

Soft computing for qualitative and quantitative seismic object and reservoir property prediction. Part 2: Fuzzy Logic Applications

Программные вычисления как ключ к качественным и количественным предсказаниям свойств сейсмических объектов и коллекторов

Часть 2: Приложения нечеткой логики

Фред Аминзаде¹ и Дэвид Вилкинсон² (Fred Aminzadeh¹ and David Wilkinson²)

Это второй фрагмент серии обзорных статей по приложениям программных вычислений в нефтяной промышленности. В этой статье Фред Аминзаде и Дэвид Вилкинсон обращают внимание на приложения нечеткой логики (включая краткое изложение технологии нечеткой логики, недавние публикации по нечеткой логике в различных сценариях разведки и разработки) и предлагаемые рамки использования нечеткой логики в сейсмостратиграфическом анализе и изучают приложения нечетких дифференциальных уравнений.

В парной статье из этой серии авторов Аминзаде и де Гроот (Aminzadeh and de Groot, 2004), были выделены основные преимущества программных расчетов. Среди них – интегрирование информации от разных источников с разными степенями неопределенности. Геофизические данные, используемые в разведке по своей сути неточные, неопределенные и нечеткие.

Это, вкупе со многими лингвистическими правилами и субъективной обработкой данных, делает ее хорошим кандидатом на использование теории нечеткого множества для обработки, анализа и интерпретации данных разведки и поисков. Рисунок 1, из работы Вилкинсона и др. (Wilkinson et al., 2003), иллюстрирует сложную задачу моделирования при анализе строения земли (геологическое обнажение) и численных измерений (в данном случае сейсмическими).

Основное преимущество нечеткой логики – это ее разносторонность в сочетании с качественной и количественной информацией и субъективными наблюдениями и правилами. При заданной природе информации, доступной для интерпретации (такой как сейсмические данные, каротажи скважин, геологические и другие геофизические данные), теория нечетких множеств может помочь в развитии рамок выполнения количественного анализа исходных данных, которые могут быть как качественными, так и количественными.



По мере увеличения сложности точные утверждения теряют смысл, а значащие утверждения теряют точность'
Лотфи Заде (Lotfi Zadeh),
изобретатель нечеткой логики

После краткого обзора предыдущей работы, мы дадим несколько примеров приложений нечеткой логики в разведке.

Что такое нечеткая логика?

Нечеткая логика, которая является комбинацией теории нечеткого множества и методов нечеткой базы правил, была введена Лотфи Заде, профессором Калифорнийского Университета в Беркли, в 1960х. Она была специально разработана для использования в тех случаях, когда данные неоднозначны и неточны.

Имеется несколько фундаментальных отличий между нечеткой логикой, традиционной теорией вероятности и алгеброй логики. Жесткие границы последней, такие как (черное или белое), (да или нет), (верно или неверно), $(p(a) = 1 - p(\text{не } a))$, (0 или 1) сглажены в нечеткой логике. Имея выбор между двумя группами, не нужно принадлежать той или другой. Через 'функции принадлежности', элемент может быть

Рисунок 1 Иллюстрация неотъемлемой нечеткости в геологии и соответствующих сейсмических данных

¹ dGB-USA, 1 Sugar Creek Center Blvd., Suite 935, Sugar Land TX 77478, USA, fred.aminzadeh@dgb-group.com

² ChevronTexaco, Energy Technology Company 6001 Bollinger Canyon Rd., San Ramon CA 94583 USA.

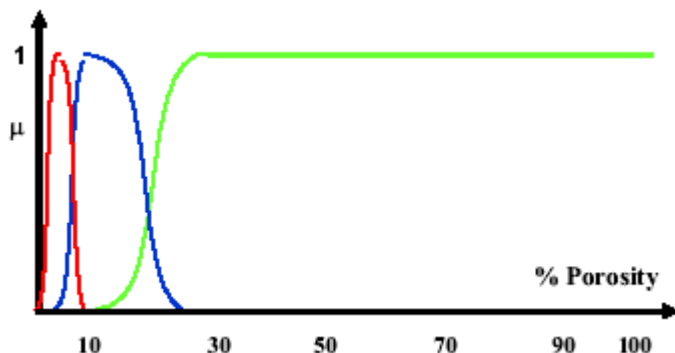


Рисунок 2 Представление низкой пористости (красным), средней пористости (голубым) и высокой пористости (зеленым) с помощью функции принадлежности

членом двух или более групп с различной степенью принадлежности одновременно. Нечеткая логика – это нетрадиционная логика, обращающаяся к проблеме Бертрانا Рассела: ‘Вся традиционная логика обычно предполагает применение точных символов. Это применимо не к земной жизни, а только к воображаемой небесной. Закон исключенного третьего верен, когда используются точные символы, но он неверен, когда символы размыты, как, фактически, все символы’.

В нечеткой логике, все является вопросом степени. Т.к. нечеткость или ‘серая область’ присутствует почти во всем, концепция нечеткой логики со своей ‘степенью принадлежности’ позволяет надлежащим образом трактовать ‘многозначность’. В отличие от классической логики, основанной на четких множествах, члены которых либо ‘Верны’ либо ‘Неверны’, нечеткая логика рассматривает проблемы, как имеющие некую степень ‘Верности.’ Нечеткая логика основана на концепции нечетких множеств, члены которых могут принадлежать секторам ‘Верно’ или ‘Неверно’ или соответствовать любому числу градации между ‘Верно’ или ‘Неверно.’ Другими словами, член нечеткого множества может иметь переменное число ‘Верно’ и ‘Неверно.’ В классических или четких множествах, переход от принадлежности к не–принадлежности в данном множестве для элемента в универсуме резкое (четкое). Для элемента в универсуме, который содержит нечеткие множества, этот переход может быть скорее постепенный, чем резкий. Таким образом, ‘нечеткий’ и ‘нечеткость’ могут быть определены как то, что имеет характеристики нечеткого множества. Отображение и множества в нечеткой теории описываются и характеризуются как функции принадлежности. На Рисунке 2 показано, как можно представлять концепции, такие как ‘низкая пористость’, ‘средняя пористость’ и ‘высокая пористость’. Естественно, такие субъективные определения могут быть различными для различных нефтяных систем.

Ясно, что имеется фундаментальное отличие между вероятностью и концепцией уровня принадлежности. Вероятностные высказывания касаются правдоподобия результата: событие либо происходит, либо нет, и можно приписать ему неравенство. Но в нечетком мире, никто не может сказать недвусмысленно, было ли событие или нет, можно только постулировать степень, в которой это событие произошло. В процессе разделения всех коллекторов на три категории, используя нечеткую концепцию, мы можем наблюдать две вещи: Первое, имеется наложение между классами. Коллектор с пористостью 12% одновременно член классов

коллекторов средней пористости и высокой пористости, хотя и с разной степенью принадлежности. Второе, имеется плавный переход степеней принадлежности (в отличие от резкого перехода от 1 к 0). Это устраняет необходимость устанавливать жесткие границы при переводе лингвистических терминов в язык компьютера.

За прошедшие несколько лет нечеткая логика стала методологией принятия решений, с всевозрастающим значением, в сфере программных расчетов и прикладного вычислительного интеллекта. Она обеспечивает элегантный способ делать окончательные выводы на основе шумных, или неточных, резких или неполных входных данных. Это, в соединении с ее способностью давать возможность бесшовной интеграции дополнительных данных в высоко сложные системы и делать это почти методом ‘прозрачного ящика’, делает нечеткую логику привлекательной альтернативой типовым технологиям. Коско (Kosko, 1993), в книге, озаглавленной *Нечеткое мышление (Fuzzy Thinking)* описывает нечеткую логику, и ее уместность во многих жизненных (и смертельных!) вопросах от политики до религии и от философии до стиральных машин. Он убеждает, что тысячи лет (с Аристотеля) в Западной философии, мир был черным или белым, правильным или неправильным, «быть или не быть» и «все или ничего». В отличие от восточной философии (начиная с Будды и затем Суфий), она рассматривает мир с различными перспектив, с единством ‘инь’ и ‘ян’, позволяя сосуществовать ‘быть’ и ‘не быть’. Такая открытость неоднозначности – сущность нечеткой логики.

Нечеткая логика в геофизике.

Как во многих других дисциплинах, ученые изучающие землю, противостоят необходимости иметь дело с многими разными типами данных, которые происходят из разнообразных источников, имеют разные масштабы и разные степени неточности и неопределенности. Нередко наши данные описываются как шумные, неточные, редкие, неполные, и т.д. Чтобы еще усложнить вопрос, обычно мы ищем убежища у переупрощенных моделей больших и сложных систем, которые пытаемся анализировать.

Несмотря на это, многие из наших способов обработки и технологий анализа данных способны функционировать адекватно только тогда, когда и модель и данные известны с достоверностью. В этой ситуации не удивительно, что результаты нашего анализа

имеют высокую степень чувствительности к несоответствиям, как в модели, так и в компонентах данных.

Чтобы бороться с этой проблемой, обычно пробуют обрабатывать данные в тех точках, где приложения наших точных алгоритмов могут давать здравый результат. Второй альтернативой будет предпочтительно применять те методики, которые терпимы к неточностям во входных данных.

Чтобы использовать подход, основанный на правилах нечеткой логики, необходимо собрать воедино все данные и нечисленную информацию, относящуюся к проекту. Для типичных геофизических приложений, возможные компоненты, основанные на знаниях, могут включать:

- Элементы данных
 - Сейсмика (3D, 4D, 4C, до суммирования),
 - Каротаж, скважинные измерения в процессе бурения
 - Керн, шлифы
 - Данные по добыче
- Элементы знаний
 - Теоретические зависимости
 - Эвристические, эмпирические правила
 - Экспертные знания
 - Атрибуты отображения характеристик
 - Геологические аналогии
 - Статистические модели, 'трюки' программ по моделированию
- Определения нечеткого разбиения входного пространства (то есть чьи свойства представляют интерес, Vp, Vs, f, Kv, Kh, литология, Sw...)
- Функции принадлежности (то есть, какую форму имеют функции принадлежности?)

За последние 25 лет, было несколько попыток включить нечеткую логику в геофизику. Чапаз (Chappaz, 1977) и Боиз (Bois, 1983, 1984) предложили использовать теорию нечетких множеств в интерпретации сейсмических разрезов. Боиз использовал нечеткую логику как средство распознавания образов для сейсмической интерпретации и анализа коллекторов. Он заключил, что теория нечетких множеств, в частности, может использоваться при интерпретации сейсмических данных, которые неточные, неоднозначные, и включают субъективную погрешность. Он предложил, что эти типы ошибок и нечеткости нельзя учитывать традиционными математическими способами: однако, они учтены в теории нечетких множеств. Он также заключил, что, используя теорию нечетких множеств, возможно извлекать геологическую информацию из сейсмических данных. Таким образом, можно, принципиально, предсказывать границу коллектора, в котором существуют углеводороды.

Гриффит (Griffith, 1987) использовал нечеткую логику для предсказания различных стратиграфических пачек по данным бурения. Он использовал субъективную классификацию плагноклазовых полевых шпатов, включающую много функций с перекрывающейся принадлежностью с различным процентным содержанием анортита. Затем он использовал данные бурения с разными переменными, такими как число оборотов, нагрузка на долото, масса бурового раствора и крутящий момент для создания численных литостратиграфических пачек, из таких данных.

Полученные результаты согласовались с полученными по данным каротажа. Лашгари (Lashgari, 1990) также доложил о серии приложений теории нечетких множеств в геостатистическом анализе и кластеризации сейсмических атрибутов с использованием метода нечеткого K- аппарата. Эн и Мун (An and Moon, 1990) использовали теорию нечетких множеств для интеграции геологических и геофизических данных. Аминзаде (Aminzadeh, 1994) обозначил приложения нечетких экспертных систем в разведке нефти. Томхейн и др. (Tomhane et al, 2002) взял качественную информацию, основанную на лингвистическом описании (например 'низкий', 'средний' и 'высокий'), часто используемом экспертами-геологами для предсказания проницаемости по данным каротажа, и сравнил их с традиционными методами на основе полу-эмпирических уравнений.

Совсем недавно, было выпущено три книги по приложениям программных вычислений в разведке. Это книги Вонг и др. (Wong et al, 2002), Никравеш и др. (Nikravesh et al, 2003) и Сэндем и др. (Sandham et al, 2003), во всех трех есть разделы, посвященные некоторым приложениям нечеткой логики в нефтяной промышленности.

Свежие примеры по использованию

В этом разделе мы предлагаем несколько свежих примеров использования нечеткой логики и указываем на потенциально высокую эффективность методики в разных задачах наук о земле.

Нечеткие дифференциальные уравнения

Дифференциальные уравнения в частных производных (PDE) - основы физических законов, которые управляют двумя разными приложениями нефтяной промышленности. Эти законы - Закон Дарси и волновое уравнение. Первый имеет дело с движением флюида через пористую среду. Второй управляет распространением волн в недрах (как упругих, так и электромагнитных). Как решать эти уравнения, с различными допущениями на относительные параметры, было предметом различных тем докторских диссертаций, программ академических исследований, деятельности нефтегазовых компаний по развитию технологий и сервисных компаний по развитию программных продуктов. Они все пытаются сделать решение более здравым, предположения реалистичными и аппроксимации более приемлемыми.

Многие геофизические технологии, такие как миграция, кинематическая поправка за угол наклона отражающей границы, моделирование волнового уравнения, а также потенциальные методы (гравиразведка, магниторазведка, электрические методы), используют стандартные волновые уравнения в частных производных с детерминистическими коэффициентами. То же самое касается уравнений в частных производных, используемых при моделировании коллекторов. По многим практическим и физическим причинам, детерминистические параметры для коэффициентов этих дифференциальных уравнений в частных производных могут привести к нереальным ситуациям (например, средние скорости для распространения сейсмических волн или расход жидкости для уравнения Дарси). Стохастические параметры или альтернативно, нечеткие коэффициенты, могут дать нам более практичное описание. Нечеткие коэффициенты дифференциальных уравнений в частных производных могут оказаться более реалистичными и простыми для параметризации.

В работе Аминзаде (Aminzadeh, 1995), использование волновых уравнений со случайными или нечеткими коэффициентами для описания скоростей в недрах и плотностей в терминах статистики и степени принадлежности, способствует лучшему описанию распространения волны в недрах, особенно когда присутствует существенная неоднородность. Более того, всплывают более обобщенные приложения геостатистических методик, делая возможным введение риска и неопределенности в ранние стадии обработки сейсмических данных и цикла интерпретации.

При сложной природе углеводородсодержащих коллекторов и значительной неоднородности формаций горных пород, через которые распространяются сейсмические волны или поток флюида (нефть, газ и вода), параметризация этих уравнений является огромным риском. Крайне редкие доступные данные, вместе с очень ограниченными прямыми измерениями (каротаж скважин, скорость потока, керн) делают моделирование и работу по оценке еще более трудной. Вдобавок, разные типы недостоверности, ошибки измерений, и аппроксимации, связанные с идеалистическими предположениями о среде и правящих физических законах, делают теоретические уравнения менее надежными.

Как только мы осознаем несоответствия стандартных математических методик и классических уравнений, основанных на детерминистической и четкой параметризации, мы понимаем необходимость искать альтернативы. Даже если мы должны существенно переписать книги по моделированию коллекторов и геофизическому отображению, нам надо двигаться к методам на основе стохастики и нечеткой логики. То есть, надо использовать волновые уравнения, состоящие из случайных или нечетких коэффициентов, описывающих геометрию недр, скорости и плотности. Это нам поможет более эффективно описать и параметризовать среду, через которую распространяются сейсмические волны, особенно когда присутствует значительная неоднородность.

Подобным образом, закон Дарси, описывающий проницаемость пород в терминах 'измеряемых' количеств, можно генерализовать для учета ошибки неточности, недостоверности и погрешности измерений. Проницаемость – это важное свойство коллектора. Она управляет скоростью потока и направленным перемещением различных флюидов (именно газа, воды и нефти) через породы коллектора. Метод Дарси, основанный на дифференциальном уравнении в частных производных, принят для идеализированной ситуации, имеющей дело с 'горизонтальным линейным потоком несжимаемого флюида'. В реальности, в высоко-неоднородной и анизотропной, многофазной обстановке флюида эти предположения слишком ограничивающие и необходим более сложный и полноценный подход к решению проблемы.

Недавно опубликованная книга Никравеша (Nikravesh et al, 2004) - первый шаг к введению нечетких дифференциальных уравнений и нечетких зависимостей в нефтяную промышленность. Представляется, что эти методы будут находить применение во многих задачах нефтяной индустрии. Это даст нам возможность рассматривать параметризацию моделей, инверсию и моделирование коллектора более эффективно и с большим соответствием реальным проблемам, с которыми мы имеем дело каждый день. Используя нечеткие дифференциальные уравнения, нам больше не требуется находить обманчивые 'точные'

уравнения для описания 'точного физического явления', для решения наших все более усложняющихся задач.

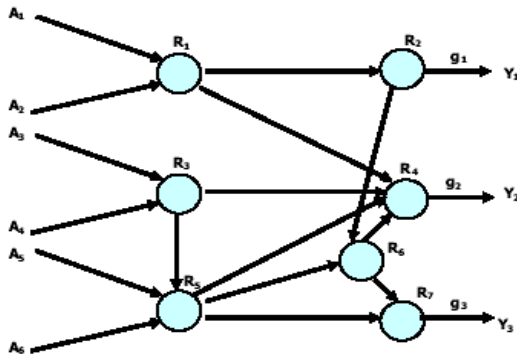
Стратиграфическая интерпретация

Одна из сильных сторон нечеткой логики лежит в концепции лингвистической переменной. Это концепция, которая имеет особую значимость в геофизике. Тогда как большая часть геофизических и геологических данных численная по природе, было много специальных попыток включить семантическую информацию в процесс выявления экспертных знаний. Нечеткая логика обеспечивает крепкую основу, внутри которой этот тип интеграции данных происходит естественным путем. Мы покажем, как многие стратиграфические концепции можно сформулировать через нечеткую логику, полагаясь на ее способность оперировать лингвистическими определениями. Этот пример взят из работы Аминзаде и Саймаан (Aminzadeh and Simaan, 1991). Три типа дельтовых фаций, продельта, дельта фронт, и аллювий характеризуются в соответствии с их сейсмическим откликом, используя следующие директивы, взятые из классической работы Брауна и Фишера (Brown and Fisher, 1977). Слова курсивом показывают неточную и нечеткую природу этих правил:

Продельта или дистальный дельта фронт, фации барьера: Картина отражений для этих фаций в разрезах по падению - *от горизонтальных до крутонаклонных, косые, характерна слоистая структура внутри зоны, которая имеет диапазон от слабо слоистой до зоны без отражений или локально хаотичной. Наклонные отражения могут сходиться (до подошвенного налегания) по направлению вниз (к бассейну). В разрезах по простиранию, фации как правило выпуклые вверх, согласные волнистые-до-холмистых хаотичные, может наблюдаться картина без отражений с некоторыми признаками канала или эрозионных размывов. На реликтовом шельфе, отражения продельты прерывистые кроме нескольких сильных отражений, амплитуды обычно низкие, кроме отражений с умеренной непрерывностью, и интервалы очень неравномерные.*

Дельта фронт, фации барьерных валов: картина отражения на разрезах по падению *от горизонтальных до слегка наклонных, параллельно-слоистые рядом с основанием, сортировка вверх асимметричная до хаотичной или картины без отражений с обычными выпуклыми вверх дифракциями и слабо определенными, холмистыми отражениями. Едва различимые, наклонные отражения внутри хаотических зон могут представлять дельта-фронт или барьерный вал свисающего крыла и, могут представлять собой промежуточные временные линии. В разрезе по простиранию, базальные отражения зоны проявляют холмистую и локально хаотичную, до зон без отражений картину, зоны проявляются едва заметно, отражения от параллельно-слоистых до драпированных, обильные дифракции. Базальные отражения характеризуются сильной непрерывностью, непрерывность в пачке уменьшается вверх. Значительная непрерывность отмечается в разрезах по падению. Амплитуда от умеренной до высокой в базальных частях, отражения высоко-непрерывны, но в хаотических интервалах непрерывность низкая; расстояние между горизонтами умеренно равномерное в базальных отражениях, но изменчивое в верхней части зоны.*

Аллювиальные, фации дельтовой равнины: Волновая картина отражений в разрезах по падению *в основном, горизонтальные параллельные, иногда от сходящихся*



напластованных до локально отсутствующих отражений; локально могут присутствовать эрозионные каналы. В разрезах по простиранию, отражения слабые, параллельно-слоистые до слегка-волнистых, картина отражений от хаотичной-до-волнистой.

Непрерывность отражений меняется от превосходной до хорошей в разрезах по падению, но непрерывность от слабой до хорошей в разрезах по простиранию; амплитуда переменная (высокая для непрерывных отражений и слабая в хаотических зонах); расстояние между горизонтами очень регулярное в зонах с высокой непрерывностью отражений, но нерегулярное в остальной части пачки.

При заданной структуре и правилах, таких как эти, применение их в экспертной системе, основанной на классической (точной) математике почти невозможно. Очевидное решение – использовать систему, основанную на нечетком следствии. Предполагается, что доступны следующие данные (факты).

- A₁. картина отражений на разрезе по падению,
- A₂. картина отражений на разрезе по простиранию,
- A₃. непрерывность отражений на разрезе по падению,
- A₄. непрерывность отражений на разрезе по простиранию,
- A₅. амплитуда отражений на разрезе по падению, и
- A₆. амплитуда отражений на разрезе по простиранию.

Заметим, что A₁ и A₂ -нечеткие количества, определяемые на нечетком подмножестве данных X₁ со степенями принадлежности f^1 и f^2 , $i = 1$,

	Продельта & дистальн., передние фации барьера	Фронт дельты, фации барьера	Фации аллювий –дельта-равнина
A ₁ Тип отражений разреза по падению	От горизонт. до круто наклонных, косых (слоистые до слабо слоистых)	От горизонт. до слабо накл. парал.-слоист. у основания, отраж. выпукл.вверх.	принципиально горизонтальные, параллельные
A ₂ Тип отражений разреза по простиранию	Выпуклые вверх	Волнистая картина базальных отражений	Параллельно-слоист. до слабо-холмистой, хаотическая до волнистой
A ₃ Непрерывность отражений разрез по падению	Локально хаотические	Лучшая непрерывность чем для разреза по простиранию	Отличная до хорошей
A ₄ Непрерывность отражений разрез по простиранию	Большой частью прерывистые отражения	Для базальных отражений непрерывность, котор. уменьшается вверх по пачке	Слабая до хорошей
A ₅ Амплит. отражений разрез по падению	Слабые отражения до отсутствия отражений, низк. амплитуда на реликт.шельфе кроме зон умерен. непрерыв.	Высокая до умеренной амплитуда в базальн. части, высокая непрерывн. отраж. низкая в хаотич. участках	Слабая

Рисунок 3 Схематическая диаграмма для Нечетких правил Таблицы 1 для выделения разных фаций на основе их сейсмического отклика

2, ... I, где I –число элементов в X₁. Таблица 1 дает описание правил. Также, задаются подгруппы X₁, X₂, X₃, со всеми возможными элементами в них. Например:

- X₁. (Горизонтальная, косая, вертикальная, слоистая, выпуклая кверху, выпуклая книзу, с холмистыми складками).
- X₂; (локально хаотичная, прерывистые отражения, непрерывные отражения)
- X₃; (низкая амплитуда отражений, высокая амплитуда отражений, без отражений).

При заданных нечеткой информации и правилах, входные данные проходят через механизм нечеткого заключения, результатом которого является нечеткая классификация данных на всевозможные стратиграфические типы; продельта, дельта фронт, аллювий (Y₁, Y₂, и Y₃) с различными степенями принадлежности (g₁, g₂, g₃, ...).

Рисунок 3 показывает возможную сеть нечетких заключений для этого примера. Рисунок 3 - только для иллюстрации, он вовсе не включает в себя все правила Таблицы 1. Хотя, рисунок показывает, концептуально, как серия нечетких правил может сочетаться, чтобы получить нечеткий результат. Этот пример иллюстрирует

Таблица 1 Набор правил для выделения разных фаций на основе их сейсмического отклика

основную концепцию представления знаний, используя нечеткую логику, не пускаясь в детальные теоретические дискуссии.

Моделирование проницаемости коллектора, используя сейсмические и каротажные данные

Проницаемость – это мера поведения флюида в пористой среде. Это самое сложное свойство коллектора для оценки, но оно играет большую роль при принятии решений управления коллектором, такие как точка заложения скважины и закачивание воды. Для этой работы мы использовали два типа данных: данные каротажа и данные ядра. В этом методе процедура преобразования проницаемости устанавливается, сначала используя контрольные данные, а затем они применяются повсюду в коллекторе.

Обычно наблюдается, что проницаемость относится к другим свойствам породы, хотя теоретическое математическое уравнение для описания такого соответствия не существует. Целью этой работы является построение процедур, которые аппроксимируют такую взаимосвязь. Конкретные свойства породы, используемые в этой методологии – это параметры упругости (скорость, плотность и пористость) полученные из каротажных или сейсмических данных. Важно, чтобы модель могла быть использована для оценки

	Песок	Глин. песок	Песч. глина	Глина	Высоко импед. песок
Высок. прониц.	148	81	83	20	43
Средн. прониц.	29	23	76	-	-
Низк. Прониц.	11	27	139	147	-
Общая	188	131	298	167	43

Таблица 2 Входной набор данных проницаемости коллектора повсюду, где присутствуют сейсмические данные. Мы выполняли это моделирование, используя Genetic Programming (GP), Коца (Коца, 1992) и Нечеткие системы умозаключений, основанные на адаптивной сети (ANFIS) и Джанг (Jang, 1997).

Гибридная GP-нечеткая система

Часто, проницаемость сильно зависит от природы формаций горных пород (литофаций). Каждая литофация может иметь широкий диапазон значений проницаемости и что еще хуже, может характеризоваться быстрыми изменениями проницаемости. Более того, разные диапазоны проницаемости демонстрируют разные геологические характеристики. В результате, практически невозможно построить одно групповое преобразование, которое даст хорошую оценку проницаемости для всех типов пород-коллекторов.

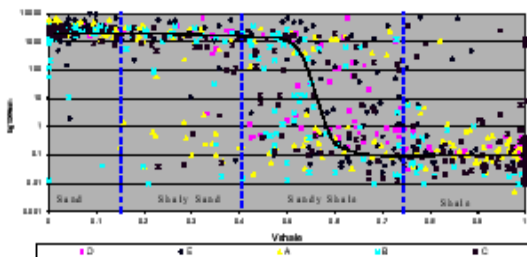


Рисунок 4 V-глины против log10 проницаемости.

Таким образом, для построения системы преобразования проницаемости, мы приняли подход разделяй-и-властвуй:

- первый слой системы идентифицирует литологическую группу.
- Второй слой системы предсказывает диапазон проницаемости (низкий, средний, высокий)
- последний слой системы оценивает фактическое значение проницаемости.

Для проверки системы, были использованы данные каротажа из пяти скважин. Для всех из них были данные для согласования проницаемости ядра. Таблица 2 представляет число данных в каждой литологической группе и диапазон проницаемости. Эти группы и диапазоны установлены на основе геологических знаний и анализа множеств данных. Общее число точек данных 827.

Один из классических способов оценки проницаемости – использование оценки V-глины. В точках скважин ее можно получить из данных гамма каротажа. При составлении кросс-плота V-глины против проницаемости (Рисунок 4), очевидно, что у них сложная зависимость, хотя в общем, чем выше значение V-глины, тем ниже проницаемость. Стандартный подход – генерировать S-кривую, которая будет подходить этим данным для предсказания проницаемости внутри коллектора. Мы увидим, что это обычно ведет к плохой оценке фактической проницаемости. Часть нашего анализа сейсмических данных – идентификация литологии. Таким образом, мы можем использовать выполнение этого анализа на базе литологии. Анализ данных X-кривой предполагает четыре литологические группы: пески, глинистый песок, песчаная глина и глина с границами фракций V-глины на 0.15, 0.4 и 0.75.

По этим данным мы можем видеть, что на самом деле существует широкий диапазон и быстрая вариация значений проницаемости внутри каждой литологической фации. Ясно, что простая регрессия V-глины не будет достаточной для того, чтобы дать реалистичную оценку проницаемости. Следовательно, обычной практикой будет – выполнение регрессии для V-глины, плюс использование некоторых других свойств каротажа. В этом случае S-кривая – это функция V-глины и пористости.

Нечеткая система умозаключений

Генетический алгоритм (GA), используемый для тренировки классификатора для предсказания диапазона проницаемости, будет обсуждаться в последующей статье на эту тему. Здесь, мы обсуждаем инструмент моделирования ANFIS, который представляет собой нечеткую систему умозаключений TSK, на основе данных на входе и выходе. Нечеткая система TSK имеет следующую структуру: первая компонента – набор входных функций принадлежности (MF). MF отображает четкие значения на входе в лингвистические значения или метки. MF может иметь форму, такую как треугольную, Гауссову или трапециевидную, пока он меняется от 0 до 1.

Трансформация четкого значения в степень (от 0 до 1) соответствия лингвистическому значению называется ‘подготовкой задачи для решения методами нечеткой логики’. Нечеткие правила – это условные положения в формате «если-то».

Часть 'если' состоит из лингвистического значения и нечетких операторов (И, ИЛИ, НЕТ). Часть 'тогда' - линейное уравнение первого порядка ($ax+by+c$). Пример нечеткого правила TSK дан здесь:

- Если пористость высокая, и плотность низкая, проницаемость = $-42572 * \text{пористость} - 53 / \text{скорость} - 115807 * \text{плотность} + 260911$.

Нечеткие умозаключения - этот метод интерпретации входных значений на основе нечетких правил, в результате чего приписываются выходные значения. В системе TSK, выходное значение рассчитывается на основе силы запуска w_i каждого правила. ANFIS это система TSK с прямой связью, похожая на нейронную сеть.

Первый шаг обучения определяет число нечетких правил (слой 2). Алгоритм кластеризации сначала подразделяет данные на группы, а затем генерирует минимальное число правил для разделения нечетких количеств, связанных с каждой из групп. Формы входных функций принадлежности (слой 1) не получают при обучении, а задаются пользователем. В зависимости от

формы входной выбранной функции принадлежности, инициализируются различные параметры (например, среднее и стандартное отклонение Гаусса). Между тем, инициализируются выходные параметры (например, коэффициенты в линейных уравнениях). Второй, обучающий шаг, регулирует входные и выходные параметры для минимизации ошибки. Более конкретно, в прямом проходе, обучающие входные данные идут прямо, пока слой 4 и выходные параметры не идентифицируются среднеквадратичной оценкой. В обратном проходе, частота появления ошибки передается обратно и входные параметры MF обновляются.

Сравнение эффективности с классическим подходом показывает, что гибридная система (Perm-FIS) дает оценки проницаемости, ближе к данным проницаемости ядра (Perm-Core). На рисунке 5 показана проницаемость ядра, оцененная стандартным способом, против фактической проницаемости ядра для пяти скважин, используемых в работе.

Хотя общее соответствие верно, имеется значительная степень разброса в этих графиках, что отражает неспособность одного преобразования адекватно объяснить сложность реального распределения проницаемости. Результаты гибридной

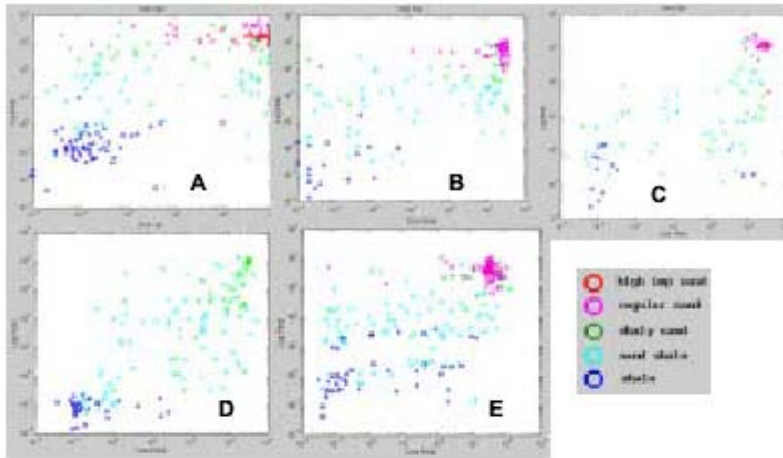


Рисунок 5 Эффективность исходного преобразования регрессии (оценка против проницаемости ядра).

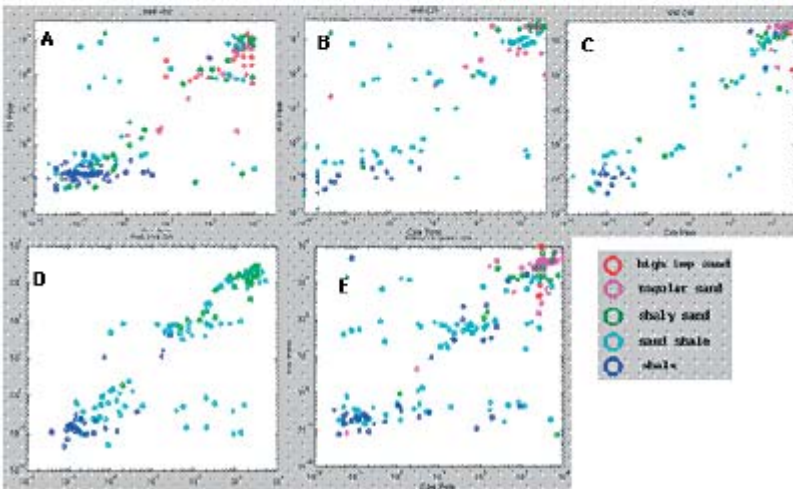


Рисунок 6 Эффективность гибридной системы (оценка против проницаемости ядра).

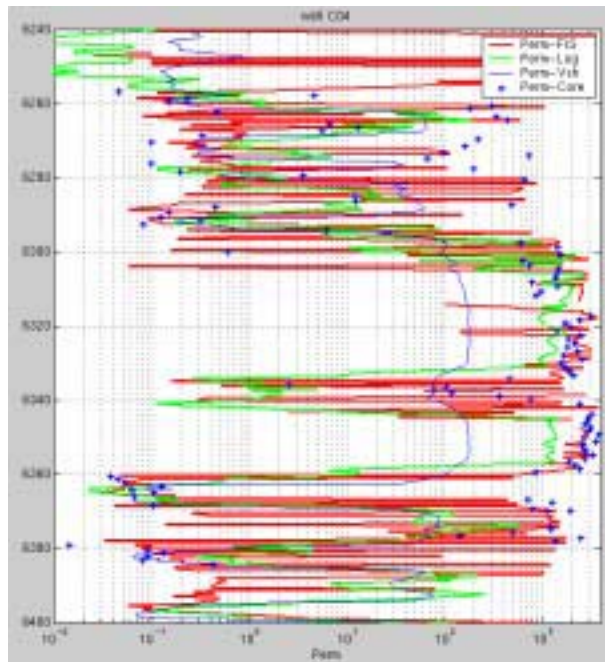


Рисунок 7 Наложенные значения эффективности различных методов и фактического значения для керна на одной и той же диаграмме проницаемости.

системы (Perm-FIS) дают оценки проницаемости более близкие к фактическим значениям проницаемости керна (Perm-Core), Рисунок 6.

Рисунок 7 показывает эффективность (а) регрессии только по Углины, (б) регрессии по Углины и пористости и (в) методов нечеткой гибридной системы. Ясно видно, что результат только для Углины неприемлем, и очевидно, что нечеткая гибридная система превосходит стандартный лучший метод организации производственных работ.

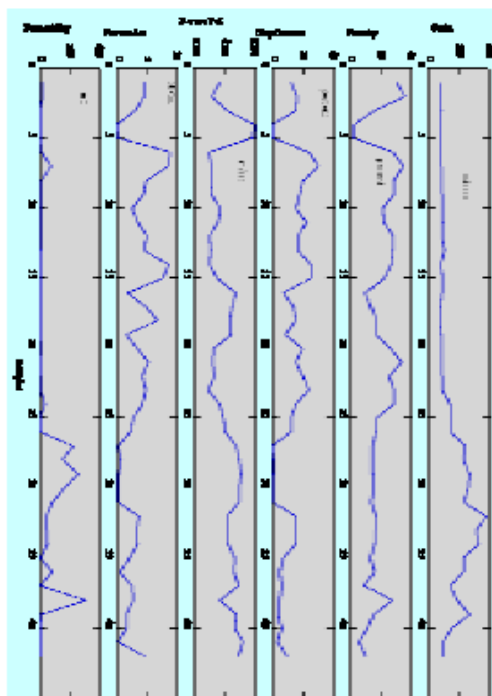


Рисунок 8 Исходные данные (из Боаду (Boadi, 1997))

Пористость	Содержание глины	Содержание глины	P_волн скорость	P_волн затухание
[-0.4585, -0.3170]	[-0.6501, -0.3604]	[-0.6198, -0.3605]	[0.0893, 0.2830]	[-0.6460 -0.3480]
[0.4208, 0.5415]	[-0.9351, -0.6673]	[0.2101, 0.3068]	[-0.7981, -0.7094]	[0.0572 0.2008]
[-0.3610, -0.1599]	[-0.7866, -0.4923]	[-0.3965, -0.1535]	[-0.0850, 0.1302]	[-0.4406 -0.1571]
[-0.2793, -0.0850]	[-0.5670, -0.2908]	[-0.4005, -0.1613]	[-0.1801, 0.0290]	[-0.5113 -0.2439]
[-0.3472, -0.1856]	[-0.1558, 0.1629]	[-0.8093, -0.5850]	[0.1447, 0.3037]	[-0.8610 -0.6173]
[-0.2700, 0.4811]	[-0.8077, -0.5538]	[-0.0001, 0.2087]	[-0.6217, -0.3860]	[-0.1003 0.1316]
[-0.2657, -0.1061]	[0.0274, 0.3488]	[-0.4389, -0.1468]	[-0.1138, 0.1105]	[-0.5570 -0.1945]

Таблица 3 Границы правил, извлеченные из данных.

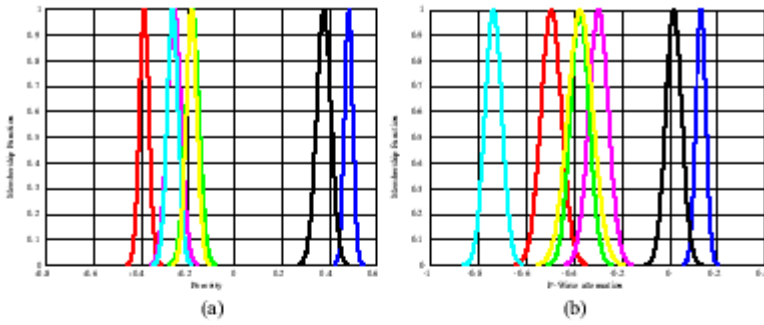


Рисунок 9 Функции принадлежности для разных диапазонов (а) пористости, (б) затухания Р- волн

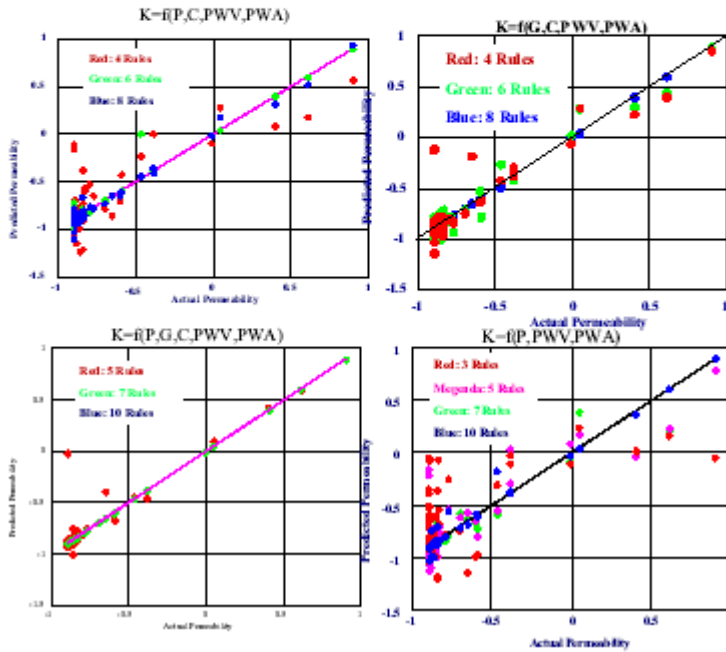


Рисунок 10 Результаты предсказания против исходных измерений проницаемости с разными входными данными

Если Тип пород = песчаники
 И Пористость= $[p1,p2]$
 И размер зерен = $[g1,g2]$
 И содержание глины = $[c1,c2]$
 И скорость Р-волны = $[pwv1,pwv2]$
 И затухание Р-волны= $[pwa1,pwa2]$
 ТО $K^* = a_0 + a_1 * P + a_2 * G + a_3 * C + a_4 * PWV + a_5 * PWA$.

Где, Р - это %пористости, G –размер зерен, С – содержание глины, PWV скорость Р-волн, и PWA затухание Р-волн и К, предсказанная пористость. Таблица 1 показывают типичные правила, извлеченные из данных. Заметим, что для удобства расчетов все данные из разных каротажных диаграмм масштабируются равномерно между -1 и 1, и все результаты приведены в Рисунок 8 Исходных данных в нормализованном виде (из Voadu, 1997). Доступные данные были поделены на три множества данных: обучение, тестирование, и оценка. Обучение нейронечеткой модели проводилось на основе обучающего набора данных и непрерывно проверялось, используя набор данных в фазе обучения. Обучение закончилось, когда было обнаружено

что качество предсказания модели стало бы хуже при продолжении обучения. Далее, число правил увеличилось на одно и обучение повторилось. Используя эту методику, было выбрано оптимальное число правил.

В Таблице 3, Колонке с 1 по 5 показаны функции принадлежности для пористости, размера зерен, содержания глины, скорости Р-волны, и затухания Р-волны соответственно, которые были выведены для каждого из вышеозначенных свойств. Например, Рисунки 8а и 8б показывают такие функции для пористости и затухания Р-волн. Кривые разных цветов показывают крайне низкие, очень низкие, низкие, средние, высокие, очень высокие и крайне высокие пористость и затухание (слева направо). На основе этих функций и описанных выше правил, была предсказана проницаемость. На Рисунке 10 показана результирующая предсказанная проницаемость на основе разных групп входных данных (1997), самый важный параметр породы, влияющий на затухание – это содержание глины. Вдобавок, этот метод имеет достаточные возможности ранжировать различные компоненты входных данных по их влиянию на предсказание.

Заключение

Мы продемонстрировали использование нечеткой логики в различных аспектах исследований и добычи в нефтяной промышленности. Несмотря на многие представленные приложения, такие как анализ каротажа скважин, предсказания свойств коллектора и стратиграфический анализ, потенциал нечеткой логики в геофизике еще полностью не реализован. Поскольку многие приложения существуют совместно, особенно гибридные системы, становится очевидно, что нечеткая логика играет центральную роль в науках о Земле. Возможно, предложенное применение нечетких дифференциальных уравнений, как для задач распространения акустических волн в земле, так и течения флюидов в коллекторе, более полно реализует потенциал нечеткой логики.

Список литературы

Aminzadeh, F. and Simaan, M., Eds. [1991] *Expert Systems in Exploration*, SEG Publications, Tulsa,
 Aminzadeh, F. [1996] Future Geophysical Technology Trends. *The Leading Edge*, **15**, 6, 739-742
 Aminzadeh, F. [1994] Applications of Fuzzy Expert Systems in Integrated Oil Exploration, in *Soft Computing*, Eds., Aminzadeh, F. and Jamshidi, M., Prentice Hall.
 An, P. and Moon, W. M. [1996] Application of fuzzy set theory for integrating geological and geophysical data. 60th Annual International Meeting, SEG, *Expanded Abstracts*, 366-369.
 Boadu, F.K. [1997] Rock properties and seismic attenuation: Neural network analysis, *Pure Applied Geophysics*, **149**, 507-524.
 Bois, P. [1984] Fuzzy Seismic Interpretation, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. GE-22, 6, 692-697.
 Brown, L. F. Jr. and Fisher, W. L. [1977] Seismic-stratigraphic interpretation of depositional systems, examples from Brazilian Rift and Pull-Apart Basins, in E. E. Payton., Ed., *Seismic stratigraphic applications to hydrocarbon exploration*, AAPG Memoir 26, 281-248.
 Griffiths, C. M. [1987] The nature of geologic representation language and consequent constraints on machine interpretation, in *Pattern Recognition and Image Processing*, Aminzadeh, F., Ed., Elsevier Science Ltd.
 Jang, J-S. R. and Sun, C-T. [1997] *Neuro-Fuzzy and Soft Computing: A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence*, Prentice Hall.
 Kosko, B. [1993] *Fuzzy Thinking*, Hyperion, New York.
 Koza, J. [1992] *Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection*. MIT Press, Cambridge, MA.
 Lashgari, B. [1991] Fuzzy Classification with Applications, in Expert Systems in Exploration, Aminzadeh, F. and M. Simaan, Eds., *SEG publications*, Tulsa, 3-32.
 Nikravesh, M. and Aminzadeh, F. [2001] Mining and Fusion of Petroleum Data with Fuzzy Logic and Neural Network Agents,

Journal of Petroleum Science and Engineering, **29**, 221-238.
 Nikravesh, M, Zadeh, L. A.; Korotkikh, V. [2004] Fuzzy Partial Differential Equations and Relational Equations Reservoir Characterization and Modeling Series. *Studies in Fuzziness and Soft Computing*, **142**, 347, Springer Verlag.
 Nikravesh, M., Aminzadeh, F., Zadeh, L. A. [2003] *Soft Computing and Intelligent Data Analysis*, Elsevier.
 Popolie, R. F. and Mendel, J. M. [1989] Heuristically constrained estimation for intelligent signal processing, in Simaan, M. and Aminzadeh, F., Eds, *Advances in geophysical data processing, Vol. 3, Artificial intelligence and expert system in petroleum exploration*, JAI Press, 107-133.
 Sandham, W., Leggett, L. [2003] *Applications of Artificial Neural Networks and Fuzzy Logic*, Kluwer Academic Publisher.
 Tamhane, D., Wong, P.M., Aminzadeh F. [2002] Integrating Linguistic Descriptions and Digital Signals in Petroleum Reservoirs, *International Journal of Fuzzy Systems*, **4**, 1, 586-591.
 Wilkinson, D., Yu, T., Xie, D. [2003] *Genetic Programming Theory and Practice*. Kluwer Academic Publishers, 271-289.
 Wong, P. M., Aminzadeh, F. and Nikravesh, M. [2002] Soft computing for Reservoir Characterization and Modeling, *Series Studies in Fuzziness and Soft Computing*, **80**, Physical Verlag, Springer.