

Мультиатрибутный анализ сейсмических данных – решение проблемы нелинейности

Multi-attribute seismic analysis – tackling non-linearity

Сатиндер Чопра[†], Даг Пруден[‡], Владимир Алексеев[†]
Satinder Chopra[†], Doug Pruden[‡], Vladimir Alexeev[†]

AVO инверсия с целью получения параметров Ламе ($\lambda\rho$ и $\mu\rho$) стала обычной процедурой, которая служит увеличению возможности распознавания зон коллекторов. Кроме того, интеграция кубов атрибутов, получаемых при AVO-анализе с другими кубами сейсмических атрибутов, получаемыми не по данным AVO, может обеспечить значимую геологическую информацию при привязке к скважинным данным и проверке правильности корреляции с петрофизическими свойствами. Расчет коллекторских свойств с целью определения математической взаимосвязи между переменными, полученными по данным каротажа, например, обычно выполняется с помощью нелинейного детерминантного анализа с несколькими переменными, используя нейронные сети. В этой работе изложены результаты сейсмической съемки 3D в южной Альберте, Канада, на примере которой впервые был применен вероятностный подход к атрибутам AVO в теории нейронных сетей (Pruden, 2002, Chopra & Pruden, 2003). Используя кривые гамма каротажа, акустического каротажа и кривой объемной плотности на интересующем участке, были получены обращения гамма каротажа и кривой объемной плотности по кубам атрибутов 3D. Эта методика оказалась успешной в двух скважинах, был получен новый газовый коллектор, который не только продлил жизнь газового месторождения, но также, выявил новые запасы.

Позже для выполнения той же задачи, вместо нейронных сетей был применен другой математический подход с использованием кубического b-сплайна. Результаты оказались схожими, это говорит о том, что кроме нейронных сетей, кубические b-сплайны могут использоваться в качестве инструмента для работы с нелинейными эффектами при выполнении мультиатрибутного сейсмического анализа.

Обращение AVO параметров в коэффициенты Ламе

Целевым объектом исследования был нижнемеловой речной канал, заполненный глауконитом, который откладывался в пределах системы врезанных долин. Сейсмическая съемка 3D проводилась с целью построения стратиграфической модели, согласованной с доступными скважинными данными и характеристиками добычи. Конечной целью был поиск неразработанных потенциальных объектов, в пределах газонасыщенных песчаников. Месторождение разрабатывается с начала 1980-х, а две из самых ранних и наиболее богатых эксплуатационных скважин начали обводняться. Поскольку цель была по своей природе стратиграфическая, прилагались все усилия для сохранения относительных амплитуд в области удалений для проведения последующего анализа AVO атрибутов при обработке сейсмических данных.

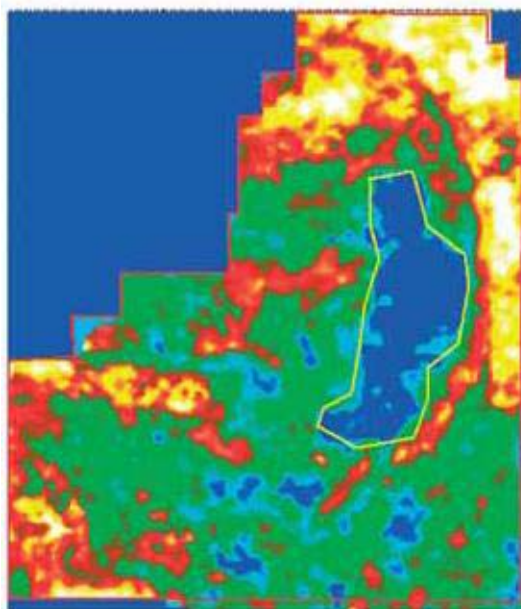


Рис 1а Временной срез Λ - ρ отображающий предполагаемую газовую аномалию. Низкие значения Λ - ρ показаны голубым. Красный полигон включает в себе все реальные данные на обоих временных срезах. Желтым полигоном обозначена предполагаемая аномалия.

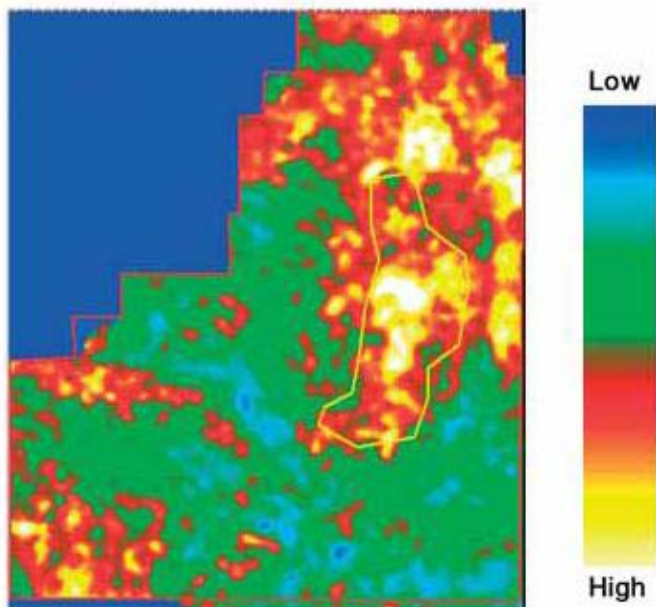


Рис 1б Временной срез μ - ρ , отображающий предполагаемую газовую аномалию. Высокие значения μ - ρ показаны желтым и красным. Красный полигон включает в себе все реальные данные на обоих временных срезах. Желтым полигоном обозначена предполагаемая аномалия.

[†]ранее в Core Lab Reservoir Technologies, Calgary

[‡]ранее в GEDCO, Calgary, ныне в Nose Creek Geophysical Inc., Calgary.

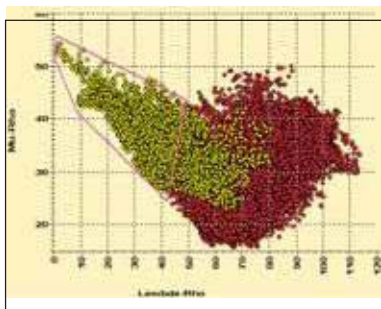


Рис 1с Кроссплот параметров Λ - ρ и μ - ρ . На кроссплоте показаны желтые точки, соответствующие низким значениям Λ - ρ и высокие значения μ - ρ , которые ожидаются в случае присутствия газовой аномалии. Фиолетовый полигон включает в себя точки кластера, соответствующие аномалии и выделяет аномалию на временных слайсах (не показано).

Литологию и информацию о поровом флюиде в целевом горизонте можно изучать в обозначениях, принятых при анализе параметров Λ - ρ и μ - ρ (Goodway, 2001) где Λ , μ и ρ - сжатие, жесткость и плотность, соответственно. Для начала были оценены характеристики коэффициентов отражения Р-и S-волн в приближении Фатти уравнений Цеппритца. Отношение V_p/V_s для данных было оценено с использованием данных двухполюсного акустического каротажа, который проводился вблизи области исследований. Коэффициенты отражения связаны с параметрами Ламе сжатия (λ) и

жесткость (μ) соотношением $\lambda\rho = I_p^2 - 2I_s^2$ и

$\mu\rho = I_s^2$ где ρ - объемная плотность. Параметры Ламе нельзя извлечь напрямую без оценки параметра плотности.

На рисунках 1 (а) и (b) показаны разрезы Λ - ρ и μ - ρ с аномалией, заключенной в полигоне желтого цвета. Красный полигон указывает на все точки реальных данных на временном срезе, которые приведены на кроссплоте Λ - ρ как функции μ - ρ . Кроссплот этих двух атрибутов показан на Рис.1 (с), желтыми точками обозначены значения в пределах желтых полигонов на рисунках 1 (а) и (b). Вдобавок к определению газонасыщенных песков, по этим данным можно получить ценную литологическую информацию.

Определение нелинейных связей между параметрами каротажных кривых

Измеренные параметры по каротажным кривым, такие как скорость Р-волн, S-волн, плотность, пористость и параметры гамма каротажа обычно выводятся в виде кросс-плота для анализа кластерных моделей различного типа литологии. В зависимости от формы этих кластеров, для пары атрибутов на кроссплоте можно определить линейные или нелинейные зависимости, а затем их использовать при преобразовании сейсмических атрибутов в необходимые свойства коллекторов. Иногда, форма кластеров или рассеяние отдельных точек на кроссплоте не дают точно определить математическую взаимозависимость. Примером чему может быть линейная аппроксимация для практически кругового расположения точек или нелинейная аппроксимация для кластера неправильной формы.

Пусть кривые каротажа на данном участке являются диагностическим признаком песков, кривые гамма каротажа имеются для всех скважин и имеется достаточно равномерное покрытие скважинами месторождения, был предложен детерминистский подход, позволивший количественно соотнести измеренные сейсмические атрибуты с данными гамма каротажа. Простой анализ взаимосвязи значений кривых гамма каротажа и акустического импеданса говорит о том, что, несмотря на видимую взаимосвязь между двумя кривыми, она точно не является линейной. Дальнейший анализ зависимости других атрибутов и кривых гамма каротажа привел к похожим результатам.

Использование нейронных сетей

Детерминантный нелинейный анализ для нескольких переменных между получаемыми многочисленными кубами сейсмических атрибутов и измеренными значениями кривой гамма каротажа в скважинах – задача, идеально подходящая для нейронных сетей. Путем обучения нейронной сети на статистически представительной популяции целевых каротажных откликов и имеющихся многочисленных кубах сейсмических атрибутов по каждой скважине, можно рассчитать нелинейное много-атрибутное преобразование с целью выполнения обращения куба намеченных данных (Hampson et al, 2001, Leiphart and Hart, 2001).

Используя кривые гамма каротажа, кривые акустического каротажа и кривую объемной плотности, которые имеются для изучаемого района по 16 скважинам, для выполнения обращения кубов данных 3D по кривым гамма каротажа и объемной плотности, была применена нейронная сеть. Результат инверсии гамма каротажа показан на горизонтальном срезе на Рисунках 2 (тот же срез, который был показан нами ранее). Данные перемасштабируются в единицы скорости счёта при гамма-каротаже Американского нефтяного института на Рисунке 2 и преобразуются в пористость на Рисунке 3, используя следующее стандартное линейное соотношение с плотностью.

$$\rho_b = \phi\rho_f + (1-\phi)\rho_{ma}$$

где ρ_b = объемная плотность
 ϕ = пористость
 ρ_{ma} = чистый пласт с известной плотностью матрикса
 ρ_f = флюид со средней плотностью

Исходя из каротажных данных, области с гамма значениями, меньшими 50 API гамма единиц, интерпретируются как каналы, заполненные песком. Это граничное значение было использовано для маскировки обращенных значений плотности для ила и глин. Анализ рисунков 2а и 2b указывает на явное присутствие трех каналов, содержащих песок.

Использование кубических b-сплайнов

Сплайновые кривые (или математическое представление аппроксимирующих кривых в форме полиномов) были использованы с разной степенью точности в зависимости от компромисса между сложностью изображения и универсальностью пространства кривых, которыми они характеризуются. Вместо того чтобы располагать сплайны во всех точках кластера, можно задавать контрольные точки на кроссплоте, на основе допущения о том, что человеческий глаз может устанавливать форму аппроксимирующего сплайна. В-сплайны – это аппроксимирующие сплайновые кривые с тем преимуществом, что степень полинома

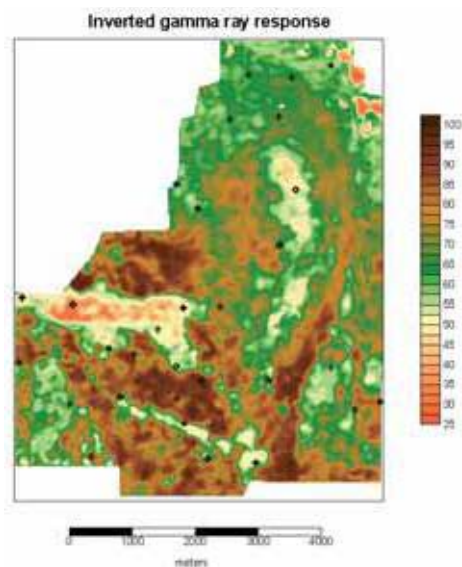


Рисунок 2 Обращенный гамма отклик на основе нейронных сетей. Отметим четкое отделение от ила и глин.

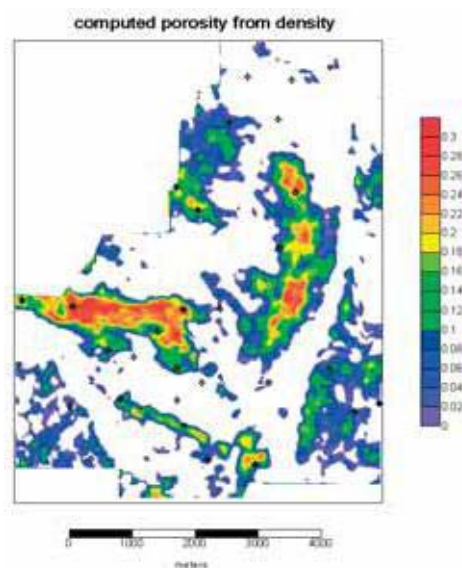


Рисунок 3 Пористость, рассчитанная по обращенным значениям плотности с помощью нейронных сетей. Для значений гамма значения плотности, соответствующие илу и глине были замаскированы, они являются индикатором относительной пористости песков.

не зависит от числа точек и его форма регулируется локально, регулировка одной точки не требует общей реконструкции кривой. Конечно, дополнительная сложность расчетов может показаться недостатком. В наших расчетах мы предполагаем, что данные являются отсчетами полиномиальной функции двух переменных, при этом отсчеты случайным образом распределены в области функции и между отсчетами нет известной связи. Набор контрольных точек помечен на кластере и кубические b-сплайны используются минимум с четырьмя ближайшими точками, затем они сдвигаются на один отсчет одновременно, окончательно объединяя составные сплайны из 4 точек.

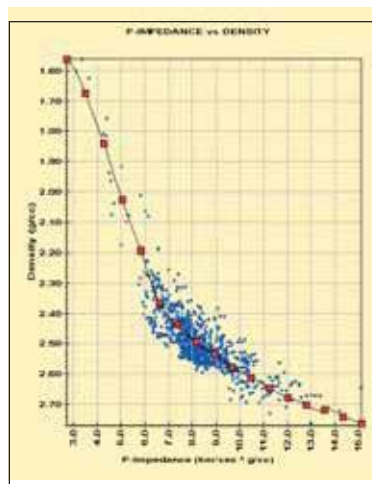


Рисунок 4 Кроссплот Р-импеданса и плотности. Контрольные точки функции сплайна отмечены красным.

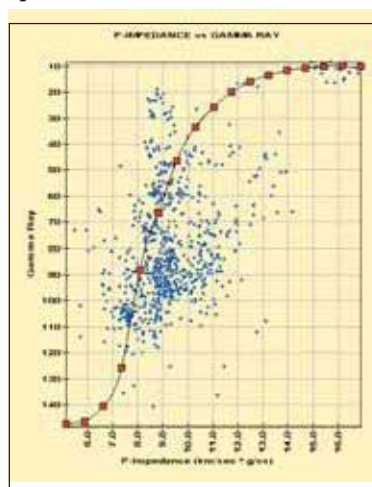


Рисунок 5 Кроссплот Р-импеданса и значений гамма каротажа

Выбор контрольных точек сплайна должен выполняться тщательно, поскольку кривая, проходящая через них, должна верно представлять данные.

На Рисунке 4 показан кроссплот Р-импеданса и плотности для скважины, расположенной внутри куба сейсмических данных 3D, взятых для нашего исследования.

Кривая кубического b-сплайна накладывается на кластер, проходящий через контрольные точки (красным), которые являются руководящими для лучшего подбора кривой.

На кроссплоте Р-импеданса и гамма каротажа для широкой зоны, которая покрывает целевую зону песков, видно рассеяние точек, которое можно увидеть на Рисунке 5. Тогда как максимально наблюдаемые значения (<70) могут говорить о наличии песчаника, низкие значения (>70) соответствуют илу и глине. Поэтому контрольные точки были выбраны так, чтобы они проходили через кластер песчаника. Подобным же образом, разумное соответствие было получено для кроссплота Р-импеданса и пористости.

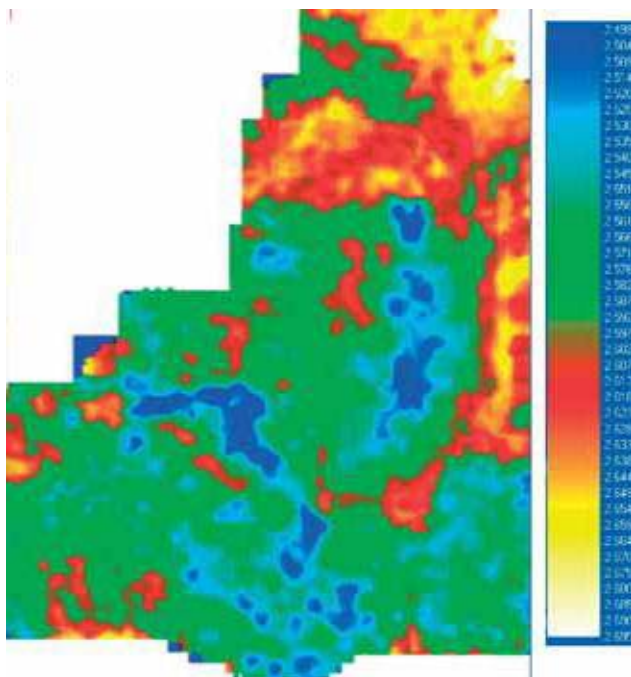


Рисунок 6 Обращение плотности с помощью сплайновой кривой. Временной срез относится к Рисунку 1.

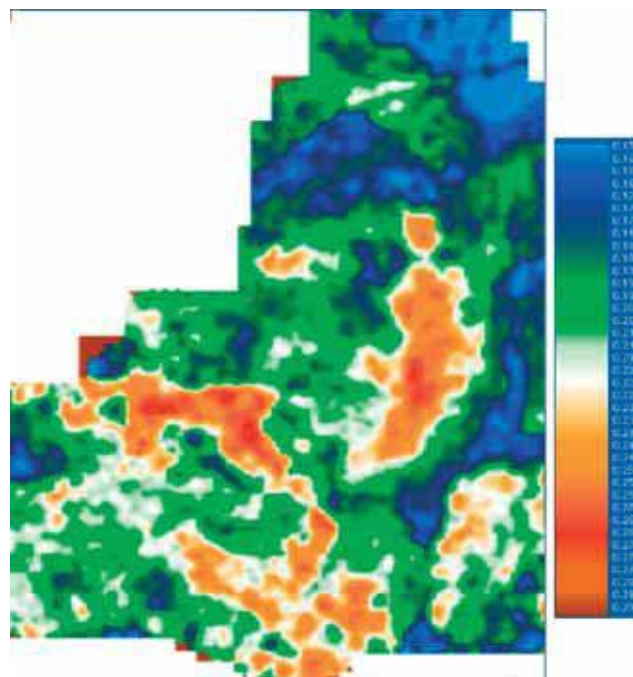


Рисунок 8 Обращение пористости с помощью сплайновой кривой. Временной срез относится к Рисунку 1.

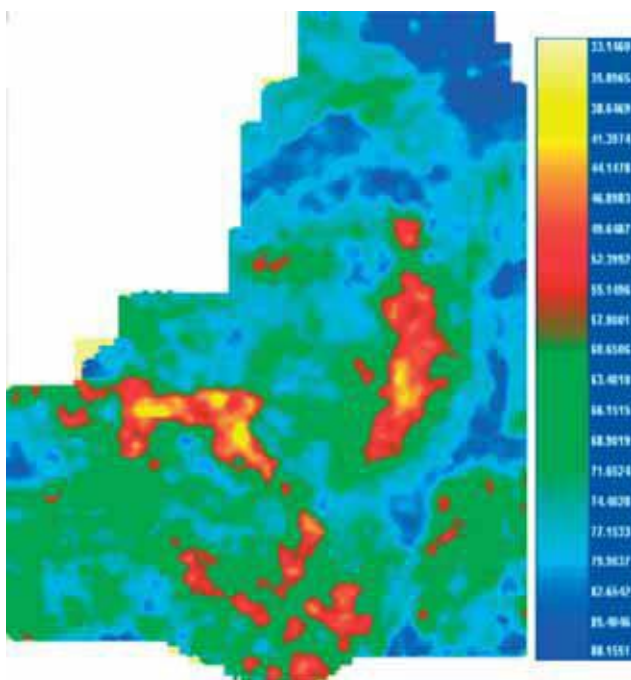


Рисунок 7 Обращение гамма каротажа с помощью сплайновой кривой. Временной срез относится к Рисунку 1.

Определенные математические взаимосвязи (полиномиальные) для этих кривых использовались для трансформации акустического импеданса в кубы плотности (Рисунок 6), гамма значений (Рисунок 7) и пористость (Рисунок 8). Для каждого из кубов были показаны временные срезы, которые относятся к Рисунку 1.

Отметим подобие аномальных структур для значений гамма каротажа (рисунок 7) и пористости (рисунок 8), соответствующие пескам. Результаты вдохновляют, особенно если учесть, что математическая зависимость, определенная по одной скважине, дала результаты, подобные результатам с использованием нейронных сетей.

Интегрирование много-атрибутных кубов

При использовании обращения AVO параметров в кубы сейсмических данных 3D получают несколько кубов атрибутов, которые содержат информацию по флюидам и литологии. Для сейсмика-интерпретатора просмотр многих кубов атрибутов и анализ результатов является непомерно большой задачей. Обычной практикой считается отображение всех кубов атрибутов, поиск аномальных зон и подтверждение их соответствия в различных кубах атрибутов. Например, участки перспективных газонасыщенных песков будут характеризоваться низкими значениями параметров Lambda-Rho, высокими значениями Mu-Rho, низкими значениями плотности, высокими значениями пористости и адекватным диапазоном значений гамма отклика.

Была разработана автоматическая процедура, которая помогает считывать все пять входных кубов и задавать требуемый диапазон значений, соответствующих газовой аномалии. На рисунке 9 показан временной срез, относящийся к Рисунку 1. Отметим, что распределение газонасыщенных песков проявляется на отдельных срезах на Рисунках 2 и 3 и 6, 7 и 8. В качестве альтернативы, был построен другой составной куб с помощью математической операции, оптимизирующей отображение аномальных зон, например как оператор в форме $(\text{Lambda}/\text{Mu}) * (\text{гамма}/\text{пористость}) * \text{плотность}$. Временной срез этого куба показан на Рисунке 10, на нем видны ожидаемые конфигурации перспективных газонасыщенных песков.

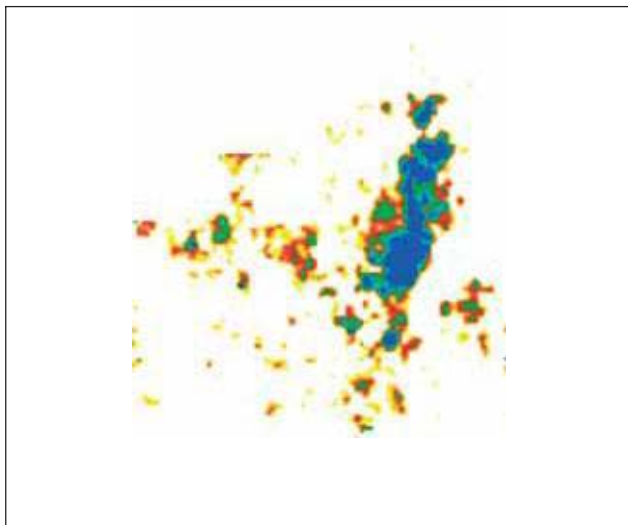


Рисунок 9 Временной срез составного куба с ограниченным диапазоном значений для отдельных атрибутов. Временной срез относится к Рисунку 1.

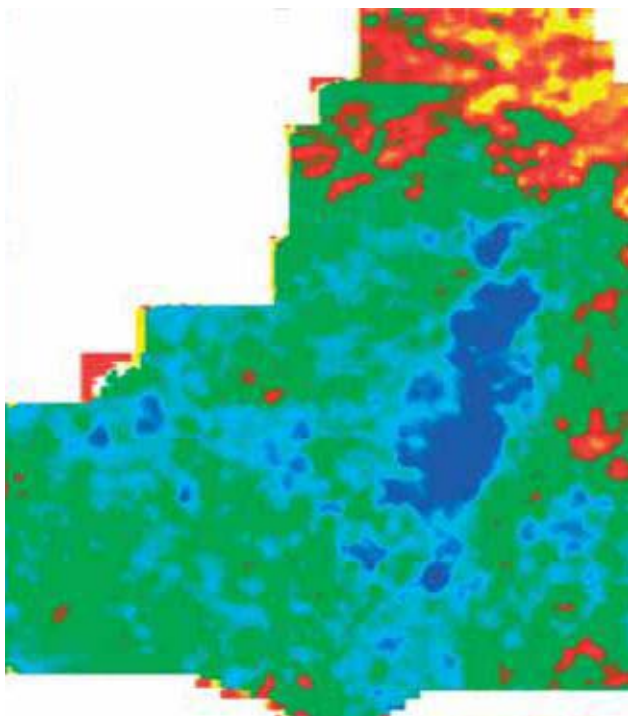


Рисунок 10 Временной срез составного куба с оптимизацией отображения аномальной зоны. Временной срез относится к Рисунку 1.

Выводы

1. Интеграция данных AVO инверсии в параметры Ламе выполнялась с использованием кубов сейсмических атрибутов, полученных с использованием анализа кубических b-сплайнов по каротажным данным. Результаты оказались похожими на результаты подобной интеграции данных на основе нейронных сетей.
2. Получаемые кубы, т.е. гамма, плотность и пористость вносят свой вклад в оценку относительного распределения и флюидосодержания песков.
3. С помощью интегрирования различных кубов атрибутов AVO был построен составной куб, что дало убедительные результаты. Использование таких кубов может помочь сейсмикам-интерпретаторам избежать монотонной работы по просмотру отдельных кубов атрибутов.

Несмотря на то, что вышеупомянутые процедуры дали убедительные результаты, необходимо сказать о том, что результаты зависят от выбора кластеров (например, гамма каротаж), используемых при определении математических зависимостей. Кроме того, вопрос о том, является ли данная скважина представительной для рассматриваемого геологического объекта, требует утвердительного ответа. Реализация данного подхода может быть затруднительной в областях со значительной изменчивостью геологического строения по латерали.

Литература

- Chopra, S. and Pruden, D. [2003] Multi-Attribute Seismic Analysis on AVO derived parameters - a case study. *The Leading Edge*, SEG Publication, 2003.
- Goodway, W.N. [2003] AVO and Lamé constants for rock parameterization and fluid detection. *CSEG Recorder*, **26**, 6, 39-60.
- Hampson, D.P., Schuelke, J.S., and Querien, J.A. [2001] Use of multiattribute transforms to predict log properties from seismic data. *Geophysics*, **66**, 220-236.
- Leiphart, D.J. and Hart, B.S. [2001] Comparison of linear regression and a probabilistic neural network to predict porosity from 3-D seismic attributes in Lower Brushy Canyon channelled sandstones, southeast New Mexico. *Geophysics*, **66**, 1349-1358.
- Pruden, D. M. [2002] Extracting meaningful geologic parameters using multiple attribute analysis on AVO derived Lamé rock parameter inversions: 3D seismic case study from southern Alberta, Canada. *Expanded abstracts, 72nd Ann. Mtg. Soc. Expl. Geophys.*