

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра геофизики

**«Изучение неоген-плейстоценовых отложений в пределах блока F3  
голландского сектора Северного моря с применением метода  
спектральной декомпозиции»**

**АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ**

Студента 4 курса 403 группы  
направление 05.03.01 геология  
профиль «Нефтегазовая геофизика»  
геологического ф-та  
Смирновой Виктории Олеговны

**Научный руководитель**

К. г.-м.н., доцент

\_\_\_\_\_

подпись, дата

А.Е. Артемьев

**Зав. кафедрой**

К. г.- м.н., доцент

\_\_\_\_\_

подпись, дата

Е.Н. Волкова

Саратов 2021

**Введение** В последнее время при подготовке месторождения к промышленной эксплуатации требуется построение модели, отражающей внутреннее строение изучаемых объектов. В основе моделирования лежит совокупность анализа и интерпретации всей геолого-геофизической информации исследуемой территории с применением различных видов атрибутивного анализа. Атрибутный анализ позволяет прогнозировать динамические свойства отложений. Многогранность атрибутивного анализа проявляется как в выборе атрибутов, так и в спектре задач, для решения которых он применяется.

В 80-х годах XX века в качестве альтернативного варианта классическому спектральному анализу, основанному на преобразовании Фурье, была предложена теория вейвлет-преобразования. Одно из наиболее перспективных направлений применения вейвлетного анализа в геофизике - расчет и анализ атрибутов сейсмических записей, в настоящее время являющийся популярным направлением развития интерпретационных методов.

Цель выпускной квалификационной работы состояла в изучении неоген-плейстоценовых отложений в пределах блока F3 голландского сектора Северного моря с применением метода спектральной декомпозиции.

Для достижения цели были поставлены и решены конкретные задачи:

- изучение геологического строения исследуемой территории, ее стратиграфических и тектонических особенностей, нефтегазоносности;
- изучение теоретических основ метода спектральной декомпозиции;
- изучение возможностей комплекса программ трехмерной сейсмической интерпретации OpendTest;
- получение результатов спектральной декомпозиции по выделенному интервалу временного разреза, приуроченному к неоген-плейстоценовым отложениям.

В структуру выпускной квалификационной работы входят 3 основных раздела: геологическое строение территории исследования, атрибутивный

анализ и результаты анализа проекта F3, содержащие 12 подразделов, 3 пункта и 2 подпункта, а также введение, заключение, список использованных источников. Выпускная квалификационная работа включает 16 рисунков и 17 формул. Объем работы составляет 50 страниц.

**Основное содержание работы. 1 Геологическое строение территории исследования** В работе рассматривается блок F3, расположенный в голландском секторе Северного моря. Исследуемый блок покрыт сейсмической съемкой МОГТ- 3D, которая была отработана для разведки нефти и газа в верхнеюрских - нижнемеловых отложениях. Верхнеюрские-нижнемеловые отложения залегают ниже интервала, выбранного для исследования. Отражения, прослеживающиеся по разрезу выше времен 1200 мс, состоят из горизонтов, связанных с отложениями миоценового, плиоценового и плейстоценового возраста. На суммарном кубе данных хорошо видно крупномасштабное сигмоидальное залегание складок. Его образуют отложения дельтовой системы, располагавшейся на территории отступившего Балтийского моря; оно характеризуется наложенными, перекрывающимися, и усеченными структурами. [Overeem, 2001; Sørensen, 1997].

В результате проведения геофизических исследований и бурения были получены данные о строении осадочного чехла Северного моря. Объект исследования – блок F3 располагается в пределах крупной осадочной депрессии - Англо-Германского бассейна.

Преимущественно нефтегазоносными являются породы среднего и верхнего отдела триасовой системы, юрской, меловой и палеогеновой систем, на глубине от 100 до 4000 м, газоносными - каменноугольной, пермской систем и нижнего отдела триасовой системы. В Северноморском бассейне общие достоверные и вероятные запасы области нефти оцениваются примерно в 3 млрд. т, природного газа в 4,5 трлн. м<sup>3</sup>. На начало 2018 года голландский сектор включал 53 нефтепродуктивных месторождения, из которых 22 расположены в континентальной зоне и 31 —

на шельфе Северного моря; 482 газопродуктивных месторождения, из которых 205 расположены в континентальной зоне и 277 — на шельфе Северного моря.

**2 Атрибутный анализ** Под сейсмическим атрибутом понимают локальную особенность записи колебаний, измеряемую и анализируемую в целях детальной геологической интерпретации волновой картины [Боганик, 2006]. Характерной чертой атрибутного анализа является его многогранность как в выборе собственно атрибутов, так и в спектре задач, для решения которых он применяется.

Атрибуты используются в следующих целях:

- наглядной визуализации информации о конкретных особенностях геологического разреза, проявляющихся в сейсмических волновых полях, реконструкции тектонической, диагенетической и аккумулятивной истории, которая позволит сделать вывод о герметичности, пористости коллектора, плотности и ориентировки трещин. Например, для прогноза скоплений углеводородов на этапе поисков могут быть использованы атрибуты, отображающие амплитудный или частотный состав волнового поля, а для выявления дизъюнктивных нарушений разной амплитуды - атрибуты, детально характеризующие геометрию границ;

- для решения традиционных задач сейсморазведки – корреляции горизонтов, установления соотношений корреляционных данных с фильтрационно-емкостными свойствами коллекторов, экстраполяции измерений разреженных скважин, таких как толщина коллектора, пористость и содержание углеводородов, на гораздо более плотную сейсмическую сетку.

Спектральной декомпозицией волнового поля называется разложение сейсмического сигнала на спектральные, то есть частотные, компоненты. Волновое поле может рассматриваться как суперпозиция нестационарных составляющих с разной частотой, меняющихся вдоль сейсмической трассы; эти составляющие будут отражать влияние геологических условий на спектральные характеристики сейсмической записи.

В целях интерпретации и применения атрибутивного анализа широко используются методы спектрального разложения волнового поля. Выделяют два основных класса методов спектральной декомпозиции в целях получения частотных характеристик. Первый основывается на использовании преобразования Фурье, а второй – на применении метода вейвлет-разложения.

Для отображения локальных свойств среды можно применить преобразование Фурье в перемещающихся одинаковых коротких временных окнах, что в частотной области аналогично использованию одинаковых узкополосных фильтров, перемещающихся вдоль оси частот.

Известно, что произвольный временной ряд  $S(t)$ , для которого выполняется условие (формула 1), может быть представлен ортогональной системой функций (формула 2), коэффициенты которой определяются из соотношения (формула 3):

$$\int_{t_1}^{t_2} [S(t)]^2 dt < \infty, \quad (1)$$

$$S(t) = C_0 \varphi_0(t) + \dots + C_n \varphi_n(t) + \dots = \sum_{n=0}^{\infty} C_n \varphi_n(t), \quad (2)$$

$$C_n = \frac{1}{|\varphi_n|^2} \int_{t_1}^{t_2} S(t) \varphi_n(t) dt, \quad (3)$$

где квадрат модуля, или энергия базисной функции  $\varphi_n(t)$  представлен формулой 4:

$$|\varphi_n|^2 = \int_{t_1}^{t_2} \varphi_n^2(t) dt. \quad (4)$$

Произведения вида  $C_n \varphi_n(t)$ , входящие в ряд (2), представляют собой спектральную составляющую сигнала  $S(t)$ , а совокупность коэффициентов  $\{C_0, \dots, C_n, \dots\}$  называют спектром сигнала.

В результате применения преобразования Фурье к сейсмической трассе производится разложение его на ряд бесконечных гармонических функций. Амплитудно-частотный спектр трассы составляют амплитудные характеристики гармоник, а фазово-частотный спектр – фазовые характеристики. В связи с тем, что сигнал, заданный во временной области,

можно представить в виде частотных характеристик, описанная операция получила широкое распространение в процессе цифровой обработки сигналов.

Спектральный анализ Фурье в широком окне не дает информации о внутреннем геологическом строении объекта. В результате преобразования Фурье по узкому временному окну выходной спектр несет в себе информацию об акустических свойствах среды, эта информация может быть использована для дальнейшего прогноза свойств. Данное утверждение является основой метода спектральной декомпозиции.

С позиций точного представления произвольных сигналов преобразование Фурье имеет ряд ограничений и недостатков. Обладая хорошей локализацией по частоте, оно не обладает временным разрешением, ввиду того, что ядро преобразования Фурье не имеет локализации по времени. Преобразование Фурье не учитывает, что частота колебания может изменяться во времени. При необходимости временной локализации спектральных компонент требуется перейти к частотно-временному представлению сигнала [Яковлев, 2013].

Решение этой проблемы возможно путем применения преобразования Гэбора (оконного преобразования Фурье), которое рассчитывается по формуле 5:

$$GT(v, b, a) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(t) e^{-\frac{(t-b)^2}{a}} e^{-i2\pi vt} dt. \quad (5)$$

В рамках преобразования Гэбора применяется предварительная операция умножения сигнала  $S(t)$  на «функцию окна»  $W(t-b)$  (где  $b$  – сдвиг окна по времени), которая также выражена в экспоненциальном виде [Gabor, 1946]. Использование функции окна позволяет локально изучить спектр сигнала во времени, то есть в разных позициях  $b$ , что делает возможным изучение частотных характеристик в динамике.

Вейвлет-преобразование - это представление одномерного сигнала в виде обобщенного ряда или интеграла Фурье по системе базисных функций, которые рассчитываются по формуле 6:

$$\Psi_{ab} = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad (6)$$

сформированных из исходного (материнского) вейвлета  $\psi(t)$ , который за счет операций изменения временного масштаба ( $a$ ) и сдвига во времени ( $b$ ) обладает определенными свойствами. Множитель  $1/\sqrt{a}$  обеспечивает независимость модуля этих функций от масштабирующего числа  $a$ .

Вейвлет-анализ выполняет аналогичную операцию, используя операторы одинаковой формы, длина которых обусловлена их изменяющимся частотным заполнением. В частотной области такая фильтрация соответствует использованию набора плавно меняющихся по ширине полосовых фильтров [Воскресенский, 2015]. Наличие набора разномасштабных вейвлетов позволяет изучать сейсмический сигнал на разных спектральных уровнях. Наличие временного сдвига позволяет сканировать изучаемый сигнал, изучать его на разных временных уровнях. Благодаря этому свойству вейвлет-преобразование используется для изучения процессов в динамике. Основное преимущество вейвлет-преобразования перед преобразованием Фурье – наличие свойства локальности вейвлетов.

Непрерывное вейвлет-преобразование в качестве прототипа вейвлета (импульса) использует базисную функцию, удовлетворяющую двум условиям: существование в определенном пространственном или временном интервале и наличие в этом интервале нулевого среднего значения.

Существует сложность выбора базисной функции, заключающаяся в том, что зарегистрированный сейсмический сигнал представляет собой суперпозицию полезных волн и волн-помех, подлежащих фильтрации. Следовательно, моментом, требующим тщательного исследования, будет

являться использование адаптивного вейвлета - импульса, извлеченного непосредственно из исходных полевых данных [Артемьев, 2010].

**3 Результаты анализа проекта F3** Для анализа сейсмических данных с применением метода спектральной декомпозиции был использован комплекс программ трехмерной сейсмической интерпретации OpendTest.

Анализ волнового поля заключается в изучении распределения амплитуд по площади. Для построения карты распределения амплитуд, был рассчитан соответствующий стандартный атрибут в интервале времени 20 мс. В совокупности с амплитудным анализом была выполнена акустическая инверсия волнового поля.

Использование стандартных атрибутов анализа волнового поля не приводит к положительным результатам интерпретации, следовательно, необходимо усовершенствовать методику и применить новые технологии динамической интерпретации. Решением этой проблемы является применение технологии спектральной декомпозиции волнового поля, которая позволяет переклассифицировать явление интерференции из класса помехи в класс положительных эффектов.

Результатом применения спектральной декомпозиции по алгоритму непрерывного вейвлет-преобразования может являться разложение волнового поля на серию массивов, описывающих амплитудную характеристику заданных гармоник. Дальнейший анализ результатов спектральной декомпозиции проводится с целью изучения распределения амплитуд различных гармоник вдоль определенного отражающего горизонта или по сейсмическому разрезу.

Алгоритм цветового комбинирования RGB - специальная методика , которая наравне со стандартными подходами к визуализации нашла широкое применение к результатам спектральной декомпозиции. На вход алгоритма подаются три различные амплитудно-частотных характеристики, которые могут быть представлены вертикальными, горизонтальными или структурными срезами амплитудных кубов частотных гармоник. В рамках



алгоритма каждому срезу присваивается свой цвето-код: красный (R), зеленый (G) или синий (B). Причем интенсивность цвета зависит от значения амплитуды. Максимальное значение амплитуды гармоники характеризуется наибольшей насыщенностью, отсутствие амплитуды – черным цветом. Таким образом создаются три цветовых канала, которые описывают поведение амплитуд для трех заданных гармоник [Буторин, 2016].

Следующим шагом необходимо произвести объединение цветовых каналов, таким образом, что выходной срез в каждой точке характеризуется тремя значениями амплитуды, каждому из которых соответствует свой цветовой канал. Цвет полученного на выходе дискрета массива определяется в рамках трехмерного цветового куба, который описывает все цвета путем комбинации красного, зеленого и синего цветовых каналов.

В целях изучения строения блока F3 были рассчитаны наборы кубов амплитуд для отдельных гармоник в диапазоне частот 8-87 Гц с шагом 4 Гц. При реализации спектральной декомпозиции в качестве основного алгоритма был выбран алгоритм непрерывного вейвлет-преобразования.

Тем не менее, в практических целях были рассчитаны спектральные характеристики по алгоритму быстрого преобразования Фурье. Как уже отмечалось ранее, в рамках декомпозиции быстрого преобразования Фурье необходимым условием является использование локального окна расчетов для определения амплитудно-частотных характеристик. В процессе были заданы следующие окна расчета: 20, 32 и 64 мс, в которых для частот 24, 44 и 64 Гц оценивались амплитудные характеристики.

Предположение о большей эффективности непрерывного вейвлет-преобразования для анализа сейсмических данных подтверждаются сравнением разных методик декомпозиции. Применение процедуры непрерывного вейвлет-преобразования позволяет получить корректную оценку спектральных характеристик, что с практической точки зрения приводит к более детальному результату спектрального анализа.

При непрерывном вейвлет-преобразовании определяющим фактором является выбор вейвлета, выступающего базисом разложения функций. В целях определения наиболее оптимального вейвлета было выполнено сравнение трех разложений по сигналам Гусса, Риккера и Морле. В результате были построены спектральные карты по целевому интервалу разреза для следующих значений частотной характеристики – 24, 44 и 64 Гц. Сравнивая результаты, отметим, что наибольшей информативностью с точки зрения выделения геологических объектов для конкретного случая обладает сигнал Риккера по сравнению с сигналами Гаусса и Морле. Учитывая этот факт, дальнейшая процедура непрерывного вейвлет-преобразования осуществлялась с применением именно вейвлета Риккера.

В процессе работы для каждого из RGB-каналов отражающего горизонта Demo 1 → MFS4 были заданы атрибуты. Обычно процедура делается в трех каналах: красном, зеленом и синем. Четвертый верхний канал называется альфа-каналом, в него может быть добавлен еще один атрибут для подчеркивания структурных особенностей, таких как складки или разломы. Для этого канала мы применим атрибут Similarity. За счет атрибута Similarity мы видим наличие крупного разлома. Благодаря применению атрибутов, появляется возможность выделить крупный разлом, простирающийся с юго-востока на северо-запад, а также следы палеорусел [Смирнова, 2021]. Распространение палеорусел на исследуемом участке подтверждает приуроченность неоген-плейстоценовых отложений к дельтовой системе.

Сравнение стандартного и спектрального подходов для области распространения системы палеоканалов в юго-западной и центральной частях площади позволяют отметить низкую степень информативности и применимости стандартного анализа для восстановления внутреннего строения исследуемых отложений. Следовательно, спектральный подход к анализу волнового поля для исследуемого объекта в значительной степени превосходит по информативности стандартные методики анализа волнового

поля. Детальность RGB-карт делает спектральную декомпозицию эффективным инструментом для определения внутреннего строения неоген-плейстоценовых отложений.

**Заключение** В выпускной квалификационной работе рассматривался блок F3, расположенный в голландском секторе Северного моря. Исследуемый блок покрыт съемкой МОГТ- 3D, которая была получена для разведки нефти и газа в верхнеюрских - нижнемеловых слоях. Верхнеюрские-нижнемеловые залегают ниже интервала, выбранного для исследования. Отражения, прослеживающиеся по разрезу выше времен 1200 мс, состоят из горизонтов, связанных с отложениями миоценового, плиоценового и плейстоценового возраста. При написании выпускной квалификационной работы была изучена специальная литература, включающая в себя статьи и учебники, описывающие уникальные геологическое строение и развитие территории, ее тектонические, стратиграфические особенности, нефтегазоносность.

В работе изложены основные теоретические основы метода спектральной декомпозиции волнового поля. Выявлено и доказано преимущество использования алгоритма непрерывного вейвлет-преобразования по сравнению с оконным преобразованием Фурье. В рамках алгоритма непрерывного вейвлет-преобразования показано преимущество использования материнского вейвлета (сигнала) Риккера для решения геологических задач изучения неоген-плейстоценовых отложений исследуемой территории.

Графические представления сейсмических данных получены с помощью комплекса программ трехмерной сейсмической интерпретации OpendTest, позволяющего обрабатывать, визуализировать и интерпретировать различные сейсмические данные с использованием атрибутов и современных методов визуализации. Для предложенной методики спектральной декомпозиции изучен алгоритм цветового комбинирования, рассчитана RGB-палетка, определены значимая полоса

амплитудного спектра и интервалы спектральных компонент. Для каждого из RGB-каналов были рассчитаны и заданы соответствующие атрибуты, на выходе получена карта цветового комбинирования спектральных гармоник. Полученные в ходе исследования результаты применения метода спектральной декомпозиции по выделенному интервалу временного разреза, приуроченному к неоген-плейстоценовым отложениям, проинтерпретированы и проанализированы, сравнены со стандартной методикой анализа сейсмических данных.