

На правах рукописи

Крикунова Евгения Владимировна

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И РАННЕЙ
ДИАГНОСТИКИ ЗАБОЛЕВАНИЙ НЕРВНОЙ СИСТЕМЫ С
УЧЕТОМ ЗАЩИТНЫХ МЕХАНИЗМОВ ОРГАНИЗМА**

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 в Юго-Западном государственном университете на кафедре биомедицинской инженерии

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Маслак Анатолий Андреевич

Официальные оппоненты: **Истомина Татьяна Викторовна**,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Национальный
исследовательский университет «МЭИ»,
кафедра основ радиотехники, профессор
кафедры (г. Москва)

Петрунина Елена Валерьевна,
кандидат технических наук, доцент,
ФГАОУ ВО «Московский политехнический
университет», кафедра СМАРТ-технологии,
заведующий кафедрой (г. Москва)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «**Воронежский государственный
технический университет**» (г. Воронеж)

Защита диссертации состоится «21» апреля 2023 года в 11⁰⁰ часов на заседании объединенного диссертационного совета 99.2.029.03, созданного на базе Юго-Западного государственного университета, Орловского государственного университета имени И.С. Тургенева, Белгородского государственного национального исследовательского университета, по адресу: 305000, 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/b8b/rq8s093ajpmmex6uysagadnk50vyv1ne/Dissertatsiya-Krikunova-E.V.pdf>

Автореферат разослан « » марта 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Милостная Наталья Анатольевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Согласно данным ВОЗ, 25% функциональных расстройств в мире обусловлено заболеваниями нервной системы (НС). Одной из важных задач современной медицины является повышение эффективности прогнозирования, ранней и дифференциальной диагностики заболеваний, включая патологию НС. Своевременное и качественное решение этого класса задач позволяет выбирать адекватные схемы профилактики и лечения. В медицине принято текущее состояние здоровья описывать через систему признаков, получаемых в ходе опросов, осмотров, инструментальных и лабораторных методов исследования. В то же время, хорошо известен факт того, что различные индивидуумы по-разному противостоят одним и тем же внутренним и внешним факторам риска (ФР), имея различные по «мощности» функции защиты. На современном этапе развития науки удастся получить лишь частные модели и рекомендации по оценке индивидуальной защиты организма от очень ограниченного и достаточно простого набора ФР. Это делает актуальной проблему поиска таких индикаторов уровня защиты организма (УЗО) и его систем от воздействия внешних ФР, использование которых позволит решать задачи синтеза математических моделей прогнозирования и оценки состояния НС в условиях отсутствия формальных моделей при неполном и нечетком описании объекта исследований.

Степень разработанности темы исследования. Несмотря на очевидные успехи отечественной и зарубежной неврологии, заболевания НС представляют серьезную социально-экономическую проблему для всего мира (А.Г. Самусенко, В.И. Стародубов, J. Olesen, V. Feigen, N. Kosfanjsek). Это обусловлено возрастающей распространенностью заболеваний НС и большими затратами, связанными с высокой инвалидностью, вызываемой данной патологией.

Современной медицинской науке известно множество механизмов защиты, обеспечиваемых двумя системами: неспецифической (сопротивляемость организма) и специфической (иммунная система), которые имеют сверхсложную и достаточно плохо изученную структуру нестационарного, динамического типа, что не позволяет получить надежные модели количественной оценки УЗО от различных ФР с последующим выбором оптимальных условий жизнедеятельности, включая адекватные возникающим событиям схемы профилактики и лечения. Анализ современных подходов к решению задач количественной оценки УЗО и его систем показывает, что в качестве теоретической основы наиболее часто используют современную адаптологию, в рамках которой для количественной оценки УЗО различные исследователи используют показатели адаптационного потенциала и адаптационного соответствия, функциональное состояние и резерв, как всего организма, так и его органов и систем, перекисное окисление липидов и антиоксидантную активность,

иммунологические лабораторные показатели, энергетические характеристики биологически активных точек и др.

Опыт решения задач с аналогичной структурой данных, полученный на кафедре биомедицинской инженерии Юго-Западного государственного университета, показал, что для решения выбранного класса задач целесообразно использовать методологию синтеза гибридных нечетких решающих правил (МСГНРП), которая выбрана в качестве базового математического аппарата исследований.

Цель работы: повышение качества прогнозирования и ранней диагностики заболеваний нервной системы, провоцируемых разнородными экзогенными и эндогенными факторами риска, на основе гибридных нечетких правил принятия решений, учитывающих защитные механизмы организма и его систем.

Для достижения поставленной цели необходимо решить **следующие задачи:**

- провести анализ структуры данных и исследуемых классов состояний нервной системы человека, находящегося под воздействием факторов риска, провоцирующих заболевания нервной системы в сочетании с другими факторами, с целью выбора адекватного математического аппарата исследования;
- разработать метод синтеза решающих правил оценки защитных свойств организма на общесистемном уровне;
- разработать метод синтеза гибридных нечетких решающих правил прогнозирования и ранней диагностики заболеваний нервной системы с учетом защитных механизмов организма;
- синтезировать математические модели оценки уровня защиты периферической и центральной нервной систем;
- получить гибридные решающие правила прогнозирования и ранней диагностики заболеваний периферической и центральной нервной систем с учетом действия защитных механизмов организма;
- разработать структуру системы поддержки принятия решений для врачей, ведущих пациентов с заболеваниями нервной системы;
- произвести апробацию предложенных методов и средств на репрезентативных контрольных выборках.

Научная новизна исследований. В диссертации получены следующие результаты, характеризующиеся научной новизной:

- метод синтеза решающих правил оценки защитных свойств организма на общесистемном уровне, отличающийся учетом составляющих, характеризующих различные механизмы формирования защитных барьеров, учитывающий специфику структуры данных и способы их обработки, позволяющий синтезировать гетерогенные нечеткие модели количественной оценки уровня защиты целого организма, обеспечивающие улучшение качества оценки состояния здоровья;
- метод синтеза гибридных нечетких решающих правил прогнозирования и ранней диагностики заболеваний нервной системы,

учитывающий характеристики индивидуальных, вредных производственных, и других факторов риска, отличающийся тем, что в условиях нечеткого описания разнородных параметров воздействия, учитывая защитные резервы на общесистемном, системном и органном уровнях, позволяющий синтезировать гибридные решающие правила, обеспечивающие повышение качества прогнозирования и ранней диагностики исследуемого класса заболеваний;

- математические модели оценки уровня защиты системы управления сердечным ритмом и когнитивной функции внимания, отличающиеся использованием гибридных нечетких решающих правил, включающих в себя показатели, характеризующие различные свойства исследуемых элементов нервной системы, обеспечивающие диагностическую чувствительность и специфичность более 0,95;

- гибридные нечеткие модели прогнозирования и ранней диагностики патологии системы управления сердечным ритмом и когнитивной функции внимания, отличающиеся учетом механизмов защиты организма на различных уровнях, обеспечивающие уверенность в принимаемых решениях не ниже 0,9; что позволяет рекомендовать полученные результаты для внедрения в практическую медицину;

- система поддержки принятия врачебных решений с интерактивным алгоритмом управления, отличающаяся тем, что база знаний использует иерархические структуры гибридных нечетких моделей, а логика ведения пациентов зависит от уровня защиты организма и комбинированного действия экзогенных и эндогенных факторов риска, что позволяет повысить качество оказания медицинских услуг исследуемой категории пациентов.

Теоретическая и практическая значимость работы состоит в развитии теории распознавания образов, нечеткой логики принятия решений, включая методологию синтеза гибридных нечетких решающих правил, обеспечивающих повышение качества обслуживания пациентов, подвергающихся воздействию разнородных природных, производственных, и других ФР за счет разработки нового направления в проектировании систем поддержки принятия решений (СППР) медицинского назначения.

Разработанные гибридные модели позволяют определять УЗО, а также оценивать уверенность в прогнозе появления и развития заболеваний системы управления сердечным ритмом и когнитивной функции внимания. Полученные в работе методы, модели и алгоритм составляют основу СППР, применение которой в медицинской практике позволит повысить качество оказания медицинской помощи пациентам с высоким риском появления и развития нервных болезней.

Работа выполнена в рамках реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» и в соответствии с научным направлением Юго-Западного государственного университета «Разработка медико-экологических информационных технологий».

Результаты работы внедрены в образовательный процесс Юго-Западного государственного университета при подготовке магистров по

направлению 12.04.04 «Биотехнические системы и технологии» и прошли испытания в Клиническом Научно-Медицинском центре «Авиценна» г. Курска. Испытания показали целесообразность их использования в системах поддержки принятия решений при диагностике неврологических заболеваний.

Методология и методы исследований. Для решения поставленных задач использовались методы системного анализа, теории биотехнических систем медицинского назначения, моделирования, теории синтеза сложных информационных систем, теории алгоритмов, нечетких множеств, прикладной математической статистики, экспертного оценивания. При разработке гибридных нечетких моделей принятия решений в качестве инструментария использовался MATLAB 2018b со встроенным пакетом Fuzzy Logic Toolbox.

Положения, выносимые на защиту:

1. Метод синтеза решающих правил оценки защитных свойств организма на общесистемном уровне позволил синтезировать гетерогенные нечеткие модели количественной оценки уровня защиты целого организма, обеспечивающие улучшение качества оценки состояния здоровья людей, подвергающихся воздействию экзогенных и эндогенных факторов риска.

2. Метод синтеза гибридных нечетких решающих правил прогнозирования и ранней диагностики заболеваний нервной системы, учитывающий как показатели, характеризующие работу защитных механизмов организма, так и характеристики индивидуальных, производственных, и других факторов риска, позволяет синтезировать модели решающих модулей, обеспечивающие повышение качества прогнозирования и ранней диагностики нервных болезней.

3. Математические модели оценки уровня защиты системы управления сердечным ритмом и когнитивной функции внимания обеспечили диагностическую чувствительность и специфичность более 0,95; а гибридные нечеткие модели прогнозирования и ранней диагностики патологии системы управления сердечным ритмом и когнитивной функции внимания обеспечили уверенность в принимаемых решениях не ниже 0,9.

4. Система поддержки принятия врачебных решений с интерактивным алгоритмом управления обеспечивает реализацию логики ведения пациентов в зависимости от уровня защиты организма и комбинированного действия разнородных факторов риска, повышая качество оказания медицинской помощи, исследуемой категории пациентов.

Степень достоверности и апробации результатов. Результаты исследования показали их воспроизводимость в различных условиях, отсутствие противоречий относительно нечетких алгоритмов принятия решений и методов математического моделирования, а также аналогичных результатов, полученных другими исследователями. Результаты экспериментальных исследований, полученных в работе решающих правил согласуются с опубликованными ранее экспериментальными данными по теме диссертации.

Основные теоретические положения и научные результаты диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили положительную оценку на Международных и Всероссийских научных конференциях: «Биотехнические, медицинские и экологические системы, измерительные устройства и робототехнические комплексы» (Рязань – 2021), «Лазерно-информационные технологии» (Новороссийск – 2022), «Медико-экологические информационные технологии» (Курск – 2021, 2022); «Искусственный интеллект в решении актуальных социальных и экономических проблем XXI века» (Пермь - 2022); «Актуальные проблемы медицинской науки и образования» (Пенза – 2022); «Биотехнология и биомедицинская инженерия» (Курск – 2022), на научно-технических семинарах кафедры биомедицинской инженерии ЮЗГУ (Курск – 2020-2023).

Публикации. Основные результаты диссертационного исследования отражены в 15 научных работах, среди которых 3 статьи в ведущих рецензируемых научных журналах, 2 статьи в журналах международной наукометрической базы Scopus и одна монография.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, четырёх разделов, заключения и списка литературы, включающего 91 отечественный и 23 зарубежных наименований. Работа изложена на 151 странице машинописного текста, содержит 30 рисунков и 12 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первом разделе выполнен анализ влияния производственных ФР на появление и развитие заболеваний НС, изучена специфика задач прогнозирования и ранней диагностики этой патологии, и показана целесообразность использования в моделях принятия решений показателей, характеризующих УЗО и его систем. Проведённый анализ показал, что роли защитных механизмов человеческого организма в прогнозах состояния здоровья человека уделяется не достаточно внимания, что приводит к снижению эффективности разрабатываемых методов и средств, направленных на борьбу с социально значимыми заболеваниями, включая заболевания НС. С учётом выявленных проблем в заключении первого раздела сформулированы цели и задачи исследования.

Второй раздел посвящен разработке методов и моделей оценки защитных механизмов организма для различных уровней его функционирования. Определён объект исследования и показано, что при решении поставленных в работе задач качество принимаемых решений может быть значительно улучшено, если при синтезе соответствующих математических моделей использовать показатели, дающие адекватную количественную оценку защитных механизмов организма, его систем и органов. На основе анализа структуры данных для решения поставленных в работе задач обосновано применение МСГНПП.

При разработке метода синтеза решающих правил оценки защитных свойств организма на общесистемном уровне с использованием модели Г. Раша теории измерения латентных переменных реализуемой интерактивным пакетом RUMM2020 было сформировано пространство информативных признаков в составе: уровень адапционного потенциала (АП); энергетический разбаланс (ЭР) биологически активных точек (БАТ) «связанных» с общесистемной реакцией организма; показатель адапционного соответствия (ПАС); показатели характеризующие перекисное окисление липидов (ПОЛ) и антиоксидантную активность (АОА); УЗО UZ_A по группе лабораторных показателей.

Предлагаемый метод реализуется следующей последовательностью действий:

1. В соответствии с выбранной методологией формируется экспертная группа, организуется процесс ее обучения и производится разведочный анализ структуры данных, с получением первичного пространства признаков.

2. Используя теорию измерения латентных переменных с моделью Г. Раша в сочетании с методами разведочного анализа формируется пространство информативных признаков относительно задачи оценки защитных свойств организма на общесистемном уровне.

3. По выбранному пространству информативных признаков с учётом общих рекомендаций МСГНПП определяются частные функции уровня защиты - UZ_p , например, для антиоксидантной системы организма УЗО определяется тремя функциями уровня защиты: по показателям относительных отклонений показателей ПОЛ и АОА от своих номинальных значений и по разности этих отклонений, которые агрегируются в частную модель УЗО типа:

$$UZO = f_z(x_{II}) + f_z(x_A) + f_z(Z) - f_z(x_{II}) \cdot f_z(x_A) - f_z(x_{II}) \cdot f_z(Z) - f_z(x_A) \cdot f_z(Z) + f_z(x_{II}) \cdot f_z(x_A) \cdot f_z(Z), \quad (1)$$

где $f_z(\delta x_A)$ – функция, характеризующая уровень защиты по показателю АОА; $f_z(\delta x_{II})$ – по показателю ПОЛ; $f_z(Z)$ – функция, характеризующая уровень защиты по разностному показателю $Z = \delta x_{II} - \delta x_A$.

4. В зависимости от целей исследования решается задача выбора механизма агрегации полученных функций уровня защиты в интегральный показатель УЗО в целом.

При этом, если интегральный УЗО определяется по совокупности выбранных функций уровня защиты, определяемых для различных типов этих уровней и при этом каждая из выбранных систем защиты вносит свой вклад в общий интегральный показатель таким образом, что увеличение защитных функций каждой системы увеличивает общий УЗО, то УЗО на общесистемном уровне UZI определяется с использованием формулы типа:

$$UZI(q+1) = UZI(q) + Q(q+1)[1 - UZI(q)], \quad (2)$$

где $UZI(1)=UZ_{АП}=Q(1)$; $Q(2)=UZ_{ЭР}$; $Q(3)=UZ_{ПАС}$; $Q(4)=UZO$; $Q(5)=UZ_A$; $UZ_{АП}$ - частный уровень защиты по показателю АП; $UZ_{ЭР}$ - по показателю ЭР; $UZ_{ПАС}$ - по показателю ПАС.

Уровень доверия к результатам, получаемым при использовании модели (2) определяется выражением:

$$UDI(q+1) = UDI(q) + UD(q+1)[1 - UDI(q)], \quad (3)$$

где $UDI(1)=UD(1)$ - уровень доверия в общесистемном уровне в определении УЗО по показателю $UZ_{АП}$; $UD(2)$ – по показателю $UZ_{ЭР}$; $UD(3)$ – по показателю $UZ_{ПАС}$; $UD(4)$ – по показателю UZO ; $UD(5)$ – по показателю UZ_A .

При осторожной стратегии, когда следует считать, что потеря защитных функций одной системы ведет к потере защитных функций всего организма следует использовать агрегатор вида:

$$UZI = \min(UZ_{АП}, UVZ_{ЭР}, UZ_{ПАС}, UZO, UZ_A). \quad (4)$$

В последнем выражении не используемый в расчетах показатель заменяется единицей, а уровень доверия определяется аналогично (3), но со своими частными мерами доверия.

5. Если решается задача классификации УЗО, то на экспертном уровне в зависимости от заданных целей выбирается алфавит классов УЗО ω_ℓ и формируется список показателей, описывающих эти уровни, которые используются как базовые переменные для построения функций принадлежности к выбираемому экспертами алфавиту классов УЗО.

Интегральные показатели уверенности отнесения пациентов к классам УЗО по выбранной системе показателей определяются системой нечетких выражений вида:

$$UZK_\ell(p+1) = UZK_\ell(p) + [\mu_\ell(D_{p+1})][1 - UZK_\ell(p)], \quad (5)$$

где $UZK_\ell(p)$ – уверенность в отнесении объекта исследования к классу УЗО ω_ℓ по показателю p ; $UZK_\ell(1) = \mu_\ell(D_1)$, D_p – шкала измерения уровня защиты по показателю p .

Классификация и оценка уверенности в классе ω_ℓ осуществляется по максимальному показателю УЗО. Для оценки УЗО на уровнях органов, подсистем и систем предлагается использовать показатели, характеризующие их функциональное состояние (ФС) и функциональные резервы (ФРО), для оценки которых используются два блока показателей: электрические характеристики БАТ, «связанных» с исследуемыми

биологическими структурами, и показатели общепринятые в медицинской практике.

С учетом показателей, характеризующих УЗО на различных его уровнях в сочетании с действием на человека разнородных ФР в рамках общей методологии синтеза гибридных нечетких решающих правил, предлагается **метод синтеза гибридных нечетких решающих правил прогнозирования и ранней диагностики с учетом защитных механизмов организма**, состоящий из следующей последовательности действий.

1. С учетом требований квалиметрии формируется экспертная группа, компетентная в области адаптологии и профпатологии и имеющая опыт синтеза гибридных нечетких решающих правил для решения исследуемого класса задач.

2. В зависимости от особенностей производственного процесса определяется алфавит исследуемых классов заболеваний ω_ℓ , для которых определяется список информативных признаков и комплексных показателей, включая ФР, определяемые образом жизни, состоянием здоровья, эргономикой и экологией рабочих мест.

3. Синтезируются модели уровня защиты на общесистемном уровне (показатели UZI и UDI (модели 2, 3, 4)). На шкале UZI с учетом меры доверия UDI строятся функции принадлежности $\mu_\ell^p(\text{UZI})$ к лингвистической переменной, определяющей уверенность в ω_ℓ по задаче p :

$$\text{UW}_\ell^p(\text{UZI}) = \mu_\ell^p(\text{UZI}). \quad (6)$$

4. Для исследуемых классов профессиональных заболеваний ω_ℓ формируются списки БАТ, определяющих ФС исследуемых органов и систем, для которых синтезируются модели оценки уровня ФС и ФРО:

$$\text{FS}_{\text{Б}\ell} = \mu_{\text{Б}\ell}(\text{ER}_\ell), \quad (7)$$

$$\text{FR}_{\text{Б}\ell} = f_{\text{FRE}\ell}(\text{ON}_\ell) + f_{\text{FRE}\ell}(\text{VV}_\ell) - f_{\text{FRE}\ell}(\text{ON}_\ell) \cdot f_{\text{FRE}\ell}(\text{VV}_\ell), \quad (8)$$

где ON_ℓ - отношение уровня ФС до воздействия нагрузкой UFS_ℓ^0 и после воздействия UFS_ℓ^N ; VV_ℓ - скорость восстановления уровня ФС $\text{VV}_\ell = (\text{UFS}_\ell^0 - \text{UFS}_\ell^N) / T_{\text{НБ}}$ за время наблюдения $T_{\text{НБ}}$.

На шкалах $\text{FS}_{\text{Б}\ell}$ и $\text{FR}_{\text{Б}\ell}$ строятся функции принадлежности $\text{UFS}_{\text{Б}\ell}^p = \mu_\ell^p(\text{FS}_{\text{Б}\ell})$ и $\text{UFR}_{\text{Б}\ell}^p = \mu_\ell^p(\text{FR}_{\text{Б}\ell})$ к лингвистическим переменным, определяющим уверенность в ω_ℓ по задаче p по показателям уровней ФС и ФРО.

Определяется список дополнительных показателей для оценки уровней ФС, по которому, с использованием пакета RUMM2020, формируется

пространство информативных показателей с синтезом нечеткой модели аналогичной (2)

$$FSD_{\ell} = AGFS_{\ell}(QD_{q\ell}), \quad (9)$$

где $AGFS_{\ell}$ - агрегатор, объединяющий дополнительные показатели ФС $QD_{q\ell}$ с номером q для класса ω_{ℓ} .

По показателям уровней ФС определяются типы нагрузок и синтезируются частные модели оценки уровня ФРО $FRQD_{q\ell}$ аналогичные (9) с синтезом нечетких моделей оценки уровня ФРО по списку дополнительных показателей:

$$FRD_{\ell} = AGFR_{\ell}(FRQD_{q\ell}). \quad (10)$$

На шкалах FSD_{ℓ} и FRD_{ℓ} строятся функции принадлежности $UFS_{D\ell}^p = \mu_{\ell}^p(FSD_{\ell})$ и $UFR_{D\ell}^p = \mu_{\ell}^p(FRD_{\ell})$ к лингвистическим переменным, определяющим уверенность в ω_{ℓ} по задаче p по дополнительным показателям уровней ФС и ФРО.

5. Для исследуемых классов профессиональных заболеваний ω_{ℓ} формируются списки БАТ, имеющих «связь» с исследуемыми органами и системами, по которым с учетом общих рекомендаций МСГНПП синтезируются модели вида $UW_{\ell}^p = \mu_{\ell}^p(ER_{\ell})$, где p - идентификатор решаемой задачи ($p=П$ – прогноз; $p=P$ – ранняя диагностика, $p=Д$ - дифференциальная диагностика; $p=C$ – степень тяжести и т.д.); ER_{ℓ} – ЭР БАТ, отобранный экспертами для патологий ω_{ℓ} .

6. Для повышения точности принимаемых решений для органов мишеней ω_{ℓ} определяются сопутствующие ФР, связанные с экологией, эргономикой, индивидуальными особенностями организма. Для оценки индивидуального здоровья с учетом имеющихся возможностей рекомендуется использовать: уровни психоэмоционального напряжения и утомления; данные опросов, осмотров, инструментальных и лабораторных исследований, принятых в традиционной медицинской практике.

В общем виде, используя общие рекомендации по синтезу гибридных нечетких решающих правил для решения задач прогнозирования, ранней и возможно дифференциальной диагностики исследуемого класса заболеваний синтезируются гибридные модели вида:

$$UWF_{\ell}^p = AGFF_{\ell}^p [UW_{\ell}^p (IZI), UFS_{B}^p, UFR_{B}^p, UFS_{D\ell}^p, UFR_{D\ell}^p, UER_{\ell}^p, UEK_{\ell}^p, UD_{\ell}^p], \quad (11)$$

где $AGFF_{\ell}^p$ - агрегатор финального решающего правила; UER_{ℓ}^p - уверенность в ω_{ℓ} от уровня эргономики рабочего места; UEK_{ℓ}^p - уверенность в ω_{ℓ} от экологической нагрузки; UD_{ℓ}^p - уверенность в ω_{ℓ} по задаче p от индивидуального состояния здоровья.

7. Если при синтезе решающих правил использовать принятое в современной адаптологии понятие адаптационного потенциала, являющегося так же характеристикой УЗО, то при синтезе соответствующих решающих правил можно повысить их уровень специфичности в части разделения пациентов с высоким риском патологии систем и органов мишеней от наличия ранних стадий исследуемых заболеваний. Это связано с тем, что по показателям адаптационного потенциала определяются такие классы состояний как неудовлетворительная адаптация (НА) и срыв механизмов адаптации (СМА), по наличию которых строится решающее правило перехода от прогностических к диагностическим решающим правилам с использованием моделей вида:

$$\text{ЕСЛИ (НА) ТО (От ПП перейти к ПРД);} \quad (12)$$

$$\text{ЕСЛИ (СМА) ТО (От ПП или ПРД перейти к ДРП),} \quad (13)$$

где ПП - прогностические решающие правила; ПРД - правила ранней диагностики; ДРП - диагностические решающие правила.

В третьем разделе получены математические модели оценки уровня защиты периферической и центральной НС, а также модели прогнозирования и ранней диагностики нервных болезней в условиях действия производственных ФР.

Учитывая практическую важность и серьезные последствия, которые могут возникать при «сбоях» в управлении работой сердца со стороны вегетативной НС, в работе осуществлялся синтез моделей оценки уровня защиты периферической нервной системы (ПНС) в части, касающейся управления сердечным ритмом.

Из множества показателей, характеризующих «надежность» управления сердечным ритмом на экспертном уровне были выбраны спектральный относительный индекс (SI), показатель активности регуляторных систем (ПАРС) и БАТ, «чувствительные» к изменению баланса в системе управления сердечным ритмом (СУСР).

С использованием предложенного в работе метода получена нечеткая модель оценки уровня защиты СУСР вида:

$$UZC=UZB+UZD-UZB \cdot UZD, \quad (14)$$

где UZB - уровень защиты СУСР по энергетическому разбалансу БАТ; UZD - уровень защиты СУСР по показателям SI и ПАРС.

В свою очередь UZD определяется выражением

$$UZD = \min[UZ(SI), UZ(\text{ПАРС})]. \quad (15)$$

Построение модели оценки уровня защиты центральной нервной системы (ЦНС) осуществлялось на примере уровня защиты когнитивной функции внимания $UZFV$, страдающей у целого ряда операторов информационно насыщенных систем.

Для этой функции ЦНС получена нечеткая модель вида

$$UZFV = UZB + UZV - UZB \cdot UZV, \quad (16)$$

где UZB - уровень защиты когнитивной функции внимания по энергетическому разбалансу БАТ; UZV - уровень защиты когнитивной функции внимания по показателям свойств внимания.

Прогностическая модель оценки уверенности в появлении и развитии патологии СУСР, полученная с использованием предложенных методов и с учетом общих рекомендаций МСГНПП, имеет вид:

$$UFP_{\Pi}(q + 1) = UFP_{\Pi}(q) + Q_{\Pi}(q + 1)[1 - UFP_{\Pi}(q)], \quad (17)$$

где UFP_{Π} - уверенность в появлении и развитии патологии СУСР; $UFP_{\Pi}(1) = \mu_{Z\Pi}(UZC) = Q_{\Pi}(1)$; $Q_{\Pi}(z) = \mu_{E\Pi}(Z_1)$; $Q_{\Pi}(3) = UPP$; $Q(4) = UPU$; $Q(5) = UPI$; q - номер показателя в расчетах UFP_{Π} ; $\mu_{Z\Pi}(UZC)$ - функция принадлежности, определяющая уверенность в риске появления и развития патологии СУСР с базовой переменной по уровню защиты UZC ; $\mu_{E\Pi}(Z_1)$ - функция принадлежности к уверенности в риске появления и развития патологии СУСР с базовой переменной, определяемой по параметрам воздействия электромагнитного поля промышленной частоты; UPP , UPU , UPI - частные оценки уверенности в появлении и развитии патологии СУСР по показателям уровней длительного психоэмоционального напряжения и хронического утомления и состоянию ЦНС относящимся к группе индивидуальных ФР.

Уверенность UFP_C в появлении и развитии патологии ЦНС (когнитивной функции внимания) определялась аналогично (16).

Переход от показателей UFP_{Π} и UFP_C к моделям прогнозирования и ранней диагностики осуществляется с использованием выражений (12) и (13). В задаче оценки состояния СУСР для выделения классов НА и СМА на экспертном уровне было принято решение использовать показатель АП. Для когнитивной функции внимания переключение между решающими правилами ПП и ПРД на экспертном уровне было предложено использовать модели классификации свойств когнитивной функции внимания по классам: риск появления и развития расстройств свойств внимания с идентификатором $s(\omega_{\Pi})$, легкое когнитивное нарушение по $s(\omega_{\Pi})$;

умеренное когнитивное нарушение по $s(\omega_v)$, начальная клиническая стадия по $s(\omega_k)$. В качестве «переключающего» свойства внимания выбирается наиболее нагруженное для исследуемой профессии свойство.

Результаты математического моделирования и экспертного оценивания показали, что уверенность в правильной классификации расстройств свойств внимания превышает уровень 0,9.

В четвертом разделе разрабатываются основные элементы СППР по анализу состояния периферической и центральной нервных систем с учетом количественных оценок УЗО и его систем, приводятся результаты экспериментальных исследований на репрезентативных контрольных выборках.

Структурная схема СППР приведена на рисунке 1. Управление взаимодействием между модулями, подсистемами, внешним аппаратным обеспечением и лицом, принимающим решение (ЛПР), обеспечивается **алгоритмом управления СППР (АУСППР)**, содержащим три основные ветви. Ветвь обучения решает задачу синтеза гибридных нечетких решающих правил и готовит их «загрузку» в базу знаний СППР. Ветвь оценки уровня защиты обеспечивает расчет величин уровня защиты по выбранным структурам организма. Ветвь принятия решений в режиме диалога с ЛПР, производит оценку состояния здоровья и формирует рекомендации по его коррекции.

Управление работой СППР осуществляет ЛПР, в качестве которого выступают профильные врачи, специализирующиеся на исследуемых классах профессиональных заболеваний. ЛПР взаимодействует с СППР через интерфейс пользователя (ИП). Управление работой внешних технических средств (ВТС) и их взаимодействие с базой данных (БД) СППР осуществляется через драйвер связи (ДС) и систему управления базой данных (СУБД).

На первом этапе проектирования основных модулей программного обеспечения СППР организуется процесс обучения. В состав пакета обучающих программ (ПОП) входят: блок разведочного анализа (БРА); пакет интерактивных программ RUMM 2020; пакет МГУА; стандартный пакет MathCAD; пакет МСГНРП.

Оригинальной подсистемой СППР, обладающей новизной, является подсистема принятия решений (ППР) в состав которой входят: модуль оценки уровня защиты (МОУЗ); модуль расчета ЭР БАТ (МРЭРБАТ); модуль принятия решений по характеристикам БАТ (МПРХБАТ); модуль оценки ФС и ФРО (МО ФС и ФРО); модуль реализации частных решающих правил (МРЧРП); модуль продукционных правил принятия решений (МПППР). Управление состоянием здоровья и ФС организма обеспечивается подсистемой формирования рекомендаций по коррекции состояния здоровья и ФС.

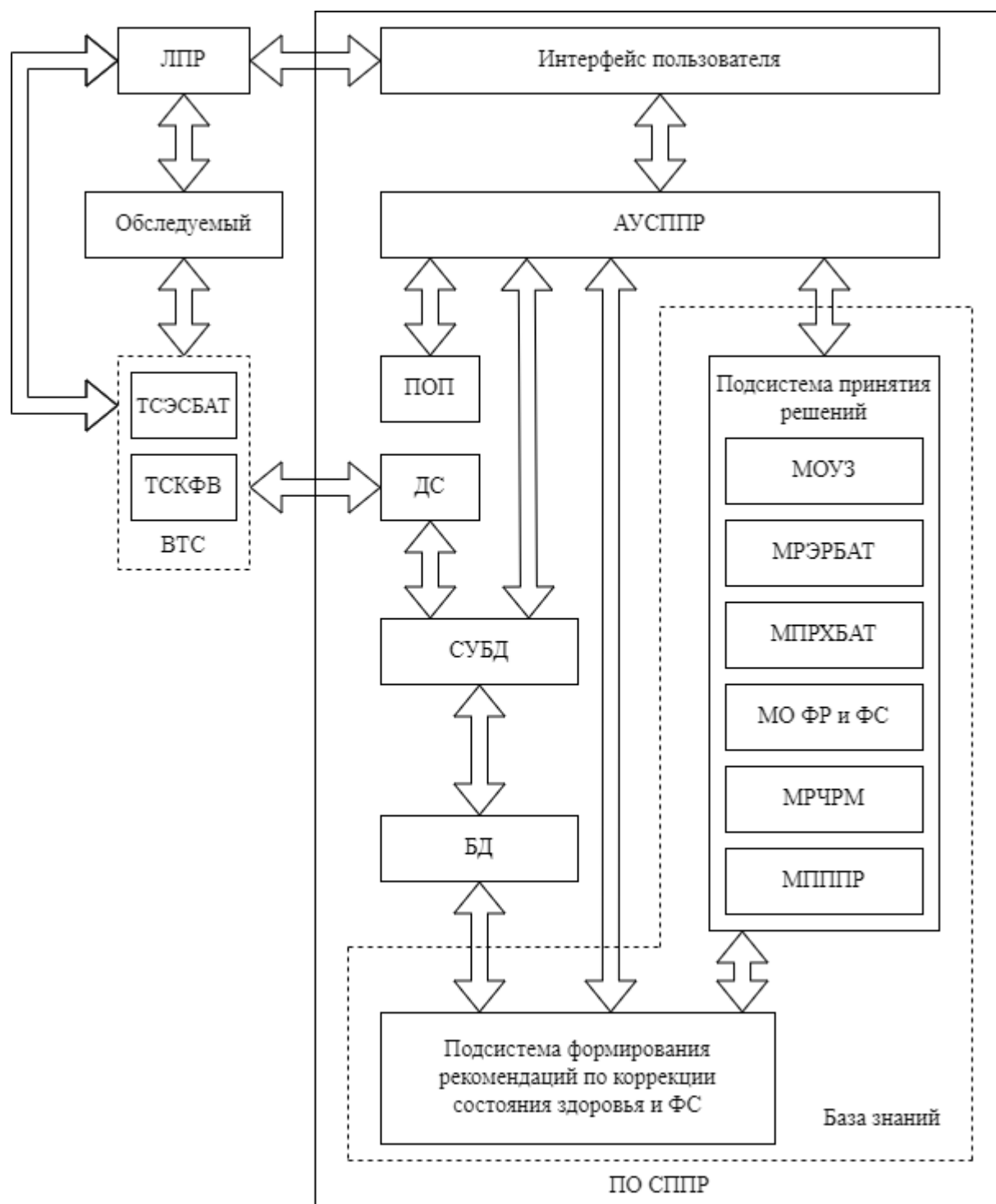


Рисунок 1 – Структурная схема СПДР

Для контроля качества «работы» математических моделей прогнозирования и ранней диагностики периферической (СУСР) и центральной (функция внимания) НС был проведен эксперимент с начала 2019 года. Обследовались работники электростанций различных типов (тепловые и атомные).

Для проверки прогностических решающих правил было отобрано 250 человек, имеющих высокие риски заболеваний периферической (СУСР) и центральной (функция внимания) НС, а также людей с начальными стадиями исследуемого класса заболеваний НС. Кроме того, в этот состав были

включены здоровые люди как альтернативный класс. Перед началом проверки качества работы решающих правил у обследуемых была произведена оценка состояния НС с использованием простых тестов, традиционно используемых в неврологии для оценки состояния периферической и центральной НС.

В 2019 году было произведено измерение признаков, входящих в прогностические модели для СУСР и ЦНС. Далее в течение трех лет фиксировалось число правильных и ошибочных решений исследуемыми моделями, по которым рассчитывались такие показатели качества как диагностические чувствительность (ДЧ), специфичность (ДС) и эффективность (ДЭ), а также прогностическая значимость положительных (ПЗ⁺) и отрицательных (ПЗ⁻) результатов. Соответствующие показатели качества приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Расчетные показатели качества прогностических моделей для СУСР и ЦНС

Наблюдение (годы)	2020		2021		2022	
	СУСР	ЦНС	СУСР	ЦНС	СУСР	ЦНС
ПК						
ДЧ	0,86	0,89	0,92	0,94	0,93	0,95
ДС	0,88	0,88	0,91	0,93	0,93	0,94
ДЭ	0,87	0,88	0,91	0,93	0,93	0,94
ПЗ ⁺	0,87	0,88	0,91	0,93	0,93	0,94
ПЗ ⁻	0,86	0,89	0,92	0,94	0,93	0,95

Анализ показателей качества, приведенных в таблице 1, позволяет сделать вывод о том, что после первого года наблюдения уверенность в правильном прогнозе превышает величину 0,9. Для прогностических задач это является хорошим результатом.

Для статистической проверки работы моделей ранней диагностики ежегодно с 2020 по 2022 год включительно отбирались по 100 человек, не заболевших по исследуемым классам заболеваний НС и по 100 человек с подтвержденной ранней стадией этих заболеваний. Усредненные значения величин ДЧ, ДС и ДЭ для моделей ранней диагностики для СУСР и ЦНС представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Расчетные показатели качества моделей ранней диагностики (модель (17))

ПК	ДЧ	ДС	ДЭ
Модели			
СУСР	0,97	0,96	0,96
ЦНС	0,98	0,97	0,97

Анализ полученных результатов показал, что статистические испытания дают результаты, аналогичные результатам математического моделирования и экспертного оценивания, что позволяет рекомендовать полученные результаты для их практического применения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен анализ структуры данных и исследуемых классов состояний нервной системы человека, находящегося под воздействием разнородных факторов риска, в ходе которого было обосновано применение методологии синтеза гибридных нечетких решающих правил для решения поставленных в работе цели и задач.

2. Разработан метод синтеза решающих правил оценки защитных свойств организма на общесистемном уровне, который позволил синтезировать гетерогенные нечеткие модели количественной оценки уровня защиты целого организма, обеспечивающие улучшение качества оценки состояния здоровья людей, подвергающихся воздействию экзогенных и эндогенных факторов риска.

3. Разработан метод синтеза гибридных нечетких решающих правил прогнозирования и ранней диагностики заболеваний нервной системы, учитывающий показатели, характеризующие работу защитных механизмов организма, а так же характеристики индивидуальных, вредных производственных, и других факторов риска, что позволило синтезировать модели модулей принятия решений, обеспечивающие повышение качества прогнозирования и ранней диагностики нервных болезней в условиях нечеткого и неполного описания исходных данных.

4. Синтезированы математические модели оценки уровня защиты системы управления сердечным ритмом и когнитивной функции внимания, включающие в себя показатели, характеризующие различные свойства исследуемых элементов нервной системы, которые обеспечили уровень доверия к принимаемым решениям не хуже 0,9; а диагностическую чувствительность и специфичность более 0,95.

5. Синтезированы гибридные нечеткие модели прогнозирования и ранней диагностики патологии системы управления сердечным ритмом и когнитивной функции внимания, обеспечивающие уверенность в принимаемых решениях не ниже 0,9; что делает оправданным применение полученных результатов в практической медицине.

6. Разработана система поддержки принятия решений с оригинальным алгоритмом управления, который позволяет управлять логикой ведения пациентов в зависимости от их индивидуальных особенностей, включая уровень защиты организма в целом, систем и органов мишеней, с учетом комбинированного действия факторов риска, что улучшило качество оказания медицинской помощи пациентам, имеющим высокий риск или ранние стадии патологии нервной системы.

7. Проведена экспериментальная проверка результатов исследования на репрезентативных контрольных выборках, которая показала, что для

задач оценки уровня защиты системы управления сердечным ритмом и когнитивной функции внимания диагностическая чувствительность и специфичность превышает величину 0,95; для задач прогнозирования возникновения и развития этих патологий показатели прогностической значимости - не ниже 0,9; а для задач ранней диагностики исследуемого типа патологии - показатели диагностической чувствительности, специфичности и эффективности превышают величину 0,95, что соответствует требованиям современной медицинской практики, предъявляемым к аналогичным классам задач.

Рекомендации. Результаты диссертационного исследования рекомендуется использовать в медицинских информационных системах для интеллектуальной поддержки принятия врачебных решений при оказании медицинской помощи пациентам с заболеваниями нервной системы.

Перспективы дальнейшей разработки темы. Использование нечетких гибридных моделей, учитывающих защитные механизмы организма человека с одновременным учетом разнородных экзогенных и эндогенных факторов риска, для ведения пациентов с другими классами заболеваний.

СПИСОК НАУЧНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России

1. Корневский, Н.А. Количественная оценка защитных механизмов организма по его оксидантному статусу / Н.А. Корневский, С.Н. Родионова, **Е.В. Крикунова**, Л.В. Стародубцева, М.В. Скиданчук // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. – 2021. – Т. 11, №4. – С. 146-162.

2. Сафронов Р.И. Использование показателей, характеризующих адаптационные механизмы, для оценки уровня защиты организма от воздействия внешних факторов риска / Р.И. Сафронов, С.Н. Родионова, **Е.В. Крикунова**, Л.В. Стародубцева, С.С. Сергеева, А.В. Титова // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. – 2021. – Т. 11, №4. – С. 163-179.

3. Корневский, Н.А. Методы количественной оценки защитных механизмов организма на различных его уровнях на основе гибридных нечетких моделей и их использование в задачах прогнозирования и медицинской диагностики / Н.А. Корневский, С.Н. Родионова, **Е.В. Крикунова**, Р.И. Сафронов, В.А. Белозеров // Медицинская техника. – 2022. – № 3 (333). – С. 24-27.

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

4. Korenevskiy, N.A. An Expert System for Predicting and Diagnosing Occupational Diseases of Electric Power Industry Workers / N.A. Korenevskiy, L.V. Shulga, **E.V. Krikunova**, R.I. Safronov, G.V. Siplivy // Biomedical Engineering. - 2022. - Vol. 55, No. 6. - Pp. 437-441. - DOI 10.1007/s10527-022-10154-x.

5. Filist, S.A. An Expert System for Monitoring the Status of Patients after Exposure to Industrial Poisonous Chemicals / S.A. Filist, L.V. Shul'ga, **E.V. Krikunova**, N.A. Milostnaya, R.I. Safronov, G.V. Siplivyi // Biomedical Engineering. - 2021. - Vol. 55, No. 4. - Pp. 269-272. - DOI 10.1007/s10527-021-10116-9.

Монографии

6. Сафронов Р.И. Перспективы применения мягких вычислений и информационных технологий в профпатологии: монография / Р.И. Сафронов, Л.В. Стародубцева, **Е.В. Крикунова**. – Курск: Изд-во Курск. гос. с-х. ак., 2018. – 232 с.

Статьи и материалы конференций

7. Корсунский, Н.А. Программно-аппаратный комплекс для формирования дескрипторов в системе поддержки принятия решений по диагностике медицинских рисков / Н.А. Корсунский, А.В. Мирошников, О.В. Шаталова, З.У. Протасова, А.В. Серебровский, **Е.В. Крикунова**, Р.И. Сафронов // Лазеры. Измерения. Информация. - 2021. - Т.1, №1(1). - С. 43-54. – URL: <https://lasers-measurement-information.ru/ojs/index.php/laser/article/view/1/13>.

8. **Крикунова, Е.В.** Использование показателей оксидантного статуса для оценки защитных механизмов организма в условиях повышенных экологических нагрузок / Е.В. Крикунова, А.И. Сурнина, М.В. Скиданчук // Биотехнические, медицинские и экологические системы, измерительные устройства и робототехнические комплексы (Биомедсистемы-2021): сборник трудов XXXIV Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов (08-10 декабря 2021 г.). – Рязань: ИП Коняхин А.В. (Book Jet), 2021. - С. 80-83..

9. **Крикунова, Е.В.** Модели самоорганизующихся систем для анализа адаптационных возможностей организма / Е.В. Крикунова, Р.И. Сафронов, А.В. Серебровский, С.А. Филист // Медико-экологические информационные технологии - 2021: сборник научных статей по материалам XXIV Международной научно-технической конференции (20 мая 2021 г.). – Курск: ЮЗГУ, 2021. - С. 119-126.

10. Корневский, Н.А. Метод оценки влияния производственных факторов риска на состояние здоровья по оксидантному статусу организма / Н.А. Корневский, Р.И. Сафронов, **Е.В. Крикунова**, В.В. Аксенов, // Медицинские технологии и приборы: материалы 9-го Международного сборника научных статей. – Тула, 2021. - С. 76-77.

11. **Крикунова, Е.В.** Нечеткие решающие правила в моделях искусственного интеллекта для прогнозирования риска заболеваний нервной

системы / Е.В. Крикунова // Лазерно-информационные технологии: труды XXX Международной научной конференции (12-17 сентября 2022 г.). – Новороссийск: НФ ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», 2022. - С. 133-135.

12. **Крикунова, Е.В.** Математические модели количественной оценки уровня защиты организма от внешних факторов / Е.В. Крикунова, С. Кадырова, В.В. Песок, Р.И. Сафронов // Искусственный интеллект в решении актуальных социальных и экономических проблем XXI века: сборник статей по материалам Восьмой Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (25-26 октября 2022 г.). – Пермь, 2022. – С. 68-74.

13. **Крикунова, Е.В.** Математические модели оценки уровня защиты центральной нервной системы / Е.В. Крикунова, Р.И. Сафронов, С. Кадырова // Актуальные проблемы медицинской науки и образования (АПМНО-2022): сб. статей по материалам VIII Междунар. науч. конф. (22-23 сентября 2022 г.). – Пенза : ПГУ, 2022. - С. 131-135.

14. **Крикунова, Е.В.** Метод синтеза гибридных нечетких решающих правил прогнозирования и ранней диагностики с учетом защитных свойств организма / Е.В. Крикунова, Р.И. Сафронов // Медико-экологические информационные технологии - 2022: сборник научных статей по материалам XXV Международной научно-технической конференции (16-17 мая 2022 г.). – Курск: ЮЗГУ, 2022. - С. 109-113.

15. Сафронов, Р.И. Оценка влияния условий труда на состояние здоровья человека по его адаптационным резервам и функциональному состоянию / Р.И. Сафронов, **Е.В. Крикунова** // Биотехнология и биомедицинская инженерия: сборник научных трудов по материалам XII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 87-летию Курского государственного медицинского университета (27 октября 2022 г.). – Курск: Изд-во КГМУ, 2022. - С. 123-127.