



DOI: <https://doi.org/10.15688/mpcm.jvolsu.2021.4.4>

УДК 519.7
ББК 32.813

Дата поступления статьи: 03.03.2021
Дата принятия статьи: 20.08.2021



ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ НЕЧЕТКОЙ МАТЕМАТИКИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МЕДИЦИНСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

Илья Васильевич Гермашев

Доктор технических наук,
профессор кафедры математического анализа и теории функций,
Волгоградский государственный университет
germashev@volsu.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5507-8508>
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

Виктория Игоревна Дубовская

Аспирант кафедры математического анализа и теории функций,
Волгоградский государственный университет
dubovskajav@volsu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4670-4682>
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

Аннотация. Теория нечетких множеств и нечеткая логика являются весьма перспективным аппаратом для разработки основанных на знаниях систем в медицине для таких задач, как интерпретация наборов медицинских результатов, дифференциация синдромов, диагностика различных заболеваний, выбор оптимальной тактики лечения, а также мониторинг пациентов в режиме реального времени. Нечеткая логика в некотором смысле подобна системе человеческого мышления и, следовательно, может справиться с неопределенностями и неточностями, обнаруженными специалистом в ходе работы с пациентом и постановки медицинского диагноза. Анализ современной медицинской практики и литературных источников показывает преимущества использования методов нечеткого анализа данных. В данной работе представлен обзор

различных исследований в области заболеваний сердечно-сосудистой системы, холеры, опухолей головного мозга, легких и др. Успешное использование различных систем нечеткой логики и приложений классификации позволяет подчеркнуть преимущества использования методов нечеткой логики при борьбе с заболеваниями, которые требуют методов искусственного интеллекта, машинного обучения для их достаточно надежного обнаружения, и сделать вывод о применимости данного подхода к дифференциальной диагностике и лечению рака молочной железы.

Ключевые слова: медицинская диагностика, нечеткая логика, рак молочных желез, консультативно-диагностические системы, методы машинного обучения.

Введение

Медицинская диагностика представляет собой одну из важнейших сфер, в которой используются различные классификационные методы. Применение искусственного интеллекта по отношению к медицинским данным позволяет значительно повысить точность выявления заболеваний [11]. На данный момент наиболее актуальной задачей медицинской диагностики является разработка консультативно-диагностических систем.

Для подобных систем важно учитывать особенности классификации и сложные взаимосвязи признаков, на которые обращают внимание в явной и неявной форме специалисты во время диагностики, лечения, составления прогноза.

Специалист во время работы вместо удобной визуальной среды работает в интуитивной. К примеру, по данным ученых Йельского университета, хирург при работе с помощью эндоскопического устройства, проводя манипуляции с наблюдаемыми на экране предметами, вместо действительного представления, получает двумерную проекцию фактической картины операционного поля. Мышление образами может выступать и как первый этап оценки состояния больного. Такие образы формируют у специалиста определенное представление о течении заболевания и его проявлениях, формируют общую картину. Именно с такими образами происходит мысленное сравнение тех симптомов, которые выявляются во время осмотра и именно то, насколько эти симптомы укладываются в общую картину, как раз от этого и зависит диагноз [7].

Процесс диагностики у опытного высококвалифицированного врача, обладающего образным мышлением и интуицией, может рассматриваться как перцептивное понятие. Полученная информация носит символичный, многозначный характер. Поэтому наблюдаются сложности в извлечении знаний экспертов. Неточность признаков и диагнозов может приводить к нечетким экспертным оценкам.

Интуитивное мышление специалиста может служить основой в постановке диагнозов, выступать ориентиром в направлении диагностического поиска, представлять собой механизм решения задач на основе образных представлений. Базируясь на фактах и опыте, у специалиста формируются знания, представленные в виде мысленных образов. На сегодняшний день вопрос преодоления разрыва между механизмом рассуждения высококвалифицированного врача и отображением данного процесса в базе знаний и системе логического вывода остается открытым, несмотря на существующие перспективные подходы [18]. Путем дальнейшего развития представляется переход от формализованных, отрывающих вариант решения, который соответствует логике врача в учебном варианте,

к способности извлекать и формализовать трудно вербализуемые представления, например, интуитивные или нечеткие для самого эксперта в данной области.

Анализ медицинской практики позволяет сделать вывод о том, что задачи прогнозирования, ранней дифференциальной диагностики характеризуются неполным и нечетким представлением исходных данных. Также имеют место высокая сложность формализации данных, отсутствие четкой границы значений параметров диагностики. Применение аппарата нечеткой логики при решении данных проблем обладает огромным потенциалом, что подтверждается в ряде исследований.

Современное развитие медицинской диагностики очень плотно связано с информационными технологиями, которые призваны избавить специалистов от рутинных операций, позволяют систематизировать знания, обеспечивают поддержку средствами искусственного интеллекта и т.п. Принимая во внимание ярко выраженную нечеткость и противоречивость медицинской информации, очевидно, что использование информационных технологий сопряжено с очень большими затруднениями. Один из способов формализовать неопределенности и обеспечить более корректные и адекватные результаты являются методы нечеткой математики. И здесь действительно получены довольно весомые результаты, которые приведены далее.

Следует отметить, что многие разделы нечеткой математики уже активно применяются для решения довольно широкого спектра задач на различных этапах интеллектуализации процесса медицинской диагностики. Это например, нечеткая логика [26; 38], нечеткие множества [35], нейро-нечеткие сети [5; 31; 36].

Но аппарат нечеткой математики — это инструмент для математического моделирования. Для того чтобы, с одной стороны смоделировать различные процессы и объекты, возникающие при решении медицинских задач, а с другой стороны обеспечить строгое обоснование тех методов, которые и будут решать эти самые задачи. В этом ракурсе оказывается важным обратить внимание на те задачи, которые удастся эффективно решать с помощью нечеткого моделирования и те методы, которые при этом применялись. В частности, этот подход оказался продуктивным для решения задач клинической и дифференциальной диагностики [1; 9; 20; 22; 24; 26; 31; 33], оценки биологических систем [25].

Среди методов, которые обеспечивали довольно высокую результативность, можно выделить моделирование неопределенности [10], классификацию [23; 36].

Более подробное описание выделенных здесь методов нечеткой математики для решения задач медицинской диагностики изложено ниже.

1. Задачи медицинской диагностики, решаемые методами нечеткой логики

Нечеткая логика широко используется для обработки неопределенностей в сложных задачах. В области здравоохранения ее использование оказалось плодотворным в клинической диагностике [24], дифференциальной диагностике [22], оценке ухода за больными.

Среди зарубежных работ в данной области выделяются исследования, посвященные развитию ранней диагностики послеоперационных осложнений [33], оценке сердечной деятельности [25], диагностике раковых опухолей центральной нервной системы [20]. Несмотря на то, что данный вопрос привлек внимание отечественных авторов немного позже, на данный момент уже наблюдается тенденция активного использования возможностей нечеткой логики. Например, была доказана необходимость использования

данных методов в процессе составления прогноза и диагностики язвенной болезни желудка [1], при дифференциальной диагностике стоматологических заболеваний [9].

Благодаря нечеткой логике оказалось возможным использовать неопределенные данные как надежное основание для выявления диабета, а также предсказание возможности его появления. Точность разработанной модели, например, для возраста «слегка стар», «немного молодой», «более или менее молодой» и «очень молодой» составляет 91,2%, 90,3%, 85,9%, 81,7% соответственно [26]. В 2007 году подобную систему предложил К. Полат, который работал над диагностикой диабета с помощью адаптивного нейро-нечеткого подхода. Система показала чувствительность 85% и специфичность 92% с точностью 89,47% [31].

Несколькими годами позже была предложена модель выявления заболевания роговицы глаза [29]. В 2011 году была разработана система прогнозирования сердечных заболеваний, связанных с повреждением сосудов и клеток крови [35]. Нечеткая математика используется уже на этапе описания роста и развития клеток. Так как переход между состояниями клетки является плавным, математическое моделирование с использованием нечеткой математики делает описание биологического процесса более точным и достоверным.

Среди последних исследований следует отметить модель заболевания холерой с нечеткой логикой Мамдани [38], систему диагностики опухоли головного мозга, а также других заболеваний, которые с ним связаны [32].

Был проведен ряд испытаний, подтверждающих успешное применение следующих систем: нечеткая экспертная система для дифференциации синдромов в восточной традиционной медицине, экспертная система для заболеваний легких с использованием нечеткой логики, обоснование случаев для медицинской диагностики с использованием теории нечетких множеств, диагностическая система, сочетающая диагностику болезней западной медицины с синдромной дифференциацией восточной традиционной медицины, нечеткую систему классификации западных и восточных лекарств, нечеткую систему диагностики и лечения интегрированной западной, восточной медицины [30].

В многих системах принятия решения в качестве математического аппарата анализа экспертной информации и результатов инструментальных обследований пациентов выбирается нечеткая логика. Авторами статьи [16], посвященной работе с терапевтическими обследованиями, подчеркивается важность формализации экспертной информации относительно множества диагнозов и их симптомов, согласования результатов инструментальных обследований с экспертными оценками и разработки методики формирования диагностического вывода для конкретной предметной области. Подробный пример системы, созданной на основе методов теории нечетких множеств, будет приведен в следующем разделе [15]. В данной работе выделяются основные проблемы, возникающие при использовании и приобретении знаний для экспертной системы, а также предложены методы их решения с помощью нечетких множеств и нечеткой логики.

В статье Н. Корневского [8] показано, что при построении экспертной системы для многих задач, связанных с прогнозированием, ранней и дифференциальной диагностикой, целесообразным является решение, основанное на методах нечеткой логики принятия решений, адаптированных под классификационные задачи. Для достижения наилучшего качества классификации автором был предложен следующий подход: для выбора формы и параметров функций принадлежности к исследуемым классам состояний и способов их агрегации предлагается использовать методологию разведочного анализа с последующим объединением частных решающего правила в нечеткие коллек-

тивы. Также автором были созданы рекомендации по синтезу частных нечетких решающих правил и их коллективов для построения базы знаний медицинских экспертных систем.

Вопрос использования нечеткой логики при постановке диагноза также рассматривается в работе [37]. Авторы акцентируют внимание на рациональности использования лингвистических терм в медицинской диагностике. По их мнению, диагноз болезни включает в себя несколько уровней неопределенности и неточности. Одно и то же заболевание может проявляться совершенно по-разному, в зависимости от пациента, интенсивности недуга. Симптом может соответствовать различным заболеваниям. С другой стороны, несколько заболеваний, присутствующих у пациента, могут взаимодействовать и мешать обычному описанию любого из заболеваний. Более того, классические понятия здоровья и болезни взаимоисключающи и противоположны. Таким образом, лучшее и наиболее точное описание сущности болезни использует лингвистические термины, которые также неточны и расплывчаты.

Одним из наиболее актуальных примеров использования нечеткой логики для решения насущных медицинских вопросов является работа [21]. Авторами исследования был разработан гибридный интеллектуальный подход к прогнозированию временных рядов COVID-19, сочетающий теорию фракталов и нечеткую логику. Нечеткая логика используется для представления неопределенности в процессе составления прогноза. Для тестирования предложенного подхода использовались горизонты прогнозирования на 10 и 30 дней вперед. Средняя точность прогнозов составляет 98 %, что можно считать хорошим результатом, учитывая сложность проблемы COVID. Предлагаемый подход может помочь людям, ответственным за принятие решений по борьбе с пандемией, путем предоставления информации ближнего горизонта для принятия решения о немедленных действиях, а также более дальнего горизонта (например, 30 дней) для принятия долгосрочных решений.

2. Нечеткие модели, используемые при решении задач медицинской диагностики

Методы теории нечетких множеств и нечеткой логики рассматриваются как подход к созданию экспертной системы, которая способна производить диагностику с учетом нечеткости данных. На сегодняшний день можно отметить ряд исследований, посвященных медицинским системам, которые используют нечеткие выводы (см., например, [19; 34]). В большинстве экспертных систем коэффициенты уверенности используются для отображения недостоверности информации и представляются аналогичным образом, как и в системе диагностики инфекционных заболеваний MYCIN. В данной системе представлено около 450 правил, которые были разработаны при помощи группы по инфекционным заболеваниям из Стэнфордского университета [10].

В системах поддержки врачебных решений зачастую используется нечеткий классификатор, который представляет собой базу нечетких правил. Данное правило является лингвистическим выражением причинно-следственных связей объекта и класса. В основе построения подобных классификаторов лежат следующие критерии:

- 1) индекс интерпретируемости, который характеризует различимость и понятность терм;
- 2) точность, которая оценивается процентом верной классификации;
- 3) сложность или компактность, которая выражается количеством нечетких правил.

Для обеспечения высокой точности работы возможно применение составных методов. Так, например, для классификации нарушений сердечного ритма используется метод Fuzzy k-NN, основанный на базе алгоритма k ближайших соседей. Выходные данные каждого используемого в схеме классификатора (Fuzzy k-NN, многоуровневый персептрон с градиентным спуском и сопряженным градиентом) представляют собой входные данные для конечного классификатора, который использует алгоритм Мамдани [36].

Авторами исследования [15] была представлена экспертная система, способная успешно решать задачу постановки диагноза с помощью блока нечетких выводов. Знания в подобных задачах представляют собой общие взаимосвязи между заболеваниями и симптомами. В качестве достоверности взаимосвязи используется степень истинности, которая представляет собой значения функции принадлежности.

Множество всех болезней определяется как

$$X = \{X_i, \quad i = \overline{1, m}\}.$$

Множество симптомов определяется как

$$Y = \{Y_j, \quad j = \overline{1, n}\}.$$

Для того, чтобы адаптировать знания к нечетким выводам использовались следующие тезисы:

- 1) A_i — наличие болезни i ;
- 2) B_j — наблюдается симптом j ;
- 3) R_{ij} — болезнь X_i по своим признакам соответствует симптому Y_j .

Так как каждый из вышеуказанных тезисов включает определенную долю недостоверности, в данном смысле они могут считаться нечеткими множествами. На их основе были установлены следующие тезисы P_j и P_{ij} :

$$P_j \underset{=}{\Delta} B_j \rightarrow \bigvee_i (R_{ij} \& A_i)'' ,$$

$$P_{ij} \underset{=}{\Delta} (R_{ij} \& A_i) \rightarrow B_j'' ,$$

где \rightarrow — импликация; \bigvee — дизъюнкция; $\&$ — конъюнкция.

К примеру, P_j можно интерпретировать как достоверность следующего утверждения «Если наблюдается симптом B_j , то базируясь на взаимосвязи R_{ij} между болезнями и симптомами проявляется по крайней мере болезнь A_j ».

Подобные достоверности выражаются в терм-множествах, то есть в форме лингвистических значений истинности, среди которых можно выделить «очень вероятно», «достаточно вероятно», «возможно, вероятно», «возможно, ложно» и т. д.

Как указывалось в предыдущем разделе, наблюдается тенденция активного использования аппарата нечеткой логики при работе со злокачественными образованиями. В недавнем времени был проведен анализ применения нечеткой логики в процессе диагностики рака молочных желез. Авторами работы [23] была создана система Fuzzy-AIRS, которая способна вычислять возможность развития онкологического заболевания на основе введенных данных о пациенте. Алгоритм классификации системы искусственного иммунного распознавания (AIRS) и ранее использовался для решения

проблем в медицинской сфере. При этом, отмечена его высокая эффективность при решении задач классификации по отношению к таким заболеваниям как рак молочных желез, болезни сердца, диабет и др. В исследовании механизм распределения ресурсов был заменен на иной, определенный на основе нечеткой логики. Данная система была использована в качестве классификатора при диагностике заболеваний. Точность классификации по набору данных относительно рака молочной железы достигла 98,51%.

Первым шагом представленного алгоритма является предварительная обработка данных. Данные масштабируются таким образом, чтобы Евклидово расстояние между любыми двумя точками из множества рассматриваемых значений было в отрезке $[0; 1]$. Евклидово расстояние рассчитывается по формуле $\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}$, где x, y — векторы признаков, n — количество атрибутов данных. На следующих этапах происходит идентификация ячеек памяти с использованием метода ARB, конкуренция за ресурсы. Подробнее ознакомиться с методом возможно в работе [23].

Для того чтобы избежать проблем избыточного использования ресурсов, ячеек памяти, а также длительного времени классификации, было предложено реализовать механизм распределения ресурсов с помощью нечеткой логики. Входная переменная механизма нечеткого распределения ресурсов — это уровень стимулирования ARB, следовательно, выходная переменная — это количество ресурсов, которые будут выделены этому ARB. Были сформированы как входные, так и выходные функции принадлежности.

Входная переменная варьируется от 0 до 1, выходная от 0 до определенного числа ресурсов и описывается треугольными функциями принадлежности. Определен ряд несложных правил, согласно которым функция принадлежности входной переменной пересчитывается в функцию принадлежности выходной переменной.

Ранее авторами было отмечено, что для решения вопроса медицинской диагностики и учета сложной взаимосвязи между параметрами оптимально использовать нейронные сети (см., например [4; 27]). Как подтверждение можно рассматривать пример использования нечеткой нейронной сети Такаги — Сугено — Канга (TSK) для определения раковых образований в гинекологии. Возможно представление обобщенной схемы вывода в модели TSK, с использованием M правил и N переменных, в виде

$$R_1 : \text{if } x_1 \in A_1^{(1)}; x_2 \in A_2^{(1)}; \dots; x_n \in A_n^{(1)} \text{ then } y_1 = p_{10} + \sum_{j=1}^N p_{1j}x_j;$$

$$R_M : \text{if } x_1 \in A_1^{(M)}; x_2 \in A_2^{(M)}; \dots; x_n \in A_n^{(M)} \text{ then } y_M = p_{M0} + \sum_{j=1}^N p_{Mj}x_j,$$

где A_i^k — значение лингвистической переменной x_i для правила R_k с функцией принадлежности $\mu_A^{(k)}$, $i = \overline{1, N}$; $k = \overline{1, M}$.

При M правилах вывода композиция выходных данных сети аналогична выводу Сугено:

$$y(x) = \frac{\sum_{k=1}^M \omega_k y_k(x)}{\sum_{k=1}^M \omega_k},$$

где $y_k = p_{k0} + \sum_{j=1}^N p_{kj}x_j$.

Следует отметить, что веса ω_k , присутствующие в выражении, представляют собой степень выполнения условий правила $\omega_k = \mu_A^{(k)}(x)$, которые задаются формулой:

$$\mu_A^{(k)}(x) = \prod_{j=1}^N \mu_A^{(k)}(x_j).$$

Согласно результатам исследования [5], использование подобной сети позволяет построить достаточно точную модель диагностирования. Также отмечается тенденция роста качества диагностики при возрастании числа правил. При проведении сравнительного анализа алгоритмов было доказано, что при функциях-константах в «то»-части правил система способна выдавать более точные результаты, при этом за меньшее количество времени, чем линейные функции. Применение четкой нейронной сети Back Propagation также показывает недостаточно хороший результат по сравнению с TSK.

Заключение

Вышеуказанные работы являются достоверным доказательством актуальности использования аппарата нечеткой логики для решения медицинских задач, например при диагностике онкологических заболеваний у женщин. Ранняя дифференциальная диагностика является одной из наиболее сложных проблем современной медицины и маммологии в частности. Данный факт обусловлен тем, что традиционные методы объективной оценки состояния молочных желез (рентгенография, маммография) могут отметить изменения в органе приблизительно через 3–6 месяцев, при этом средний размер выявляемых опухолей равен 1,34 см [3]. Однако высокая вероятность полного излечения характерна для случаев обнаружения опухоли менее 5 мм. На данный момент врачи диагностируют III–IV стадию заболевания приблизительно у 30% больных при первичном обследовании.

Одним из возможных методов решения данной проблемы является метод микроволновой радиотермометрии (РТМ). Данный метод заключается в измерении внутренних и поверхностных температур тканей и последующей оценке интенсивности их теплового излучения. РТМ-метод обладает рядом преимуществ. Во-первых, он относится к исследованиям, которые напрямую могут оценивать активность пролиферативного процесса. Температурные изменения характерны в первую очередь для опасных, быстрорастущих опухолей. Во-вторых, неинвазивность метода позволяет проводить профилактические осмотры женщин и выявлять заболевание на ранней стадии [28].

На сегодняшний день можно отметить ряд работ, посвященных методу микроволновой термометрии, одни из которых описывают возможности и результаты применения метода [2; 28], другие освещают тему разработки физико-математических моделей [17], а также анализа данных радиотермометрии (см., например [6; 12–14]).

Таким образом, особый интерес представляет использование методов нечеткой логики по отношению к термометрическим данным, полученным с помощью РТМ-метода, что позволит повысить эффективность выявления злокачественных опухолей, а также достоверность полученных результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Башлыков, И. А. Использование методов нечеткой логики принятия решений для прогнозирования и диагностики язвенной болезни желудка / И. А. Башлыков, В. В. Буняев, В. Н. Гадалов // Вестник новых медицинских технологий. — 2006. — Т. 13, № 2. — С. 10–12.

2. Вайсблат, А. В. Использование микроволновой радиотермометрии в диагностике рака молочной железы / А. В. Вайсблат, В. Г. Веснин, М. А. Конкин. — Электрон. текстовые дан. — Режим доступа: <http://www.resltd.ru/rus/literature/cancer.htm>. — Загл. с экрана.
3. Веснин, С. Г. Современная микроволновая радиотермометрия молочных желез / С. Г. Веснин, А. М. Каплан, Р. С. Авакян // Медицинский альманах. — 2008. — № 3. — С. 82–87.
4. Дубовская, В. И. Нейронные сети и регрессионный анализ в диагностике рака молочной железы / В. И. Дубовская, А. Г. Лосев // Интеллектуальные системы в науке и технике. Искусственный интеллект в решении актуальных социальных и экономических проблем XXI века. — Пермь : Изд-во Перм. гос. ун-та, 2020. — С. 93–99.
5. Зайченко, Ю. П. Применение систем на нечеткой логике к задаче медицинской диагностики / Ю. П. Зайченко, Н. А. Мурга // Вестник национального технического университета Украины «Киевский политехнический университет». — 2008. — № 49. — С. 14–23.
6. Замечник, Т. В. Управляемый классификатор в диагностике рака молочной железы по данным микроволновой радиотермометрии / Т. В. Замечник, А. Г. Лосев, А. Ю. Петренко // Математическая физика и компьютерное моделирование. — 2019. — № 3. — С. 53–67. — DOI: <https://doi.org/10.15688/mpcm.jvolsu.2019.3.5>.
7. Кобринский, Б. А. К вопросу о формальном отражении образного мышления и интуиции специалиста слабо структурированной предметной области / Б. А. Кобринский // Новости искусственного интеллекта. — 1998. — № 3. — С. 64–76.
8. Корневский, Н. А. Использование нечеткой логики принятия решений для медицинских экспертных систем / Н. А. Корневский // Медицинская техника. — 2015. — № 1 (289). — С. 64–76.
9. Лапытов, А. И. Применение нечеткой логики в дифференциальной диагностике стоматологических заболеваний / А. И. Лапытов, С. В. Радченко. — Электронный медицинский журнал. — Электрон. текстовые дан. — Режим доступа: <http://emm.infomed.su/articles/13-2009-04-10-11-06-36.html>. — Загл. с экрана.
10. Лорьер, Ж.-Л. Системы искусственного интеллекта / Ж.-Л. Лорьер. — М. : Мир, 1991. — 568 с.
11. Лосев, А. Г. Интеллектуальный анализ данных микроволновой радиотермометрии в диагностике рака молочной железы / А. Г. Лосев, В. В. Левшинский // Математическая физика и компьютерное моделирование. — 2017. — № 5 (342). — С. 16–22. — DOI: <https://doi.org/10.15688/mpcm.jvolsu.2017.5.6>.
12. Лосев, А. Г. Анализ данных микроволновой радиотермометрии и гипотеза термоасимметрии / А. Г. Лосев, Е. А. Мазепа, Х. М. Сулейманова // Современная наука и инновации. — 2019. — № 1 (25). — С. 63–72.
13. Мазепа, Е. А. Исследование однородности данных РТМ-диагностики по типу датчика / Е. А. Мазепа, В. И. Дубовская // Труды института математики и информационных технологий Волгоградского государственного университета. — Волгоград : Изд-во ВолГУ, 2019. — С. 24–30.
14. Мазепа, Е. А. Пространство термометрических признаков в задаче диагностики рака молочной железы / Е. А. Мазепа, В. И. Дубовская // Современная наука и инновации. — 2019. — № 4. — С. 39–50.
15. Оразбаев, Б. Б. Экспертные системы для медицинской диагностики с применением методов теории нечетких множеств / Б. Б. Оразбаев. — ИТпортал. — Электрон. текстовые дан. — Режим доступа: <http://tportal.ru/science/tech/ekspertnye-sistemy-diya-meditsinsko/>. — Загл. с экрана.
16. Поворознюк, А. И. Применение нечеткой логики в компьютерных системах медицинской диагностики / А. И. Поворознюк, Е. С. Харченко // Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». Серия: Информатика и моделирование. — 2015. — № 33 (1142). — С. 125–133.
17. Поляков, М. В. Математическое моделирование пространственного распределения радиационного поля в биоткани: определение яркостной температуры для диагностики

/ М. В. Поляков, А. В. Хоперсков // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 1, Математика. Физика. — 2016. — № 5 (36). — С. 73–84.

18. Финн, В. К. Об одном варианте логики аргументации / В. К. Финн // НТИ. Сер. 2. — 1996. — № 5–6. — С. 3–19.

19. Adlassing, K. P. Fuzzy Set Theory in Medical Diagnosis / K. P. Adlassing // IEEE Trans. — 2012. — Vol. SMC-16, № 2. — P. 260–265.

20. Belacel, N. Multicriteria Fuzzy Classification Procedure PROCFTN: Methodology and Medical Application / N. Belacel, M. R. Boulassel // Fuzzy Sets and Systems. — 2004. — № 2 (141). — P. 203–217.

21. Castillo, O. Forecasting of COVID-19 Time Series for Countries in the World Based on a Hybrid Approach Combining the Fractal Dimension and Fuzzy Logic / O. Castillo, P. Melin // Chaos, Solitons & Fractals. — 2020. — № 140. — Article ID: 110242. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2020.110242>.

22. Di Lascio, L. Medical Differential Diagnosis Through Type-2 Fuzzy Sets. / L. Di Lascio, A. Gisolfi, A. Nappi // Proceedings of IEEE FUZZ Conference. — Reno, NV, 2005. — P. 371–376.

23. Gunes, S. Automated Identification of Diseases Related to Lymph System from Lymphography Data Using Artificial Immune Recognition System with Fuzzy Resource Allocation Mechanism (Fuzzy-AIRS) / S. Gunes, K. Polat // Fuzzy Sets and Systems. — 2006. — Vol. 1, № 4. — P. 253–260.

24. Hwang, C. An Interval Type-2 Fuzzy Spherical Shells Algorithm. / C. Hwang, F.-H. Rhee // Proceedings of IEEE FUZZ Conference. — Budapest, Hungary : IEEE, 2004. — P. 1117–1122. — DOI: 10.1109/FUZZY.2004.1375568.

25. Joly, H. Application of Fuzzy Set Theory to the Evaluation of Cardiac Functions. / H. Joly // MEDINFO '80, Proc. 3rd World Conference on Medical Information. — Tokyo : North Holland Publications, 1980. — Vol. 1. — P. 91–95.

26. Lee, C.-S. A Fuzzy Expert System for Diabetes Decision Support Application / C.-S. Lee, M.-H. Wang // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. — 2011. — Vol. Part B (Cybernetics), № 41(1). — P. 139–153.

27. Mazepa, E. Neural Network Modeling in the Construction of Multiple Nonlinear Regression of RTM-Diagnostic Data. / E. Mazepa, V. Dubovskaya // 2020 2nd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). — Lipetsk, 2020. — P. 439–444.

28. Modern Microwave Thermometry for Breast Cance / S. Vesnin, A. K. Turnbull, J. M. Dixon, I. Gorynin // Journal of Molecular Imaging & Dynamics. — 2017. — Vol. 7, iss. 2. — Article ID: 1000136. — DOI: 10.4172/2155-9937.1000136.

29. Moein, S. Iris Disease Classifying Using Neuro-Fuzzy Medicaldiagnosis Machine / S. Moein, M. H. Saraee, M. Moein // Springer Adv Intell Soft Comput. — 2009. — № 56. — P. 359–368.

30. Phuong, N. H. Fuzzy Logic and its Applications in Medicine / N. H. Phuong, V. Kreinovich // International Journal of Medical Informatics. — 2001. — № 62. — P. 165–173.

31. Polat, K. An Expert System Approach Based on Principal Component Analysis and Adaptive Neuro Fuzzy Inference System to Diagnosis of Diabetes Disease / K. Polat, S. Gunes // Elsevier Digital Signal Process. — 2007. — № 17 (4). — P. 702–710.

32. Rana, M. Design of Expert System for Medical Diagnosis Using Fuzzy Logic / M. Rana, R. R. Sedamkar // Int. J. Sci. Eng. Res. — 2013. — № 4 (6). — P. 2914–2921.

33. Sakaguchi, S. Development of an Early Diagnostic System Using Fuzzy Theory for Postoperative Infections in Patients with Gastric Cancer / S. Sakaguchi // Digestive Surgery. — 2004. — № 3 (21). — P. 210–214.

34. Sanchez, E. Linguistic Approach in Fuzzy Logic of W.H.O. Classification of Dyslipoproteinemias / E. Sanchez // Fuzzy Set and Theory Recent Development. — 1982. — P. 582–588.

35. Predictive Data Mining for Medical Diagnosis: An overview of Heart Disease Prediction

/ G. Soni, U. Ansari, D. Sharma, S. Soni // Int. J. Comput. Appl. — 2011. — № 17 (8). — P. 43–48.

36. Ten Years of Genetic-Fuzzy System: a Current Framework and New Trends. / O. Cardon, F. Herrera, F. Gamide, F. Haffman, L. Magdalena // Proceeding of Joint 9th IFSA World Congress and 20th NAFIPS International Conference. — Vancouver : North Holland Publications, 2012. — Vol. 39, iss. 3. — P. 2947–2955.

37. Torres, A. Fuzzy Logic in Medicine and Bioinformatics / A. Torres, J. J. Nieto // Journal of Biomedicine and Biotechnology. — 2006. — P. 1–7.

38. Uduak, A. Proposed Fuzzy Framework for Cholera Diagnosis and Monitoring / A. Uduak, M. Mfon // Int. J. Comput. Appl. — 2013. — № 82 (17). — P. 1–10.

39. Wills, K. Combining Categories in Nursing Assessment Using Interval Valued Fuzzy Sets. / K. Wills, R. I. John, S. Lake // Proceedings of 10th Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge Based Systems (IPMU 2004). — Perugia, Italy : Springer, 2004. — P. 139–53.

REFERENCES

1. Bashlykov I.A., Bunyaev V.V., Gadlov V.N. Ispolzovanie metodov nechetkoy logiki prinyatiya resheniy dlya prognozirovaniya i diagnostiki yazvennoy bolezni zheludka [The Use of Methods of Fuzzy Decision-Making Logic for Predicting and Diagnosing Gastric Ulcer]. *Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologiy* [Bulletin of new medical technologies], 2006, vol. 13, no. 2, pp. 10-12.

2. Vaysblat A.V., Vesnin V.G., Konkin M.A. *Ispolzovanie mikrovolnovoy radiotermometrii v diagnostike raka molochnoy zhelezy* [Use of Microwave Radiothermometry in the Diagnosis of Breast Cancer]. URL: <http://www.resltd.ru/rus/literature/cancer.htm>.

3. Vesnin S.G., Kaplan A.M., Avakyan R.S. Sovremennaya mikrovolnovaya radiotermometriya molochnykh zhelez [Modern Microwave Radiothermometry of the Mammary Glands]. *Meditsinskiy almanakh* [Medical Almanac], 2008, no. 3, pp. 82-87.

4. Dubovskaya V.I., Losev A.G. Neyronnye seti i regressionnyy analiz v diagnostike raka molochnoy zhelezy [Neural Networks and Regression Analysis in the Diagnosis of Breast Cancer]. *Intellektualnye sistemy v nauke i tekhnike. Iskusstvennyy intellekt v reshenii aktualnykh sotsialnykh i ekonomicheskikh problem XXI veka* [Intelligent systems in science and technology. Artificial intelligence in solving urgent social and economic problems of the XXI century] Perm, Izd-vo Perm. gos. un-ta, 2020, pp. 93-99.

5. Zaychenko Yu.P., Murga N.A. Primenenie sistem na nechetkoy logike k zadache meditsinskoj diagnostiki [Application of Fuzzy Logic Systems to the Problem of Medical Diagnostics]. *Vestnik natsionalnogo tekhnicheskogo universiteta Ukrainy «Kievskiy politekhnicheskiiy universitet»* [Bulletin of the National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic University”], 2008, no. 49, pp. 14-23.

6. Zamechnik T.V., Losev A.G., Petrenko A.Yu. Upravlyaemy klassifikator v diagnostike raka molochnoy zhelezy po dannym mikrovolnovoy radiotermometrii [Controlled Classifier in the Diagnosis of Breast Cancer According to Microwave Radiothermometry]. *Matematicheskaya fizika i kompyuternoe modelirovanie* [Mathematical Physics and Computer Modeling], 2019, no. 3, pp. 53-67. DOI: <https://doi.org/10.15688/mpcm.jvolsu.2019.3.5>.

7. Kobrinskiy B.A. K voprosu o formalnom otrazhenii obraznogo myshleniya i intuitsii spetsialista slabo strukturirovannoy predmetnoy oblasti [On the Question of Formal Reflection of Imaginative Thinking and Intuition of a Specialist in a Poorly Structured Subject Area]. *Novosti iskusstvennogo intellekta* [Artificial Intelligence News], 1998, no. 3, pp. 64-76.

8. Korenevskiy N.A. Ispolzovanie nechetkoy logiki prinyatiya resheniy dlya meditsinskikh ekspertnykh sistem [Using Fuzzy Decision Logic for Medical Expert Systems]. *Meditsinskaya tekhnika* [Medical equipment], 2015, no. 1 (289), pp. 64-76.

9. Lapytov A.I., Radchenko S.V. *Primenenie nechotkoy logiki v differentsialnoy diagnostike stomatologicheskikh zabolevaniy* [Application of Fuzzy Logic in

Differential Diagnosis of Dental Diseases]. *Elektronnyy meditsinskiy zhurnal*. URL: <http://emm.infomed.su/articles/13-2009-04-10-11-06-36.html>.

10. Loryer Zh.-L. *Sistemy iskusstvennogo intellekta* [Artificial Intelligence System]. Moscow, Mir Publ., 1991. 568 p.

11. Losev A.G., Levshinskiy V.V. Intellektualnyy analiz dannykh mikrovolnovoy radiotermometrii v diagnostike raka molochnoy zhelezy [Intellectual Analysis of Microwave Radiothermometry Data in the Diagnosis of Breast Cancer]. *Matematicheskaya fizika i kompyuternoe modelirovanie* [Mathematical physics and computer modeling], 2017, no. 5 (342), pp. 16-22. DOI: <https://doi.org/10.15688/mpcm.jvolsu.2017.5.6>.

12. Losev A.G., Mazepa E.A., Suleymanova Kh.M. Analiz dannykh mikrovolnovoy radiotermometrii i gipoteza termoasimmetrii [Analysis of Microwave Radiothermometry Data and Hypothesis of Thermoasymmetry]. *Sovremennaya nauka i innovatsii* [Modern science and innovations], 2019, no. 1 (25), pp. 63-72.

13. Mazepa E.A., Dubovskaya V.I. Issledovanie odnorodnosti dannykh RTM- diagnostiki po tipu datchika [Investigation of the Uniformity of RTM Diagnostic Data by Sensor Type]. *Trudy instituta matematiki i informatsionnykh tekhnologiy Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta* [Proceedings of the Institute of Mathematics and Information Technologies of Volgograd State University] Volgograd, Izd-vo VolGU Publ., 2019, pp. 24-30.

14. Mazepa E.A., Dubovskaya V.I. Prostranstvo termometriceskikh priznakov v zadache diagnostiki raka molochnoy zhelezy [Space of Thermometric Features in the Problem of Breast Cancer Diagnosis]. *Sovremennaya nauka i innovatsii* [Modern science and innovation], 2019, no. 4, pp. 39-50.

15. Orazbaev B.B. *Ekspertnye sistemy dlya meditsinskoj diagnostiki s primeneniem metodov teorii nechetkikh mnozhestv* [Expert Systems for Medical Diagnostics Using Fuzzy Set Theory Methods]. *ITportal* [ITportal] URL: <http://tportal.ru/science/tech/ekspertnye-sistemy-diya-meditsinsko/>.

16. Povoroznyuk A.I., Kharchenko E.S. Primenenie nechetkoy logiki v kompyuternykh sistemakh meditsinskoj diagnostiki [Application of Fuzzy Logic in Computer Systems of Medical Diagnostics]. *Vestnik Natsionalnogo tekhnicheskogo universiteta «Kharkovskiy politekhnicheskiiy institut»*. Seriya: *Informatika i modelirovanie* [Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". Series: Computer Science and Modeling], 2015, no. 33 (1142), pp. 125-133.

17. Polyakov M.V., Khoperskov A.V. Matematicheskoe modelirovanie prostranstvennogo raspredeleniya radiatsionnogo polya v biotkani: opredelenie yarkostnoy temperatury dlya diagnostiki [Mathematical Modeling of Spatial Distribution of Radiation Field in Biotissue: Determination of Brightness Temperature for Diagnostics]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 1, Matematika. Fizika* [The Science Journal of Volgograd State University. Mathematics. Physics], 2016, no. 5 (36), pp. 73-84.

18. Finn V.K. Ob odnom variante logiki argumentatsii [On One Version of the Logic of Argumentation]. *NTI. Ser. 2* [NTI. Ser. 2], 1996, no. 5-6, pp. 3-19.

19. Adlassing K.P. Fuzzy Set Theory in Medical Diagnosis. *IEEE Trans.*, 2012, vol. SMC-16, no. 2, pp. 260-265.

20. Belacel N., Boulassel M.R. Multicriteria Fuzzy Classification Procedure PROCFTN: Methodology and Medical Application. *Fuzzy Sets and Systems*, 2004, no. 2 (141), pp. 203-217.

21. Castillo O., Melin P. Forecasting of COVID-19 Time Series for Countries in the World Based on a Hybrid Approach Combining the Fractal Dimension and Fuzzy Logic. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2020, no. 140, article ID: 110242. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2020.110242>.

22. Di Lascio L., Gisolfi A., Nappi A. Medical Differential Diagnosis Through Type-2 Fuzzy Sets. *Proceedings of IEEE FUZZ Conference*. Reno, NV, 2005, pp. 371-376.

23. Gunes S., Polat K. Automated Identification of Diseases Related to Lymph System From Lymphography Data Using Artificial Immune Recognition System with Fuzzy Resource Allocation Mechanism (Fuzzy-AIRS). *Fuzzy Sets and Systems*, 2006, vol. 1, no. 4, pp. 253-260.

24. Hwang C., Rhee F.C.-H. An Interval Type-2 Fuzzy Spherical Shells Algorithm. *Proceedings of IEEE FUZZ Conference*. Budapest, Hungary, IEEE, 2004, pp. 1117-1122. DOI:

10.1109/FUZZY.2004.1375568.

25. Joly H. Application of Fuzzy Set Theory to the Evaluation of Cardiac Functions. *MEDINFO '80, Proc. 3rd World Conference on Medical Information*. Tokyo, North Holland Publications, 1980, vol. 1, pp. 91-95.

26. Lee C.-S., Wang M.-H. A Fuzzy Expert System for Diabetes Decision Support Application. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 2011, vol. Part B (Cybernetics), no. 41(1), pp. 139-153.

27. Mazepa E., Dubovskaya V. Neural Network Modeling in the Construction of Multiple Nonlinear Regression of RTM-Diagnostic Data. *2020 2nd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA)*. Lipetsk, 2020, pp. 439-444.

28. Vesnin S., Turnbull A.K., Dixon J.M., Gorynin I. Modern Microwave Thermometry for Breast Cance. *Journal of Molecular Imaging & Dynamics*, 2017, vol. 7, iss. 2, article ID: 1000136. DOI: 10.4172/2155-9937.1000136.

29. Moein S., Saraee M.H., Moein M. Iris Disease Classifying Using Neuro-Fuzzy Medicaldiagnosis Machine. *Springer Adv Intell Soft Comput*, 2009, no. 56, pp. 359-368.

30. Phuong N.H., Kreinovich V. Fuzzy Logic and Its Applications in Medicine. *International Journal of Medical Informatics*, 2001, no. 62, pp. 165-173.

31. Polat K., Gunes S. An Expert System Approach Based on Principal Component Analysis and Adaptive Neuro Fuzzy Inference System to Diagnosis of Diabetes Disease. *Elsevier Digital Signal Process*, 2007, no. 17 (4), pp. 702-710.

32. Rana M., Sedamkar R.R. Design of Expert System for Medical Diagnosis Using Fuzzy Logic. *Int. J. Sci. Eng. Res*, 2013, no. 4 (6), pp. 2914-2921.

33. Sakaguchi S. Development of an Early Diagnostic System Using Fuzzy Theory for Postoperative Infections in Patients with Gastric Cancer. *Digestive Surgery*, 2004, no. 3 (21), pp. 210-214.

34. Sanchez E. Linguistic Approach in Fuzzy Logic of W.H.O. Classification of Dyslipoproteinemias. *Fuzzy Set and Theory Recent Development*, 1982, pp. 582-588.

35. Soni G., Ansari U., Sharma D., Soni S. Predictive Data Mining for Medical Diagnosis: An overview of Heart Disease Prediction. *Int. J. Comput. Appl*, 2011, no. 17 (8), pp. 43-48.

36. Cardon O., Herrera F., Gamide F., Haffman F., Magdalena L. Ten Years of Genetic-Fuzzy System: a Current Framework and New Trends. *Proceeding of Joint 9th IFSA World Congress and 20th NAFIPS International Conference*. Vancouver, North Holland Publications, 2012, vol. 39, iss. 3, pp. 2947-2955.

37. Torres A., Nieto J.J. Fuzzy Logic in Medicine and Bioinformatics. *Journal of Biomedicine and Biotechnology*, 2006, pp. 1-7.

38. Uduak A., Mfon M. Proposed Fuzzy Framework for Cholera Diagnosis and Monitoring. *Int. J. Comput. Appl*, 2013, no. 82 (17), pp. 1-10.

39. Wills K., John R.I., Lake S. Combining Categories in Nursing Assessment Using Interval Valued Fuzzy Sets. *Proceedings of 10th Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge Based Systems (IPMU 2004)*. Perugia, Italy, Springer, 2004, pp. 139-53.

APPLICATION OF FUZZY MATHEMATICS MODELS FOR SOLVING MEDICAL DIAGNOSTICS PROBLEMS

Ilya V. Germashev

Doctor of technical sciences, Professor,
Department of Mathematical Analysis and Function Theory,
Volgograd State University
germashev@volsu.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5507-8508>
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

Viktoriya I. Dubovskaya

Postgraduate Student, Department of Mathematical Analysis and Function Theory,
Volgograd State University
dubovskajav@volsu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4670-4682>
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

Abstract. Fuzzy set theory and fuzzy logic are a very suitable and applicable framework for developing knowledge-based systems in medicine for tasks such as interpreting medical outcome sets, differentiating syndromes, diagnosing various diseases, choosing optimal treatment tactics, and monitoring patients in real time. fuzzy logic is similar to the system of human thinking and, therefore, can cope with the uncertainties and inaccuracies found by the specialist in the course of working with the patient and making a medical diagnosis. The analysis of modern medical practice and literature sources proves the advantages of using fuzzy data analysis methods. this paper presents an overview of various studies in the field of diseases of the cardiovascular system, cholera, brain tumors, lungs, etc. the successful use of various fuzzy logic systems and classification applications highlights the advantages of using fuzzy logic methods in the fight against diseases that require software for their accurate detection, and concludes that this strategy is applicable to the differential diagnosis and treatment of breast cancer.

Key words: medical diagnostics, fuzzy logic, breast cancer, consultative and diagnostic systems, machine learning methods.