

на правах рукописи



Хрипина Ирина Игоревна

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И РАЗВИТИЯ ГАНГРЕНЫ
НИЖНИХ КОНЕЧНОСТЕЙ НА ОСНОВЕ ГИБРИДНЫХ
НЕЧЕТКИХ МОДЕЛЕЙ**

Специальность: 05.11.17 – Приборы, системы и изделия
медицинского назначения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Курск – 2018

Работа выполнена на кафедре биомедицинской инженерии Юго-Западного государственного университета

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Корневский Николай Алексеевич

Официальные оппоненты: Егошина Ирина Лазаревна
доктор технических наук, доцент,
Поволжский государственный
технологический университет, профессор
кафедры радиотехнических и медико-
биологических систем (г. Йошкар-Ола)

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

Ведущая организация: Воронежский государственный технический
университет (г. Воронеж)

Защита состоится «29» ноября 2018 года в 16:00 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/newfmm/diss/d999.099.03/disser%20Hripina%20%20i%20%20i.pdf>

Автореферат разослан «___» октября 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Милостная Наталья Анатольевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Несмотря на значительные усилия мировой медицины, проблема успешного лечения ишемической болезни нижних конечностей далека от своего эффективного решения. Это, в значительной мере, относится к хроническим облитерирующим заболеваниям артерий нижних конечностей (ХОЗАНК) и особенно к злокачественному ее развитию – критической ишемии нижних конечностей (КИНК), в виде гангрены.

Это подтверждается тем, что в России КИНК развивается у около миллиона человек. При этом в течение года умирает 15-20 % пациентов, а 20 % переносит высокую ампутацию конечностей. Скандинавские исследования показали, что в мировом масштабе в течение 5 лет погибает до 50 % пациентов (Савельев В.С., Кошкин В.М.).

Специалисты, которые решают задачи, заключающиеся в повышении качества оказания медицинской помощи больным, включая пациентов страдающих КИНК с осложнением в виде гангрены, наиболее важной составляющей в процессе совершенствования методов управления лечебно-диагностическим процессом называют эффективное прогнозирование возникновения и развития гангрены нижних конечностей (ГНК), которое, учитывая ограничения на оперативность, стоимость и качество принимаемых решений, можно обеспечить, применяя современные математические методы и методологию системного анализа, которые опираются на информационные и интеллектуальные технологии (Бокерия Л.А., Устинов А.Г., Лазаренко В.А., Быков А.В., Корневский Н.А.). Применение вышеперечисленных технологий позволит рационализировать подход к ведению пациентов, страдающих КИНК, и повысить эффективность лечения. Учитывая сказанное, актуальность работы заключается в необходимости повышения эффективности прогнозирования возникновения и развития ГНК на основе современных математических методов и интеллектуальных технологий, которые позволят своевременно начать лечебно-профилактические мероприятия, планирование индивидуальной тактики ведения больных, и, за счет этого, повысить качество оказания медицинских услуг населению, страдающему ГНК.

Степень разработанности темы исследования. Проблеме повышения эффективности лечения больных, страдающих КИНК, ГНК посвящено множество работ российских и зарубежных ученых (Бокерия Л.А., Абалмасов К.Г., Бурлева Е.П., Смирнов О.А., Соколов А.Г., Amberger A. (1997), Batt D.L., Peterson E.D. (2009), Hirsch A.T. (2006), Maier J.A. (1998) и др.) В научных публикациях исследуются прогностические возможности различных методов: ультразвуковая доплерография, сегментарное измерение артериального давления, транскутанного определения напряжения O_2 , тредмил-тест, тепловизионные методы, ангиография, электрокардиография, лабораторный анализ крови и т.д.

При этом применяются различные математические методы: регрессионный анализ, модель Т. Байеса, корреляционный анализ, аттракторные модели и т.д.

Однако, несмотря на достигнутые успехи, смертность и инвалидизация населения от ГНК остается недопустимо высокой. Одной из причин такого состояния дел является несвоевременная оценка приближения и наступления

критических состояний с опозданием назначений адекватных схем профилактики и лечения.

Анализ известных методов, методик и средств их информационной поддержки позволяет сделать вывод, что недостаточное внимание уделяется оценке и выбору состава и структуры используемых информативных показателей и математического аппарата, которые соответствуют структуре обрабатываемых данных.

Проведенные нами исследования позволяют сделать вывод, что задачи, решаемые в работе, относятся к классу плохоформализуемых, с сильно пересекающимися и нечетко определяемыми структурами данных. В этих условиях в соответствии с рекомендациями различных авторов (L. Zadeh, E. Shortliffe, А. Устинов, Н. Кореневский, А. Шуткин и др.) целесообразно использовать теорию нечеткой логики принятия решений с технологией синтеза гибридных решающих правил, которые несмотря на свои широкие возможности в медицинской практике сосудистых хирургов и ангиологов не нашли пока еще своего должного применения.

Цель работы: повышение качества медицинского обслуживания больных с высоким риском появления и развития ГНК путем разработки гибридных нечетких моделей, обеспечивающих решение задач прогнозирования искомой патологии в условиях, когда исходные данные представлены неполно и нечетко с пересекающейся структурой классов.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- проведен разведочный анализ структуры данных, выбран адекватный математический аппарат исследования и сформировано пространство информативных признаков;
- разработан метод синтеза гибридных решающих правил прогнозирования возникновения и развития ГНК;
- получена система гибридных нечетких моделей для прогнозирования гангрены нижних конечностей;
- предложен алгоритм управления процессами принятия решений при ведении пациентов с высоким риском и страдающих ГНК;
- разработана структура интеллектуальной системы поддержки принятия решений, обеспечивающей формирование рекомендаций по ведению пациентов с КИНК, включая гангрену;
- произведена экспериментальная проверка полученных результатов на репрезентативных контрольных выборках.

Научная новизна. В диссертационной работе получены следующие результаты, характеризующиеся научной новизной:

- пространство информативных признаков для решения задач прогнозирования возникновения и развития ГНК, отличающееся тем, что кроме традиционно используемых в медицине признаков в их состав включены интегральные показатели, которые характеризуются функционированием различных подсистем организма, что позволяет получить высококачественные прогностические правила;

- метод синтеза гибридных нечетких решающих правил, прогнозирования ГНК, отличающийся использованием разноуровневых и разнородных предикторов, которые описывают как степень ишемического поражения нижних конечностей, так и общесистемные показатели состояния организма в целом, позволяющий получать нечеткие математические модели, обеспечивающие требуемые показатели качества и оперативности принятия решений;

- гибридные нечеткие модели прогнозирования возникновения и развития ГНК, отличающиеся агрегацией специфических признаков и интегральных показателей, характеризующих функционирование различных подсистем организма, позволяющие обеспечивать уверенность в принимаемых решениях на уровне 0,9;

- алгоритм управления и структура интеллектуальной системы поддержки принятия решений по прогнозированию возникновения и развития ГНК, отличающиеся возможностью гибко менять тактику ведения пациентов с исследуемой патологией в зависимости от индивидуального состояния организма, позволяющие повысить качество оказания медицинской помощи больным, страдающим выбранным классом болезни.

Теоретическая и практическая значимость работы состоит в том, что по данным разведочного анализа изучена структура данных решаемой задачи, сформировано пространство информативных признаков и предложен метод синтеза гибридных нечетких решающих правил, позволивший по разноуровневому и разнородному пространству признаков получить математические модели прогнозирования возникновения ГНК, обеспечивающие приемлемую для медицинской практики уверенность в принимаемых решениях.

Для практической реализации полученных теоретических результатов разработан алгоритм управления процессом принятия решений по рациональному ведению пациентов, страдающих исследуемой патологией.

Разработанный метод, модели и алгоритм составили основу построения интеллектуальной системы поддержки принятия решений сосудистого хирурга и врача ангиолога, использование которой позволит повысить качество оказания медицинской помощи больным, страдающим КИНК, переходящей в гангрену.

Работа выполнена в рамках прикладных научных исследований в соответствии с Федеральной целевой программой «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» и соответствует научному направлению Юго-Западного государственного университета «Разработка медико-экологических информационных технологий».

Результаты работы внедрены в учебном процессе Юго-Западного государственного университета при подготовке бакалавров направления 12.03.04 «Биотехнические системы и технологии» и используются в медицинской практике ОБУЗ «Корневская ЦРБ» (пгт Коренево, Курская область).

Методы исследований. Для решения поставленных задач использовались методы: синтеза биотехнических систем, системного анализа, теории проектирования сложных информационных систем, теории распознавания образов, теории нечеткой логики принятия решений, теории измерения латентных

переменных, теории уверенности, прикладной математической статистики, экспертного оценивания. При разработке интеллектуальной системы в качестве инструментария использовалась среда Matlab 7.10 (R210a) со встроенным пакетом FuzzyLogicToolbox, диалоговый пакет RUMM 2020.

Положения, выносимые на защиту.

1. Проведенный разведочный анализ позволил выбрать адекватный математический аппарат исследования и сформировать пространство информативных признаков, по которому были получены математические модели прогнозирования ГНК.

2. Метод синтеза гибридных нечетких решающих правил прогнозирования возникновения и развития ГНК обеспечил получение соответствующими математическими моделями качество принятия решений, которые соответствуют требованиям медицинской практики.

3. Апробация полученных математических моделей прогнозирования возникновения и развития ГНК на репрезентативных контрольных выборках показала уверенность в принимаемых решениях на уровне 0,9, что позволяет рекомендовать полученные результаты в практику работы сосудистых хирургов и врачей ангиологов.

4. Алгоритм управления интеллектуальной системой поддержки принятия решений позволяет рационально и гибко менять тактику ведения пациентов с высоким риском возникновения и страдающим ГНК в зависимости от их текущего состояния с учетом разнородных факторов риска и клинических проявлений заболевания, снижает риск ампутации нижних конечностей.

Степень достоверности и апробация работы. Результаты исследования показали их воспроизводимость в различных условиях, непротиворечивость концепциям системного анализа и теории синтеза биотехнических систем, а также аналогичным результатам, полученным другими исследователями. Метод и модели прогнозирования возникновения и развития ГНК построены на теории распознавания образов и нечеткой логике принятия решений и согласуются с ранее опубликованными экспериментальными данными по теме диссертации.

Основные теоретические положения и научные результаты диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили положительную оценку на международных и Всероссийских конференциях: X Russian-German conference on biomedical engineering: SaintPetersburg (Санкт-Петербург, 2014); Биотехнология и биомедицинская инженерия (Курск, 2017); Электронный научно-образовательный вестник Здоровье и образование в XXI веке (Москва, 2017); Медико-экологические информационные технологии (Курск, 2015, 2017); Биотехнические, медицинские, экологические системы и робототехнические комплексы - Биомедсистемы-2017 (Рязань, 2017); Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации (Курск, 2015); научная сессия НИЯУ МИФИ-2015 (Москва, 2015), а также на научно-технических семинарах кафедры биомедицинской инженерии ЮЗГУ (Курск, 2014-2018).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 16 научных работ, в том числе 1 монография, 8 публикаций в рецензируемых научных журналах и изданиях.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения и библиографического списка, включающего 212 наименований. Работа изложена на 144 страницах машинописного текста, содержит 23 рисунка и 17 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первом разделе приводится анализ моделей и методов, используемых в медицинских приложениях и, в частности, используемых для решения задач прогнозирования возникновения и развития ГНК, раскрываются проблемы, связанные с распространенностью, профилактикой наступления гангрены, проводится обзор систем поддержки принятия решений, разработанных для медицины и их математическое и программное обеспечение.

Обосновывается выбор в качестве аппарата исследований методологии синтеза гибридных нечетких решающих правил. Показывается целесообразность использования в качестве прогностических признаков электрических характеристик биологически активных точек (БАТ).

Во втором разделе формируется пространство информативных признаков с использованием теории измерения латентных переменных, разрабатывается метод синтеза гибридных нечетких решающих правил и производится синтез частных математических моделей прогнозирования возникновения и развития ГНК по электрическим характеристикам БАТ.

В соответствии с целью диссертационной работы объектом исследования являются методы, модели и алгоритм для решения задач прогнозирования возникновения и развития ГНК.

Исходным материалом для разведочного анализа явилось пятилетнее наблюдение доктора А. Быкова за 400 больными с ХОЗАНК. Пациенты имели различные стадии заболевания, вплоть до ГНК, требующей ампутации нижних конечностей.

Исследования проводились с использованием традиционных статистических методов, реализуемых программой STATISTICA 6.0 с привлечением методов теории измерения латентных переменных, алгоритмов метода группового учета аргументов (МГУА), модификаций методов разведочного анализа, ориентированных на синтез гибридных нечетких решающих правил.

В ходе этих исследований под руководством доктора А. Быкова группа высококвалифицированных экспертов составила список из 76 признаков для оценки состояния больных, страдающих ХОЗАНК, критической формой которых является ГНК.

Анализ структуры данных, которые используются для прогнозирования возникновения ГНК показал, что они имеют неполную и нечеткую природу с пересекающейся структурой, которая не поддается достаточно строгому

математическому описанию. Опыт, связанный с решением многочисленных задач с подобной структурой данных показал, что для их решения целесообразно использовать методологию синтеза гибридных нечетких решающих правил (СГНРП), разработанную на кафедре биомедицинской инженерии Юго-Западного государственного университета (Корневский Н.А., Филист С.А., Шуткин А.Н.).

В соответствии с общими рекомендациями выбранной методологии при использовании интерактивного пакета RUMM 2020 была произведена оптимизация состава **информативных признаков для задач прогнозирования возникновения и развития ГНК**.

Например, для задачи прогнозирования риска возникновения гангрены было сформировано пространство информативных признаков в составе: x_1 – качество жизни (КЖ); x_2 – лодыжечно-плечевой индекс (ЛПИ); x_3 – реографический индекс (РИ); x_4 – температура тела (Т); x_5 – скорость оседания эритроцитов (СОЭ); x_6 – наличие лейкоцитоза (Лк); x_7 – наличие тромбоза (Тр); x_8 – наличие анемии (Ан); x_9 – частота сердечных сокращений (ЧСС); x_{10} – частота дыхания (ЧД); x_{11} – величина систолического артериального давления (САД); x_{12} – наличие аритмии (Ар).

С учетом особенностей структуры данных и в соответствии с общей методологией СГНРП в работе предложен **метод синтеза гибридных нечетких решающих правил прогнозирования ГНК**, состоящий из следующих основных этапов:

1. При участии инженера по знаниям для выбранного класса задач формируется группа высококвалифицированных экспертов из врачей сосудистых хирургов, кардиологов и ангиологов. Количественный состав группы определяется по правилам, принятым в квалиметрии.

2. Для выбранного класса задач (типы прогноза: возникновение гангрены, развитие гангрены), исходя из требуемого качества принимаемых решений и технико-экономических возможностей, эксперты определяют перечень блоков используемых признаков и состав используемых показателей (признаков) для каждого из блоков. Уточняется список прогнозов и классов состояний КИНК, включая гангрену.

3. С использованием теории измерения латентных переменных с моделью Г. Раша и метода группового учета аргументов (МГУА). Производится оптимизация структуры признакового пространства по каждому блоку признаков. Полученный после использования процедур Г. Раша и (или) МГУА состав признаков считается информативным.

4. Для каждого информативного признака и (или) комплексного показателя определяется способ нечеткого представления, который четко определяемым входным показателям ставит в соответствие нечеткие значения измеряемых свойств (частных функций принадлежности к степени уверенности в том, что у пациентов возникнет или разовьется ГНК).

5. Исходные признаки объединяются в комплексные показатели по выбранным промежуточным целям синтеза частных решающих правил с получением нечетких решающих правил первого уровня в составе: правила оценки уровня психоэмоционального напряжения, хронического утомления,

функционального резерва организма; правила оценки риска возникновения развития ГНК по доктору А. Быкову по подпространствам опроса и осмотра, инструментальных и лабораторных методов исследования.

6. При наличии медико-технической возможности использования информации, снимаемой с БАТ, синтезируются нечеткие аналитические или табличные частные решающие правила.

7. Используя общие рекомендации по синтезу гибридных нечетких решающих правил, производится агрегация решающих правил второго уровня с блоком нечеткой классификации по уровням уверенности в различных стадиях возникновения и развития ГНК в виде нечетких выражений.

Уверенность в риске развития гангрены URR определяется выражением:

$$URR = F_R(UGB, UKB, UGS), \quad (1)$$

где $UGB = f_B(OKG, IMI, LMI)$;

$$UKB = f_B(KB);$$

$$UGS = f_S(YPH, YU, YFR);$$

F_R, f_B, f_S - соответствующие функции агрегации для оценки URR ; OKG – уровень риска появления и развития гангрены по показателю КЖ; IMI – уровень риска появления и развития гангрены по инструментальным показателям ЛПИ, РИ, Т, ЧСС, САД, ЧДД, LMI – уверенность риска появления и развития гангрены по лабораторным показателям СОЭ, Лк, Тр, Ан, Ар; KB – уровень риска развития гангрены, определяемый по электрическим характеристикам БАТ; YPH -уровень риска появления и развития гангрены по показателям Y_{P_T} , Y_{P_B} и Y_{P_B} ; YU – уровень риска появления и развития гангрены по показателям YU_T , YU_B и YU_B ; YFR – уровень риска развития гангрены по показателям, характеризующим функциональный резерв.

Уверенность в риске возникновения гангрены определяются выражением:

$$URV = F_V(UGB, UKB, UGS), \quad (2)$$

где F_V агрегатор для модели оценки риска возникновения гангрены.

Остальные переменные определяются так же, как и в предыдущей формуле.

Принятие классификационных решений осуществляется по формуле:

$$\Omega_\ell = F_\ell(URR, URV), \quad (3)$$

где F_ℓ - функционал вычисления функций принадлежности к классам ω_ℓ с базовыми переменными URR и URV .

С учетом прогностической ценности БАТ в конце раздела получена частная математическая модель расчета уверенности в появлении и развитии гангрены UKB по электрическим характеристикам БАТ в виде нечеткого правила

$$UKB = UKB_{01} + UKB_{03} + UKB_{010} - UKB_{01} \cdot UKB_{03} - UKB_{01} \cdot UKB_{010} - UKB_{03} \cdot UKB_{010} + UKB_{01} \cdot UKB_{03} \cdot UKB_{010}, \quad (4)$$

где $УКБ_{01}$ - уверенность в появлении и развитии ГНК по ситуации парез и паралич нижних конечностей;

$УКБ_{03}$ - уверенность в появлении и развитии ГНК по ситуации боли в стопе;

$УКБ_{010}$ - уверенность в появлении и развитии ГНК по ситуации отеки ног.

Третий раздел посвящен разработке основных элементов интеллектуальной системы поддержки принятия решений для прогнозирования возникновения и рецидивов ГНК.

В соответствии с предложенным во втором разделе методом синтеза гибридных нечетких решающих правил прогнозирования ГНК на первом этапе синтеза прогностических решающих правил было выбрано три блока информативных признаков: группа традиционно измеряемых показателей, предложенных доктором А. Быковым (2017 г.), по которым определяются частая уверенность в появлении и развитии ГНК ($УГВ$); группа признаков, характеризующих функциональное состояние человека и его функциональный резерв, определяющая частую уверенность в появлении и развитии ГНК ($УГС$) и группа признаков, оцениваемых по электрическим характеристикам БАТ с расчетом УКБ по выражению (4).

Для расчета $УГВ$ используются выбранные во втором разделе информативные признаки X_1, \dots, X_{12} .

В качестве информативных показателей для расчета $УГС$ выбраны уровень длительного психоэмоционального напряжения $УРН$, уровень хронического утомления $УУ$ и функциональный резерв организма $УФР$. Для расчета УКБ выбраны точки: E31, E32, E36, E38, E39, E40, E42, RP2, RP6, RP7, V22, V25, V37, V38, V39, V54, V56, V61.

На втором этапе синтеза для каждого из информативных признаков, показателей и сопротивлений БАТ определены функции принадлежности к классу ω_r - высокий риск появления и развития ГНК.

Например по признакам X_1 и X_4 соответствующие функции принадлежности описываются аналитическими выражениями вида:

$$\mu_{\omega_r}(X_1) = 0,025X_1 + 0,05;$$

$$\mu_{\omega_r}(X_4) = \begin{cases} 0,1, \text{ если } 0 \leq x_4 < 36; \\ -0,166x_4 + 6,1, \text{ если } 36 \leq x_4 < 36,6; \\ 0,107x_4 - 3,9, \text{ если } 36,6 \leq x_4 < 38; \\ 0,15, \text{ если } x_4 \geq 38. \end{cases} \quad (5)$$

Для показателя $УРН$ функция принадлежности к классу ω_r описывается выражением:

$$\mu_{\omega_r}(YPH) = \begin{cases} 0, \text{если } YPH < 0,2; \\ 1,43(YPH - 0,2)^2, \text{если } 0,2 \leq YPH < 0,55; \\ 0,35 - 1,43(YPH - 0,9)^2, \text{если } 0,55 \leq YPH < 0,9; \\ 0,35, \text{если } YPH \geq 0,9. \end{cases} \quad (6)$$

Для точек E36, E39 и RP2 функция принадлежности к классу ω_r описывается выражением:

$$\mu_{03}(\delta R_{E36}) = \mu_{03}(\delta R_{E39}) = \mu_{03}(\delta R_{RP2}) = \begin{cases} 0, \text{если } \delta R_q < 15\%; \\ 0,0025\delta R_q - 0,0375, \text{если } 15\% \leq \delta R_q < 55\%; \\ 0,1, \text{если } \delta R_q \geq 55\%, \end{cases} \quad (7)$$

где δR_j - величины отклонений сопротивлений БАТ с номером j от своих номинальных значений.

Показатели UGB, УКБ и UGS по отношению к исследуемым латентным переменным URV и URR носят скрытый (латентный) характер. Поэтому их прогностическая уверенность относительно URV и URR проверялась с использованием интерактивного пакета RUMM 2020. На рисунке 1 показан скриншот таблицы ранжирования индикаторных переменных по отношению к показателю URV, на рисунке 2 – по отношению к показателю URR.

INDIVIDUAL ITEM-FIT for Analysis Name URV5 - Serial Order										
	Seq	Item	Type	Location	SE	FitResid	DF	ChiSq	DF	Prob
1	1	I0001	Poly	-1,031	0,669	-1,056	11,67	0,424	4	0,980438
2	2	I0002	Poly	1,408	0,602	-0,968	11,67	0,536	4	0,969917
3	3	I0003	Poly	-0,377	0,576	-0,943	11,67	0,852	4	0,931368

Рисунок 1 – Таблица ранжирования индикаторных переменных UGB, УКБ, UKS латентной переменной URV

INDIVIDUAL ITEM-FIT for Analysis Name URR1 - Chi Square Probability Order										
	Seq	Item	Type	Location	SE	FitResid	DF	ChiSq	DF	Prob
3	3	I0003	Poly	0,852	0,627	-0,919	13,00	0,317	4	0,988716
2	2	I0002	Poly	-5,588	0,574	-0,659	13,00	0,580	4	0,965277
1	1	I0001	Poly	4,737	0,542	-1,062	13,00	1,225	4	0,873979

Рисунок 2 – Таблица распределения индикаторных переменных UGB, УКБ, UKS латентной переменной URR

Анализ этих таблиц показывает, что выбранные индикаторные переменные надежно описывают латентные переменные URV и URR, что свидетельствует об их высокой информативности.

На третьем этапе синтеза на шкалах URV и URR были определены функции принадлежности второго уровня к классам высокий риск возникновения $\omega_{ГВ}$ и рецидива $\omega_{ГР}$ ГНК.

На рисунке 3 приведены примеры графиков функций принадлежности к классам $\omega_{ГВ}$ и $\omega_{ГР}$.

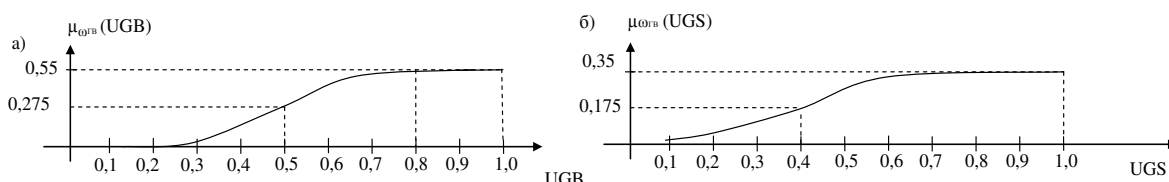


Рисунок 3 – Графики функций принадлежности: а) - $\mu_{\omega_{ГВ}}(UGB)$; б) - $\mu_{\omega_{ГР}}(UGS)$

На четвертом этапе синтеза полученные функции принадлежности агрегируются в нечеткие прогностические правила вида:

$$URR(q+1) = URR(q) + \mu_{\omega_{ГР}}(Z_{q+1})[1 - URR(q)] \quad (8)$$

где $URR(1) = \mu_{\omega_{ГР}}(UGS)$; $Z_2 = UKБ$; $Z_3 = UGS$.

$$URV(q+1) = URV(q) + \mu_{\omega_{ГВ}}(Y_{q+1})[1 - URV(q)], \quad (9)$$

где $URV(1) = \mu_{\omega_{ГВ}}(UGB)$; $Y_2 = UKБ$; $Y_3 = UGS$.

Полученные уровни риска URR и URV используются как базовые переменные для выделения таких классов состояний как: I – низкая уверенность в появлении и развитии гангрены; II – средняя уверенность в появлении и развитии гангрены; III – высокая уверенность в появлении и развитии гангрены; IV – очень высокая уверенность в появлении и развитии гангрены.

Для выделения этих классов состояний на пятом этапе синтеза на экспертном уровне получены соответствующие функции принадлежности, по которым решения о классификации принимаются в соответствии с выражениями:

$$\Omega_{\ell_B} = \max \{ \mu_I(URV), \mu_{II}(URV), \mu_{III}(URV), \mu_{IV}(URV) \} \quad (10)$$

$$\Omega_{\ell_P} = \max \{ \mu_I(VRR), \mu_{II}(VRR), \mu_{III}(VRR), \mu_{IV}(VRR) \} \quad (11)$$

Для решения задач машинной реализации предлагаемых в работе моделей предлагается **алгоритм управления процессами принятия решений** для соответствующей интеллектуальной системы.

Алгоритм реализует две крупные ветви – процесс синтеза необходимых математических моделей и их загрузка в базу знаний и собственно процесс принятия решений.

Проход по ветвям алгоритма осуществляется в интерактивном режиме с использованием многооконного режима.

В четвертом разделе приводятся описание интеллектуальной системы поддержки принятия решений (ИСППР) и основные результаты экспериментальных исследований.

Структура ИСППР, приведенная на рисунке 4, базируется на универсальной оболочке интеллектуальной системы, разработанной на кафедре биомедицинской инженерии ЮЗГУ для решения различных медицинских задач, ориентированных на использование систем гибридных нечетких решающих правил.

В процессе проектирования программного обеспечения решаются две большие задачи: обучение с синтезом соответствующих решающих правил и процессы принятия решений по прогнозированию возникновения и рецидивов ГНК.

При решении задач обучения задействуются методы: разведочного анализа, реализуемые соответствующим программным модулем; теории измерения латентных переменных на основе модели Г. Раша, реализуемой диалоговым пакетом RUMM 2020; многомерного линейного анализа, реализуемого пакетом Mathcad; метод синтеза коллектива нечетких решающих правил, разработанных на кафедре биомедицинской инженерии ЮЗГУ.

В ходе процессов принятия решений задействуются технические средства для оценки энергетических характеристик БАТ с соответствующим программным обеспечением, а также программные модули, решающие задачи оценки уровней психоэмоционального напряжения (УРН), утомления (УУ), функционального резерва (УФР), прогнозирования возникновения и рецидивов ГНК.

Связь со специалистами предметной области, обеспечивается соответствующим интерфейсом пользователя (ИП).

Электрические характеристики БАТ регистрируются блоком регистрации психофизиологической информации (БРПФИ). Информация с БРПФИ передается через драйвер связи (ДС) и систему управления базой данных (СУБД) в базу данных (БД) ИСППР.

Блок разведочного анализа (БРА) решает задачи оценки структуры многомерных данных и формирования рекомендаций по выбору формы и параметров функций принадлежности к исследуемым классам состояний и способов их агрегации в соответствии с правилами, описанными в работах.

Пакет RUMM 2020 реализует задачи оценки информативных признаков, проверяет соответствие индикаторных переменных модели Г.Раша и оценивает взаимосвязь латентной переменной с индикаторными переменными.

Пакет Mathcad решает задачи математической статистики, поддерживая блок разведочного анализа.

Пакет синтеза нечетких решающих правил (НРП) поддерживает метод синтеза коллективов гибридных нечетких решающих правил. Взаимодействие

пакетов подсистемы обучения поддерживается алгоритмом управления процессом принятия решений (АУППР).

Все решающие правила размещаются в универсальной оболочке базы знаний (БЗ), разработанной на кафедре биомедицинской инженерии ЮЗГУ.

Модуль оценки Y_{PH} , Y_U , Y_{FR} рассчитывает величины уровней психоэмоционального напряжения, утомления и функционального резерва, необходимые для повышения точности работы соответствующих прогностических решающих правил.

Модуль оценки электрических характеристик БАТ (ЭХ БАТ) выбирает из базы данных значения сопротивлений соответствующих точек, оценивает их отклонения от номинальных значений и готовит данные для остальных модулей подсистемы принятия решений.

Модули прогнозирования возникновения и рецидива ГНК решают задачи по своему прямому назначению, на основании которых для врача лечебно-профилактических учреждений могут быть сформированы рекомендации по выбору рациональных схем профилактики и лечения соответствующим модулем.

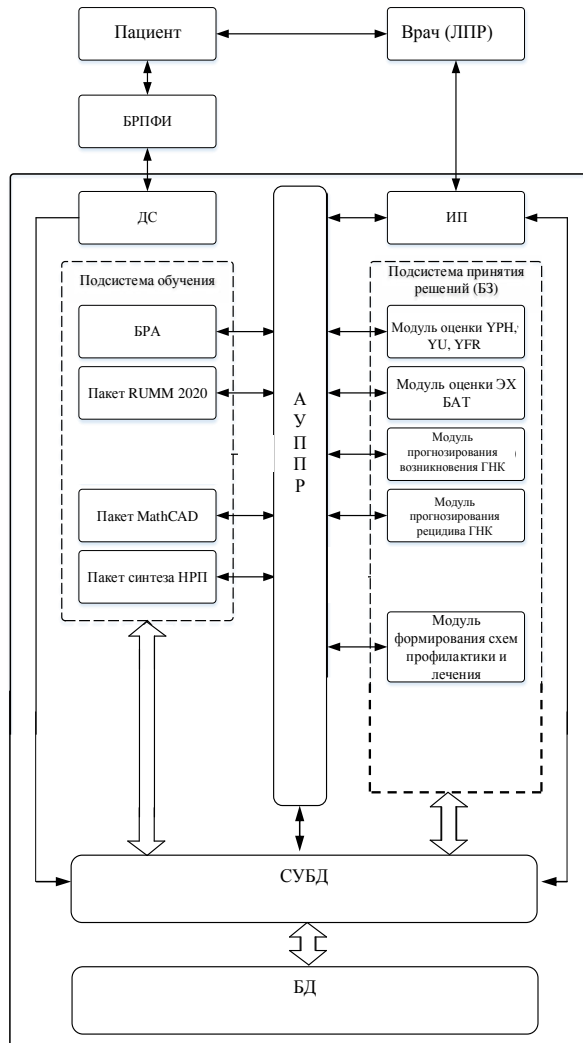


Рисунок 4 – Структура ИСППР прогнозирования ГНК

Для подтверждения качественных показателей, разработанных правил прогнозирования на репрезентативных контрольных выборках рассчитывались

такие общепринятые в медицине показатели, как диагностическая чувствительность (ДЧ), специфичность (ДС), диагностическая эффективность (ДЭ), прогностическая значимость положительных (ПЗ⁺) и отрицательных (ПЗ⁻) результатов.

В ходе контроля правил прогнозирования возникновения и рецидива ГНК (модели 8 и 9) наблюдения за пациентами проводились четыре года. В начале первого года наблюдения осуществлялось измерение всех показателей, отобранных для оценки прогноза появления и развития ГНК.

В качестве порога дефазификации (разделение на незаболевших и заболевших) эксперты назвали уровень 0,5. С этим порогом было отобрано 100 пациентов, которые в соответствии с «решением» математических моделей 8 и 9 не заболеют и 100 пациентов, которые заболеют (классы $\omega_{ГВ}$ и $\omega_{ГР}$).

Далее после каждого года наблюдения производились наблюдения за этими пациентами с фиксацией количества заболевших ГНК и не заболевших.

Результаты правильного и неправильного срабатывания правила 8 и 9 фиксировались с расчетом всех показателей качества.

В таблице 3 представлены показатели качества «срабатывания» прогностической модели (8) по четырем годам наблюдений.

Таблица 3

Значения показателей качества работы прогностического решающего правила 8

Год наблюдения ПК	1	2	3	4
ДЧ	0,85	0,89	0,91	0,94
ДС	0,75	0,78	0,86	0,92
ДЭ	0,77	0,8	0,86	0,92
ПЗ ⁺	0,83	0,87	0,9	0,94
ПЗ ⁻	0,87	0,83	0,88	0,93

Примечание: ПК – показатели качества.

Сводная таблица показателей качества работы решающего правила (9) за 4 года наблюдений представлена таблицей 4.

Значения показателей качества работы прогностического решающего правила 9

Год наблюдения \ ПК	1	2	3	4
ДЧ	0,75	0,79	0,91	0,92
ДС	0,83	0,92	0,92	0,91
ДЭ	0,82	0,88	0,92	0,92
ПЗ ⁺	0,81	0,92	0,92	0,92
ПЗ ⁻	0,8	0,89	0,92	0,94

Анализ данных таблиц 3 и 4 показывает, что показатели ДЧ, ПЗ⁻, ДЭ растут от года к году.

К третьему году наблюдения качество прогнозирования достигает приемлемых для медицинской практики значений. С учетом этого эксперты выбрали трехлетний срок как надежное время прогноза рецидива ГНК.

Таким образом, в ходе статистической проверки было показано, что полученные в работе прогностические модели могут быть рекомендованы к практическому использованию сосудистыми хирургами и врачами-ангиологами.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Диссертационное исследование заключается в решении научно-практической задачи разработки и внедрения автоматизированных систем в медицине. В ходе проведенных исследований разработана интеллектуальная система поддержки принятия решений по прогнозированию возникновения и рецидивов гангрены нижних конечностей на основе технологии мягких вычислений, позволяющая повысить качество оказания медицинской помощи пациентам, имеющим склонность к возникновению и страдающим ГНК.

В диссертации получены следующие основные научные результаты:

1. Сформировано пространство информативных признаков, которое после оптимизации с использованием экспертного оценивания и теории измерения латентных переменных позволило сократить время и затраты по сбору информации и принятию решений по сравнению с существующими аналогами.

2. Разработан метод синтеза гибридных нечетких решающих правил, прогнозирования ГНК, использующий разноуровневые и разнородные предикторы, описывающие как степень ишемического поражения нижних конечностей, так и общесистемные показатели состояния организма в целом, что позволяет получать нечеткие математические модели, обеспечивающие требуемые показатели качества и оперативности принятия решений.

3. Получена система гибридных нечетких моделей прогнозирования возникновения и развития гангрены нижних конечностей, агрегирующая специфические признаки и интегральные показатели, характеризующие функционирование различных подсистем организма, позволяющая обеспечивать

уверенность в принимаемых решениях на уровне 0,9.

4. Синтезирован алгоритм управления системой поддержки принятия решений, обеспечивающий гибкую смену тактики ведения пациентов с исследуемой патологией в зависимости от индивидуального состояния организма, позволяющий повысить качество оказания медицинской помощи больным, страдающим выбранным классом болезни.

5. Разработана структура интеллектуальная система поддержки принятия решений, использование которой позволяет повысить качество медицинского обслуживания пациентов, предрасположенных к возникновению или страдающих ГНК.

6. Произведена апробация предложенных в работе моделей и программно-технических средств в клинических условиях и показано, что прогностическая значимость полученных результатов превышает 0,9, что позволяет рекомендовать разработанную систему для использования в клинической практике.

Рекомендации. Результаты диссертационного исследования следует внедрить в медицинскую практику сердечно-сосудистых и хирургических отделений больниц различного уровня.

Перспективы дальнейшей разработки темы. Совершенствование разработанных методов и средств, а также её ориентация на другие виды сердечно-сосудистых заболеваний с целью повышения качества оказания медицинской помощи больным с выбранным классом заболеваний.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных журналах

1. **Хрипина, И.И.** Модуль регистрации электрических характеристик биологически активных точек для экспертной системы врача рефлексотерапевта / Корневский Н.А., Крупчатников Р.А., Ключиков И.А., **Хрипина И.И.** // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2014. – № 5 (56). – С. 81-88.

2. **Хрипина, И.И.** Модель прогнозирования возникновения осложнений ишемии нижних конечностей путем оценки функционального резерва организма / А.В. Быков, А.Г. Устинов, **И.И. Хрипина** // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. – 2015. – №4(17). – С. 81-88.

3. **Хрипина, И.И.** Использование аналоговых интерфейсов АФЕ для параметрической оценки степени синхронности электрофизиологических процессов / Корневский Н.А., Дмитриева В.В., Серебровский В.В., **Хрипина И.И.** // Медицинская техника. – 2015. – № 4. – С. 27-30.

4. **Хрипина, И.И.** Оценка информативности биологически активных точек с использованием теории измерения латентных переменных / Корневский Н.А., Мухатаев Ю.Б., Быков А.В., **Хрипина И.И.** // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. – 2016. – Т. 15. – № 4. – С. 628-632.

5. **Хрипина, И.И.** Метод синтеза гибридных нечетких моделей принятия решений по оценке состояния и управлению биотехническими системами/

Кореневский Н.А., Серебровский В.В., Разумова К.В., **Хрипина И.И.** // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2016. – № 9. – С. 68-74.

6. **Хрипина, И.И.** Использование акупунктурных точек как биоиндикаторов экологической нагрузки на организм человека / Кореневский Н.А., Стародубцева Л.В., **Хрипина И.И.**, Устинов А.Г. // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. – 2014. – Т. 13. – № 2. – С. 312-316.

7. **Хрипина, И.И.** Оценка уверенности в развитии гангрены нижних конечностей на основе моделей Г. Раша и Е. Шортлифа / Быков А.В., Пархоменко С.А., Бойцов А.В., **Хрипина И.И.** // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. – 2017. – Т. 16. – № 4. – С. 878-883.

8. **Хрипина, И.И.** Метод и нечеткая модель прогнозирования рецидива гангрены нижних конечностей / **Хрипина И.И.**, Пархоменко С.А., Кореневская С.Н., Субботина Т.И., Бойцова Е.А., Цымбал Е.В. // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. – 2018. – Т.17. – №2. – С. 394-400.

Монография

9. **Хрипина, И.И.** Прогнозирование появления и развития гангрены нижних конечностей с использованием нечетких интеллектуальных технологий: монография / Быков А.В., Кореневская С.Н., Пархоменко С.А., Стародубцева Л.В., **Хрипина И.И.** – Курск: «Издательский дом ВИП», 2017. – 470 с.

Научные работы в других изданиях РИНЦ

10. **Хрипина, И.И.** Интеллектуальные медицинские системы с нечеткими коллективами решающих правил / А. Устинов, С.Н. Кореневская, **И.И. Хрипина**, А.В. Бойцов // X Russian-German conference on biomedical engineering. – SaintPetersburg, 2014. – С. 90-92

11. **Хрипина, И.И.** Интеллектуальная система принятия решений по организации лечебно-оздоровительных мероприятий для пациентов с ишемическими поражениями нижних конечностей / Быков А.В., Кореневская С.Н., **Хрипина И.И.**, Родионов Д.С. // Биотехнология и биомедицинская инженерия: сборник научных трудов по материалам X Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 25-летию биотехнологического факультета и 20-летию кафедры биологической и химической технологии. – Курск: ЮЗГУ, 2017. – С. 133-141.

12. **Хрипина, И.И.** Интеллектуальная и информационная поддержка ведения пациентов с хроническими облитерирующими заболеваниями артерий нижних конечностей / Быков А.В., Пархоменко С.А., Стародубцева Л.В., Кореневская С.Н., **Хрипина И.И.** // Электронный научно-образовательный вестник Здоровье и образование в XXI веке. – 2017. – Т. 19. – № 12. – С. 68-70.

13. **Хрипина, И.И.** Интеллектуальная поддержка ведения пациентов с критической ишемией нижних конечностей / Быков А.В., **Хрипина И.И.**, Гривачев Е.А. // Биотехнические, медицинские, экологические системы и робототехнические комплексы - Биомедсистемы-2017: сборник трудов XXX Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. – Рязань: Рязанский государственный радиотехнический университет, 2017. – С. 295-297.

14. **Хрипина, И.И.** Нечеткие коллективные классификаторы для оценки состояния живых систем/ Кореневский Н.А., **Хрипина И.И.**, Лазурина Л.П. //

Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации: сборник материалов XII международной научно-технической конференции. – Курск: ЮЗГУ, 2015. – С. 172-174.

15. **Хрипина, И.И.** Оценка уровня утомления на основе моделей Е. Шортлифа/ Кореневский Н.А., **Хрипина И.И.**, Магеровский М.А. // Медико-экологические информационные технологии – 2015: сборник материалов международной научно-технической конференции. – Курск: ЮЗГУ, 2015. – С. 102-107.

16. **Хрипина, И.И.** Синтез коллективов нечетких решающих правил для медицинских экспертных систем / Кореневский Н.А., **Хрипина И.И.**, Шуткин А.Н., Разумова К.В. // НАУЧНАЯ СЕССИЯ НИЯУ МИФИ-2015: аннотации докладов: в 3-х томах. – М.: МИФИ, 2015. – С. 64.