

УДК 522-11

EDN [UNTUYQ](#)

Совершенствование технологии нечетких петрофизических композиций

А.Н. Гресюк, С.В. Шилова

Ухтинский государственный технический университет, пр. Первомайская, 13, Ухта,
169300, Россия

E-mail: lekun90@mail.ru

Аннотация. Представленная технология совершенствования представления экспериментальных данных в виде функций принадлежности для нечётких отношений обладает рядом ключевых преимуществ, особенно в контексте анализа петрофизических данных. Аппроксимация многомодальных функций принадлежности позволяет эффективно работать с нечёткими отношениями, где функции принадлежности имеют сложную форму (не унимодальные, а, например, полимодальные). Особенно актуально для петрофизических зависимостей, где данные часто имеют нелинейный и неоднородный характер. Настройка контрастности визуализации предоставляет гибкие инструменты для наглядного отображения нечётких отношений, что важно для интерпретации сложных данных, что в свою очередь позволяет выделять значимые области функций принадлежности, улучшая восприятие результатов. Инвариантность к порядку параметров, то есть конструкция нечёткого отношения не зависит от того, какой параметр выбран в качестве исходного, а какой — прогнозируемого. Это важно для обеспечения устойчивости и непротиворечивости модели. Данная технология расширяет возможности нечёткого моделирования в петрофизике, обеспечивая более точное представление данных и улучшая интерпретацию сложных зависимостей. Её интеграция с методами нечёткого вывода и композициями делает её перспективным инструментом для анализа и прогнозирования в условиях неопределённости.

Ключевые слова: моделирование, петрофизические параметры, фазификация, нечеткий вывод Мамдами, нечеткая петрофизическая композиция.

Improving the technology of fuzzy petrophysical compositions

A.N. Grisyuk, S.V. Shilova

Ukhta State Technical University, Pervomaiskaya avenue, 13, Ukhta, 169300, Russia

E-mail: lekun90@mail.ru

Abstract. The presented technology for improving the representation of experimental data in the form of membership functions for fuzzy relationships has a number of key advantages, especially in the context of petrophysical data analysis. The approximation of multimodal membership functions makes it possible to work effectively with fuzzy relations, where membership functions have a complex form (not unimodal, but, for example, polymodal). This is especially true for petrophysical dependencies, where data is often nonlinear and heterogeneous. The visualization contrast setting provides flexible tools for visually displaying fuzzy relationships, which is important for interpreting complex data, which in turn allows you to highlight significant areas of membership functions, improving the perception of results. Invariance to the order of parameters, that is, the construction of a fuzzy relation does not depend on which parameter is chosen as the initial one and which is predicted. This is important to ensure the stability and consistency of the model. This technology expands the possibilities of fuzzy modeling in petrophysics, providing a more accurate representation of data and improving the interpretation of complex dependencies. Its integration with fuzzy inference and composition methods makes it a promising tool for analysis and forecasting under conditions of uncertainty.

Keywords: modeling, petrophysical parameters, phasification, fuzzy inference of Mamdani, fuzzy petrophysical composition,

1. Введение

Анализ сложившейся ситуации недропользования показывает, что эпоха «легкой разработки и эксплуатации месторождений» подходит к концу как в России, так и за рубежом.

Разрабатываемые месторождения фактически истощены, что приводит к необходимости ввода в эксплуатацию новых месторождений, обладающие более сложным технологиями в освоении (характеризующих сложным геологическим строением и требующих значительных затрат на строительство инфраструктуры), что приводит к необходимости применения новых технологических методов изучения и освоений недропользования.

В современных условиях моделирование становится центральным звеном в цепочке принятия решений при освоении месторождений. Оно играет ключевую роль ввиду многообразия геологических условий, поскольку является единственным способом получения обобщенных сведений об объекте. Поскольку даже однотипные месторождения из одной области существенно различаются по морфологии, вещественному составу, условиям залегания, степени изменения вмещающих пород и другим характеристикам [1].

Сегодня каждая область моделирования включает широкий арсенал средств анализа, обладающих специфическим инструментарием математических методов и использует при этом значительный набор средств визуализации. Это позволяет более точно и эффективно исследовать сложные геологические системы, принимать обоснованные решения и оптимизировать процессы разработки недр.

В зависимости от того на какой стадии ведутся геологоразведочные работы, полученные результаты при моделировании могут существенно различаться. На ранних этапах, как правило, используются более обобщенные модели, основанные на ограниченных данных, что позволяет получить предварительные оценки и определить перспективные зоны. По мере накопления дополнительных данных и проведения более детальных исследований модели уточняются и становятся более точными.

Одним из ключевых направлений в области моделирования, которое заслуженно занимает важное место, является трехмерное компьютерное моделирование [1]. Данный подход позволяет создавать объемные представления геологических структур, что существенно повышает качество анализа, планирования бурения и разработки месторождений. Трехмерные модели обеспечивают более полное и реалистичное отображение геологических особенностей, способствуют принятию обоснованных решений и оптимизации процессов недропользования [2] (рисунок 1).

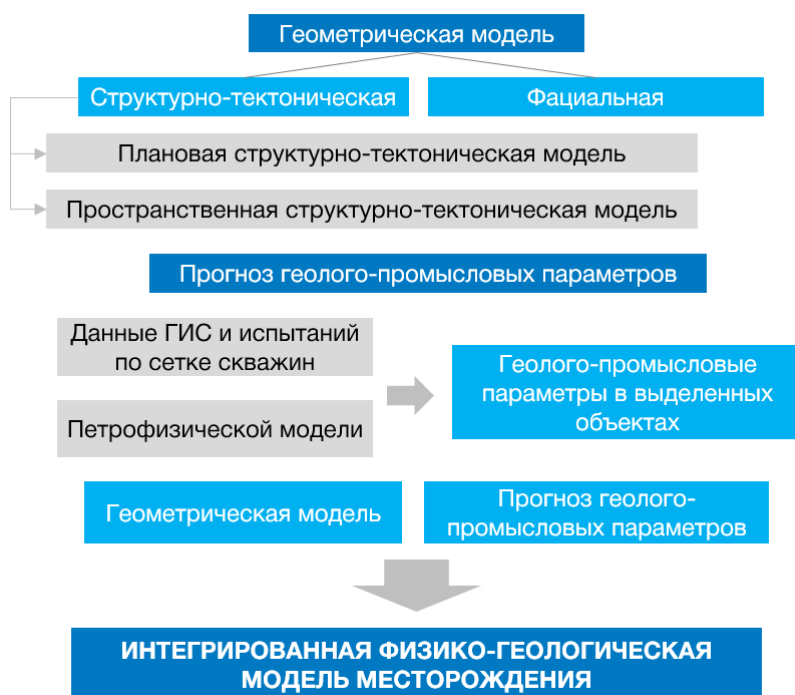


Рисунок 1. Традиционно математическая модель изучаемых геологических объектов.

Также необходимо отметить, что разнообразие геологических объектов, увеличение естественной и искусственной трещиноватости, ухудшение фильтрационных свойств коллекторов приводят к понятию неопределенности данных.

2. Постановка задачи (Цель исследования)

Недостаточно точная и правильная оценка подсчетных параметров в условиях неопределенности влечет за собой неправильные инженерные или управленческие решения, в частности, это может быть связано с выбором экономически нецелесообразных стратегий.

Поэтому сейчас для уменьшения рисков принятия решений, анализ неопределенностей исходных данных является актуальным как никогда.

Так в последние годы для неопределенных задач применяют распространенный для интеллектуальных систем аппарат нечеткого моделирования.

Нечеткое моделирование заключается в преобразовании системы нечетких петрофизических моделей и нечетких данных в модели геологического строения. Математической основой такого подхода является язык теории нечетких множеств, поскольку использование теории вероятностей для этих задач является слишком сложным. Это обусловлено тем, что условие нормировки вероятностных законов значительно усложняет вычислительную схему и зачастую является противоестественным, поскольку вероятность

основывается на многократных измерениях, что в принципе невозможно реализовать в реальных условиях [3].

Таким образом, нечеткое моделирование предоставляет более гибкий и практичный инструмент для описания неопределенности и вариативности геологических данных, избегая сложностей, связанных с вероятностными методами.

Обобщенную технологическую схему построения информационной модели можно представить в виде реализации трех этапов: первый «данные», второй «правила преобразования», третий «поле достоверности и его анализ». При этом основные требования предъявляются к этапу правил преобразования, особенно к процессу фазификации и к выбору наиболее эффективного параметра (рисунок 2). Непосредственным результатом такого подхода, как правило, являются трехмерные модели распределения достоверностей прогнозных параметров.

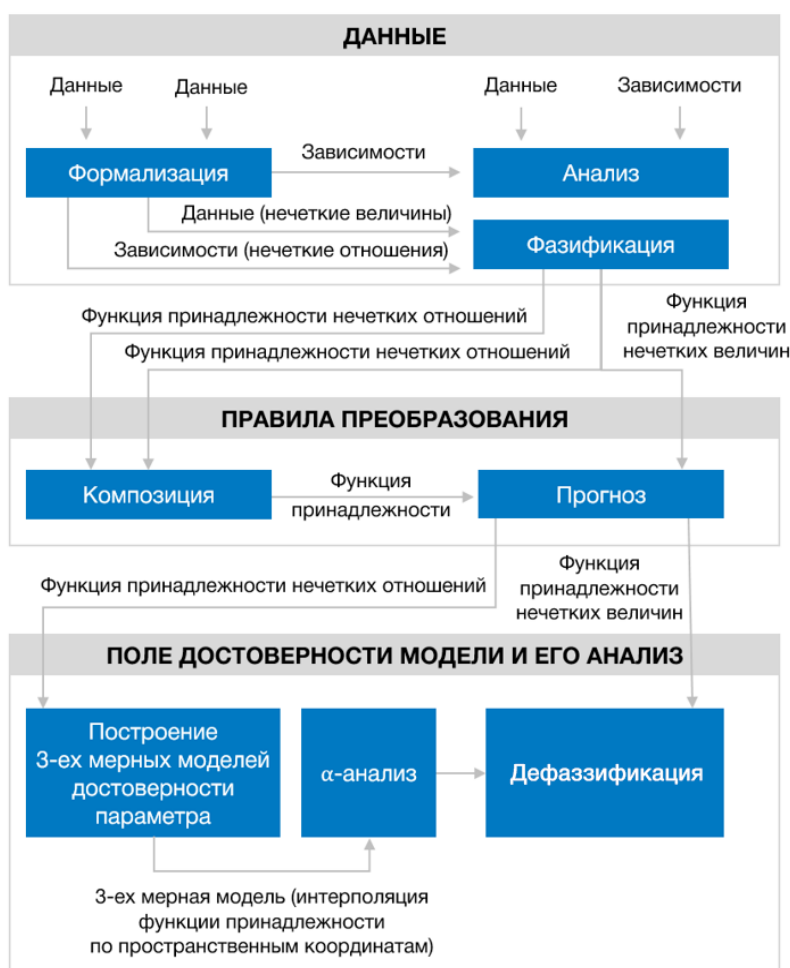


Рисунок 2. Обобщенная технологическая схема построения информационной модели.

Центральной проблемой при построении такой модели является нахождение оптимального эффективного параметра степени размытости функции принадлежности и дальнейшего прогнозирования данных на основе технологии нечеткого вывода Мамдани. Для ее решения разработан метод петрофизических композиций предназначен для прогноза подсчетных параметров по геофизическим данным на основе технологии нечеткого вывода Мамдани.

Впервые предложенная в работе [4], технология получила развитие в [5] при прогнозировании петрофизических параметров и была адаптирована к условиям конкретных месторождений в [6]. В результате коллективом научной школы УГТУ, под руководством профессора Александра Ивановича Кобрунова была создана технология прогноза подсчетных параметров при оценке запасов углеводородов на основе метода нечетких петрофизических композиций. Однако, данная технология имела определенные ограничения. В частности, она использовала специальный — экспоненциальный — вид функции принадлежности, что ограничивало возможность эффективного прогнозирования параметров при наличии многомодальных и несимметричных функций принадлежности. Такие ситуации достаточно часто встречаются в практике анализа петрофизических зависимостей, и их учет требует более гибких подходов к моделированию и обработке данных.

Еще одним недостатком данной технологии являлся порядок выбора исходного и прогнозируемого параметра, так как это существенно влияет при построении конструкций зависимость нечетких отношений между нечеткими величинами. При этом сама технология нечеткого вывода отделена от выбора конкретного приема фазификации данных, что оставляет широкий простор для развития идеи и методов нечетких петрофизических композиций.

В настоящей работе будут представлены основные выдержки по модификации данной технологии.

3. Методы и материалы исследования

Принимаем постулат, состоящий в том, что нечеткое отношение между двумя величинами X и Y задаются системой экспериментальных данных $M = \{x_i, y_i\}, i = 1 \div N$, отражающая меру принадлежности любой пары точек $\xi \in X, \eta \in Y$ к облаку данных $\{x_i, y_i\}, i = 1 \div N$. При возрастании собственно уклонения $\xi \in X, \eta \in Y$ эта функции принадлежности должна убывать. Обозначим:

$$r_i \{ \xi, \eta \} = \| \{ \xi, \eta \} - \{ x_i, y_i \} \|_{R^N} = \left[(x_i - \xi)^2 + (y_i - \eta)^2 \right]^{1/2},$$

Эта величина характеризует расстояние в евклидовом пространстве (ξ, η) от точки $\{x_i, y_i\}$ из облака экспериментальных данных. Тогда мера принадлежности пары $U_M \{ \xi, \eta \}$ облаку точек может быть выражена как сумма значений функции, которая убывает при увеличении расстояния между точками $r_i \{ \xi, \eta \}$.

В параметрической форме класс таких функций может быть представлен:

$$\frac{k}{h^2 + [r_i \{ \xi, \eta \}]^2},$$

где параметры k, h конкретизируют вид монотонно убывающей зависимости обеспечивая адаптированную их форму к конкретной задаче [7].

Если в качестве функции принадлежности $U_M \{ \xi, \eta \}$ принять величину пропорциональную $U'_M \{ \xi, \eta \} = \sum_{i=1}^N \frac{k_i}{h^2 + [r_i \{ \xi, \eta \}]^2}$. И выполнить нормирование на множителе

$U^0 = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \frac{k_i}{h^2}}$. То окончательно функцию принадлежности для выбранной пары $\{ \xi, \eta \}$ к

отношению между двумя величинами X и Y определяется:

$$U_M \{ \xi, \eta \} = \frac{1}{U^0} \sum_{i=1}^N \frac{k_i}{h^2 + [r_i \{ \xi, \eta \}]^2}. \quad (1)$$

Формирование нечеткого отношения между нечеткими величинами X и Z по исходным композициям нечетких отношений, X и Y и Y и Z выводится из данных $M = \{x_i, y_i\}, i = 1 \div N$ и $Q = \{y_i, z_i\}, i = 1 \div L$. И строятся соответствующие нечеткие отношения $U_M \{ \xi, \eta \}$ (между X и Y) и $U_Q \{ \eta, \zeta \}$ (между Y и Z) где пара $\{ \eta \in Y, \zeta \in Z \}$. Далее по методике Мамдани следует сконструировать нечеткое отношение [5]:

$$U_{M*Q}(\xi, \zeta) = \max_{\eta} \left[\min \{ U_M \{ \xi, \eta \}, U_Q \{ \eta, \zeta \} \} \right] \quad (2)$$

Построение нечеткого отношения между петрофизическими характеристиками X и Y состоит в следующем [7]:

- 1) вся область определения $D = X \times Y$ покрывается сеткой (с шагом dx по X и dy – по Y).

Узлы сетки $\{ \xi_j, \eta_j \}$ являются точками расчета меры принадлежности $U_M \{ \xi, \eta \}$

- 2) выбираются параметры контрастности нечеткого отношения h и относительного доверия k_i значениям $\{x_i, y_i\}$. Этот этап относится к этапу методических работ;
- 3) по формуле (1) рассчитывается мера принадлежности $U_M\{\xi_j, \eta_j\}$ адекватная экспериментальным данным $M = \{x_i, y_i\}, i = 1 \div N$.

Использование эффективного параметра h позволяет получать несимметричную меру принадлежности одного параметра при заданном значении другого. Такой подход обеспечивает более гибкое моделирование взаимосвязей между параметрами, учитывая возможное различие в степени влияния одного параметра на другой и наоборот. Это особенно важно при анализе сложных петрофизических зависимостей, где симметричные модели могут не полностью отражать реальные характеристики системы.

Продemonстрируем эффективность метода при использовании формулы (1) на примере.

Исходные данные участвующие при построении нечеткого отношения между двумя параметрами А и В представлены на рисунке 3.

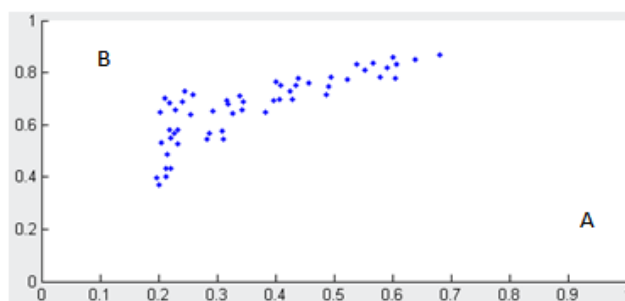


Рисунок 3. Данные для построения нечеткого отношения между характеристиками А и В.

Если взять $h = 0,02$, то нечеткое отношение АВ примет вид, представленный на рисунке 4, в трехмерном пространстве рисунок 5.

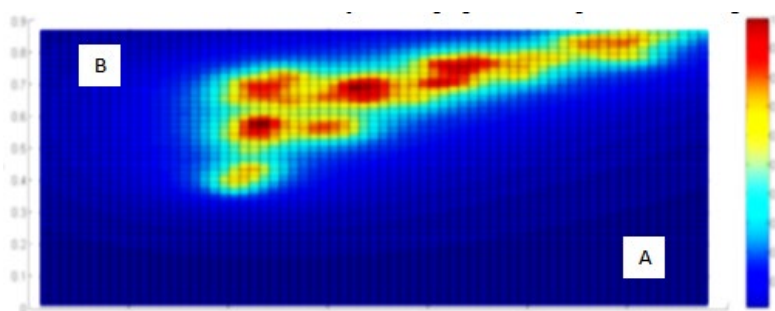


Рисунок 4. Графическое представление нечеткого отношения АВ

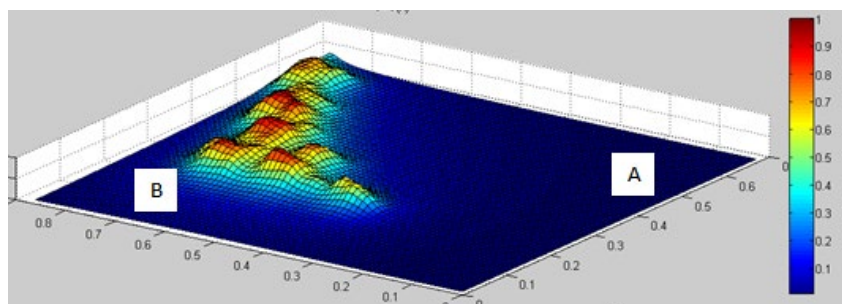


Рисунок 5. Графическое представление нечеткого отношения АВ.

Следует отметить, что при функции принадлежности В от А при заданном значении параметра А имеет многомодовый, несимметричный характер (рисунок 6).

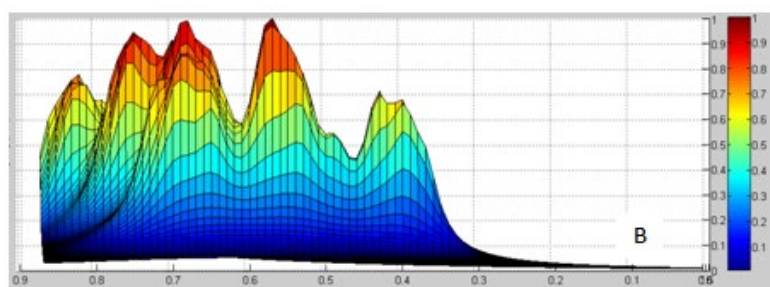


Рисунок 6. Функция принадлежности В при заданном А.

Представленный эксперимент показывает, что в нечетком отношении отсутствуют «дыры» (области с неопределенными значениями меры принадлежности). Сама функция нечеткого отношения обладает плавностью изменения значений и «размытостью» контура.

Фазификация на основе использования формулы (1) позволяет сделать обобщение на случай трех измеряемых характеристик с получением трехмерных функций принадлежности. Продемонстрируем это на тестовом примере. Пусть результаты измерений приведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты тестовых измерений.

№ образца для измерения	Характеристики образца, (усл.ед.)		
	X	Y	Z
1	5	3	4
2	10	11	13
3	15	17	18
4	27	24	23

Ниже приведены 2 примера трехмерной фазификации при различных значениях параметра h.

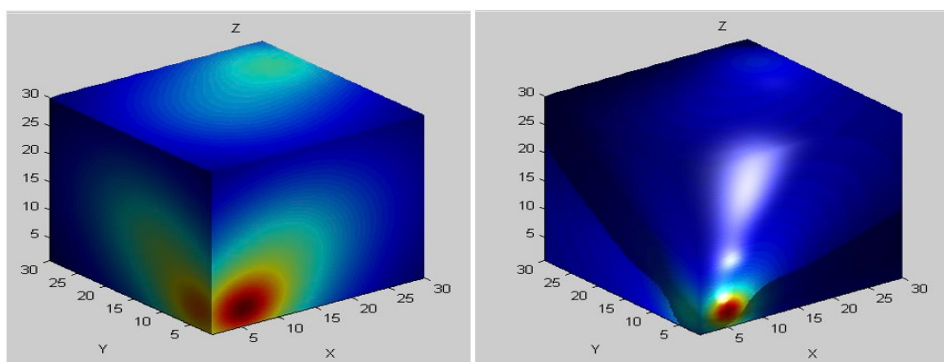


Рисунок 7. Примеры трехмерной фазификации при различных значениях параметра h .

В качестве области значений функции принадлежности был выбран куб со стороной 30 усл.ед. Из рисунка 7 видно, что наибольшее значение функции принадлежности распределены вблизи главной диагонали куба. Это вывод является вполне ожидаемым, если учитывать значения исходных данных.

4. Полученные результаты

Были проведены эксперименты по сопоставлению двух методик: разработанной с ранее изложенной в [1].

Исходные данные эксперимента 1 представлены на рисунке 8.



Рисунок 8. Реальные данные.

Сравнительный результат представления функций принадлежности двух методик представлен в таблице 2.

Таблица 2. Сопоставление результатов фазификации нечетких отношений.

Разработанная методика	Методика [1]

Исходные данные эксперимента 2 представлены на рисунке 9.

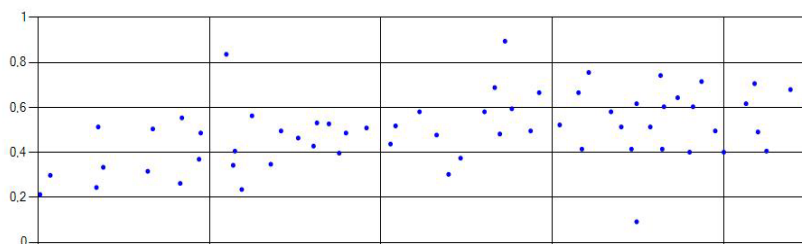
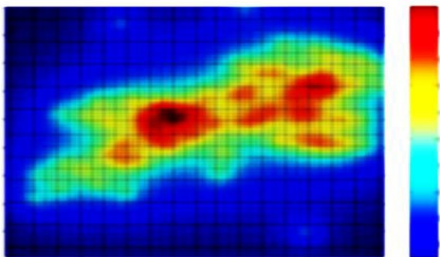
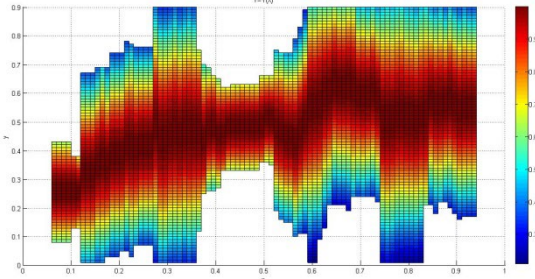


Рисунок 9. Реальные данные.

Нечеткие отношения, полученные в результате расчета по разработанной и представленной в [1] приведено в таблице 3.

Таблица 3. Сопоставление результатов фазификации (по двум методикам).

Разработанная методика	Методика [1]
	

Сравнительные результаты экспериментов показывают, что разработанная методика лишена указанных в начале статьи недостатков и позволяет получать многомодальные описания нечеткого отношения. Такой подход обеспечивает более точное и гибкое моделирование сложных взаимосвязей между параметрами, учитывая их многомодальную природу и несимметричные характеристики, что значительно повышает качество анализа и прогнозирования в области петрофизики и оценки запасов углеводородов.

5. Выводы

Расчет функции принадлежности по формуле (1) позволяет сделать следующие выводы:

- Мера принадлежности наиболее зависит от взаимного расположения точек, чем меньше эффективный параметр h , и результат расчета тем самым приобретает более дифференцированный характер. В этом случае максимумы функции меры

принадлежности располагаются в реально измеренных точках отношения, что позволяет точно отражать локальные особенности данных.

- Мера принадлежности слабее зависит от взаимного расположения реально измеренных точек, чем больше эффективный параметр h . В результате образ результата представляет собой плавно меняющуюся функцию, что способствует сглаживанию локальных особенностей и повышает устойчивость модели к шумам.
- Если увеличивать эффективный параметра h до определенного уровня, то расстояние между измеренными точками фактически нивелируется, и эксперт может рассматривать их как одну. В этом случае различия между точками становятся незначительными, что позволяет объединять их в единое значение для упрощения анализа и моделирования.

Сопоставление результатов композиций приводит к выводу о том, что указанные ранее недостатки преодолены, а технология нечетких петрофизических композиций с модифицированными функциями принадлежности, характеризующими отношение нечетких переменных приемлема для многомодальных функций принадлежности, характерных для исходных данных позволяет получать многомодальные функции принадлежности в итоговой композиции.

Благодарности

Авторы выражают благодарность коллективу школы «Физико-математического моделирования в науках о Земле», принимающих непосредственное участие при разработке данной технологии: руководителю школы профессору Александру Ивановичу Кобрунову, профессору Бурмистровой О. Н., доцентам Матрюк Е. Н., Кожевниковой П. В., Кунцеву В. Е., Кулешову В.Е, Могутову А.С.

Список литературы

1. Никитин А. А., Хмелевской В. К. Комплексирование геофизических методов: учебник для вузов. – Тверь: ООО «издательство ГЕРС», 2004. – 294 с.
2. Кобрунов А. И., Кожевникова П. В., Дорогобед А. Н. Информационная модель месторождения нефти и газа. Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей: материалы 46-й сессии Международного семинара им. Д. Г. Успенского (Пермь, 21-25 января 2019 г.). – Пермь : ГИ УрО РАН, ПГНИУ, 2019. – С. 183-188.

3. Кобрунов А. И., Дорогобед А. Н. Математическое моделирование геологических объектов в условиях неопределенности. ИТ Арктика. – 2018. – №4. – С. 3-19.
4. Кобрунов А.И., Григорьевых А.В. Методы нечеткого моделирования при изучении взаимосвязей между геофизическими параметрами. - М. «Геофизика» № 2 с.17-23 2010 г.
5. Кобрунов А.И., Кулешов В.Е, Могутов А.С., Художилдова А.Н. Метод нечетких петрофизических композиций при прогнозировании петрофизических параметров. Вестник институт Геологии КомиНЦ УРО РАН, №9, сентябрь 2011 стр. 18-24.
6. Кобрунов А.И., Кулешов В.Е., Могутов А.С. Адаптация метода нечётких петрофизических композиций для определения подсчётных параметров Низевого месторождения // Электронный научный журнал "Нефтегазовое дело". 2011. №6. С. 307-315.
7. Дорогобед А.Н. Геомоделирование в условиях неопределенности для задач нефтегазовой отрасли. Дис. канд. тех наук: 05.13.18 : защищена 23.03.16 : утв. 28.04.16 / Дорогобед Алена Николаевна. – Ухта, 2016. – 152 с. – Библиогр.: с. 132-146. – Инв. № 416040750014.