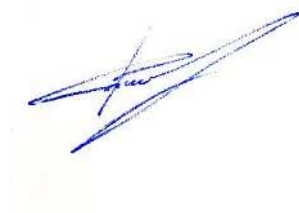


*на правах рукописи*



**Родионов Дмитрий Сергеевич**

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКИ ФОРМ  
ПИЕЛОНЕФРИТА И ОЦЕНКИ СТЕПЕНИ ИХ ТЯЖЕСТИ НА ОСНОВЕ  
ГИБРИДНЫХ НЕЧЕТКИХ МОДЕЛЕЙ**

Специальность: 2.2.12. Приборы, системы и изделия  
медицинского назначения (технические науки)

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Курск – 2023

Работа выполнена на кафедре биомедицинской инженерии Юго-Западного государственного университета

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Корневский Николай Алексеевич**

Официальные оппоненты: **Чопоров Олег Николаевич**  
доктор технических наук, профессор,  
Воронежский государственный медицинский университет им. Н.Н. Бурденко, проректор по цифровой трансформации (г. Воронеж)

**Коржук Николай Львович**  
кандидат технических наук, доцент,  
Тульский государственный университет, кафедра приборов и биотехнических систем, профессор кафедры (г. Тула)

Ведущая организация: **Южный федеральный университет**  
(г. Ростов-на-Дону, г. Таганрог)

Защита состоится «21» апреля 2023 года в 14<sup>00</sup> часов на заседании объединенного диссертационного совета Д 999.099.03, созданного на базе Юго-Западного государственного университета, Орловского государственного университета имени И.С. Тургенева, Белгородского государственного национального исследовательского университета, по адресу: 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Юго-Западного государственного университета и на сайте <https://swsu.ru/upload/iblock/fd2/dmf7oq2lop6kdo6g9znua7sbz9jcv5u/Dissertatsiya-Rodionov-D.S.pdf>

Автореферат разослан «\_\_» февраля 2023 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Милостная Наталья Анатольевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Анализ российской и иностранной литературы по проблемам урологии показывает, что, несмотря на несомненные успехи современной медицины, пиелонефрит является опасной и распространенной патологией мочеполовой системы, с продолжающимся ростом. Этот вид заболевания, являясь неспецифической патологией почек, распространен в различных возрастных группах, а частота его возникновения превышает частоту появления всех болезней почек, взятых вместе (Серегин С.П., Новиков А.В., Маждраков Г.Н., Чернега М.С. и др.).

О сложностях, связанных с диагностикой этой патологии, говорит тот факт, что не выявленный пиелонефрит у живых пациентов находят у каждого из 10-12 умерших, причем у пожилых людей на вскрытии пиелонефрит выявляют у каждого пятого умершего. Современные исследователи называют два основных обстоятельства, приводящих к значительным диагностическим сложностям: многообразие и многогранность проявлений заболевания, развивающегося как на местном, так на системном уровнях, и то, что используемые в урологической практике клинические и лабораторные методы исследования зачастую не позволяют ни подтвердить, ни исключить диагноз (Серегин С.П., Кухтевич А.В., Новиков А.В. и др.).

Проблема осложняется так же и тем, что протекание болезни почек в условиях нарушений уреодинамики сопровождается развитием осложнений в виде интоксикации, уросепсиса, септического шока, что часто приводит к летальности.

Значительного снижения осложнений и летальности при пиелонефрите можно достичь своевременной и точной оценкой форм и степени тяжести протекания исследуемого заболевания, что позволит выбрать адекватные схемы профилактики и лечения (Серегин С.П., Новиков А.В., Корневский Н.А., Чернега М.С. и др.).

Исходя из сказанного, разработка и исследование эффективных методов, моделей и программных средств диагностики форм пиелонефрита и оценки степени его тяжести является актуальной научной задачей.

**Степень разработанности темы исследований.** Анализ публикаций отечественных и зарубежных ученых показал, что в настоящее время отсутствует единый подход к выбору оптимальных схем ведения пациентов, страдающих различными формами и степенью тяжести пиелонефрита, поэтому в современной литературе до сих пор оспаривается диагностическая ценность основных диагностических критериев. Основные трудности возникают при дифференциальной диагностике различных форм пиелонефрита, которая осложняется многочисленностью разнородных показателей, неоднозначными выводами и заключениями, что значительно затрудняет оценку результатов исследования и снижает их диагностическую надежность. Работами профессора Серегина С.П. и его учеников было показано, что устранить ряд проблем, связанных с прогнозированием и диагностикой в урологии, включая заболевания почек, можно, используя

современные математические методы и информационные технологии (Серегин С.П., Новиков А.В., Коцарь А.Г., Чернега М.С. и др.), однако использование наиболее популярных в медицинских исследованиях математических методов затрудняется тем, что исследуемый класс задач имеет плохоформализуемую структуру с сильно пересекающейся и неопределенной структурой классов. Опыт решения такого класса задач показал, что требуемое качество принятия медицинских решений может быть достигнуто при использовании технологии мягких вычислений и, в частности, методологии синтеза гибридных нечетких решающих правил (МСГНРП), которая реализуется программным обеспечением систем поддержки принятия решений (СППР) медицинского назначения (Кореневский Н.А., Серегин С.П., Устинов А.Г., Филист С.А., Шаталова О.В.).

С учетом вышеуказанного сформулированы цель и задачи исследования.

**Цель работы:** повышение качества медицинской помощи урологическим больным путём разработки метода, моделей и алгоритма дифференциальной диагностики форм пиелонефрита и определения степени его тяжести в условиях недостаточности информации с пересекающейся структурой исследуемых классов состояний выбранной патологии.

Для достижения поставленной в работе цели решены **следующие задачи:**

- проведен разведочный анализ структуры данных, описывающих исследуемую патологию с учетом возможных сочетанных заболеваний и различных функциональных состояний, и выбран математический аппарат исследования;
- определен состав информативных признаков, оптимизированный с использованием теории измерения латентных переменных;
- разработан метод синтеза гибридных нечетких моделей дифференциальной диагностики форм пиелонефрита и оценки степени их тяжести;
- синтезированы модели дифференциальной диагностики серозной, гнойной и переходной форм пиелонефрита для различных блоков информативных признаков, с учетом сочетанных патологий и состояния беременности;
- получена математическая модель оценки степени тяжести исследуемых форм пиелонефрита;
- предложены алгоритм управления и структура базы знаний системы поддержки принятия решений для врача, ведущего пациентов, страдающих пиелонефритом;
- выполнена проверка предложенных моделей принятия решений на репрезентативных контрольных выборках.

**Научная новизна исследований** заключается в следующем:

- разработан метод синтеза моделей дифференциальной диагностики форм пиелонефрита и оценки степени его тяжести,

отличающийся использованием гетерогенных блоков данных, описывающих состояние иммунного и оксидантного статуса крови в сочетании с блоком признаков, характеризующих степень тяжести исследуемой патологии, и обеспечивающий решение задачи синтеза гибридных нечетких решающих правил с учетом состояния беременности и сопутствующих патологий, что обеспечило повышение качества принимаемых решений по пациентам с различными формами исследуемого заболевания;

– синтезированы гибридные модели дифференциальной диагностики серозной, гнойной и переходной форм пиелонефрита, отличающиеся использованием блоков информативных признаков, характеризующих иммунный и оксидантный статус организма с учетом сопутствующих патологий и состояния беременности, позволяющие решать задачи диагностики выбранных классов состояний с уверенностью не ниже 0,91, что позволяет рекомендовать полученные результаты к применению в практике врачей урологов;

– синтезирована нечеткая модель оценки степени тяжести исследуемых форм пиелонефрита, в которой используется информация, характеризующая функционирование организма на различных его уровнях, обеспечивающая уверенность в принимаемых решениях не хуже 0,9, что является хорошим результатом для плохоформализуемой нечеткой структуры данных, характерной для исследуемых классов состояний;

– разработана система поддержки принятия решений, отличающаяся тем, что в её базу знаний включены программные модули расчета степени тяжести поражения центральной гемодинамической системы, дифференциальной диагностики форм и степени тяжести пиелонефрита, а также модуль формирования схем профилактики и лечения, работающие под управлением оригинального алгоритма принятия решений, что обеспечивает повышение качества ведения пациентов с различными формами заболевания и при наличии сочетанных патологий.

**Теоретическая и практическая значимость работы** определяется дальнейшим развитием системного анализа, методов синтеза биотехнических систем медицинского назначения, теории распознавания образов, нечеткой логики принятия решений, ориентированных на решение задач повышения качества медицинской помощи пациентам, болеющим пиелонефритом, с учетом его различных стадий, степени тяжести и возможных сочетанных заболеваний за счет разработки нового направления в создании СППР для врачей урологов.

Полученные в диссертации результаты позволили разработать СППР с оригинальной базой знаний и алгоритмом управления, практическое внедрение которой в урологии позволит поднять на новый уровень качество оказания медицинской помощи пациентам, страдающим различными формами пиелонефрита с учетом различных форм его протекания и с возможной сопутствующей патологией.

Работа выполнена в соответствии с Федеральной целевой программой «Предупреждение и борьба с социально-значимыми заболеваниями» и с

научными направлениями Юго-Западного государственного университета «Медико-экологические информационные технологии» и «Моделирование биологических и медицинских процессов на основе информационных технологий».

Результаты работы внедрены в учебном процессе Юго-Западного государственного университета при подготовке специалистов по направлению 30.05.03 «Медицинская кибернетика», прошли испытания в Клиническом Научно-Медицинском центре «Авиценна» г. Курска, в котором наблюдаются пациенты с различной формой и степенью тяжести пиелонефрита.

**Методология и методы исследований.** Для решения поставленных задач использовались методы математической статистики, системного анализа, теории биотехнических систем и распознавания образов, экспертное оценивание и теория нечетких множеств. При разработке гибридных моделей в качестве инструментария использовался Matlab 9.8.0 с графическим интерфейсом пользователя для Neural Network Toolbox со встроенным пакетом Fuzzy Logic Toolbox.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Метод синтеза нечетких гибридных моделей дифференциальной диагностики форм пиелонефрита и оценки степени его тяжести, отличающийся использованием гетерогенных блоков данных, описывающих состояние иммунного и оксидантного статуса крови в сочетании с блоком признаков, характеризующих степень тяжести исследуемой патологии, позволил решить задачу синтеза гибридных нечетких решающих правил с учетом сопутствующих патологий и состояния беременности, обеспечив повышение качества принимаемых решений при ведении исследуемой категории пациентов.

2. Нечеткие гибридные модели дифференциальной диагностики серозной, гнойной и переходной форм пиелонефрита с учетом сопутствующих патологий и состояния беременности, позволяют решать задачи диагностики выбранных классов состояний с уверенностью не ниже 0,91, а задачи оценки степени тяжести исследуемых форм пиелонефрита с уверенностью не ниже 0,9.

3. Разработанная система поддержки принятия решений врача уролога с иерархической структурой базы знаний и с гибридными решающими модулями, работающими под управлением оригинального алгоритма принятия решений, позволяет управлять процессом ведения пациентов с различными формами пиелонефрита, что обеспечивает повышение качества оказания медицинской помощи больным, страдающим пиелонефритом с учетом наличия сочетанных патологий и различных функциональных состояний пациентов.

**Степень достоверности и апробации результатов.** Достоверность результатов исследования подтверждена отсутствием противоречий результатам, полученным другими исследователями при решении аналогичных задач, корректным применением выбранного математического

аппарата, а также результатами экспериментальной проверки предложенных решающих правил и алгоритма принятия решений на репрезентативных контрольных выборках.

Основные теоретические положения и научные результаты диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили положительную оценку на Всероссийских и Международных научных конференциях: всероссийская научно-техническая конференция студентов, молодых ученых и специалистов «Биотехнические, медицинские и экологические системы, измерительные устройства и робототехнические комплексы. Биомедсистемы» (Рязань, 2017, 2021г.); XIII Международная научная конференция с научной молодежной школой имени И.Н. Спиридонова «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии» (Суздаль, 2018г.); всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Биотехнология и биомедицинская инженерия» (Курск: КГМУ, 2018г.); международная научно-техническая конференция «Медико-экологические информационные технологии» (Курск, 2018-2022г.), на научно-технических семинарах кафедры биомедицинской инженерии ЮЗГУ (Курск, 2017-2023г.).

**Публикации.** Основные результаты диссертационного исследования отражены в 13 научных работах, среди которых 7 статей в ведущих рецензируемых научных журналах, публикация в журнале, индексируемом в международной наукометрической базе Scopus, патент.

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, четырёх разделов, заключения и списка литературы, включающего 141 отечественное и 31 зарубежное наименование. Работа изложена на 144 страницах машинописного текста, содержит 18 рисунков и 18 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность темы диссертации, определяются цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость работы.

**В первом разделе** приводятся сведения об этиологии, патогенезе и методах диагностики пиелонефрита, его форм. Производится анализ моделей и методов, используемых в медицинских приложениях и в частности используемых для решения задач диагностики пиелонефрита, дается обзор информационных и интеллектуальных технологий, применяемых в медицинской практике. Показывается, что хорошие практические результаты для решения поставленных в работе задач достигаются при использовании в качестве базового математического аппарата нечеткой логики принятия решений. В заключении первого раздела сформулированы цели и задачи исследования.

**Во втором разделе** описывается объект и методы исследования, формируется пространство информативных признаков с использованием теории измерения латентных переменных, разрабатывается метод синтеза гибридных нечетких моделей дифференциальной диагностики форм

пиелонефрита и оценки степени его тяжести и осуществляется синтез базовой модели дифференциальной диагностики форм пиелонефрита

В соответствии с целью диссертационной работы объектом исследования являются структуры данных, описывающих состояния исследуемой категории пациентов, метод, модели и алгоритмы для системы поддержки принятия решений (СППР) врача уролога.

Исходным материалом для разведочного анализа явилось тринадцатилетнее наблюдение профессора Серегина С.П. и его учеников за 450 больными с различными формами пиелонефрита.

В ходе исследований проводилось общеклиническое обследование с осмотром, лабораторными и инструментальными исследованиями.

Для предварительного разведочного анализа (РА) группа высококвалифицированных экспертов под руководством профессора Серегина С.П. отобрала группу из 94 признаков, включающих в себя факторы риска возникновения и обострения пиелонефрита и признаки, предназначенные для решения задач диагностики и определения форм пиелонефрита. После проведения оптимизации их состава с использованием пакета RUMM 2020, реализующего модель Г. Раша, этот список сократился до 13. Сгруппированные в три блока, эти признаки представлены в таблицах 1, 2 и 3.

Таблица 1. Список показателей, характеризующих оксидантный статус плазмы крови

Показатели	Единицы измерения	1	2
		Серозный пиелонефрит до лечения	Гнойный пиелонефрит после лечения
		$x_1$ : МДА	Мкмоль/л
$x_2$ : АГП	у.е.	$0,38 \pm 0,03$	$1,3 \pm 0,06$
$x_3$ : СОД	у.е.	$16,5 \pm 0,5$	$17,5 \pm 0,5$
$x_4$ : Каталаза	мкат/л	$16 \pm 0,5$	$18 \pm 0,6$

Таблица 2. Показатели цитокинового спектра плазмы крови

Показатели	Единицы измерения	1	2	3
		Здоровые	Серозный	Гнойный
$x_5$ : TNF $\alpha$	пкг/мл	$5,8 \pm 0,7$	$36,8 \pm 1,9$	$23,6 \pm 1,6$
$x_6$ : IL-1 $\alpha$	пкг/мл	$3,8 \pm 0,3$	$20,4 \pm 1,1$	$14,3 \pm 1,0$
$x_7$ : IL-6	пкг/мл	$1,7 \pm 0,2$	$14,1 \pm 1,5$	$8,2 \pm 0,5$
$x_8$ : IL-8	пкг/мл	$24,7 \pm 1,9$	$52,6 \pm 2,3$	$55,2 \pm 3,6$
$x_9$ : IFN $\alpha$	пкг/мл	$6,2 \pm 0,8$	$27,3 \pm 1,7$	$167,3 \pm 5,1$
$x_{10}$ : IL-10	пкг/мл	$2,9 \pm 0,05$	$12 \pm 1,1$	$1,3 \pm 0,06$
$x_{11}$ : IL-1RA	пкг/мл	$450 \pm 12,7$	$123,4 \pm 2,1$	$326,4 \pm 13,3$



Таблица 3 Список показателей, характеризующих функционально-метаболическую активность нейтрофилов периферической крови

Показатели	Единицы измерения	1	2	3
		Здоровые	Серозный	Гнойный
$x_{12}$ : Активность и интенсивная фагоцитоза (ФП)	%	79,1±3,1	46,8±3,2	57,8±4,2
$x_{13}$ : Активность кислородозависимых систем (НСТ)	%	13±0,5	64±3,5	72±4,5

Проведенный РА позволил сделать вывод о том, что структура данных, описывающих состояния пациентов, страдающих различными формами пиелонефрита, имеет нечеткую природу с пересекающимися классами состояний, что делает целесообразным в качестве базового математического аппарата исследования выбрать методологию синтеза гибридных нечетких решающих правил (МСГНРП), которая хорошо зарекомендовала себя при решении большого круга задач со структурой данных, аналогичной решаемым в работе задачам (Кореневский Н.А., Филист С.А., Серегин С.П., Чернега М.С.).

Основными элементами решающих правил МСГНРП являются функции принадлежности  $\mu_{\omega_\ell}(x_i)$  к классам  $\omega_\ell$  с выбранным типом базовой переменной (информативные признаки, комплексные и интегральные показатели, вычисляемые различными способами, включая правила нечеткого вывода, коэффициенты уверенности  $KU_{\omega_\ell}$  по событиям  $\omega_\ell$  и т. д.).

Выбранная методология, имея значительные потенциальные возможности в решении плохо формализуемых задач, требует адаптации под решаемые в данной работе задачи.

С учетом специфики структуры данных и особенностей протекания заболевания предлагается **метод синтеза гибридных нечетких моделей дифференциальной диагностики форм пиелонефрита и оценки степени его тяжести**, состоящей из следующей последовательности действий:

1. В соответствии с общими рекомендациями МСГНРП формируется экспертная группа врачей урологов, обучаемая синтезу гибридных нечетких решающих правил, которая формирует первичное пространство признаков для дифференциальной диагностики серозной (класс  $\omega_{СП}$ ) и гнойной (класс  $\omega_{ГП}$ ) форм пиелонефрита. Производится разведочный анализ структуры данных с рекомендациями по выбору математического аппарата исследований.

2. С учетом специфики структуры данных с использованием методов экспертного оценивания и теории измерения латентных переменных относительно классов  $\omega_{СП}$  и  $\omega_{ГП}$  формируется состав информативных признаков  $x_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ).

3. С использованием признаков и дистальных гистограмм на шкалах различных мер близости в многомерном пространстве признаков производится анализ областей пересечения классов  $\omega_{СП}$  и  $\omega_{ГП}$  с выделением дополнительных областей состояния пациентов (классы  $\omega_{Дr}$ ), по которым целесообразно формировать рациональные (оптимальные) схемы их лечения.

4. По основным и дополнительным классам состояний  $\omega_\ell$  ( $\ell = ГП, СП, Дr$ ) (где  $r$  – идентификаторы дополнительных классов состояний ( $r = 1, 2, \dots, R$ )) на базовых переменных  $x_i$  получают функции принадлежности к классам  $\omega_\ell - \mu_{\omega_\ell}(x_i)$ .

5. С учетом общих рекомендаций МСГНРП и заданных свойств  $\mu_{\omega_\ell}(x_i)$  производится агрегация функций принадлежности в решающие правила дифференциальной диагностики форм пиелонефрита

$$UFP_\ell = FP_\ell[\mu_{\omega_\ell}(x_i)], \quad (1)$$

где  $\ell = 1, \dots, L$ ;  $L$  – число выделенных форм пиелонфрита;  $UFP_\ell$  – уверенность в форме  $\ell$ ;  $FP_\ell$  – функция агрегации.

Финальные решения  $FUP$  принимаются по максимальной величине  $UFP_\ell$

$$FUP_\ell = \max_\ell(UFP_\ell) \quad (2)$$

6. Эксперты определяют сопутствующие заболевания и функциональные состояния, для которых целесообразно выработать специальные схемы ведения, для которых повторяются пункты 2 – 5 метода с синтезом дополнительных моделей типа (2).

7. Формируется состав информативных признаков  $S_j$  для синтеза решающих правил оценки степени тяжести исследуемых форм пиелонефрита, для которых определяются частные степени тяжести  $f_{ST}(S_j)$ .

8. С учетом свойств  $f_{ST}(S_j)$  и общих рекомендаций МСГНРП синтезируется интегральная модель оценки степени тяжести

$$ST = FS[f_{ST}(S_j)], \quad (3)$$

где  $FS$  – функция агрегации для модели оценки степени тяжести.

9. Эксперты определяют классы степени тяжести  $\omega_S$ , для которых целесообразно формировать рациональные (оптимальные) схемы лечения  $L_S$ , на  $ST$  определяются функции принадлежности  $\mu_S(ST)$  к классам степени тяжести. Решение о классификации  $\Omega_S$  принимается по максимальному значению  $\mu_S(ST)$ :

$$\Omega_S = \max[\mu_S(ST)]. \quad (4)$$

Выбор рациональных (оптимальных) схем лечения выбирается с использованием продукционных правил вида:

$$\text{ЕСЛИ } \Omega_s, \text{ТО } L_s, \quad (5)$$

где  $s = 1, 2, \dots, S$ .

Используя предложенный метод синтеза для признаков, приведенных в таблицах 1, 2 и 3, на первом этапе исследований было установлено, что в пространстве 13 признаков между основными формами гнойного (класс  $\omega_{ГП}$ ) и серозного (класс  $\omega_{СП}$ ) пиелонефрита находится группа пациентов, состояния которых позволили их выделить в самостоятельный класс переходной формы (класс  $\omega_{ПС}$ ), для которого следует назначать специфические формы лечения с целью оптимизации лечебно-диагностического процесса.

Для выделенных трех классов состояний, используя общие рекомендации МСГНРП, выбранная группа экспертов, работая по технологии Дельфи, построила графики функций принадлежности, пример которого приведен на рис. 1.

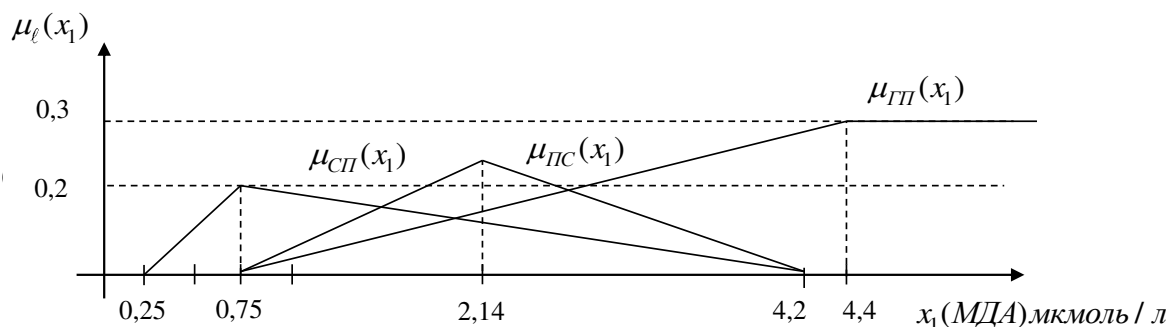


Рисунок 1. График функции принадлежности к исследуемым классам состояний ( $\omega_{СП}$ ,  $\omega_{ГП}$  и  $\omega_{ПС}$ ) с базовой переменной  $x_1$

Частные модели оценки уверенности в принадлежности пациентов к классам  $\omega_{ГП}$  и  $\omega_{СП}$  по признакам, характеризующим оксидантный статус крови (таблица 1), определяются итерационными формулам Е. Шортлифа:

$$\begin{aligned} UFP1_{СП}(q+1) &= UFP1_{СП}(q) + \mu_{СП}(x_{i+1})[1 - UFP1_{СП}(q)]; \\ UFP1_{ГП}(q+1) &= UFP1_{ГП}(q) + \mu_{ГП}(x_{i+1})[1 - UFP1_{ГП}(q)]. \end{aligned}$$

где  $UFP1_{СП}(1) = \mu_{СП}(x_1)$ ;  $UFP1_{ГП}(1) = \mu_{ГП}(x_1)$ ;  $i = 1, 2, 3$ ;  $q = 1, 2, 3$ .

Аналогично определяются частные модели по признакам, характеризующим цитокиновый спектр плазмы крови ( $UFP2$ ), и по показателям, характеризующим функционально-метаболическую активность нейтрофилов периферической крови ( $UFP3$ ).

Финальные решающие правила определения уверенности в классах  $\omega_{СП}$  и  $\omega_{ГП}$  агрегируются моделями вида:

$$UFF_{СП} = UFP1_{СП} + UFP2_{СП} + UFP3_{СП} - UFP1_{СП} \cdot UFP2_{СП} - UFP1_{СП} \cdot UFP3_{СП} - \\ - UFP2_{СП} \cdot UFP3_{СП} + UFP1_{СП} \cdot UFP2_{СП} \cdot UFP3_{СП}; \quad (6)$$

$$UFF_{ГП} = UFP1_{ГП} + UFP2_{ГП} + UFP3_{ГП} - UFP1_{ГП} \cdot UFP2_{ГП} - UFP1_{ГП} \cdot UFP3_{ГП} - \\ - UFP2_{ГП} \cdot UFP3_{ГП} + UFP1_{ГП} \cdot UFP2_{ГП} \cdot UFP3_{ГП}; \quad (7)$$

Уверенность в том, что у пациента переходная форма пиелонефрита (класс  $\omega_{ПС}$ ), определяется агрегацией функций принадлежности  $\mu_{ПС}(x_i)$  моделью вида:

$$UFF_{ПС}(q+1) = UFF_{ПС}(q) + \mu_{ПС}(x_{i+1})[1 - UFF_{ПС}(q)]; \quad (8)$$

где  $UFF_{ПС}(1) = \mu_{ПС}(x_1)$ ;  $i = 1, \dots, 12$ .

Решение о классификации по формам пиелонефрита  $\omega_{СП}$ ,  $\omega_{ГП}$  или  $\omega_{ПС}$  принимается по максимальной величине уверенности по выбранным классам состояний пациента при ее превышении порога, выбранного экспертами  $UP^П$ .

$$FUP_{\ell} = \max(UFF_{СП}, UFF_{ГП}, UFF_{ПС}) \quad (9)$$

где  $\ell = СП, ГП, ПС$ .

Величина порога  $UP^П$  определялась экспертами по рекомендациям МСГНПП, в результате чего было выбрано значение 0,6 ( $UP^П = 0,6$ ). При равенстве уверенностей решение принимается в пользу более тяжелой формы заболевания. При  $FUP_{\ell} < UP^П$  принимается решение об отсутствии гнойной формы. Экспертный анализ и математическое моделирование показали, что уверенность в дифференциальной диагностике выбранных форм пиелонефрита превышает величину 0,95, что является хорошим теоретическим результатом для задач данного уровня формализации и сложности.

Используемый список информативных признаков требует определенного времени и средств для проведения лабораторных исследований.

В то же время анализ переменной Location модели Г. Раша, полученной пакетом RUMM2020, позволил выделить всего три признака, по которым может быть синтезировано достаточно надежное правило дифференциальной диагностики всех выделенных форм пиелонефрита: перекисное окисление липидов ( $x_1$ ); антиокислительная активность ( $x_2$ ); количество церулоплазмينا в сыворотке крови ( $x_3$ ).

Для этой группы признаков получены модели оценки уверенности в отсутствии исследуемого заболевания UO и в наличии серозного US и гнойного UG пиелонефрита:

$$UO(i+1) = UO(i) + \mu_0(x_{i+1})[1 - UO(i)]; \quad (10)$$

$$US(i+1) = US(i) + \mu_{СП}(x_{i+1})[1 - US(i)]; \quad (11)$$

$$UG(i+1) = UG(i) + \mu_{ГП}(x_{i+1})[1 - UG(i)]. \quad (12)$$

Решение о классификации принимается по максимальному значению  $UO$ ,  $US$  или  $UG$ :

$$\Omega_i = \max(UO, US, UG). \quad (13)$$

Диагноз считается подтвержденным, если величины  $US$  или  $UG$  превышают порог 0,5. При равенстве  $US$  и  $UG$  решение принимается в пользу гнойного пиелонефрита.

Результаты моделирования и экспертного оценивания показали, что уверенность в правильной классификации при использовании правила (13) составляет 0,91, что несколько ниже, чем обеспечивает использование модели (9).

Это свидетельствует о том, что при сокращении количества информативных признаков с 13 до 3-х качество классификации остаётся достаточно высоким позволяя рекомендовать модель (13) для практического использования.

**Третий раздел** посвящен синтезу моделей принятия решений по дифференциальной диагностике форм пиелонефрита и оценки степени его тяжести с учетом сочетанных патологий и функциональных состояний пациентов.

Состояние беременности значительно изменяет функциональное состояние женщин, включая гомеостаз. Пиелонефрит беременных женщин сопровождается поражением органов и систем поддержания гомеостаза. Анализ технологии ведения беременных пациенток с пиелонефритом показал, что вопросы, связанные с диагностикой и профилактикой исследуемой патологии, требуют своего эффективного решения. С учетом этого, одной из решаемых в работе задач является изучение диагностической ценности полученных решающих правил для измененного функционального состояния беременных женщин.

Анализ результатов разведочного анализа показал, что для беременных возрастает информативность признаков, характеризующих иммунный статус с понижением информативности оксидантного статуса. Этот же вывод был подтверждён с использованием пакета RUMM 2020, что позволило перейти к сокращенному составу информативных признаков в составе –  $x_5, x_6, \dots, x_{13}$  (таблицы 2 и 3) с построением «своих» функций принадлежности и решающих правил, аналогичных правилам (7), (8) и (9). В ходе экспертного оценивания и математического моделирования было показано, что уверенность в дифференциальной диагностике выбранных форм пиелонефрита у беременных превышает величину 0,93.

К одной из актуальных проблем современной урологии относят задачи оценки состояния, профилактики и лечения больных с мочекаменной болезнью (МКБ). Одним из осложнений МКБ является пиелонефрит,

отягощающий течение мочекаменной болезни. В ходе предварительного разведочного анализа было установлено, что информативность показателей таблицы 1 для исследуемого случая сочетанной патологии пиелонефрита с МКБ значительно возросло по сравнению с показателями таблиц 2 и 3.

Это послужило основой использования для синтеза решающих правил по классам  $\omega_{СП}$ ,  $\omega_{ГП}$  и  $\omega_{ПС}$  только четырёх признаков  $x_1, \dots, x_4$  с дальнейшей проверкой качества работы полученных классификационных моделей. В ходе синтеза решающих правил по этой группе признаков со «своими» функциями принадлежности были получены нечеткие модели аналогичные моделям (7), (8) и (9).

Результаты математического моделирования и экспертных оценок показали, что уверенность в диагностике выбранных форм пиелонефрита, сочетанного с МКБ, превышает величину 0,91, что является хорошим результатом для задач с аналогичной структурой данных.

Для оценки степени тяжести форм пиелонефрита по согласованию с экспертами было принято решение использовать совокупность таких показателей как: величины  $US$  и  $UG$ , определяемые по формулам (11) и (12); энергетического разбаланса ( $ER$ ) биологически активных точек ( $БАТ$ ), «связанных» с почками (меридиан  $V$ ); уровень психоэмоционального напряжения ( $YP$ ), характеризующий общее функциональное состояние пациента; реографический индекс ( $RI$ ), рассчитываемый по реограмме, снимаемой в проекции почек; степень тяжести ишемического поражения центральной гемодинамической системы ( $STC$ ); сатурация крови кислородом ( $S$ ), определяемая пальцевым датчиком. В соответствии с предложенным в работе методом синтеза, используя показатели  $US$ ,  $UG$ ,  $ER$ ,  $YP$ ,  $RI$ ,  $STC$  и  $S$  как базовые переменные, эксперты, получили функции принадлежности к лингвистической переменной степень тяжести пиелонефрита  $ST$ .

Для оценки степени тяжести серозной  $STS$  или гнойной  $STG$  форм пиелонефрита используются продукционные правила вида:

$$\text{ЕСЛИ } (\Omega_\ell = \omega_{СП}) \text{ ТО } STS ; \quad (14)$$

$$\text{ЕСЛИ } (\Omega_\ell = \omega_{ГП}) \text{ ТО } STG . \quad (15)$$

С учетом того, что все выбранные для оценки степени тяжести функции принадлежности при своем увеличении увеличивают степени тяжести исследуемой патологии, в соответствии с рекомендациями МСГНПП величины  $STS$  и  $STG$  определяются выражениями:

$$STS(i+1) = STS(i) + \mu_{ST}(Q_{i+1})[1 - STS(i)]; \quad (16)$$

$$STG(i+1) = STG(i) + \mu_{ST}(Q_{i+1})[1 - STG(i)], \quad (17)$$

где  $STS(1) = \mu_{ST}(US)$ ;  $STG(1) = \mu_{ST}(UG)$ ;  $\mu_{ST}(Q_2) = \mu_{ST}(ER)$ ;  $\mu_{ST}(Q_3) = \mu_{ST}(YP)$ ;  $\mu_{ST}(Q_4) = \mu_{ST}(RI)$ ;  $\mu_{ST}(Q_5) = \mu_{ST}(STC)$ ;  $\mu_{ST}(Q_6) = \mu_{ST}(S)$ .

Для выбора адекватных схем лечения, соответствующих степени тяжести заболевания, эксперты выделили три класса степени тяжести: легкая

(класс  $\omega_L$ ), средняя (класс  $\omega_C$ ) и тяжелая (класс  $\omega_T$ ) течения пиелонефрита. Каждому классу состояний соответствует своя схема лечения  $L_P$  ( $P = L, C, T$ ).

Для каждого из классов степени тяжести в работе получены функции принадлежности  $\mu_L(ST)$ ,  $\mu_C(ST)$ ,  $\mu_T(ST)$ . Выбор искомого класса состояний осуществляется по максимальному значению функций принадлежности:

$$KLST_P = \max[\mu_L(ST), \mu_C(ST), \mu_T(ST)]. \quad (18)$$

Выбор соответствующей схемы лечения осуществляется с использованием продукционного правила типа:

$$\text{ЕСЛИ } KLST_P \text{ ТО } L_P. \quad (19)$$

Экспертные оценки и результаты математического моделирования показали, что уверенность в правильной «работе» модели (18) превышает величину 0,9.

**В четвертом разделе** приводятся описания структуры системы поддержки принятия решений (СППР), информационно-аналитической модели базы знаний, алгоритма управления СППР и результатов статистических испытаний полученных математических моделей на репрезентативных контрольных выборках.

Анализ различных вариантов структур медицинских СППР показал, что с целью минимизации затрат на разработку системы, ориентированной на решение поставленных в работе задач, целесообразно использовать универсальную оболочку СППР, разработанную в ЮЗГУ, с базой знаний, ориентированной на использование гибридных нечетких математических моделей, объединяемых в иерархические и (или) сетевые структуры.

Для полученных в работе решающих правил и для реализации механизмов их взаимодействия между собой и со всеми необходимыми программными модулями выбранной системы потребовалась разработка оригинальной базы знаний, которая впоследствии была внедрена в универсальную оболочку. В состав оригинальной базы знаний вошли: модуль расчета STC, определяющий степень тяжести ишемического поражения центральной гемодинамической системы по методике, разработанной доктором А. Быковым; модуль оценки электрических характеристик БАТ (ЭХ БАТ), производящий расчет и оценку сопротивлений БАТ; модули дифференциальной диагностики форм пиелонефрита и оценки степени его тяжести; модуль формирования схем профилактики и лечения (предлагает врачу рациональные схемы ведения пациентов с исследуемой патологией).

Для решения задачи оптимизации выбора структуры базы знаний построена информационно-аналитическая модель, на которой в удобной для проектировщика форме показаны связи взаимодействия между исходными данными, решающими модулями и результатом решений.

Управление работой СППР, включая её взаимодействие с ЛПР, осуществляется алгоритмом принятия решений, имеющим две основные ветви реализации процесса управления: обучения и принятия решений в интерактивном режиме.

Для подтверждения качественных показателей разработанных решающих правил на репрезентативных контрольных выборках рассчитывались такие общепринятые в медицине показатели, как диагностическая чувствительность (ДЧ), специфичность (ДС), диагностическая эффективность (ДЭ).

Результаты срабатывания решающих правил оформлялись таблицами результатов наблюдений.

В таблице 4 приведены результаты срабатывания решающего правила диагностики серозной, гнойной и переходной форм пиелонефрита по 13 информативным признакам для модели 9 (показатель  $FUP_{\ell}$ ).

Таблица 4. Результаты срабатывания решающих правил 9

Пациенты		Результаты наблюдения	
		Положительные	Отрицательные
Класс $\omega_{СП}$	$n_{СП} = 100$	97	3
	$n_0 = 100$	4	96
Класс $\omega_{ГП}$	$n_{ГП} = 100$	96	4
	$n_0 = 100$	5	95
Класс $\omega_{ПС}$	$n_{ПС} = 100$	99	1
	$n_0 = 100$	0	100

Примечание:  $n_0$  – количество пациентов контрольной группы;  $n_{СП}$  – количество пациентов класса  $\omega_{СП}$ ;  $n_{ГП}$  – количество пациентов класса  $\omega_{ГП}$ ;  $n_{ПС}$  – количество пациентов класса  $\omega_{ПС}$ .

Показатели качества, рассчитанные по данным таблицы 4. для правил оценки  $FUP_{\ell}$  ( $\ell = СП, ГП, ПС$ ) приведены в таблице 5:

Таблица 5. Качество классификации решающих правил 9

Класс \ ПК	ПК		
	ДЧ	ДС	ДЭ
$FUP_{СП}$	0,97	0,96	0,96
$FUP_{ГП}$	0,96	0,95	0,95
$FUP_{ПС}$	0,99	1,0	0,99

Анализ таблицы 5 показывает, что правила типа 9 обеспечивают качество принимаемых решений не хуже 0,95, что соответствует выводам математического моделирования.

Для задачи дифференциальной диагностики форм пиелонефрита по трем информативным признакам (модель 13) получены показатели качества, представленные в таблице 6:



Таблица 6. Качество классификации решающих правил 13

Класс \ ПК	<i>ДЧ</i>	<i>ДС</i>	<i>ДЭ</i>
$\Omega_{US}$	0,93	0,94	0,93
$\Omega_{UG}$	0,91	0,92	0,91
$\Omega_{UO}$	0,89	0,90	0,90

Анализ таблицы 6 показывает, что все показатели ниже показателей таблицы 5, но они остаются приемлемыми для практического пользования, тем более, что количество информативных признаков в модели 13 в четыре раза меньше, чем в модели 9, а это значит пропорционально уменьшается время и стоимость сбора информации для решения поставленных задач.

Аналогично проверялось качество работы решающих правил дифференциальной диагностики форм пиелонефрита у беременных и форм пиелонефрита, отягощенного мочекаменной болезнью.

Анализ полученных результатов показал, что учет сопутствующих патологий и состояния беременности позволяет при сокращении времени и затрат на диагностику сохранять приемлемое для практики качество принимаемых решений.

Показатели качества «срабатывания» решающего правила классификации степени тяжести пиелонефрита (модель 18) приведены в таблице 7:

Таблица 7. Качество классификации модели 18

Класс \ ПК	<i>ДЧ</i>	<i>ДС</i>	<i>ДЭ</i>
$KLST_L(\omega_L)$	0,95	0,97	0,96
$KLST_C(\omega_C)$	0,96	0,93	0,94
$KLST_T(\omega_T)$	0,96	0,97	0,96

Анализ результатов статистических испытаний по всему набору полученных гибридных нечетких моделей показал, что все они могут быть рекомендованы к практическому использованию в составе СППР врачей урологов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе получены следующие основные результаты:

1. Проведен разведочный анализ структуры данных, описывающих исследуемую патологию с учетом возможных сочетанных заболеваний и различных функциональных состояний, и выбран математический аппарат исследования.

2. Получен список информативных признаков для диагностики форм и степени тяжести пиелонефрита, отличающийся наличием разнородных блоков информативных признаков, описывающих оксидантный статус, цитокиновый спектр плазмы крови и функционально-

метаболическую активность нейтрофилов периферической крови, позволяющий решать задачи дифференциальной диагностики выбранных форм пиелонефрита с выделением дополнительной переходной формы.

3. Разработан метод синтеза гибридных нечетких моделей дифференциальной диагностики форм пиелонефрита и оценки степени его тяжести, отличающийся использованием гетерогенных блоков данных, описывающих состояние иммунного и оксидантного статуса крови в сочетании с блоком признаков, характеризующих степень тяжести исследуемой патологии.

4. Получены математические модели дифференциальной диагностики серозной, гнойной и переходной форм пиелонефрита по блокам признаков, характеризующих иммунный и оксидантный статус крови, обеспечивающие уверенность в правильной классификации на уровне 0,95, а по показателям антиокислительной активности, перекисного окисления липидов и количеству церулоплазмينا в сыворотке крови – на уровне 0,91.

5. Получены математические модели дифференциальной диагностики форм пиелонефрита, осложнённого мочекаменной болезнью и у беременных с редуцированным составом информативных признаков, обеспечивающие уверенность в правильном принятии решений на уровне 0,9 и выше в зависимости от количества и качества собираемых медицинских данных.

6. Синтезирована модель оценки степени тяжести исследуемых форм пиелонефрита, решающая задачу классификации легкой, средней и тяжелой стадии заболевания с уверенностью не хуже 0,93, что является хорошим результатом в условиях неполного и нечеткого описания исследуемых классов состояний.

7. Предложены алгоритм управления и структура базы знаний системы поддержки принятия решений для врача, ведущего пациентов, страдающих пиелонефритом, позволившие гибко управлять тактикой ведения больных с исследуемой патологией и обеспечившие повышение качества ведения пациентов с различными формами заболевания и при наличии сочетанных патологий.

8. Экспериментальная проверка предложенных моделей на репрезентативных контрольных выборках показала, что для задачи дифференциальной диагностики выбранных форм пиелонефрита диагностическая эффективность превышает величину 0,92, а диагностическая эффективность в задачах оценки степени тяжести пиелонефрита – величину 0,93, что позволяет рекомендовать полученные гибридные НРП в практику работы врачей урологов.

**Рекомендации.** Результаты диссертационного исследования могут быть использованы при построении систем поддержки принятия решений для врачей урологов.

**Перспективы дальнейшей разработки темы.** Использование нечетких гибридных моделей для решения задач повышения качества оказания медицинских услуг пациентам, страдающим пиелонефритом,

позволит поднять на новый качественный уровень медицинское обслуживание людей с исследуемой патологией. Дальнейшие исследования в рассматриваемой медицинской области позволят повысить качество оказания медицинской помощи пациентам, с различными патологиями мочевыделительной системы, в частности почек.

## **СПИСОК НАУЧНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Публикации в рецензируемых научных журналах**

1. Корневский, Н.А. Использование методологии синтеза гибридных нечетких моделей для решения задач оценки состояния и управления сложными биотехническими системами / Корневский Н.А., Шуткин А.Н., Цымбал Е.В., Степашов Р.В., Родионова С.Н., Родионов Д.С. // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. – 2018. – Т. 17. - № 3. – С. 744-751.
2. Родионов, Д.С. Оценка степени тяжести пиелонефрита по энергетическому разбалансу биологически активных точек / Д.С. Родионов, С.В. Петров, Л.П. Лазурина // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. – 2019. – Т.9. - № 3 (32). – С. 129-140.
3. Серегин, С.П. Диагностика форм пиелонефрита и оценка степени их тяжести на основе нечетких математических моделей / С.П. Серегин, Д.С. Родионов, С.В. Петров, Г.В. Сипливый // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. – 2019. – Т.9. – №3(32). – С. 173-191.
4. Серегин, С.П. Дифференциальная диагностика форм пиелонефрита на основе гибридных нечетких моделей / С.П. Серегин, Д.С. Родионов, С.В. Петров, Р.А. Крупчатников // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. – 2019. – Т.18. – № 3. – С. 184-191.
5. Корневский, Н.А. Математические модели дифференциальной диагностики форм пиелонефрита для экспертных систем врачей-урологов /Н.А. Корневский, Г.В. Сипливый, Д.С. Родионов, Т.Н. Говорухина, В.В. Дмитриева // Медицинская техника. – 2019. – № 6 (318) – С. 48-50.
6. Серегин, С.П. Нечеткие модели дифференциальной диагностики пиелонефрита у беременных / С.П. Серегин, Д.С. Родионов, И.М. Холименко, Л.П. Лазурина // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. – 2021. – Т.11. – № 1. – С. 98-111.
7. Серегин, С.П. Нечеткие модели дифференциальной диагностики серозного и гнойного пиелонефрита у больных мочекаменной болезнью / С.П. Серегин, Д.С. Родионов, Н.А. Милостная, Г.В. Сипливый, Р.А. Крупчатников // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. – 2021. – Т.20. – № 2. – С. 106-113.

**Публикации в изданиях, индексируемых в международной  
научометрической базе Scopus**

8. Bykov A.V. An intelligent decision support system for managing patients with lower limb ischemia based on hybrid fuzzy models / A.V. Bykov, A.A. Burmaka, S.N. Korenevskaya, D.S. Rodionov // Biomedical Engineering. – 2018. – Т. 52. № 4. – Pp. 271-274.

**Патент**

9. Патент 2707358 С1 Российская Федерация. Способ дифференциальной диагностики форм пиелонефрита и оценки степени их тяжести / Быков А.В., Корневский Н.А., Родионов Д.С., Цуканова М.Н. – № 2019107761, заявл. 19.03.2019; опубл. 26.11.2019.

**Научные работы в других изданиях**

10. Степашов, Р.В. Прогнозирование профессиональных заболеваний на основе методов синтеза гибридных нечетких решающих правил / Р.В. Степашов, Д.С. Родионов, Е.С. Потапова, И.А. Комлев // Биотехнология и биомедицинская инженерия: сборник научных трудов по материалам XI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Курск: Курский государственный медицинский университет, 2018. – С. 160-163.

11. Родионов, Д.С. Дифференциальная диагностика форм пиелонефрита с использованием технологии мягких вычислений / Д.С. Родионов // Медико-экологические информационные технологии: сборник научных статей по материалам XXIII Международной научно-технической конференции. – Курск, 2020. – С. 164-169.

12. Родионов, Д.С. Нечеткая модель диагностики форм пиелонефрита у женщин в дородовой и послеродовой период / Д.С. Родионов, В.В. Аксёнов // Биотехнические, медицинские и экологические системы, измерительные устройства и робототехнические комплексы (Биомедсистемы): сборник трудов XXXIV Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. – Рязань, 2021. – С. 251-254.

13. Родионов, Д.С. Метод синтеза гибридных нечетких моделей дифференциальной диагностики форм пиелонефрита и оценки степени его тяжести / Д.С. Родионов, М.В. Скиданчук // Медико-экологические информационные технологии: сборник научных статей по материалам XXV Международной научно-технической конференции. – Курск, 2022. – С. 146-149.