоты могут служить дополнительными атрибутами для перехода к количественному анализу свойств маломощных русел.
3. Применение свёрточных нейронных сетей и коэффициентов при параболической аппроксимации максимальной амплитуды от частоты увеличивает скорость и достоверность интерпретации сейсмических данных на территории со значительным количеством русловых объектов, характеризующихся различными амплитудно-частотными характеристиками.

### **Теоретическая и практическая значимость**

Рассмотренные в данной работе технологии нацелены на изучение палеорусел. Во многих регионах исследования русла являются перспективной фацией для бурения, следовательно, их детальное изучение способствует увеличению достоверности наличия целевых объектов при разработке.

Методологические подходы, описанные в рамках данной работы, позволяют выделять русловые объекты в автоматическом режиме, что сокращает время работы над производственными проектами.

Предложенные атрибуты дополняют существующие, использованные при стандартной интерпретации сейсмических данных, и, следовательно, повышают качество прогноза упругих и петрофизических свойств в межскважинном пространстве.

### **Степень достоверности и апробация результатов**

Достоверность результатов исследования показана на модельных и реальных сейсмических данных 3D. Полученные материалы согласуются с существующими литературными источниками и применяются в работе с текущими проектами по интерпретации сейсмических данных. Основные положения диссертационной работы были представлены автором на всероссийских и международных конференциях:

- В 2018 году на 20-й научно-практической конференции «Геомодель-2018», Геленджик, Россия;
- В 2020 и 2022 годах на международной геолого-геофизической конференции и выставке «Современные технологии изучения и освоения недр Евразии - ГеоЕвразия», Москва, Россия;
- В 2020 году на ежегодной международной конференции и выставке «European Association of Geoscientists & Engineers (EAGE) Conference and Exhibition», Амстердам, Голландия;
- В 2021 году на международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов 2021», Москва, Россия.

В дополнение к вышеописанным научным публикациям, автор выступал на четырёх конференциях, проводимых внутри компании «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» и в РГУНГ им. Губкина:

- В 2019 и 2020 годах на ежегодной конференции «Синтез современных геотехнологий - ключ к объективному познанию недр», Москва, Россия;
- В 2021 и 2022 году в ежегодном конкурсе на лучшую научно-техническую разработку ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг».

### **Методология и методы исследования**

В рамках данной работы использовались следующие материалы:

- 3D наземные сейсмические данные с двух лицензионных участков;
- Материалы геофизических исследований скважин (ГИС) по двум месторождениям Западно-Сибирского НГБ.

Для решения поставленных задач использовалось специализированное геофизическое программное обеспечение для интерпретации и моделирования сейсмических данных Decision Space (Landmark), HampsonRussell (CGG), Tesseral. Для моделирования синтетических данных и написания разработанного автором программного продукта использовалась среда программирования Matlab, Python.

### **Личный вклад автора**

В работах, опубликованных в соавторстве, основополагающий вклад принадлежит соискателю. Автором разработаны подходы и их обоснованность для выделения и прогноза свойств палеорусел на основе свёрточных нейронных сетей и спектрального анализа сейсмических данных. Также автором было выполнено применение описанных методов на реальных сейсмических данных 3D Западно-Сибирского НГБ.

При подготовке публикаций автор принимал непосредственное участие в создании методологий, описываемых в статьях, в оформлении иллюстраций и написании текста.

### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 10 работ. Из них 5 публикаций представлены в реферируемых научных журналах, включённых в международные базы цитирования Web of Science (WoS), Scopus, RSCI (РИНЦ), список изданий, рекомендованных для

защиты в диссертационном совете МГУ по специальности. Пять из десяти работ являются тезисами, опубликованными в сборниках трудов всероссийских и международных конференций, индексируемых в Scopus, WoS, RSCI.

### **Объём и структура работы**

Диссертация содержит список сокращений, введение, три главы, заключение и список литературы из 87 наименований. Работа состоит из 107 страниц текста, 81 иллюстрации и 4 таблиц.

### **Благодарности**

Автор хочет выразить благодарность научному руководителю Юрию Петровичу Ампилову за чуткое руководство моей научной деятельностью, за то, что вселял уверенность все эти годы подготовки работы. Также автор благодарен Игорю Николаевичу Керусову, который всегда был готов разъяснить возникающие вопросы по теме исследования, указать на недостающие элементы в работе, найти положительные тезисы там, где их изначально не было.

Глубокую благодарность автор выражает Гриневскому Антону Сергеевичу за заразительный пример при решении трудных задач, которые приводили к интересным результатам, часть из которых легла в основу написания статей к данной работе и самой диссертации.

Автор признателен коллективу коллег из Управления сейсмических исследований ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг», которые бесконечно мотивировали написать диссертационную работу, поддерживали и не давали сдаваться.

Также автор выражает благодарность сотрудникам кафедры сейсмометрии и геоакустики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, в особенности Шалаевой Наталии Владимировне, которая давала ценные рекомендации по теме диссертации.

Автор благодарен своим друзьям, родителям и мужу за огромнейшую поддержку.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

### **Введение**

Во введении изложены актуальность работы, цели и задачи диссертационного исследования, его практическая значимость и научная новизна, сформированы основные защищаемые положения.

### **Глава 1. Выделение палеорусел с использованием нейронных сетей**

**Глава 1** представляет собой обзор существующих методов выделения объектов на изображении и алгоритмы классификации, которые нашли широкое применение в смежных областях науки и могут быть использованы для решения поставленных задач в сейсморазведке. Показаны преимущества и недостатки используемых подходов. Среди описанных методов сегментации наиболее значительный эффект при выделении палеорусел достигается с использованием нейронных сетей. Это связано с тем, что целевые русла обладают различной амплитудно-частотной характеристикой и геометрической формой. Для использования нейронных сетей в сейсморазведке необходимо выбрать архитектуру сети и составить обучающую выборку. Именно эти этапы описаны наиболее подробно в первой главе.

В **разделе 1.1** изложены основные понятия отдельных элементов свёрточной нейронной сети и описана используемая автором архитектура. Каждый слайс

сейсмического куба для нейронной сети – это рисунок, который характеризует изменение амплитуды волнового поля (или другого атрибута). Поэтому задача выделения палеорусел сводится к задаче сегментации изображения. Современной и одной из наиболее эффективных архитектур нейронной сети, решающей задачу сегментации, является свёрточная нейронная сеть U-Net<sup>2</sup>. Её архитектура состоит из повторяющейся последовательности свёрточных слоёв и слоёв субдискретизации (рисунок 1). На каждой итерации происходит постепенное уменьшение разрешения рисунка, но увеличение свойств (особенностей изображения). При достижении минимального заданного значения выполняется противоположный процесс увеличения разрешения путем интерполяции и конкатенации с признаками матриц предыдущих слоёв, обладающих одинаковым размером.

Действие свёрточных слоёв подобно фильтрации, что наглядно проиллюстрировано в первой главе на примере двухмерных матриц. Слои субдискретизации уменьшают или увеличивают размерность рисунка, в первом случае из четырёх одинаковых значений в матрице берётся максимальное, во втором случае происходит интерполяция изображения.

Для ускорения обучения и увеличения точности предсказания в основную архитектуру были встроены слои из модели RES-NET<sup>3</sup>. Возможность использования этой модели заключается в том, что каждый обученный слой с фиксированной размерностью выводится из основной архитектуры сети. Эта модель состоит из последовательности блоков с различной размерностью, каждый блок представлен двумя свёрточными нейронными слоями, между которыми располагается функция активации.

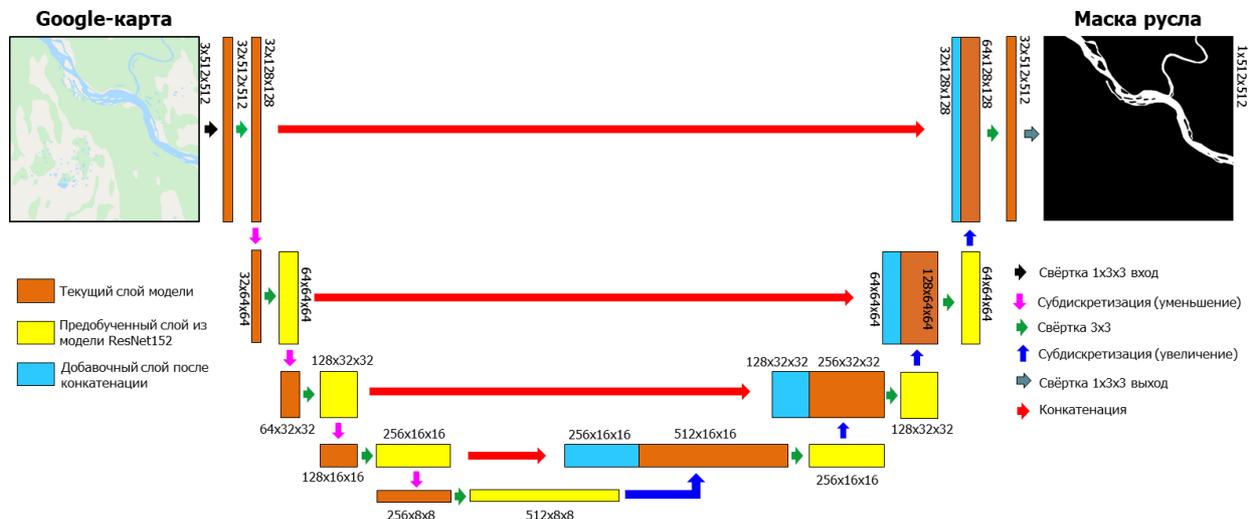


Рисунок 1. Архитектура U-Net, использованная для выделения русел

Для обучения нейронной сети необходимо построить тестовую и тренировочную выборку. При построении выборки учитываются особенности выделения русел на сейсмических данных. Одной из них является то, что на горизонтальных слайсах сейсмического куба они выглядят подобно современным руслам, только их количество

<sup>2</sup> Ronneberger O. U-Net: Convolutional Networks for biomedical Image Segmentation / Olaf Ronneberger, Philipp Fischer and Thomas Brox // Computer Science Department and BIOS Centre for biological signaling Studies, University of Freiburg – 2018. P.1-8

<sup>3</sup> He. K Deep Learning for Image Recognition / Kaiming He, Xiangyu Zhang, Shaoqing Ren, Jian Sun // Microsoft Research – 2015. P.770-778

значительно больше, так как на сейсмических данных иллюстрируются одновременно разновременные русла. Вторая особенность заключается в выделении русел на сейсмических данных вручную, поэтому результаты интерпретации нельзя использовать для обучения нейронной сети по двум основным причинам:

- выделяются субъективно и неоднозначно;
- нет достаточно большого объема данных, так как ограничено число месторождений и интервалов с руслами.

Таким образом, единственная возможность получить большое разнообразие русловых объектов – это использование космоснимков, а точнее, Google-карт, которые в рамках данной задачи и были применены.

**Раздел 1.2** содержит описание получения масок русел на Google-картах, то есть выделенное русло на выходном массиве на однородном фоне. Расчёт масок русел состоял из нескольких этапов: выделение всех водных объектов на Google-картах, построение персистентных диаграмм для каждого объекта, выделение русел по количеству пар с гомологией  $H_1$  и  $H_0$  (числа Бетти).

Преимущество использования Google-карт заключается в том, что на них уже изначально выделены различные зоны: водные объекты, зеленые зоны, горная местность. Однако изначальную интерпретацию Google-схем невозможно использовать, так как на них, с одной стороны, присутствует несколько классов, которые схожи по форме объектов между собой и отличаются только цветом, а с другой стороны, водные объекты одного цвета могут относиться к различным объектам, например, озеро и река. Поэтому вначале выполнено выделение всех водных объектов, которые представлены руслами и озёрами. Затем для каждого объекта строились персистентные диаграммы, чтобы разделить их по типам.

Пусть есть облако точек  $X$ , и каждая точка этого облака есть шар, у которого с течением времени расширяется радиус. Начальное время нулевое, в этот момент времени шар представляет из себя точку. В некоторый момент времени  $t_b$  радиус одного шара перекрывает другой, и в структуре появляется связь, затем в некоторый момент  $t_d > t_b$  она исчезает или остаётся неизменной. Количество новых пар, время их появления и прекращения существования характеризуется числами Бетти. Для двумерного пространства существует два числа Бетти:  $H_0$  и  $H_1$ .  $H_0$  описывает количество связных компонент, а  $H_1$  – количество полостей, образуемых при создании новых пар.

Таким образом, персистентные диаграммы характеризуют количество различных связей со схожей гомологией, и если объекты сплошные (без наличия пустот) с равномерной сеткой распределения значений, то они обладают общей персистентной диаграммой или схожей к ней, где значения показывают шаг сетки. Если у объектов сложные топологические особенности, как, например, у русел, то на персистентной диаграмме появляется множество новых точек, которые характеризуют появление новых связей, как в количестве простых связей ( $H_0$ ), так и образование полостей ( $H_1$ ). Поэтому по количеству данных связей и выполнена отсечка для отделения русел от других водных объектов.

**Раздел 1.3.** касается подходов построения окончательной обучающей и тестовой выборки для решения поставленной задачи выделения палеорусел. Особенностью прогноза русел по сейсмическим данным является одновременное выделение разновременных русел на сейсмическом седиментационном слайсе.

Основные отличия современных Google-карт от сейсмических данных заключаются в следующем:

- 1) Множество разновременных русел, которые выделяются одновременно;
- 2) Латеральное изменение амплитуды русла;
- 3) Присутствует шум, искажающий восприятие объекта.

Согласно вышеописанным пунктам, необходимо изменить амплитуду русел, добавить шум и совместить несколько различных картинок рек, чтобы они стали многоуровневыми.

Для изменения амплитуды и добавления шума на картинке на языке python есть встроенная библиотека «albumentations». Данная библиотека обычно используется для расширения данных для обучения. В рамках работы она также применялась для увеличения обучающей выборки: исходные снимки разбивались на картинки меньшей размерности, затем поворачивались на 90, 180 или 270 градусов (таким образом, удалось увеличить число иллюстраций с 200 до 800). Затем к рисункам был добавлен шум и выполнено изменение цвета случайным образом. Следующий этап заключался в суммировании нескольких картинок, выбранных случайным образом, и преобразовании их в черно-белый оттенок (рисунок 2).

Преобразование в черно-белый оттенок сделано для того, чтобы уйти от сильного влияния амплитуды, так как на сейсмических данных амплитуда атрибута может обладать всевозможными оттенками, которые тяжело повторить в обучающей выборке, а привести любой атрибут в черно-белую шкалу всегда можно.

Далее выполнено сложение масок русел подобно тому, как комбинировались исходные изображения, чтобы из входного результата получить желаемый выход.

После обучения нейронной сети выполнена проверка на сейсмических данных на небольших фрагментах куба<sup>4</sup>. Несмотря на присутствие некоторых неточностей, нейронная сеть обучилась достаточно хорошо, выделяются объекты, которые действительно являются русловыми. Кроме того, они обладают различной амплитудой и формой, но выделяются нейронной сетью как русловые объекты, что не может выполнить стандартная сегментация по амплитуде.



Рисунок 2. Сопоставление Google-карты, изменённой Google-карты с сейсмическим слайсом вдоль сейсмического куба 3D

## Глава 2. Спектральная характеристика трассы отражённых волн от слоя с постоянными свойствами

В главе 2 рассмотрены существующие и предложенные автором атрибуты, нацеленные на анализ упругих свойств объектов с малой мощностью, в основе которых

<sup>4</sup> Алексеева П.А. Выделение палеорусел в отложениях тюменской свиты с использованием нейронной сети по данным сейсморазведки 3D / Алексеева П.А., Калугин А.А., Кирьянова Т.Н. // Геофизика. 2022. С. 9-15.

лежит анализ амплитудно-частотной характеристики сигнала и подбор мгновенной фазы импульса.

В случае мощности слоя меньше длины волны происходит интерференция сигнала и необходимо учитывать одновременно изменения волнового поля, вызванные уменьшением мощности и изменением свойств. При мощности слоя меньше длины волны происходит интерференция лепестков импульса, в результате чего изменяется видимая частота, амплитуда и мгновенная фаза отражения<sup>5</sup>.

Эффекты изменения фазово- и амплитудно-частотной характеристики сигнала, вызванные отражением от маломощного слоя, также влекут искажение зависимостей амплитуды от угла падения (для пластов с одинаковыми свойствами, но разной мощностью)<sup>6</sup>, так как на коэффициент отражения одновременно влияет как изменение мощности слоя, так и изменение свойств (коэффициентов отражения от кровли и от подошвы).

Поэтому при интерпретации сейсмических данных необходимо учитывать и использовать особенности отражения от маломощных пластов, а именно изменение спектральных характеристик трассы. Существует два наиболее распространённых подхода:

- анализ куба RGB-смешивания частот или амплитуд отдельных частот, полученных по результатам спектральной декомпозиции<sup>7</sup>;
- анализ отдельных фазовых составляющих трасс, рассчитанных по фазовой декомпозиции<sup>8</sup>.

В **разделе 2.1** рассмотрено три наиболее часто используемых метода спектральной декомпозиции: оконное преобразование Фурье, вейвлет-преобразование, метод согласованного преследования<sup>9</sup>.

Оконное преобразование Фурье (ОПФ) заключается в локализации Фурье преобразования на определенном временном отрезке с использованием оконных функций, которые сдвигаются с течением времени<sup>10</sup>.

В оконном преобразовании Фурье ширина оконной функции постоянна, в связи с чем разрешающая способность по частоте также постоянна и обратно-пропорциональна временному разрешению. Постоянное значение разрешающей способности при выбранной ширине окна вызывает ряд трудностей для определения низкой частоты, так как при использовании широкого окна целевой интервал во времени теряет информативность.

Альтернативный подход основан на вейвлет-преобразовании. Данный тип преобразования одномерного сигнала – это его представление в виде обобщенного ряда или интеграла Фурье в системе базисных функций. Вейвлеты представляют собой короткие волны с нулевым интегральным значением и локализацией по оси

<sup>5</sup> Partyka G. Interpretational applications of spectral decomposition in reservoir characterization / Greg Partyka // The Leading Edge. - 1999. P.353-360

<sup>6</sup> Wes H. Thin beds, tuning, and AVO / Hamlyn Wes // The Leading Edge – 2014. P. 1394 - 1397

<sup>7</sup> McArdle N.J. Understanding seismic thin-bed responses using frequency decomposition and RGB blending / McArdle N.J., Ackers M.A. // First Break. – 2012. P.57-65

<sup>8</sup> Castagna J. Phase Decomposition / John Castagna, Arnold Oyem, Oleg Portniaguine, Understanding Aikulola // Interpretation. – 2016. P.1-10

<sup>9</sup> Алексеева П.А. Сопоставительный анализ различных спектральных методов при решении интерпретационных задач сейсморазведки / Алексеева П.А., Гриневский А.С., Керусов И.Н., Ампилов Ю.П. // Геофизика. - 2021. С. 64-71.

<sup>10</sup> Levshin A.L. On a frequency-time analysis of oscillations / Pisarenko V.F., Pogrebinsky G.A. // Annales de Géophysique. - 1972. P. 211-218.

независимой переменной (времени), способные к сдвигу по этой оси и масштабированию.

Данный метод основан на том, что вдоль трассы перемещается не постоянное во времени окно (как в ОПФ), а изменяющийся по определенному закону вейвлет.

Однако как в вейвлет-преобразовании, так и в оконном Фурье преобразовании существуют функции, ограничивающие разрешающую способность, поэтому существуют подходы, основанные на подборе частоты и мгновенной фазы изначально заданных вейвлетов. Одним из таких подходов является метод согласованного преследования.

Спектральная декомпозиция, основанная на методе согласованного преследования<sup>11</sup>, заключается в том, что каждую сейсмическую трассу можно представить в виде линейной комбинации вейвлетов.

Заданные вейвлеты известны, а коэффициенты линейной комбинации рассчитывают с учётом минимизации невязки между аналитической трассой и трассой, составленной из вейвлетов.

В данной работе сопоставление описанных методов выполнено на двух модельных трассах, одна из которых состоит из отдельных вейвлетов Рикера с разной частотой и фазой, а вторая - является линейной комбинацией косинусов из 10Гц, 30Гц и 80Гц (рисунок 3). На первой модельной трассе показано, что вне зависимости от частоты вейвлета разрешающая способность оконного преобразования Фурье во временной области сохраняется. При тестировании размеров оконной функции на второй модели видно, что при размерах окна меньше 30мс частоты 10 Гц, 30Гц и 80Гц практически не различаются, в связи с чем, для целей интерпретации использование малых размеров оконной функции не целесообразно. На второй модели также показано влияние различных вейвлетов на результат преобразования, наилучшее частотно-временное разрешение показал комплексный вейвлет Морле. По сравнению с оконным преобразованием Фурье разрешение вейвлет-преобразования выше при малых размерах оконной функции, но при увеличении размеров оконной функции ОПФ показывает точнее локализацию сигнала по частоте. Метод согласованного преследования был также протестирован на смоделированных данных. Анализ результата применения метода на первой модели показывает, что этот подход обеспечивает наилучшее разрешение в частотной и временной области по сравнению с результатами ОПФ и НВП. При применении данного метода ко второй модельной трассе, состоящей из линейной комбинации косинусов (рисунок 3), результаты по определению верной частоты наихудшие, что связано с одной стороны с интерференцией сигнала, а с другой стороны с тем, что модельная трасса не является совокупностью нульфазовых сейсмических импульсов, локализованных по оси времён.

Широкое распространение изучения амплитуд различных частот связано с тем, что в зоне тюнинг мощности частота с максимальной амплитудой характеризует мощность слоя при постоянных свойствах пласта, а также изменение соотношения упругих параметров в пластах при постоянной мощности. В связи с этим для иллюстрации одновременного эффекта от нескольких частот обычно выполняется построение куба RGB-смешивания частот.

---

<sup>11</sup> Liu J. Spectral decomposition and its application in mapping stratigraphy and hydrocarbons / Jianlei Liu // A dissertation presented to the faculty of the department of Geosciences University of Houston. - 2006 г

Недостаток заключается в том, что использование методики смешивания частот подчёркивает все аномалии в волновом поле, не конкретизируя их природу.

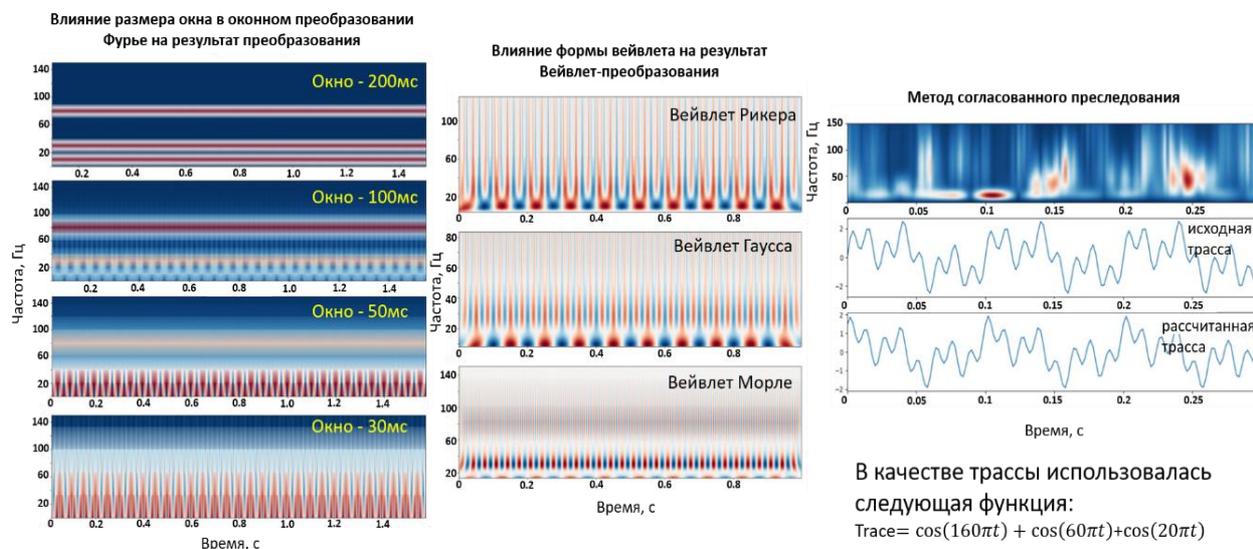


Рисунок 3. Анализ влияния параметров частотно-временных преобразований на разрешающую способность

В разделе 2.2 описана методика фазовой декомпозиции, в основе которой также используется спектральная декомпозиция, но рассчитывается уже не амплитудно-частотный спектр, а фазово-частотная характеристика в интервале. В фазовой декомпозиции рассчитывается суммарный эффект частот на отдельно взятой фазе.

Как было описано выше, в зоне тюнинг мощности сейсмическая трасса чувствительна как к изменению мощности, так и к изменению свойств. Но величина амплитуд трасс отдельных фазовых составляющих характеризует преимущественно изменение свойств.

В качестве примера использования данного метода в работе было рассмотрено 4 модели, в которых изменяется:

- 1) Мощность слоя (1 модель);
- 2) Скорость продольной волны в слое, мощность остаётся постоянной и равна 8м (2 модель);
- 3) Мощность слоя, при этом происходит срезание нижележащих отложений (скорость продольной волны постоянная 3900 м/с) (3 модель);
- 4) Мощность слоя, при этом происходит срезание нижележащих отложений (скорость продольной волны постоянная 3800 м/с) (4 модель).

К описанным выше моделям была применена фазовая декомпозиция и рассмотрены трассы на фазовых составляющих  $-90^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  и  $180^\circ$ . Согласно результатам, при изменении только мощности (модель 1) в зоне тюнинг эффекта изменение амплитуды трассы определённых фазовых составляющих происходит относительно незначительно, то есть распределение амплитуд между фазами практически сохраняется. При изменении только акустического импеданса (модель 2) в пласте происходит сильное изменение фазовых составляющих  $-90^\circ$ ,  $90^\circ$ , и достаточно наглядно изменяется амплитуда фазовой составляющей  $180^\circ$ . В случае пониженного значения импеданса относительно выше- и нижележащих пород повышенное значение амплитуды возникает на фазовой составляющей  $-90^\circ$ . При увеличенном акустическом импедансе в нижнем слое и пониженном в верхнем увеличение амплитуды

наблюдается на фазовой составляющей  $90^\circ$ . Основная особенность модели 3, в которой скорость продольной волны в слое составляет 3900 м/с (что незначительно выше, чем скорость в нижележащей пачке) заключается в том, что происходит локальное изменение амплитуды в местах срезания слоев нижележащих пород, которое проявляется на фазовой составляющей  $90^\circ$ . В модели 4 фазовая составляющая  $90^\circ$  обладает повышенным абсолютным значением амплитуд, когда в слое увеличенный акустический импеданс относительно нижележащих слоев. На  $0^\circ$  и  $180^\circ$  распределение амплитуды практически сохраняется.

Однако вышеописанные характеристики тяжело анализировать для количественной оценки, так как результатом применения фазовой декомпозиции является набор фазовых сейсмограмм, а теоретических зависимостей, которые бы показывали, как применяемые в данном подходе фазовые составляющие связаны со свойствами и мощностью, нет. Поэтому возникает необходимость использования дополнительных подходов для анализа отражения в зоне тюнинг эффекта, которые не только на качественном уровне позволяют выполнить интерпретацию маломощных слоев, но и способствуют их количественной оценке.

В разделе 2.3 показано, как можно упростить формулу для коэффициента отражения с учётом влияния импульса. Вначале было рассмотрено упрощение для акустического случая, а затем для упругого. Формулы выводились аналитически и анализировались на модельных данных.

Коэффициенты отражения от однородного маломощного пласта могут быть представлены в виде линейной комбинации пар чётных и нечётных коэффициентов отражения<sup>12</sup>. Согласно работе (Chung, 1994)<sup>13</sup>, центральный лепесток вейвлета Рикера, который приближен к статистическому сейсмическому вейвлету, может быть аппроксимирован косинусом, и следовательно, коэффициент отражения выражается следующим образом:

$$R(t) = r_1 \cos \left\{ \left( t - \frac{h}{V_{P2}} \right) \frac{2\pi}{T} \right\} + r_2 \cos \left\{ \left( t + \frac{h}{V_{P2}} \right) \frac{2\pi}{T} \right\} + 2r_3 \cos \left\{ \left( t + \frac{h}{V_{S2}} \right) \frac{2\pi}{T} \right\} \quad (1)$$

При условии малой мощности слоя относительно длины волны максимальная амплитуда функции  $R(t)$  может быть представлена следующим образом:

$$R(t) = M_1 \cos(\omega t) + M_2 \sin(\omega t) \quad (2)$$

$$\frac{\partial R(t)}{\partial t} = -\omega M_1 \sin(\omega t) + \omega M_2 \cos(\omega t) = 0 \quad (3)$$

$$\operatorname{tg}(\omega t) = \frac{M_2}{M_1} \quad (4)$$

Так как в рамках данной задачи интересуется наименьшее абсолютное значение аргумента, то:

<sup>12</sup> Puryear Cl. Layer-thickness determination and stratigraphic interpretation using spectral inversion: Theory and application / Cl. Puryear, JP. Castanga // GEOPHYSICS. - 2008. P.37-48

<sup>13</sup> Chung HM. Seismic properties of thin beds / Chung Hai-Man // A dissertation submitted to the faculty of graduate studies in partial fulfillment of the requirements for the degree of doctor of philosophy. - 1994.

$$t_{max} = \frac{\arctg\left(\frac{M_2}{M_1}\right)}{w} \quad (5)$$

Подставляя (5) в (2), максимальное значение трассы с учётом малости пласта относительно длины волны равно:

$$R(t_{max}) = M_1 \frac{M_1}{\sqrt{M_1^2 + M_2^2}} + M_2 \frac{M_2}{\sqrt{M_1^2 + M_2^2}} = \sqrt{M_1^2 + M_2^2} \quad (6)$$

Согласно выражению (6), максимальная амплитуда трассы равна:

$$A_{max}^2 = K^2 - (LK + G)w^2 + \frac{1}{4}Lw^4 \quad (7)$$

, где

$$\begin{aligned} K &= r_1 + r_2 + 2r_3 \\ G &= t_{hp}^2 r_1 + r_2 t_{hp}^2 + 2r_3 t_{hs}^2 \\ L &= t_{hp}^2 r_1 - r_2 t_{hp}^2 - 2r_3 t_{hs}^2 \end{aligned} \quad (8)$$

$t_{hp}$  – время пробега продольной волны в слое,  $t_{hs}$  – время пробега поперечной волны в слое  $\lambda$  – длина волны,  $\omega$  – циклическая частота,  $h$  – мощность слоя,  $V_{s2}$  – скорость поперечной волны в слое,  $V_{p2}$  – скорость продольной волны в слое, коэффициенты  $r_3$  и  $r_4$  характеризуют пары чётных и нечётных коэффициентов отражения и выражаются через  $r_1$  (коэффициент отражения от кровли) и  $r_2$  (коэффициент отражения от подошвы) следующим образом:

$$\begin{aligned} r_3 &= \frac{r_2 - r_1}{2} \\ r_4 &= \frac{r_2 + r_1}{2} \end{aligned} \quad (9)$$

Согласно выражению 7, квадрат максимальной амплитуды отражения от маломощного слоя параболически зависит от квадрата циклической частоты<sup>14</sup>.

Согласно формуле 8, коэффициент  $K$  зависит преимущественно от свойств слоёв, в отличие от коэффициентов  $G$  и  $L$ . Поэтому для валидации выведенной формулы было рассмотрено, как изменяются атрибуты коэффициента отражения от трёхслойной модели среды с изменяющейся мощностью 2-го слоя и скоростью продольных волн 1-го (модель 1), 2-го (модель 2) и 3-го (модель 3) слоёв. Моделирование выполнялось с использованием метода конечных разностей, поэтому дополнительно был проанализирован шаг сетки, чтобы уйти от сильных осцилляций при анализе маломощных слоёв.

Для расчёта атрибутов была выполнена следующая последовательность действий:

- 1) Выполнена корреляция отражения вдоль изучаемого сейсмического горизонта, приуроченного к кровле пласта;
- 2) Рассчитана спектральная декомпозиция с использованием вейвлет-преобразования с комплексным вейвлетом Морле;
- 3) Измерены (сняты) значения частот вдоль горизонта;
- 4) Построена параболическая аппроксимация квадрата амплитуды в зависимости от квадрата частоты для каждой точки вдоль горизонта;
- 5) Коэффициентами параболической аппроксимации являются соответственно атрибуты  $K$ ,  $G$  и  $L$ .

<sup>14</sup> P.A. Alekseeva Prediction of elastic properties of thin homogeneous layers based on seismic data / P.A. Alekseeva, I.N. Kerusov // Russian Geology and Geophysics. 2022. P. 1177-1188.

По результатам моделирования построены карты атрибутов К, G и L в зависимости от свойств среды и мощности 2-го слоя.

Как показало моделирование, изменение атрибута К для моделей 1 и 3 характеризует преимущественно изменение скоростей в области маломощного пласта (до 12 метров), в отличие от атрибутов L и G. Именно такой диапазон мощностей наиболее характерен для русел тюменской свиты (которые будут использованы в качестве примера на реальных данных). Для модели 2 нет такого сильного разделения по свойствам и мощности, однако, параметр К, в отличие от атрибутов L и G, также наиболее сильно изменяется в зависимости от свойств, чем от изменения мощности. Параметр К, согласно формуле 7, соответствует коэффициенту аппроксимации при нулевой степени и, следовательно, характеризует пересечение графика с осью ординат. Как показано на графиках зависимости квадрата амплитуды от квадрата частоты (рисунок 4) для модели 1 происходит группирование аппроксимирующих парабол в зависимости от изменения скорости. Диапазон изменения значений каждой группы сужается в зависимости от уменьшения частоты, в связи с этим параметр К характеризует изменение преимущественно свойств среды, а не мощности.

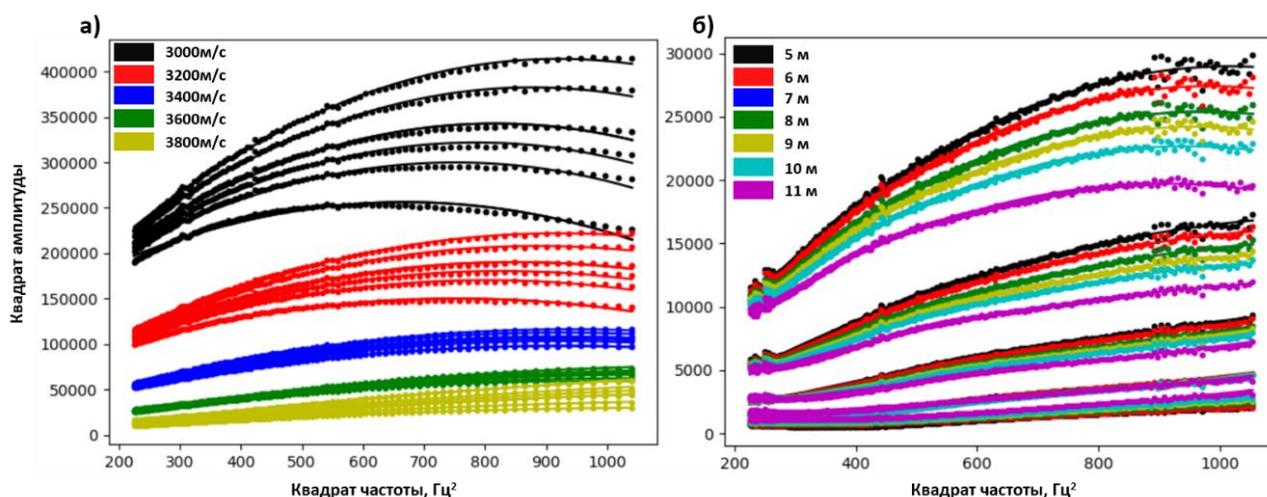


Рисунок 4. Графики зависимостей квадрата амплитуды от квадрата частоты для модели 1

В разделе 2.4 рассмотрены дополнительные факторы, влияющие на амплитудно-частотную характеристику трассы.

Одной из причин является характеристика соотношения упругих свойств внутри слоя, в частности рассмотрены слои с градиентным и контрастным изменением свойств. Методом, предложенным для разделения таких эффектов, является AVB<sup>15</sup>. Он заключается в том, что строится график изменения амплитуды в зависимости от ширины полосы пропускания фильтра для определенного момента времени, а затем, подбирается тренд к совокупности точек, по этому тренду определяется тангенс угла наклона между осью абсцисс и ординат ( $w_1$ ) (градиент) и пересечение с осью ординат ( $w_0$ ) (интерсепт). В зависимости от свойств разреза эти параметры будут изменяться. Кроме того, для более контрастного изменения амплитуды отфильтрованной трассы, в случае применения трапециевидного фильтра, следует учитывать не тренд, а прямую, проходящую через глобальный максимум и точку графика с практически постоянным значением амплитуды.

<sup>15</sup> Kelly Michael C. Method of geophysical exploration: 5136552. - United States, 1992 г.

Другая причина заключается в наличии частотно-зависимого поглощения, как вышележащих слоёв, так и самого слоя.

### **Глава 3. Применение методов выделения и анализа свойств русел на реальных сейсмических данных Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна**

В главе 3 показано применение методов выделения и анализа свойств русел на сейсмических данных 3D Западно-Сибирского НГБ. Целевым интервалом исследования являются среднеюрские (тюменская свита) аллювиально-озёрные отложения. Интерес к данным отложениям вызван тем, что они нефтеносны и относятся к трудноизвлекаемым запасам (ТрИЗам), в связи с этим на их разработку предоставляются дополнительные налоговые льготы в Российской Федерации.

В разделе 3.1 показано использование нейронных сетей для выделения русел и включение их в прогноз свойств.

В тектоническом строении месторождение приурочено к Верхне-Ляминскому валу Фроловской мегавпадины. Основным интервалом разработки является пласт ЮК<sub>2</sub>, сложенный отложениями тюменской свиты, являющимися континентальными аллювиальными. Одна из главных проблем разработки аллювиальных отложений заключается в сложном распространении коллекторов, которое контролируется фациальным фактором<sup>16</sup>. В пределах данного месторождения коллекторы приурочены к руслам. И задача, которая ставится перед интерпретатором, заключается в выделении и прогнозе свойств палеорусел.

Наиболее распространённым атрибутом для визуализации и выделения русел по сейсмическим данным является седиментационный срез по кубу RGB-смешивания частот, полученных в результате спектральной декомпозиции, что связано с маломощностью отложений. Поэтому основным атрибутом для выделения русел с использованием нейронной сети был слайс вдоль ОГ ЮК<sub>2</sub> по кубу RGB-смешивания частот. Результатом прогноза нейронной сети является атрибут, который характеризует вероятность наличия русла. По результатам выполненного прогноза, как показано на рисунке 5, многие русла, которые прослеживаются на слайсе куба RGB-смешивания частот, выделяются, но достаточно значимая часть осталась невыделенной.

В связи с этим для улучшения прогноза использовался не один атрибут, а несколько наиболее информативных, на которых проявляются русловые объекты: максимальная амплитуда в окне, среднее значение мгновенной частоты, огибающая, амплитуда вдоль куба продольного импеданса, полученного по результатам сейсмической инверсии. По результатам прогноза на каждом из атрибутов выделялись отдельные участки волнового поля лучше, чем по слайсу куба частот, поэтому комплексный анализ всех атрибутов целесообразно применять для повышения точности прогноза. Рассчитанная вероятность наличия русла по каждому атрибуту суммировалась и нормировалась, что способствовало уточнению локализации русел (рисунок 6).

Такой подход способствует оконтуриванию границ русел в автоматическом режиме, что позволяет отдельно анализировать атрибуты внутри них, стоять объёмные геологические тела, учитывать их при выполнении инверсии волнового поля. Данная

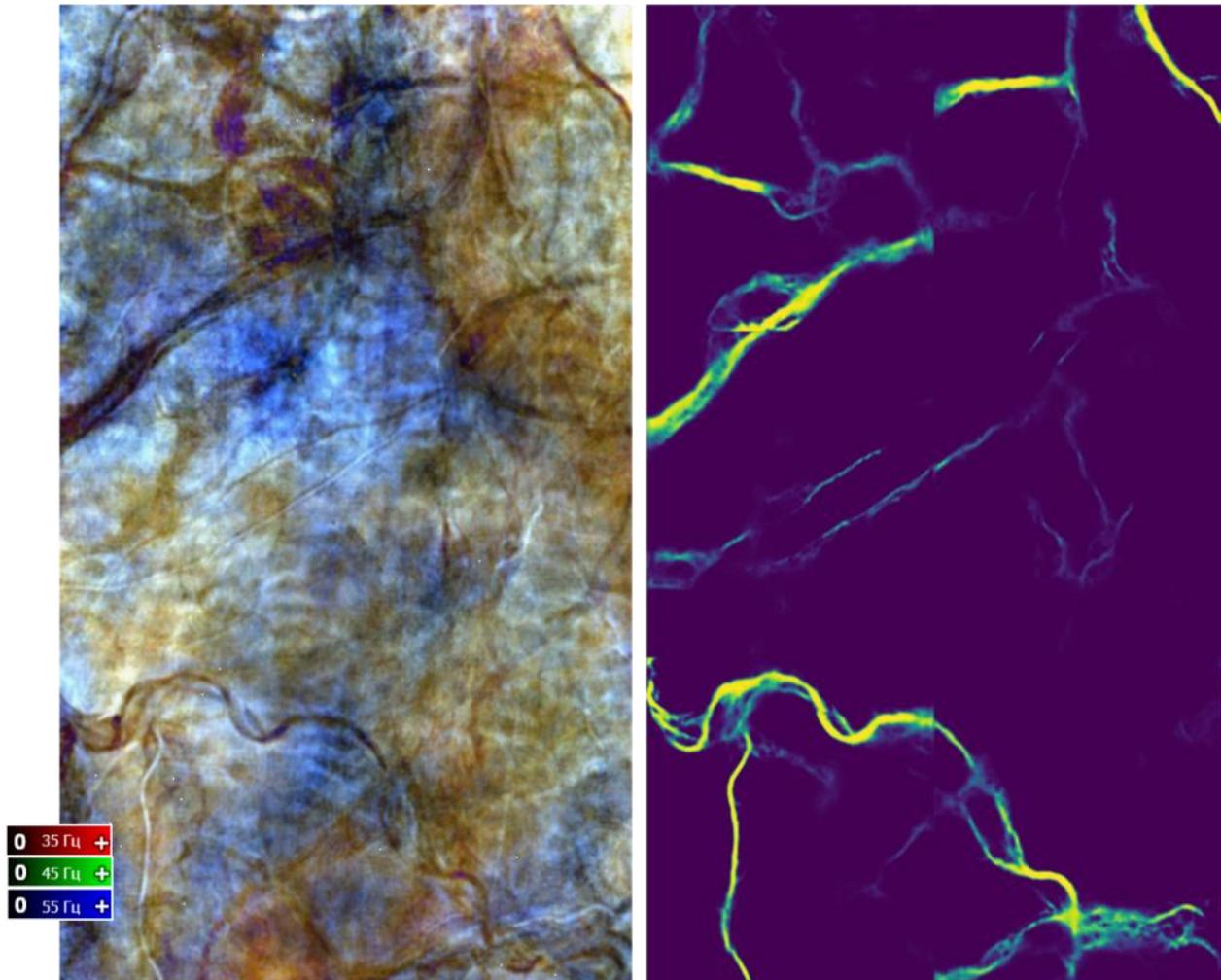
---

<sup>16</sup> Ольнева Т.В., Жуковская Е.А., Муртазин Д.Г. Влияние типа меандрирования палеорусел на потенциальный объём литологической ловушки и эффективность геолого-разведочных работ // Геофизика. – 2018. – №4. – С. 75-81.

методика позволяет отойти от субъективного анализа при интерпретации и ускорить процесс выделения объектов.

Русла в рамках изучаемого месторождения маломощны и не превышают 12 метров. Поэтому внутри выделенных объектов можно спрогнозировать свойства на основе предложенных автором атрибутов. В данном случае был рассмотрен атрибут К, который входил в состав составного атрибута и вносил весомый вклад в прогноз эффективных толщин.

**Слайс вдоль куба  
RGB-смешивания частот**



*Рисунок 5. Вероятность наличия русел в результате применения нейронной сети к слайсу по кубу RGB-смешивания частот*

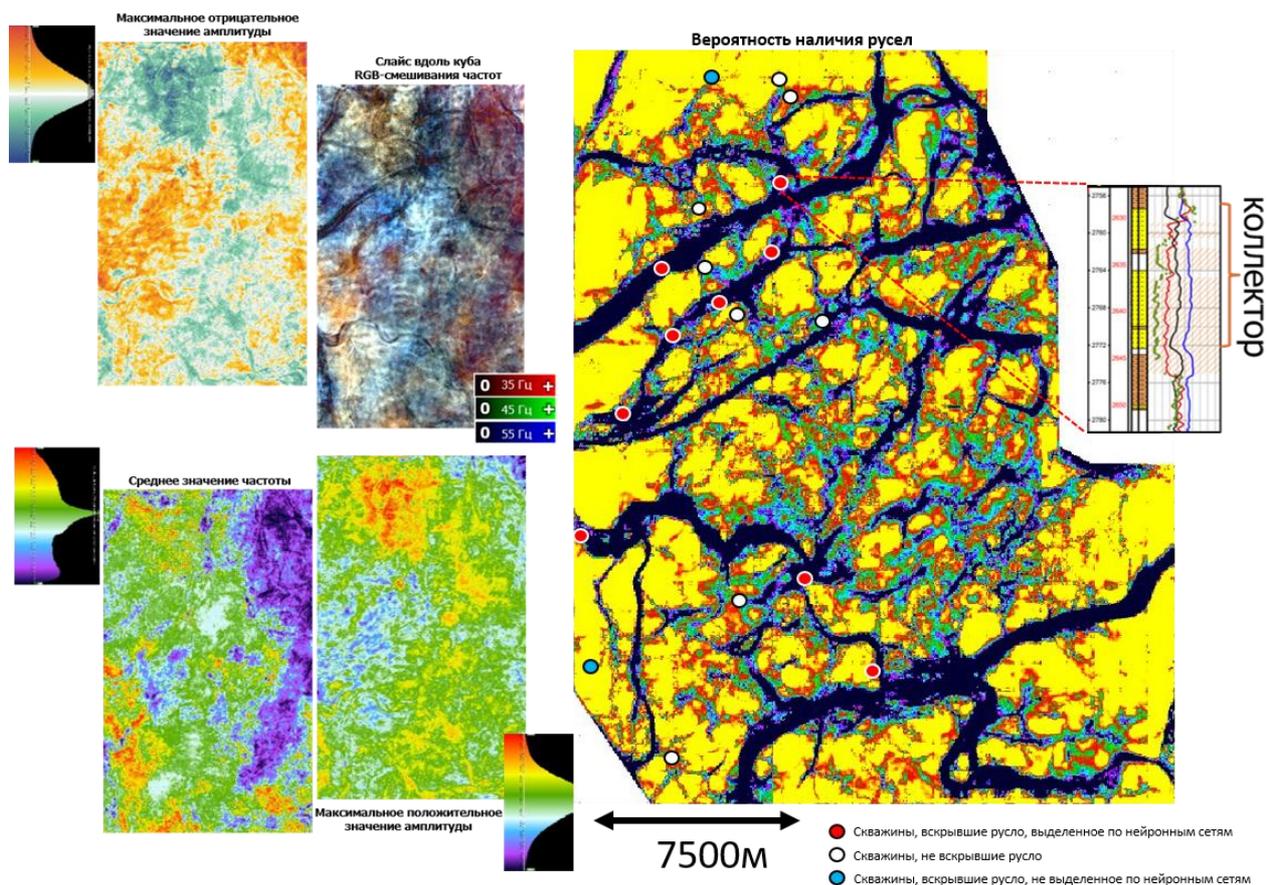


Рисунок 6. Прогноз положения русел нейронными сетями по набору атрибутов

В разделе 3.2 показано более детальное применение атрибутов К, G, L. Для применения предложенного автором подхода анализировались пласты ЮК<sub>2-3</sub> (верхняя подсвита тюменской свиты), так как на них влияние отражения от кровли триасовых отложений не столь значительно по сравнению с нижележащими аллювиально-озёрными отложениями. Кроме того, данный интервал, согласно скважинным данным, характеризуется высокой латеральной неоднородностью и относительно низкой мощностью русловых отложений.

Для расчета атрибутов К, G, L была выполнена спектральная декомпозиция с использованием непрерывного вейвлет-преобразования с комплексным вейвлетом Морле, диапазон частот, который использовался для построения параболической зависимости, изменялся от 20 до 50 Гц.

Для анализа независимости полученных атрибутов рассмотрена их взаимная корреляция, которая показала, что атрибуты К, G и L являются независимыми, так как коэффициенты корреляции между К и L – 0.5, К и G – 0.06, G и L – 0.3.

Кроме того, как было сказано выше, на атрибуты волнового поля оказывает сильное влияние одновременно изменение мощности слоя и свойств пласта. Поэтому выполнено сопоставление коэффициентов К, G и L с другими атрибутами волнового поля для анализа возможности получения дополнительной уникальной информации, которую не предоставляли другие атрибуты. Для сопоставления были рассчитаны атрибуты мгновенной частоты, RMS-амплитуды и sweetness.

По полученным результатам показано, что атрибут L практически идентичен атрибуту sweetness и RMS-амплитуде. Зоны, выделяемые по атрибуту G, схожи с атрибутом мгновенной частоты. Идентичность информации, полученной по атрибутам

L и G, с другими атрибутами связана с тем, что данные атрибуты одновременно зависят и от свойств пласта, и от мощности, в отличие от атрибута K, который является независимым и несёт в себе дополнительную информацию о свойствах разреза, как было показано в выведенных выше формулах. Таким образом, параметр K можно использовать как для прогноза свойств, так и для выделения дополнительных фациальных областей, которые не проявляются по другим атрибутам.

Для выделения геометрии маломощных русел в качестве основного атрибута использовался куб RGB-смешивания частот частичных угловых сумм. На данном атрибуте выделяются тонкие русла разветвлённой реки и прирусловые отмели, согласующиеся со скважинными данными. Основными данными для выделения фаций по скважинам являлись кривые гамма-каротажа и результаты описания керна. Вдоль выделенных русел разветвлённой реки также выполнен расчет атрибута K.

В дополнение к проведённому анализу были выделены фациальные зоны с использованием атрибута мгновенной частоты и атрибута AVB. Повышенные значения атрибута мгновенной частоты характеризуют области широких долин меандрирующих рек, имеющие по скважинным и сейсмическим данным более ранний возраст по сравнению с разветвлёнными реками. Атрибут AVB способствовал выделению зон с различной конфигурацией пластов. Повышенные значения атрибута AVB характеризуют слои с контрастным изменением свойств в кровле и постоянным или регрессивным изменением свойств в пласте. По данному атрибуту выделены пойменные участки.

Таким образом, по результатам выполненного атрибутного анализа и на основе скважинной информации была построена фациальная карта, иллюстрирующая временно заливаемые участки пойм, широкие долины меандрирующих рек, более молодые русла разветвленных рек и прирусловые отмели. С учётом фациальной карты и атрибутов, стандартных и предложенных автором, построена карта эффективных толщин.

### **Заключение**

В рамках выполненной работы рассмотрены основные проблемы геологической интерпретации маломощных палеорусел по сейсмическим данным, которые заключались в выделении объектов и прогнозе их свойств.

В данном исследовании предложен новый подход к анализу маломощных слоёв, который основан на детальном изучении амплитуды отражения в зависимости от частоты с использованием технологии спектральной декомпозиции. Актуальность описанной методики заключается в том, что на амплитудно-частотный спектр отражения от маломощного слоя одновременно влияет как изменение мощности слоя, так и изменение свойств, поэтому использование стандартных атрибутов не позволяет оценить изменение свойств маломощных отложений. В работе изложены теоретические основы данного метода, которые показали, что квадрат амплитуды отражения от однородного маломощного слоя параболически зависит от квадрата циклической частоты отражения. Коэффициент аппроксимации при нулевой степени аргумента зависит преимущественно от свойств пласта и в меньшей степени от мощности, в отличие от коэффициентов при первой и второй степени. Описанные коэффициенты использовались в качестве атрибутов для прогноза свойств в межскважинном пространстве.

Результаты проделанной работы показывают, что для выделения и оконтуривания границ русел существует возможность использования свёрточных нейронных сетей.

Данная технология способна объединять и разделять объекты, не ориентируясь только на амплитуду, что является существенным отличием и от других подходов и несравненным преимуществом. Для обучения нейронной сети оказалось эффективно использовать спутниковые снимки, а для отделения русел от других объектов на снимках строить персистентные диаграммы. В основе выделения палеорусел лежали атрибуты амплитуд отдельных частот, так как данные атрибуты являются на практике одними из основных для визуализации целевых объектов. Но для улучшения методики прогноза использовалась совокупность атрибутов, на которых лучше выделяются различные особенности русел в волновом поле.

Данные методы могут быть широко использованы для выделения палеорусел на сейсмических горизонтальных слайсах или седиментационных срезах. Для расчёта атрибутов, предложенных автором, необходимо выполнять анализ амплитуд отдельных частот, то есть применять спектральную декомпозицию и учитывать тот факт, что целевые объекты должны быть маломощны и контрастны. Кроме того, применение описанных подходов возможно не только для исследования палеорусел, но и других геологических объектов, которые обладают схожей конфигурацией и контрастными свойствами со вмещающими породами.

Результаты проделанной работы открывают новые горизонты для дальнейших исследований: выделение речных систем в объёме, учет фациального районирования при расчёте инверсии, включение в инверсионные преобразования особенностей отражения от маломощных слоёв.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в журналах Scopus, Web of Science (WoS), RSCI, а также в изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности:

1. **Алексеева П.А.** Сопоставительный анализ различных спектральных методов при решении интерпретационных задач сейсморазведки / Алексеева П.А., Гриневский А.С., Керусов И.Н., Ампилов Ю.П. // Геофизика. 2021. № 2. С. 64-71. RSCI. (0.47 п.л., авторский вклад – 70%). Импакт-фактор РИНЦ, 2019: 0,377.

2. **Р.А. Alekseeva** Prediction of elastic properties of thin homogeneous layers based on seismic data / Р.А. Alekseeva, I.N. Kerusov // Russian Geology and Geophysics. 2022. 63. P. 1177-1188. Scopus. (0.8 п.л., авторский вклад – 85%). Импакт-фактор SJR, 2021: 0,55.

3. **Алексеева П.А.** Выделение палеорусел в отложениях тюменской свиты с использованием нейронной сети по данным сейсморазведки 3D / Алексеева П.А., Калугин А.А., Кирьянова // Геофизика. 2022. №3. С. 9-15. RSCI. (0.4 п.л., авторский вклад – 60%). Импакт-фактор РИНЦ, 2019: 0,377.

4. Гриневский А.С. Возможности широкоазимутальной сейсморазведки для исследования перспектив среднеюрского и доюрского комплекса Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции / Гриневский А.С., Хисамутдинова А.И., Бояркин Р.Ю., Керусов И.Н., Мирошниченко Д.Е., **Алексеева П.А.**, Кучерявенко Д.С. // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2021. №5. С. 30-39. RSCI. (0.6 п.л., авторский вклад – 10%). Импакт-фактор РИНЦ, 2019: 0,412.

5. Куприянова Е.К. Новый методический подход к оценке характеристик палеорусловых тел по результатам атрибутного анализа в различных геологических условиях / Куприянова Е.К., Сайфутдинов Р.Ш., Моисеев С.В., Керусов И.Н., **Алексеева П.А.**, Воробьёва Л.Ф. // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири.

2020. № 3. С. 23-29. Scopus. (0.4 п.л., авторский вклад – 5%). Импакт-фактор SJR, 2020: 0,227.

### ИНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ

6. **Alexeeva P.** The Application Scope of Spectral Methods in Seismic Interpretation / Alexeeva P., Kerusov I., Grinevskiy A. // EAGE Annual Online 82nd conference and exhibition. 2020. P. 1-5 (0.25 п.л., авторский вклад – 70%)

7. **Алексеева П.А.** Частотно-зависимый коэффициент отражения // XXVIII Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов 2021». 2021. С. 1-2 (0.14 п.л.)

8. **Алексеева П.А.** Опыт применения методов спектрального анализа сейсмических данных для решения седиментационных задач / Алексеева П.А., Керусов И.Н., Моисеев С.В. и др. // 20-ая научно-практическая конференция «Геомодель 2018». 2018. С. 1-5 (0.25 п.л., авторский вклад – 50%)

9. **Алексеева П.А.** Прогноз упругих свойств отложений тюменской свиты / Алексеева П.А., Романчук А.Ф., Казора И.В. // ГеоЕвразия 2022, 2022. С. 156-158 (0.2 п.л., авторский вклад – 70%)

10. **Алексеева П.А.** Применение спектрального анализа для выделения и определения свойств палеорусел / Алексеева П.А., Керусов И.Н., Гриневский А.С., Куприянова Е.К. // ГеоЕвразия 2020, 2020. С. 154-156 (0.21 п.л., авторский вклад – 65%)