

## SPE-202030-RU

# От качественной интерпретации к количественному анализу: прогноз свойств геологических тел с помощью атрибута спектральной декомпозиции на примере ачимовского клиноформного комплекса Западной Сибири

Роман Петрович Волков, Дмитрий Сергеевич Волков, а также Георгий Сергеевич Кожевников, ООО «Лаборатория геологии и моделирования осадочных бассейнов»

Авторское право 2020, Общество инженеров нефтегазовой промышленности

Данная статья была подготовлена для презентации на Российской нефтегазовой технической конференции SPE, которую изначально должна была пройти 12-14 октября 2020 года (Москва, Россия). В связи с эпидемиологической ситуацией в мире, вызванной COVID-19, мероприятие было перенесено на 26-29 октября 2020 года, формат конференции изменен на виртуальный. Официальные материалы конференции были опубликованы для онлайн-доступа 26 октября 2020 года.

Данная статья была отобрана Программным комитетом SPE для представления на конференции на основе информации, содержащейся в представленном авторами реферате. Экспертиза содержания статьи Обществом инженеров нефтегазовой промышленности не выполнялась, внесение исправлений и изменений является обязанностью и ответственностью авторов. Материал в том виде, в котором он представлен, не обязательно отражает точку зрения SPE, его должностных лиц или членов Общества. Электронное копирование, распространение или хранение любой части данной статьи без предварительного письменного согласия SPE запрещается. Разрешение на воспроизведение в печатном виде распространяется только на реферат объемом не более 300 слов; при этом иллюстрации копировать не разрешается. Реферат должен содержать явно выраженную ссылку на авторское право SPE.

# Аннотация

Карта атрибута спектральной декомпозиции является одним из наиболее репрезентативных материалов для геолого-геофизической интерпретации данных сейсморазведки на качественном уровне. Указанная методика с использованием приема RGB-смешивания позволяет уверенно выполнять картирование аномалий сейсмической записи, не проявляющихся при анализе полного спектра сигнала, а также оценивать амплитудный отклик для центральной частоты анализируемого диапазона. Однако возникает вопрос о применимости результатов спектральной декомпозиции в процессе количественной интерпретации материалов сейсморазведки.

На сегодняшний день существует ряд работ, таких как Widess (1973), J.Gridley и G.Partyka (1997), Буторин А.В. (2016), которые указывают на возможность использования результатов спектральной декомпозиции при выполнении количественной оценки мощности выделяемых геологических объектов. Данная задача является актуальной, поскольку позволяет на этапе динамической интерпретации привнести дополнительную информацию, извлеченную из амплитуд ограниченного частотного диапазона. Кроме того, дополнительным преимуществом данной методики является возможность независимой экспресс-оценки количественных параметров геологических объектов.

В данной статье представлен подход для выполнения прогноза мощности песчаника с помощью атрибута спектральной декомпозиции на примере пласта ачимовского клиноформного комплекса одного из месторождений Западной Сибири, который характеризуется сложным распределением песчаного материала и наличием маломощных песчаных линз, не превышающих предельного значения разрешающей способности сейсморазведки.

### Введение

В конце 90-х годов XX века возникла технология спектральной декомпозиции, позволяющая выполнять анализ амплитудных характеристик волнового поля в заданном диапазоне частот (S.Chopra., K.Marfurt, 2005). На данный момент опубликовано множество статей и научных работ, посвященных спектральному анализу волнового поля и аспектам его практического применения. Однако в большинстве производственных отчетов данный атрибут используется в процессе геологогеофизической интерпретации материалов сейсморазведки МОГТ-3D лишь на качественном уровне – наглядность и репрезентативность анализируемых карт позволяет уверенно оконтурить геологические объекты, которые либо не проявляются совсем, либо проявляются существенно хуже при анализе стандартных атрибутов, рассчитанных из данных полного диапазона частот (Буторин А.В., 2016)

В этом случае возникают вопросы: рассматривать ли результаты расчета атрибута спектральной декомпозиции только в виде некоторой амплитудно-частотной характеристики изучаемого разреза, имеющей качественные связи с геоморфологическими особенностями анализируемой стратиграфической поверхности? Или допускается возможность количественных расчетов интерпретируемых геологических объектов, характеризующихся повышенными фильтрационно-емкостными свойствами?

Так, в работах Widess (1973), J.Gridley и G.Partyka (1997), Буторин А.В. (2016) обсуждаются перспективы и предлагаются методики количественной интерпретации карт атрибута спектральной декомпозиции. В целом, их объединяет общий подход – прогноз мощности перспективных геологических объектов, основанный на изучении интерференционного взаимодействия плоской волны от кровли и подошвы маломощного акустически контрастного пласта.

Целью данной работы является практическая реализация подхода по количественному прогнозу мощности коллектора с использованием спектральной декомпозиции, основанная на анализе волновой картины, характеризующей «тонкий» пласт.

В рамках данной статьи описаны теоретические аспекты частотно-временных преобразований, выполнено моделирования волнового поля, представлено решение обратной задачи для модельных данных, которое перенесено на реальные данные МОГТ-3D одного из месторождений Западной Сибири с залежами в ачимовском клиноформном комплексе. Помимо этого, представлена качественная геологическая интерпретация результатов спектральной декомпозиции с привлечением палеогеоморфологического анализа, а также сопоставление прогнозной мощности песчаника ачимовского пласта по предлагаемой методике с традиционным подходом, основанным на инверсионных преобразованиях.

#### Теория

Перед интерпретаторами данных сейсморазведки возникает множество сложностей в процессе изучения геологических объектов малой мощности и тонких пластов. Одна из таких – наличие эффектов конструктивной и деструктивной интерференции при изменяющейся мощности слоя. Так, конструктивная интерференция (тюнинг-эффект) возникает при синфазном суммировании сигнала от кровли и подошвы тонкого пласта, мощность которого составляет <sup>1</sup>/<sub>4</sub> длины волны доминирующего периода сигнала (Widess., 1973). На сейсмическом разрезе удается различить отражения от границ пластов, значения мощности которых в большинстве случаев превышает <sup>1</sup>/<sub>4</sub> длины волны, в то время как тонкий слой проявляется только виде изменения амплитуд. (Saadatinejad et al., 2011) Возникает правомерный вопрос: что считать «тонким» слоем и при каком сейсмическом масштабе исследований?

Применение методики спектральной декомпозиции в этом случае позволяет оценить масштаб мощностей исследуемых объектов на качественном уровне. В статье Partyka (1999) приведен

классический пример использования данного атрибута для определения относительной мощности русловых отложений. Установлено, что «тонкие» участки русла наилучшим образом фиксируется на картах амплитуд спектральной декомпозиции в интервале высоких частотах, в то время как увеличенные мощности русловых отложений наиболее четко отражены в диапазоне низких частот. Laughlin et al. (2002) представили наглядное схематическое изображение данного случая (Рисунок 1). В краевых участках русла, где мощность отложений не велика, тюнинг-эффект наблюдается на спектральной компоненте высоких частот. В центре русла, где мощности достигают максимальных значений, тюнинг-эффект фиксируется на спектральной компоненте низких частот (S.Chopra., K.Marfurt, 2007).



Рисунок 1—Схема, демонстрирующая явление тюнинг эффекта для спектральных компонент на примере модели русла: А) поперечное сечение модели русла, Б) карта спектральной компоненты высоких частот (36 Гц), В) карта спектральной компоненты низких частот (15 Гц)

Кроме того, вовлекаемые в анализ карты амплитуд по спектральным компонентам также имеют между собой отличия, которые объясняются различием математического аппарата при реализации расчета атрибута спектральной декомпозиции. Представим два наиболее используемых подхода – быстрое преобразование Фурье (БПФ) и непрерывное вейвлет-преобразование (CWT).

#### БПΦ

Преобразование Фурье  $F(\omega)$  данных во временной области f(t) имеет математическое представление:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-i\omega t}dt(1)$$
(1)

где t - время.

Переход нестационарного сигнала в частотную область посредством преобразования Фурье демонстрирует его амплитудно-частотную характеристику (спектр). Однако такое преобразование не подходит для анализа сейсмических данных, частотный состав которых не постоянен и изменяется во времени.

Анализ считающихся стационарными в малом окне сейсмических данных и дальнейшее Фурье преобразование каждого сегмента, отображает частотный состав сигнала в данный период времени (Chakraborty and Okaya, 1995; Zabihi and Siahkoohi, 2006). Если рассматриваемое временное окно смещено корректно, имеется возможность оценить частотный состав сигнала и получить двухмерное представление зависимости частот от времени. Это двумерное представление широко известно, как оконное преобразование Фурье (Short Time Fourier Transform). Реализация быстрого преобразования

Фурье основана на этом приеме. Оконное преобразование Фурье  $S(\omega, \tau)$  выражается математически внутренним произведением сигнала f (t) со смещенной во времени оконной функцией  $\phi(t)$ :

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)\overline{\varphi}(t-\tau)e^{-i\omega t}dt$$
<sup>(2)</sup>

где оконная функция  $\varphi(t)$  с центром в момент времени  $t = \tau$ ,  $\tau$  – параметр сдвига,  $\varphi^-$  – комплексно сопряженная функция  $\varphi$ .

### Непрерывное вейвлет-преобразование (CWT)

Непрерывное вейвлет-преобразование (Continuous Wavelet Transform), введенное Morlet et al. (1982), является еще одним методом, используемым для анализа частотных компонент сигнала. В отличие от оконного преобразования Фурье в непрерывном вейвлет-преобразовании используется переменная длина окна. Если длина интервала, в котором оконная функция отлична от нуля, увеличивается, разрешение по времени уменьшается, а разрешение по частоте увеличивается. И наоборот, когда длина интервала уменьшается, разрешение по времени увеличивается, а разрешение по частоте уменьшается, а разрешение по частоте уменьшается, а разрешение по частоте уменьшается, а разрешение по частоте уменьшается. (Mallet, 1999).

Вейвлет-преобразование состоит из вейвлетов, являющихся функциями, определенными как  $\psi(t) \in L^2(\mathbb{R})$  и имеющими нулевое среднее значение, которое локализовано как по времени, так и по частоте (Sinha et al., 2005). Каждый базис вейвлета формируется с помощью расширения и перевода двухпараметрической функции, известной как материнский вейвлет,  $\psi(t)$ . Учитывая базис вейвлета, мы можем представить все функции в базисе с помощью переводов и масштабирования материнского вейвлета

$$\psi_{\sigma,\tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{\sigma}} \psi(\frac{t-\tau}{\sigma}) \tag{3}$$

#### где $\tau \in R$ , $\sigma \neq 0$ , $\sigma$ и $\tau$ параметры масштаба и перевода.

В данной формуле отображено, когда значение  $\sigma$  увеличивается, вейвлет сжимается, его спектр расширяется и максимальная частота сдвигается к более высокому значению. И наоборот, когда вейвлет масштабируется так, что он расширяется, значение  $\sigma$  уменьшается, его спектр сжимается, а максимальная частота сдвигается к более низкому значению (Chopra and Marfurt, 2015). Непрерывное вейвлет-преобразование определяется как внутреннее произведение семейства вейвлетов  $\psi_{\sigma,\tau}(t)$  с сигналом f (t) следующим образом:

$$F_{W}(\sigma,\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{\sigma}} \overline{\psi} \left(\frac{t-\tau}{\sigma}\right) dt$$
(4)

где  $\psi$  является комплексно сопряженным  $\psi$ ,  $F_W(\sigma, \tau)$  - карта шкалы времени. В каждом масштабе (т.е для каждого значения  $\sigma$ ) ядро оператора вейвлета масштабируется с коэффициентом  $1\sigma$  и переводится с помощью параметра  $\tau$  для получения вейвлет-коэффициентов  $F_W(\sigma, \tau)$ .

На практике при выполнении спектральной декомпозиции с применением алгоритма непрерывного вейвлет-преобразования используются следующие импульсы: Morlet, Gaussian и Mexican-Hat.

#### Теоретическая оценка моделирования

Перейдем к теоретической оценке возможностей спектральной декомпозиции посредством моделирования, являющегося в данном случае подготовкой к решению обратной задачи, источником проверки гипотезы и информативности предлагаемой методики. При выполнения данной задачи вполне информативным окажется рассмотрение акустически контрастной модели клина, в которой мощности изменяются в пределах необходимых для исследования значений. Синтезируем эти модели, максимальная временная мощность которых составляет 30 мс, выполнив свертку с импульсами Рикера, Ормсби, Гаусса при равных значениях центральной частоты и их длительности. Для полученных результатов проанализируем амплитудный отклик, волновую картину и возможности восстановления мощностей с использованием теоретических импульсов.

Импульс Рикера представляет собой нуль-фазовый сигнал с центральным пиком и двумя меньшими боковыми лепестками (Рисунок 2 - Рисунок 4(А)). Математически может быть однозначно задан только одним параметром – центральной частотой f (H.Ryan., 1994):

$$A_{Ricker}(t) = (1 - 2\pi^2 f^2 t^2) e^{-\pi^2 f^2 t^2}$$
(5)

Оценка спектра импульса Рикера демонстрирует достаточно широкий диапазон частот (Рисунок 2 - Рисунок 4 (Г)), который оказывает дальнейшее влияние на поведение отклика амплитуд в сейсмической модели клина. Анализ волновой картины рассчитанной модели (Рисунок 2 - Рисунок 4 (Ж)) достаточно прост, что является ее преимуществом, поскольку пиковое значение амплитуды надежно отражает границы клина при мощности, превышающей <sup>1</sup>/<sub>4</sub> периода сигнала. Однако наблюдается отличие в величине порога разрешающей способности. Так, для импульса Рикера с центральной частотой 30 Гц предел разрешающей способности, по теоретической оценке, составляет порядка 8,3 мс, в то время как по результатам моделирования тюнинг-эффект наблюдается при мощности пласта 6,5 мс (Рисунок 2 - Рисунок 4(К)).



Рисунок 2—Применение импульсов: А) Рикера Б) Ормсби В) Гаусса с центральной частотой 20 Гц для выполнения теоретического моделирования. Представлены амплитудно-частотные характеристики анализируемых импульсов: Г) Рикера Д) Ормсби Е) Гаусса; синтезированные модели клина с использованием импульсов: Ж) Рикера З) Ормсби И) Гаусса; амплитудный отклик (выраженный в относительных значениях) от кровли синтетической модели клина, полученной посредством свертки с сигналом К) Рикера Л) Ормсби М) Гаусса



Рисунок 3—Применение импульсов: А) Рикера Б) Ормсби В) Гаусса с центральной частотой 30 Гц для выполнения теоретического моделирования. Представлены амплитудно-частотные характеристики анализируемых импульсов: Г) Рикера Д) Ормсби Е) Гаусса; синтезированные модели клина с использованием импульсов: Ж) Рикера 3) Ормсби И) Гаусса; амплитудный отклик (выраженный в относительных значениях) от кровли синтетической модели клина, полученной посредством свертки с сигналом К) Рикера Л) Ормсби М) Гаусса



Рисунок 4—Применение импульсов: А) Рикера Б) Ормсби В) Гаусса с центральной частотой 40 Гц для выполнения теоретического моделирования. Представлены амплитудно-частотные характеристики анализируемых импульсов: Г) Рикера Д) Ормсби Е) Гаусса; синтезированные модели клина с использованием импульсов: Ж) Рикера З) Ормсби И) Гаусса; амплитудный отклик (выраженный в относительных значениях) от кровли синтетической модели клина, полученной посредством свертки с сигналом К) Рикера Л) Ормсби М) Гаусса

Импульс Ормсби также являются нуль-фазовым (Рисунок 2 - Рисунок 4 (Б)) и определяется при его формировании трапециевидной формой (границы трапеции – частоты f<sub>1</sub>-f<sub>4</sub>) в частотном спектре (Рисунок 2 - Рисунок 4 (Д)). Математически уравнение, описывающее импульс Ормсби, выражается следующим образом (H.Ryan., 1994):

$$A_{Ormsby}(t) = \frac{\pi}{f_4 - f_3} \Big[ f_4^2 \operatorname{sinc}^2(\pi f_4 t) - f_3^2 \operatorname{sinc}^2(\pi f_3 t) \Big] - \frac{\pi}{f_2 - f_1} \Big[ f_2^2 \operatorname{sinc}^2(\pi f_2 t) - f_1^2 \operatorname{sinc}^2(\pi f_1 t) \Big]$$

$$(6)$$

Данный сигнал имеет множество боковых лепестков, что в последствии при моделировании осложняет анализируемую волновую картину. Так, при рассмотрении сейсмической модели клина, синтезированной с помощью импульса Ормсби (Рисунок 2 - Рисунок 4 (3)), наблюдается

множество интерференционных минимумов и максимумов, осложняющих анализ и не позволяющих уверенно проследить положение границ клина. Однако в точках, где наблюдаются явления конструктивной и деструктивной интерференции, пиковое значение амплитуды уверенно отражает искомую границу. При увеличении центральной частоты сигнала пиковые значения амплитуды при больших мощностях клина более уверенно описывают положения границы. Теоретическая оценка предельного значения разрешающей способности для импульса Ормсби с центральной частотой 30 Гц составляет порядка 8,3 мс, по результатам моделирования – 8,25 мс. Данный факт является одним из преимуществ использования данного импульса по причине соответствия мощности модели, равной ¼ периода сигнала, явлению тюнинг-эффекта (Рисунок 2 - Рисунок 4 (Л)).

Импульс Гаусса обладает преимущественно схожими характеристиками с вышеописанным импульсом Ормсби. Сигнал определяется как функция косинуса, демпфированная функцией Гаусса (Рисунок 2 - Рисунок 4 (В)) с шириной, пропорциональной ширине спектра (а) при значении 60% уровня амплитуд. Импульс имеет следующее математическое представление (К. Wawrzyniak., 2009):

$$A_{Gaussian}(t) = e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^2} \cos(2\pi f t) \tag{7}$$

Отличие данного сигнала заключается в наличии меньшего количества боковых лепестков, а также гауссовым распределением огибающей амплитуды и амплитудно-частотного спектра (Рисунок 2 - Рисунок 4 (Е)). Обращаясь к описанию модели, синтезированной с использованием импульса Гаусса (Рисунок 2 - Рисунок 4 (И)), также можно заметить схожесть (Рисунок 2 - Рисунок 4) с вышеописанной сейсмической моделью клина для импульса Ормсби.

Таким образом, исходя из постановки задачи моделирования, существует возможность выбора и использования зондирующего импульса для построения модели. В данном случае и в дальнейшем, основной задачей моделирования является изучение зависимости амплитудного отклика кровли клина от мощности модели при значениях, не превышающих пороговое для разрешающей способности сигнала. Следовательно, в процессе построения сейсмической модели уместно использование как импульсов Ормсби и Гаусса, так и импульса Рикера с последующей полосовой фильтрацией модели или дальнейшем спектральном разложении. Кроме того, допустим подход построения синтетической моделей клина с использованием извлеченных импульсов по кубам спектрального разложения сейсмических данных МОГТ-3D, что будет рассмотрено далее.

#### Моделирование

Выполнение моделирования с использованием полученных импульсов по спектральным компонентам сейсмических данных МОГТ-3D имеет практический интерес в данной работе. Результатом расчета атрибута спектральной декомпозиции является набор кубов с центральными частотами спектрального разложения. Дополнительно при вычислении атрибута регулируется выбор оптимальной ширины полосы спектра.

Так, если в ходе анализа предполагается использование высокочастотных составляющих спектра, то рекомендуется выбор полосы частот на основе октавной шкалы (Рисунок 5). Этот прием используется для устранения эффекта Гиббса, который может вызывать множество ревербераций в волновом поле, амплитуда и количество которых пропорционально крутизне частотного среза. Наиболее часто увидеть данный эффект удается при узкой ширине полосы спектра на высоких частотах.



Рисунок 5—Расчет атрибута спектральной декомпозиции с выбором полосы пропускания на основе октавной шкалы

Для сравнения методик расчёта атрибута спектральной декомпозиции выполнена оценка импульсов в интервале залегания ачимовского клиноформного комплекса на примере кубов высоких частот (40 Гц) с выбором полосы пропускания на основе линейной (Модель А – Рисунок 6 (А)) и октавной (модель Б – Рисунок 6 (Б)) шкалы.



Рисунок 6—Сравнение извлеченных импульсов по кубу спектральной декомпозиции: А) 41 Гц с выбором полосы пропускания частот на основе октавной шкалы (далее 41 Гц) и Б) 40 Гц с выбором полосы пропускания частот на основе линейной шкалы (далее 40 Гц). Представлены: амплитудно-частотные характеристики для полученных импульсов по кубу спектральной декомпозиции: В) 41 Гц Г) 40 Гц; синтезированные модели клина с использованием этих импульсов: Д) 41 Гц Е) 40 Гц; амплитудный отклик (выраженный в относительных значениях) от кровли синтетической модели клина, полученной посредством свертки с сигналом: Ж) 41 Гц З) 40 Гц; отклонение восстановленных значений временной мощности по карте изохрон от истинных для сверточной модели клина сигналом: И) 41 Гц К) 40 Гц

Наглядно представлены различия между синтезированными моделями акустически контрастного сейсмического клина для двух случаев оцененных импульсов, а также амплитудный отклик от кровли клина, выраженный в относительных значениях. Так, при рассмотрении модели А (Рисунок 6 (Д)) наблюдается сложная интерференционная картина – отклик амплитуд от кровли и подошвы пласта имеет несколько высокоамплитудных минимумов и максимумов. Кроме того, корреляция границ клина в данной модели не точно соответствует их реальному положению. Максимум

конструктивной интерференции достигается при значении временной мощности модели 6,25 мс, что совпадает с теоретическими расчетами (Рисунок 6 (Ж, И)).

Для модели Б волновая картина (Рисунок 6 (Е)) характеризуется как слабо интерференционная, отклик амплитуд от кровли и подошвы пласта имеет единственный высокоамплитудный максимум. Корреляция границ клина по пиковому значению амплитуд в данной модели точнее соответствует их реальному положению. Максимум конструктивной интерференции достигается при значении временной мощности модели 6,1 мс - достаточно близким к теоретическому (Рисунок 6 (З, К)).

Дальнейший анализ заключается в оценке импульсов в интервале залегания ачимовского клиноформного комплекса по спектральным составляющим с дальнейшим их использованием при построении акустически контрастных синтетических моделей клина. Выделим в спектральной характеристике исследуемого интервала разреза диапазоны низких средних и высоких частот, в каждом из которых выберем анализируемое значение частоты (Рисунок 7). Соответственно, данные частоты позволяют исследовать акустически контрастные геологические особенности строения разреза в различных сейсмических масштабах: более крупные объекты наиболее точно интерпретируются в зоне низких частот, с сокращением мощности искомых геологических тел или их элементов строения необходимо переходить к анализу более высокочастотных компонент спектра.



Рисунок 7—Амплитудный спектр, рассчитанный в интервале ачимовского клиноформного комплекса. Для дальнейшего исследования выбран кубы атрибута спектральной декомпозиции с центральной частотой 19,4 Гц (условно можно принять 20 Гц), 31 Гц (условно можно принять 30 Гц), 41 Гц (условно можно принять 40Гц).

По этому принципу для дальнейшего исследования выбран кубы атрибута спектральной декомпозиции с центральной частотой 19,4 Гц (условно можно принять 20 Гц), 31 Гц (условно можно принять 30 Гц), 41 Гц (условно можно принять 40Гц). Выбор данных частот основан на вышесказанном утверждении, а также на репрезентативности карты атрибута спектральной декомпозиции с использованием технологии RGB-смешивания.

Определим количественные параметры акустически контрастной модели клина, использованной для получения синтетических временных разрезов. Непосредственно акустическая жесткость для данной модели задана исключительно изменением значений скорости продольной волны, оценка которых проведена по результатам интерпретации геофизических исследований скважин (ГИС). Так, значение интервальной скорости во вмещающих глинистых породах принято равным 4500м/сек, значение скорости пород клина, представленными песчаниками, составляет в среднем 4200м/сек. Максимальная мощность клина составляет порядка 120 м (Рисунок 8). На основе

представленной модели продемонстрированы синтетические разрезы, полученные в результате свертки с извлеченными импульсами для трех центральных частот.



Рисунок 8-Скоростная модель клина

Наблюдаемые максимумы относительной амплитуды вдоль кровли клина для каждой из рассматриваемых центральных частот соответствуют по мощности величине разрешающей способности сигнала (1/4f, с учетом двойного времени, представленном на графиках - 1/2f). При значениях мощности клина, не превышающих порога разрешающей способности, амплитуда убывает как полиномиальная функция. Именно эти мощности песчаника представляют интерес с точки зрения количественного прогноза результатов спектральной декомпозиции (Рисунок 9). Прогноз толщин коллектора, превышающих предельное значение разрешающей способности, в данной статье не рассматривается и может быть вычислен с помощью других интерпретационных приемов.



Рисунок 9—Применение извлеченных импульсов по кубу атрибута спектральной декомпозиции с частотой: А) 19.4 Гц (далее 19.4 Гц) Б) 31 Гц (далее 31 Гц) В) 41 Гц (далее 41 Гц) для выполнения моделирования. Представлены амплитудно-частотные характеристики анализируемых импульсов: Г) 19.4 Гц Д) 31 Гц Е) 41 гц; синтезированные модели клина с использованием импульсов: Ж) 19.4 Гц З) 31 Гц И) 41 Гц; амплитудный отклик (выраженный в относительных значениях) от кровли синтетической модели клина, полученной посредством свертки с сигналом К) 19.4 Гц Л) 31 Гц М) 41 Гц

Опишем функцию отклика относительных амплитуд от изменения временной мощности песчаника вдоль кровли пласта на примере частоты 19,4 Гц.

Для данной частоты величина разрешающей способности с учетом двойного времени составляет порядка 0,025 с. Этому значению соответствует максимум относительной амплитуды вдоль кровли пласта. Также оно является граничным при дальнейшем решении обратной задачи по количественному восстановлению мощности клина.

С целью выполнения перехода к численному решению задачи, аппроксимируем функцию распределения амплитуд полиномом второй степени по методу наименьших квадратов (Рисунок 10).



двойного времени) полиномом второй степени по методу наименьших квадратов

Полученное уравнение уверенно описывает зависимость относительной амплитуды вдоль кровли клина от временной мощности клина, выраженной в двойном времени. Дальнейшая задача сводится к поиску обратной зависимости: необходимо решить полученное квадратное уравнение, один из корней которого является значением функции мощности (с учетом двойного времени) по аргументу относительной амплитуды вдоль кровли клина. Поиск данного решения является некорректной задачей, поскольку отсутствует единственность аналитического решения, что наглядно продемонстрировано на примере амплитудного отклика вдоль кровли синтетической модели клина с центральной частотой 19,4 Гц (Рисунок 11). Так, значению амплитуды 1,6 соответствуют два значения временной мощности клина: 0,015 с и порядка 0,035 с (Рисунок 11). Однако в данном случае благодаря привлечению априорной информации имеется возможность выбрать из двух существующих решений единственное.



Рисунок 11—Пример некорректности решения рассматриваемой обратной задачи: одному значению относительной амплитуды (красная линия значений 1.6) соответствует два значения временной мощности (зеленые пунктирные линии, соответствующие значениям 0.015с и порядка 0.035с с учетом двойного времени)

При выполнении моделирования известна величина мощности, не превышающей порога разрешающей способности сигнала. При апробации расчетов на материалах сейсморазведки МОГТ-3D, априорная информация о значениях максимальной мощности доступна как по карте временных мощностей между кровлей и подошвой отражающих горизонтов (грубая оценка эффективных мощностей песчаника в представлении, что пласт между отражающими горизонтами сложен исключительно песчаниками), так и по данным интерпретации ГИС.

Приведем корректное решение данного уравнения, удовлетворяющее условию задачи:

Временная мощность<sub>*TWT*</sub> = 
$$\frac{143.44 - \sqrt{(143.44)^2 - 4*2503.8*0 \text{тнос.Амплитуда}}}{2*2503.8}$$
(8)

Применение полученной зависимости (8) для восстановления временных значений мощности модели клина имеет положительные результаты – максимальное отклонение составляет 1,9 мс (с учетом двойного времени). При использовании стандартной корреляции кровли и подошвы синтетической модели клина и построении карты временной мощности наблюдается максимальное отклонение 22,5 мс от истинного значения (Рисунок 12). Аналогичные операции выполняются для синтетических моделей с центральными частотами 31 Гц и 41 Гц.



синтетической модели клина (с учетом двоиного времени) с применением аппроксимирующей функции решения и с использованием карты временной мощности

По результатам выполненных преобразований получено три массива данных с информацией о восстановленных временных мощностях модели (с учетом двойного времени), которые необходимо объединить в единый массив. Для решения данной задачи необходимо использовать имеющиеся значения амплитуд и восстановленные значения временной мощности. Обратимся к комплексной амплитудно-частотной характеристике синтетической модели (Рисунок 13).



Рисунок 13—Комплексная амплитудно-частотная характеристика синтетической модели клина, отражающая вклад в определении мощности клина с индивидуальными весовыми коэффициентами

Отметим, что каждая частотная составляющая вносит вклад в определение мощности модели клина с индивидуальным весовым коэффициентом. Так, значение временной мощности клина (с учетом двойного времени) 0,010 с может быть вычислено с использованием всех рассматриваемых частотных компонент. Однако, для каждой центральной частоты данная мощность проявляется в виде различных значений амплитуды. Поэтому необходимо количественное определение влияния каждой анализируемой амплитудно-частотная характеристике на масштаб изучаемого объекта. Пусть h<sub>i</sub> – точка со значением восстановленной искомой временной (с учетом двойного времени) мощности клина, характеризующейся амплитудным откликом A<sub>i</sub> для центральной частоты синтетической модели f<sub>i</sub>. Тогда эффективная временная мощность (с учетом двойного времени) клина может выражаться с помощью следующего закона:

$$H \mathfrak{I} \Phi = \frac{\sum_{i=1}^{3} A_i h_i}{\sum_{i=1}^{3} A_i} \tag{9}$$

Выполненный расчет эффективной мощности модели клина с использованием рассмотренных частотных компонент представлен на Рисунок 14. Максимальная отклонение восстановленных значений мощности от истинных в модели клина составило 1,9 мс с учетом двойного времени.



Рисунок 14—Расчет эффективной мощности синтетической модели клина с использованием набора массивов частотных компонент

Таким образом, на модельных материалах наглядно продемонстрирована и доказана возможность выполнения количественного прогноза по результатам спектральной декомпозиции. Возможно ли использование представленного подхода за рамками синтетических данных? Какие особенности данной методики необходимо учесть при апробации на полевых материалах сейсморазведки МОГТ-3D?

Рассмотрим данные вопросы на примере обозначенного объекта исследования –конуса выноса ачимовского клиноформного комплекса.

### Объект исследования

Объектом исследования данной работы является авандельтовый конус выноса ачимовского клиноформного комплекса одного из месторождений (Х) Западной Сибири. Согласно схеме нефтегеологического районирования месторождение Х расположено в пределах Пур-Тазовской нефтегазоносной области Западно-Сибирского НГБ. На участке месторождения выполнена съемка МОГТ-3D в объеме 520 км<sup>2</sup>, в пределах съемки находится 7 скважин, вскрывших ачимовский клиноформный комплекс.

Ачимовский интервал неокома является объектом изучения многих нефтегазовых и сервисных компаний уже на протяжении многих десятилетий. Данный комплекс характеризуются сложностью строения, невыдержанностью по мощности и гранулометрическому составу пород. (М.В. Букатов., 2018)

По литолого-морфологическим признакам перспективные объекты, представленные песчаными телами, имеют сходные генетические и литолого-петрофизические особенности. На площади месторождения X при комплексном анализе геолого-геофизической информации одного из пластов ачимовского комплекса выделяется объект, интерпретируемый как авандельтовый конус выноса.

При анализе волновой картины наблюдается аномалия, характеризующаяся высокими значениями амплитуд и пониженными значениями частоты. Рассчитанные карты атрибутов огибающей



амплитуды и мгновенной частоты позволяют уверенно оконтурить изучаемый конуса выноса (Рисунок 15 - Рисунок 16).







Рисунок 15—Карта А) изохрон, Б) временной мощности, В) огибающей амплитуды, Г) мгновенной частоты пласта АчХ; Д) временной разрез в интервале залегания пласта АчХ



Рисунок 16—Карта атрибута спектральной декомпозиции, рассчитанная вдоль кровли пласта АчХ

4 из 7 скважин, вскрывших этот объект, подтвердили наличие песчаника и проявления насыщения. Согласно описанию керна, коллектор представлен песчаником серым, мелкозернистым реже крупнозернистым, алевритовым. Мощность песчаного коллектора по результатам интерпретации комплекса ГИС изменяется в диапазоне от 6,7 до 28,1 метра в пределах исследуемого пласта АчХ. В соответствии с принятой средней скоростью песчаника, которая рассчитывалась из акустического каротажа, проведена оценка временной мощности вскрытых песчаных отложений (Таблица 1).

Скважина	Мощность вскрытых песчаных отложений, м	Временная мощность (TWT), с
9	24.5	0.0117
12	28.1	0.0134
14	21.1	0.0100
16	6.7	0.0032
17	0	0
19	0	0
25	0	0

#### Таблица 1—Априорная информация для изучаемого конуса выноса по комплексу ГИС

Кроме того, в пределах съемки имеются 3 скважины, не вскрывшие песчаный коллектор – соответственно они могут являться своего рода проверкой результата представленной методики.

#### Качественная интерпретация результатов спектральной декомпозиции

Элементы клиноформной толщи бокового заполнения бассейна в целом разделяются на ундаформу, клиноформу и фондоформу. Собственно, клиноформный склон сложен глинистыми породами, а ундаформная и фондоформная части представлены чередованием песчаных и глинистых пачек. Фондоформеные песчаники объединяются под названием «ачимовская толща». Предполагается, что они формируются в период активизации сноса материала, часть которого мутьевыми потоками сносится к подножию склона, не задерживаясь на склоне (Бейзель А.Л., 2010).

В Западной Сибири вместо этих специальных терминов используются категории шельфа (мелководная часть) – ундаформа, склона – клиноформа и подножия склона (глубоководная часть) – фондоформа. В зоне ундаформы осадконакопление происходило в мелководно-морских условиях, в зонах клиноформы и фондоформы – в относительно глубоководных участках, до 500 м (в пределах изучаемой площади около 300-350 м).

Термины – унда-, клино- и фондоформа для трехмерных геологических тел использовать не следует, правильнее называть выделяемые участки комплекса унда-, клино- и фондотемами (Нежданов А.А., 2000).

Для выявления границ палеорусловых тел и, как следствие, возможных литологических ловушек выполнен комплексный геолого-геофизический анализ сейсмических атрибутов и результатов спектральной декомпозиции.

Анализ общих толщин комплексов показывает, что общая толщина максимальна в клинотеме и достигает в депоцентрах сейсмокомплекса АчХ 56 м. В дистальной части клинотемы толщины комплекса сокращаются.

Таким образом, можно заключить, что ачимовские песчаные комплексы сформированы при активном вдольбереговом разносе осадков, поступающих в глубоководную часть бассейна из единого (авандельтового) источника питания обломочным материалом. Такой вывод является традиционным при генетических реконструкциях рассматриваемых отложений (Нежданов А.А., 2000). Наиболее перспективными зонами являются зоны повышенных толщин (депоцентры) ачимовских песчаников, связанные с разгрузкой авандельтовых осадков. На этих участках увеличиваются значения эффективных толщин и улучшаются коллекторские свойства (Рисунок 17)



Рисунок 17-Карта мощности пласта АчХ с элементами интерпретации

Для уточнения строения ачимовских клиноформенных отложений и локализации песчаных тел был использован метод идеального седиментационного тренда, (Нежданов, 2017).

Метод идеального седиментационного тренда заключается в анализе отклонений мощности клиноформенных отложений от идеальной мощности, построенной с учетом допущения одинаковых условий осадконакопления вдоль всей береговой линии. Одинаковые условия осадконакопления включают в себя одинаковую скорость привноса осадочного материала, единый профиль палеодна и единую скорость погружения вдоль направления потока осадочного материала. Отклонения фактической мощности осадочного комплекса от идеального тренда в меньшую сторону трактуются как области седиментационного голодания, тогда как в положительную – как локальные депоцентры, в которых ожидается повышенная мощность песчаных интервалов (Нежданов, 2017).

Для построения идеального седиментационного тренда для каждого интервала согласно методике, описанной в (Нежданов, 2017) была построена упрощенная идеальная береговая линия, которая потом клонировалась в направлении, параллельном направлению сноса материала и каждой полученной изолинии присваивалось значение, принятое на основе сглаженной карты мощности данного интервала.

Карта локальных составляющих толщин пласта АчХ приведена на Рисунок 18.



Рисунок 18—Карта локальных составляющих толщин в интервале пласта АчХ

В данном интервале выделяется три основных области, связанных с депоцентрами накопления песчаных отложений. Две из них располагаются в юго-западной и северо-восточной части площади и имеют северо-восточное простирание, их генезис предположительно связан с континентальной русловой системой и с накоплением континентальных мелководных песчаников вдоль береговой линии. Третья область расположена в северо-западной части площади в пределах границы фондотемы и связана с отложениями глубоководного конуса выноса, сформировавшегося как результат переноса осадочного материала речной системой. Между мелководной зоной депоцентров и глубоководным конусом выноса отмечается область пониженных мощностей, связанная с транзитной зоной в склоновой части морского дна.

Таким образом, рассматриваемый глубоководный конус выноса имеет следующие палеогеоморфологические особенности: шельфовая область, склон, глубоководная область, основной подводящий канал и конус выноса. Накопление песчаных тел конусов выноса происходило в моменты максимальных регрессий, когда мелководная часть шельфа осушалась, и на склоне относительно глубокой впадины начинали действовать процессы массопереноса, выраженные в виде оползней, грязевых потоков и турбидитовых течений. Каналы и протоки, по которым перемещался

обломочный материал в глубоководную впадину также хорошо отображаются в волновом поле. В этапы трансгрессий в бассейн поступал преимущественно глинистый материал, поэтому песчаные тела ачимовских конусов выноса разделены глинистыми породами (Рисунок 19).



Рисунок 19-Фациальная схема отложений пласта АчХ

#### Методология расчетов

Рассмотренная на синтетических данных методика прогноза количественных характеристик геологического строения разреза по результатам спектральной декомпозиции предназначена для контрастных объектов в поле акустического импеданса. Исследуемое песчаное тело, интерпретируемое как авандельтовый конус выноса ачимовского клиноформного комплекса, удовлетворяет этому условию. Но существуют некоторые отличия объекта исследования от теоретических представлений, которые необходимо определить в качестве допущений.

Построение ранее представленной сейсмической модели клина основано на однородности литологического состава и физических свойств вмещающих пород и пород клина. Интерпретация отражающих горизонтов кровли и подошвы изучаемого пласта также подразумевает в себе прослеживание кровли и подошвы песчаных отложений. Однако известно, что коллекторы ачимовского интервала разреза представлены переслаиванием песчано-глинистых пропластков, что означает неоднородность литологического состава и физических свойств модели клина в приближении к полевым материалам.

Здесь также необходимо учесть выполнение исследования в сейсмическом масштабе, не превышающем предельное значение разрешающей способности. В данном случае рассматриваемая среда является микроскопически неоднородной, но макроскопически – однородной средой с эффективными свойствами. Таким образом, задача по количественному прогнозу результатов спектральной декомпозиции сводится к поиску эффективной мощности песчаных тел (Нэфф) в разрезе ачимовского клиноформного комплекса.

**19,4** Ги. Для частоты 19,4 Гц согласно информации по моделированию значение предела разрешающей способности (с учетом двойного времени) составляет порядка 0,025 с. Выполнив сравнение этой величины с априорной данными ГИС (Таблица 2), возможно предположить, что мощность интерпретируемого авандельтового конуса выноса в межскважинном пространстве, вероятнее всего, не превысит значение порога разрешающей способности данного сигнала. Следовательно, при существующих значениях мощности для центральной частоты сигнала 19,4 Гц величины амплитуд не достигнут максимума конструктивной интерференции как при рассмотрении синтетической модели клина, так и карты атрибута спектральной декомпозиции.

Скважина	Значения амплитуды вдоль кровли пласта АчХ, у.е.	Мощность вскрытых песчаных отложений, м	Временная мощность (с учетом двойного времени) при Vp=4200м/c, c	Относительные амплитуды модели клина, у.е.
12	191.712	28.1	0.0134	1.5029
16	73.3	6.7	0.0032	0.4557
14	215.3	21.1	0.0100	1.2288
9	157.8	24.5	0.0117	1.3703
Априорная информация	0	0	0.0000	0.0000

Таблица 2—Сопоставление модельных и реальных амплитуд

Непосредственное выполнение работы с картой атрибута спектральной декомпозиции предусматривает предварительный статистический анализ значений амплитуд робастным методом. Преимущество данной процедуры заключается в возможности выявить «выбросы» - значения, выделяющиеся из общей выборки и влияющие на последующие операции с амплитудами. После вычисление значений «внешних границ» массива данных амплитуд, превышающие значения удаляются из анализа. Кроме того, положительные значения амплитуд не удовлетворяют условиям

применяемой методики и принимаются равными нулю. Карта атрибута спектральной декомпозиции подготовлена к дальнейшим вычислениям.

Однако возможность пересчета карты амплитуд для частоты 19,4 Гц (Рисунок 20) вдоль кровли изучаемого пласта АчХ с использованием полученной функции решения в главе моделирование невозможна по причине несоответствия уровней амплитуд синтетических и полевых сейсмических данных. В таком случае предлагается реализация подхода по приведению карты амплитуд с центральной частотой 19,4 Гц к уровню величин относительных амплитуд синтезированной модели. Стандартная нормировка с использованием максимального и минимального значений амплитуды невозможна ввиду отсутствия информации о максимальной величине амплитуды на карте атрибута спектральной декомпозиции. Поэтому предлагается выполнение оценки значений карты амплитуд в районе пластопересечения со скважинами, вскрывающими тело авандельтового конуса выноса. (Таблица 2) Кроме того, исходя из априорной информации по модельным данным, имеется дополнительная возможность добавления в кросскорреляционную связь точки со значением амплитуды 0, которой соответствует отсутствие эффективной мощности песчаника.



Рисунок 20—Карта амплитуд (куб 19,4 Гц) вдоль кровли пласта АчХ

Перейдем к нахождению нормировочного коэффициента. Для этого необходимо оценить зависимость относительных модельных амплитуд вдоль кровли клина от значений амплитуд карты атрибута спектральной декомпозиции вдоль кровли пласта АчХ (Рисунок 21). Как подчеркивалось ранее, для модельных и полевых данных распределение значений амплитуд для соответствующих им мощностей, не превышающих <sup>1</sup>/<sub>4</sub> периода сигнала, в идеализированном представлении описывается полиномом второй степени. Следовательно, между двумя массивами данных существует линейная зависимость, которая является нормировочным коэффициентом для карты атрибута спектральной декомпозиции (Рисунок 22). Приведение значений амплитуд к единому диапазону позволяет осуществить дальнейший расчет временной мощности песчаных отложений с использованием ранее полученной зависимости (8) по результатам моделирования (Рисунок 23).



Рисунок 21—Кросскорреляционная зависимость модельных значений относительной амплитуды и модуля амплитуды по карте атрибута спектральной декомпозиции вдоль кровли пласта АчХ



Рисунок 22—Карта нормированных значений амплитуды вдоль кровли пласта АчХ



Рисунок 23—Карта временной мощности (с учетом двойного времени) песчаных отложений пласта АчХ для частоты 19.4 Гц

Сравнение результатов карты восстановленных значений временной мощности для центральной частоты 19,4 Гц со скважинными данными представлено в таблице 3.

Скважина	Временная мощность (при скорости 4200м/с) (TWT), с	Восстановленные временные мощности (TWT), с	Мощность вскрытых песчаных отложений, м
12	0.0134	0.012	28.1
16	0.0032	0.004	6.7
14	0.0100	0.014	21.1
9	0.0117	0,009	24.5
17	0	0.001	0
25	0	0.001	0
19	0	0	0

Габлица 3—Контроль качества полученных результато	Габлица	3—Контроль	качества	полученных	результатов
---	---------	------------	----------	------------	-------------

Максимальное отклонение в определении временной мощности от скважинных данных составляет 2 мс.

Анализ результатов карт спектральных компонент на этом не заканчивается. Для выявления и количественного описания более маломощных объектов необходимо выполнить аналогичную последовательность действий при рассмотрении карт атрибута спектральной декомпозиции с центральной частотой 31 Гц и 41 Гц.

Однако основное отличие при выполнении операций с картами заключается в использовании карты значений восстановленных временных мощностей, полученной на предыдущем этапе исследований. Так, при значениях восстановленной временной мощности в межскважинном пространстве, равных и превышающих <sup>1</sup>/<sub>4</sub> периода сигнала, возможно выполнение анализа карты атрибута спектральной декомпозиции с центральной частотой компоненты до граничного значения ее разрешающей способности. Кроме того, для величины восстановленной мощности, соответствующей <sup>1</sup>/<sub>4</sub> периода сигнала, предполагается достижения максимального значения амплитуды на карте атрибута спектральной компоненты. Таким образом, нормировка данной карты может быть выполнена с использованием двух значений:

- 1. Отклик амплитуды со значением 0 при отсутствии эффективных мощностей песчаника;
- Исключив область неоднозначности решения обратной задач, имеется возможность сопоставить максимальные значения амплитуд для модельных и реальных данных при эффективной мощности песчаника, составляющей <sup>1</sup>/<sub>4</sub> периода волны.

В результате, по завершении рассмотрения анализируемых карт атрибута спектральной декомпозиции получено три массива данных восстановленных значений временной мощности (с учетом двойного времени), которые необходимо объединить в единый массив (Рисунок 24). Для этого предлагается использовать методику (9), рассмотренную в главе моделирование на примере синтетических данных.



Рисунок 24—Прогнозируемые карты мощности песчаных отложений с использованием карт атрибута спектральной декомпозиции на различных частотах

## Результаты

Результатом проведенной работы является прогнозная карта временной мощности песчаника пласта АчХ ачимовской толщи (Рисунок 25). Полученная карта отражает все основные геологические объекты в интервале залегания пласта: повышенными значениями интервальных времен отчетливо выделяется авандельтовый конус выноса с подводящим каналом пласта АчХ, а также более мелкие эрозионные врезы на склоне.



Рисунок 25—Прогнозная по результатам спектральной декомпозиции карта временной мощности песчаника пласта АчХ

Для перехода из временных мощностей к истинными был проанализирован весь набор имеющихся скоростей: куб интервальной скорости по результатам глубинной миграции на этапе обработки, карта интервальных скоростей пласта АчХ по каротажным данным, результаты синхронной инверсии (отношение куба Zp к кубу плотности в интервале залегания пласта). Каждый набор скоростей был использован для получения истинных мощностей и проанализирован на предмет сопоставления с результатами бурения: наименьшими погрешностями характеризуются преобразования из интервальных времен в мощности по инверсионным преобразованиям (Рисунок 26). Результаты преобразований по карте интервальной скорости из каротажных данных также близка к результатами прогнозной карты мощности с использованием куба интервальных скоростей из глубинной миграции может объясняться недостаточной расчленённостью полученного куба, что, в целом, является ожидаемым результатом.



Рисунок 26—Карта среднего значения интервальной скорости пласта АчХ (слева) и временной разрез куба интервальной скорости в интервале залегания пласта АчХ по результатам инверсионных преобразований (справа)

Результаты преобразования карты временной мощности песчаных отложений пласта АчХ в мощности песчаника с использованием куба интервальных скоростей по результатам инверсионных преобразований представлены на Рисунок 27. Количественной оценкой качества выполненного прогноза стал расчет стандартного отклонения прогнозной мощности песчаника от скважинной информации, которое составило 4.72 м (Таблица 4). Дополнительной оценкой качества проделанной работы стало сопоставление карты прогнозной мощности песчаника пласта АчХ по результатам спектральной декомпозиции, представленной в настоящей работе, с мощностью песчаника по результатам инверсионных преобразований, которые являются одним из основных методик количественного прогноза (Рисунок 28). На площади работы была получена надежная зависимость мощности песчаника по результатам спектральной пласта от средних значений акустического импеданса (Рисунок 29), что позволило получить карту Н эфф. из куба акустического импеданса. Карты мощности песчаника по результатам спектральной декомпозиции и по акустической инверсии сопоставимы, однако количественная оценка погрешностей двух независимых методик, основанная на расчете стандартного отклонения, показала преимущества прогноза по результатам спектральной декомпозиции по сравнению со стандартной методикой инверсионных преобразований (Таблица 4).



Рисунок 27—Прогнозная по результатам спектральной декомпозиции карта мощности песчаника пласта АчХ



Рисунок 28—Карта средних значений акустического импеданса пласта АчХ (слева) и разрез акустического импеданса в интервале залегания ачимовских отложений (справа)



Рисунок 29—Зависимость мощности песчаника от акустического импеданса пласта АчХ

№ скв.	Hadada H (no	Акустическая инверсия		Спектральная декомпозиция	
	Н эфф, м (по результатам бурения)	Н эфф, м	Разница с результатами бурения, м	Н эфф, м	Разница с результатами бурения, м
9	24.5	24.47	0.03	19.85	4.65
12	28.1	20.92	7.18	21.33	6.77
14	21.1	24.07	-2.97	21.93	-0.83
16	6.7	4.76	1.94	7.78	-1.08
17	0	5.57	-5.57	4.64	-4.64
19	0	-5.06	5.06	2.75	-2.75
25	0	5.67	-5.67	6.14	-6.14
Стандартное отклонение, м			5.05		4.72

#### Таблица 4—Сопоставление прогнозной мощности песчаника пласта АчХ по результатам инверсионных преобразований и по результатам спектральной декомпозиции

## Выводы

По результатам проведённой работы на примере одного из пластов ачимовской толщи предложена методика использования результатов спектральной декомпозиции для прогноза мощности песчаника. Предложенная методика может быть использована как совместно с традиционными методами количественной динамической интерпретации, так и отдельно от них: когда, например, результаты инверсионных преобразований не могут быть напрямую использованы для количественного прогноза.

К основным преимуществам предложенной методики стоит отнести возможность получения карт прогнозной временной мощности песчаника по невскрытым скважинами объектам, несмотря на возникающие в этой ситуации трудности с нормировкой амплитуд. Кроме того, имеются предпосылки успешной апробации представленного подхода на малоизученных и, вероятно, не изученных бурением площадях с применением комплекса определенных интерпретационных техник.

Также необходимо отметить, что одним из преимуществ рассмотренной методики является минимальный объем входных данных, который по существу позволяет получить результат, практически независимый от качества и количества исходной информации. Исключением в данном случае могут являться только качество сейсмических материалов и корреляции отражающих горизонтов. Таким образом, получаемый результат имеет основания рассматриваться в процессе динамической интерпретации сейсмических данных как дополнительный источник информации о фильтрационно-емкостных свойствах пласта.

В рассмотренном примере результаты прогноза мощности песчаных отложений пласта АчХ по атрибуту спектральной декомпозиции оказалась точнее прогноза, выполненного с помощью инверсионных преобразований, что, по сути, переводит метод спектральной декомпозиции из разряда качественного атрибутного анализа в полноценную методику количественного прогноза емкостных свойств пласта.

## Благодарности

Авторы статьи выражают благодарность за консультации, предоставление материалов, а также технической и профессиональной поддержки в процессе написания работы:

- 1. **ООО** «Центр «ГеоГрид» (г. Москва) в лице генерального директора, к.г-м.н, Болотова С.Н. и первого заместителя генерального директора по производству Милецкой Г.В.
- 2. **ООО** «Газпромвьет» (г. Москва) в лице генерального директора Красникова И.Ю. и главного геолога заместителя генерального директора Денисова Ю.И.

# Список литературы

- 1. Бейзель А.Л. Тектоно-седиментационный комплекс основная надпородная единица строения осадочного чехла. Концептуальные проблемы литологических исследований в России: Материалы 6-го Всероссийского литологического совещания, Казань, 2011.
- Буторин А.В. Изучение детального строения ачимовского нефтегазоносного комплекса на основе спектральной декомпозиции сейсмического волнового поля - Текст диссертации, Санкт-Петербург, 2016
- М.В. Букатов, Д.Н. Пескова, М.Г. Ненашева, С.А. Погребнюк, Г.М. Тимошенко, Д.В. Солодов, В.В. Жуков, А.С. Бочков, Г.В. Волков, А.А. Вашкевич. Ключевые проблемы освоения Ачимовских отложений на разных масштабах исследования // PROHEФТЬ. Профессионально о нефти. — 2018 — № 2(8). — С. 16-21.
- 4. Нежданов А.А. Геологическая интерпретация сейсморазведочных данных: курс лекций. ТИУ, Тюмень, 2017.
- 5. Нежданов А.А., Пономарев В.А., Туренков Н.А., Горбунов С.А. Геология и нефтегазоносность ачимовской толщи Западной Сибири. Издательство Академии горных наук, Москва, 2000.
- 6. Chakraborty, A., and Okaya, D.: Frequency-time decomposition of seismic data using waveletbased methods, Geophysics, 60, 1906-1916, 1995.
- 7. Chopra, S., and Marfurt, K.: Is curvature overrated? No, it depends on the geology, First Break, 33, 45-55, 2015.
- 8. Chopra, S., and Marfurt, K.: Seismic attributes for prospect identification and reservoir Characterization, SEG Geophysical Development Series 11, 327–35, 2007.
- 9. Chopra, Satinder & Marfurt, Kurt. (2005). Seismic attributes A Historical Perspective. Geophysics. 70. 3-. 10.1190/1.2098670
- 10. Continous Wavelet Transform, and S Transform. 6th International Conference and Exposition on Petroleum Geophysics, Kolkata, 662-666, 2006.
- 11. Harold Ryan.: Ricker, Ormsby, Klander, Butterworth A Choice of Wavelets. CSEG Recorder, Vol. 19, Issue No. 07 (September1994).
- 12. Laughlin, K., Garossino, P., and Partyka, G.: Spectral decomposition applied to 3D, AAPG Explorer. 23, 28-31, 2002
- 13. Morlet, J., Arens, G., Fourgeau, E., and Glard, D.: Wave propagation and sampling theory-Part I: Complex signal and scattering in multilayered media, Geophysics, 47, 203–221, 1982.
- 14. Partyka, G. A., Gridley, J., and Lopez, J.: Interpretational applications of spectral decomposition in reservoir characterization, The Leading Edge, 18, 353–360, 1999.
- 15. Saadatinejad, M.R., Hassani, H., and Javaherian, A.: Representation of the thickness distribution of channels and stratigraphic events at one of the Iranian field in the Hormuz strait using a composite plot and RGB display technique, Journal of Geophysics and Engineering, 8, 412-421, 2011, doi:10.1088/1742-2132/8/3/002
- 16. Sinha, S., Routh, P.S., Anno, P.D., and Castagna, J.P.: Spectral decomposition of seismic data with continuous-wavelet transform, Geophysics, 70,19-25, 2005.
- 17. Wawrzyniak, Kamila. (2009). Application of time-frequency transforms to processing of full waveforms from acoustic logs. Acta Geophysica. 58. 49-82. 10.2478/s11600-009-0043-4.
- 18. Widess, M.B., 1973, How thin is a thin bed, Geophysics, 38, 1176-1180
- 19. Zabibi, N.E., and Siahkoohi, H.R.: Single frequency seismic attribute based on Short Time Fourier Transform.