
МОДЕЛИРОВАНИЕ В МЕДИЦИНСКИХ И ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

MODELING IN MEDICAL AND TECHNICAL SYSTEMS

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-4-175-192>



УДК 004.891

Метод оценки уровня неспецифической защиты организма человека по показателям, характеризующим процессы адаптации

С. Н. Родионова¹ ✉

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: knsofia@mail.ru

Резюме

Целью исследования является разработка метода оценки уровня неспецифической защиты организма человека по показателям, характеризующим процессы адаптации, использование которого в решающих правилах прогнозирования и диагностики заболеваний обеспечивает повышение качества принимаемых решений.

Методы. В многочисленных источниках имеется достаточно подробное описание защитных механизмов организма человека, реализуемых неспецифической и специфической системами защиты, которые тесно связаны с такими понятиями, как: адаптационный потенциал, адаптационный резерв, функциональное состояние и функциональный резерв.

В работе исследуются вопросы использования показателей, характеризующих адаптационный потенциал и адаптационные резервы для количественной оценки неспецифического уровня защиты организма от воздействия разнородных внешних факторов. В качестве базового математического аппарата используется методология синтеза гибридных нечетких решающих правил.

Результаты. В работе показано, что для количественной оценки уровня защиты организма целесообразно использовать показатель активности регуляторных систем, адаптационный потенциал, показатель, характеризующий иммунно-эндокринную составляющую адаптации, и показатель, характеризующий нервно-психическую составляющую адаптации. Для этой системы показателей разработан метод оценки уровня защиты по базовым показателям, характеризующим процессы адаптации на общесистемном уровне, отличающийся учетом составляющих, характеризующих различные механизмы формирования адаптационного потенциала и адаптационного резерва, учитывающий специфику структуры данных и способы их обработки для наилучших результатов по качеству и времени принимаемых решений. Получены нечеткие функции уровня защиты по выбранной системе показателей с интегральной оценкой уровня защиты организма.

© Родионова С. Н., 2023

Заключение. В работе показано, что для улучшения показателей качества прогнозирования и диагностики социально значимых и профессиональных заболеваний целесообразно использовать показатели уровня защиты организма, определяемые по адаптационным механизмам. Установлено, что качество принятия решений с использованием предложенных моделей увеличивается на 10–15% в зависимости от типа решаемых задач по сравнению с моделями, не использующими показатели уровня защиты организма.

Ключевые слова: адаптационный потенциал; адаптационный резерв, функции уровня защиты; уровень защиты организма; нечеткие решающие правила.

Финансирование. Работа выполнена в рамках реализации программы развития ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» проекта «Приоритет – 2030».

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Родионова С. Н. Метод оценки уровня неспецифической защиты организма человека по показателям, характеризующим процессы адаптации // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 13, № 4. С. 175–192. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-4-175-192>.

Поступила в редакцию 04.10.2023

Подписана в печать 03.11.2023

Опубликована 22.12.2023

A Method for Assessing the Level of Nonspecific Protection of the Human Body by Indicators Characterizing the Processes of Adaptation

Sofia N. Rodionova¹✉

¹ Southwest State University
50 Let Oktyabrya Str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: knsofia@mail.ru

Abstract

The purpose of the research is to develop a method for assessing the level of nonspecific protection of the human body according to indicators characterizing the adaptation processes, the use of which in the decisive rules of forecasting and diagnosis of diseases ensures an improvement in the quality of decisions made.

Methods. Numerous sources have a fairly detailed description of the protective mechanisms of the human body, implemented by non-specific and specific protection systems, which are closely related to such concepts as: adaptive potential, adaptive reserve, functional state and functional reserve.

The paper investigates the use of indicators characterizing the adaptive potential and adaptive reserves for quantifying the nonspecific level of protection of the body from the effects of heterogeneous external factors. The methodology of synthesis of hybrid fuzzy decision rules is used as a basic mathematical apparatus.

Results. The paper shows that to quantify the level of protection of the body, it is advisable to use an indicator of the activity of regulatory systems, adaptive potential, an indicator characterizing the immune-endocrine component of adaptation and an indicator characterizing the neuropsychic component of adaptation. For this system of indicators, a method has been developed to assess the level of protection based on basic indicators characterizing adaptation processes at the system-wide level, characterized by taking into account components characterizing various mechanisms for the formation of adaptive potential and adaptive reserve, taking into account the specifics of the data structure and

ways of processing them for the best results in terms of quality and time of decisions. Fuzzy functions of the level of protection according to the selected system of indicators with an integral assessment of the level of protection of the body are obtained.

Conclusion. The paper shows that in order to improve the quality of forecasting and diagnosis of socially significant and occupational diseases, it is advisable to use indicators of the level of protection of the body determined by adaptive mechanisms. It is established that the quality of decision-making using the proposed models increases by 10-15%, depending on the type of tasks being solved, compared with models that do not use indicators of the level of protection of the body.

Keywords: adaptive potential, adaptive reserve, functions of the level of protection; the level of protection of the body; fuzzy decision rules.

Funding: The work was carried out as part of the implementation of the Southwest State University development program of the Priority 2030 project.

Conflict of interest: The Authors declares the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Rodionova S. N. A Method for Assessing the Level of Nonspecific Protection of the Human Body by Indicators Characterizing the Processes of Adaptation. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2023; 13(4): 175–192. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-4-175-192>.

Received 04.10.2023

Accepted 03.11.2023

Published 22.12.2023

Введение

Одним из фундаментальных свойств живого организма является его способность в ответ на многообразные воздействия окружающей среды включать сложнейшие механизмы адаптации, способные в определенных пределах обеспечивать нормальное функционирование живой системы, защищая человеческий организм от перехода из состояния здоровья в состояние болезни.

В многочисленных источниках имеется достаточно подробное описание защитных механизмов организма человека, реализуемых неспецифической (сопротивляемость организма) и специфической (иммунная система) системами защиты [1; 2; 3]. В терминах современной адаптологии защитные функции организма тесно связаны с такими

понятиями, как адаптационный потенциал и адаптационный резерв, которые, в свою очередь, связаны с понятием здоровья.

В работах по адаптологии приводятся различные определения адаптационного потенциала (АП) и адаптационного резерва (АР) во взаимосвязи с состоянием здоровья и функциональным состоянием. В контексте рассматриваемой работы под адаптационным потенциалом будем понимать показатель уровня приспособляемости организма человека к различным и меняющимся факторам внешней среды, а адаптационный резерв будем рассматривать как возможность организма противостоять воздействию различного вида нагрузок, адаптироваться к этим нагрузкам, минимизируя их воздействие и обеспечивая

должный уровень эффективности деятельности человека. В связи с этим оба эти понятия целесообразно использовать при решении задач оценки уровня защиты организма и тесно связанных с ними задач оценки состояния здоровья¹. Рассматривая вопросы количественной оценки УЗО, следует учитывать, что АП определяет уровень приспособляемости организма человека к факторам внешней среды, а УЗО – способность организма сопротивляться появлению и развитию заболеваний на различных уровнях организма. В этом заключается фундаментальное различие этих понятий.

В работах [4; 5; 6; 7; 8] было показано, что адаптационный потенциал и адаптационный резерв представляют собой классические нечеткие понятия, которые целесообразно описывать в рамках теории нечеткой логики принятия решений². С учетом этого для количественной оценки уровня защиты организма введем характеристическую функцию уровня защиты (ФУЗ) с областью значений на интервале $[0, \dots, 1]$. Нулевому значению ФУЗ соответствует слой функций защиты организма, способный привести к его гибели. Единичному значению ФУЗ соответствует такое состояние функции защиты, которое

позволяет сохранить здоровье и работоспособность организма с требуемым качеством. В качестве такой функции может быть выбрана функция принадлежности, например, к понятию «отличный уровень защиты».

В работах [7; 8] были получены модели оценки уровня защиты организма по таким показателям, как адаптационный потенциал сердечно-сосудистой системы, энергетический разбаланс общесистемных биологически активных точек, показатель адаптационного соответствия и иммунологические лабораторные показатели. В этих же работах было показано, что для решения задач прогнозирования, ранней и дифференциальной диагностики различных классов заболеваний, использующих в качестве одного из ведущих информативных показателей УЗО, целесообразно использовать методы нечеткой логики принятия решений, в частности, методологию синтеза гибридных нечетких решающих правил (МСГНРП), разработанную в Юго-Западном государственном университете [4; 9; 10; 11; 12; 13; 14; 15; 16; 17; 18].

Отличительной чертой МСГНРП является объединение интеллекта врачей (клиническое мышление), профессиональных знаний инженера-когнитолога с методами искусственного интеллекта.

¹ Крикунова Е. В. Методы и средства прогнозирования и ранней диагностики заболеваний нервной системы с учетом защитных механизмов организма: дис. ... канд. техн. наук. Курск, 2023. 152 с.

² Методы и средства прогнозирования и ранней диагностики заболеваний нервной системы с учетом защитных механизмов организма: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Курск, 2023. С. 20.

Естественный интеллект врачей восполняет дефицит статистических данных, позволяя строить адекватные модели для плохоформализуемых задач. Инженер-когнитолог, взаимодействуя с профессионалами предметной области и используя данные разведочного анализа, выбирает модели, адекватные структуре данных решаемых задач.

Основными элементами правил принятия решений в МСГНРП, так же как и в классической парадигме мягких вычислений, являются функции принадлежности $\mu_{\omega_\ell}(x_i)$ к гипотезам (классам) ω_ℓ с базовыми переменными определяемыми существом решаемой задачи (информативные признаки, комплексные и интегральные показатели, вычисляемые различными способами, включая правила нечеткого вывода, коэффициенты уверенности KU_{ω_ℓ} по событиям ω_ℓ и т. д.). Применительно к задачам оценки УЗО к типовым элементам решающих правил добавляются ФУЗО со свойствами функций принадлежности.

С учетом нечеткой природы показателя уровня защиты было принято решение для уточнения информативной ценности моделей, полученных в работах [7; 8], использовать гибридный метод оценки информативности разработанный специально для применения при нечетком описании исследуемых переменных описанный в работе [19]. В результате этих исследований было показано,

что информативность моделей, полученных в работах [7; 8], составляет 0,49. Этот результат делает актуальной проблему разработки метода оценки УЗО по показателям, характеризующим механизмы адаптации с получением более высоких показателей информативности с последующим «встраиванием» этих показателей в соответствующие прогностические и диагностические решающие правила.

Материалы и методы

По современным представлениям процессы адаптации рассматриваются с позиций взаимодействия регулирующих и регулируемых систем. В состав регулирующих систем входят центральная (ЦНС) и вегетативная (ВНС) нервные системы, а также эндокринная и иммунная системы. К регулируемым системам относят органы и ткани. Согласование между регулируемыми и регулирующими системами осуществляет сердечно-сосудистая система (ССС) [20; 21]. Исходя из этих представлений и с учетом рекомендаций [3; 20; 21; 22; 23; 24; 25] для решения задачи оценки уровня защиты будем использовать показатели, получившие наибольшее применение в рамках современной адаптологии: показатель активности регуляторных систем по Р. М. Баевскому (ПАРС); показатели, характеризующие адаптационный потенциал системы кровообращения (ИФИ, АП, ПАС); показатель, характеризующий иммунно-

эндокринную составляющую адаптации по Л. Х. Гаркави (ИЭСА); показатель, характеризующий нервно-психическую составляющую адаптации (НПСА) по шкале И. Н. Гурвича. Такой подбор показателей позволяет производить оценку адаптационного потенциала (АР) на различных уровнях функционирования организма без учета природы внешних воздействий, что позволяет отнести их к классу неспецифических показателей по отношению к природе внешних воздействий, а следовательно, получаемые на их основе оценки УЗО без определенных типов преобразований также будут неспецифическими.

При разработке метода синтеза моделей оценки УЗО мы исходили из того, что описывающие эту характеристику организма показатели являются измеряемыми (с помощью специальной аппаратуры) признаками, а рассчитываемый уровень УЗО организма в целом (целевая функция) относится к классу нечетких, не строго и разноречиво определяемых в современной медицине понятий. Такая взаимосвязь между набором признаков и целевой функцией характерна для теории измерения латентных переменных. В таких условиях с учетом общих рекомендаций МСГНРП для оценки роли этих признаков в формировании понятия УЗО с последующей количественной его оценкой производится исследование «вклада» каждого из них в искомую латентную переменную с

использованием интерактивного пакета RUMM2020 [26; 27; 28; 29; 30; 31].

В ходе предварительного разведочного анализа при использовании интерактивного пакета RUMM 2020 для оценки связи индикаторных переменных ИФИ, ПАС ПАРС АП, ИЭСА и НПСА с латентной переменной «уровень защиты организма» экспертная группа из 8 человек определила список информативных признаков в составе ПАРС АП, ИЭСА и НПСА.

В соответствии с принятой методологией, при отсутствии возможности набора обучающей выборки для получения соответствующих функций защиты используется экспертный метод Дельфы, в ходе реализации которого эксперты отвечают на вопросы: при каких значениях параметра можно с достаточной степенью уверенности считать, что при заданных условиях жизнедеятельности вероятность появления и развития исследуемых классов заболеваний практически отсутствует; насколько уверенно можно делать вывод об отсутствии риска появления и развития искомых заболеваний; как в числовом виде соотносятся значения этой уверенности с мнением эксперта об уровне защиты организма, его органов и систем; при каких значениях параметра можно с достаточной степенью уверенности считать, что при заданных условиях жизнедеятельности вероятность появления и развития исследуемых классов заболеваний критически высока (по мнению эксперта

болезнь либо существует, либо почти неизбежно наступит в ближайшее время); насколько уверенно можно делать вывод о критической ситуации относительно рассматриваемых состояний организма (появление и развитие искомым заболеваний); как в числовом виде соотносятся значения этой уверенности с мнением эксперта об уровне защиты организма, его органов и систем; какова зависимость между значением исследуемого параметра и уровнем защиты.

Ответы на эти вопросы, по сути, задают координаты точек «перегиба» графиков функций уровня защиты в качестве аргумента (базовой переменной), для которого являются исследуемые показатели (ПАРС, АП и др.). Анализ известной литературы и собственные исследования показывают, что при выборе амплитудных характеристик следует учитывать, относительно каких структур организма производится оценка уровня защиты. Например, для показателя АП, являющегося аналогом ИФИ, в работе Р. М. Баевского показано, что он разработан для оценки характеристик всего организма, и приводятся данные о том, что он обладает наибольшей чувствительностью к наличию ранней стадии патологии сердечно-сосудистой системы, меньшее качество классификации обеспечивается для системы дыхания, значительно меньшее – для системы пищеварения [20]. Это позволяет сделать вывод о том, что, оценивая уровень защиты по АП этих систем, следует

пропорционально уменьшать соответствующие оценки их защитных свойств по данному показателю.

Таким образом, в ходе выполнения этого этапа исследований эксперты получают набор функций уровня защиты $f_{Z_{\ell}}(AP_i)$ по показателю AP_i (i = ПАРС, АП, НПСА, ИЭСА) для выбранного уровня исследований, систем, подсистем и органов ℓ (ℓ = оо – организм в целом, сс – сердечно-сосудистая система, кс – кардиореспираторная система, с – сердце, л – легкое, ...).

Как следует из определения адапционного резерва (AR), он характеризует реакцию адапционных механизмов на определенную нагрузку, которая может выбираться с учетом рекомендаций резервометрии, используемой при оценке функциональных резервов [32; 33].

После выбора типа нагрузки по общепринятым в адаптологии рекомендациям для количественной оценки AR для выбранного показателя AP в рамках рекомендаций МСГНРП предлагается использовать два показателя: AN – отношение величины AP до воздействия нагрузкой $AP(0)$ и после воздействия $AP(N)$ и скорость AV восстановления AP за время наблюдения T_{HB} – $AV = [AP(0) - AP(N)]/T_{HB}$. В условиях нечеткой парадигмы определяются две частные функции уровня адапционного резерва: $f_{AR}(AN)$ и $f_{AR}(AV)$ с базовыми переменными AN и AV .

Адаптационный резерв для анализируемого показателя АР (ПАРС, АП и др.) определяется агрегацией частных функций уровня адаптационного резерва в соответствии с общими рекомендациями МСГНРП. Например, если показатели AN и AV , дополняя, «усиливают» друг друга, то адаптационный резерв показателя AP_i (i = ПАРС, АП, НПСА, ИЭСА) определяется выражением

$$AR_i = f_{AR_i}(AN_i) + f_{AR_i}(AV_i) - f_{AR_i}(AN_i) \cdot f_{AR_i}(AV_i). \quad (1)$$

В общем случае выражение (1) имеет вид

$$AR_{il} = AG_{il} [f_{AR_{il}}(AN_i), f_{AR_{il}}(AV_i)], \quad (2)$$

где AG_{il} – функция агрегации.

Используя показатели (2) как базовые переменные, определяют соответствующие наборы функций уровня защиты $f_{Z_{il}}(AP_i)$.

Интегральная оценка уровня защиты организма, его систем и органов определяется агрегацией соответствующих пар частных уровней защиты:

$$UZ_{il} = AG_{UZ} [f_{Z_{il}}(AP_i), f_{Z_{il}}(AR_i)]. \quad (3)$$

Без потери общности и качества вместо функций уровня защиты могут быть использованы функции принадлежности к лингвистическим переменным «максимально возможный уровень защиты». В зависимости от типа решаемых задач возможно

использование функций принадлежности к лингвистическим переменным «критически низкий уровень защиты». Различные типы функций принадлежности различным образом встраиваются в прогностические и диагностические решающие правила.

Если имеется возможность формирования обучающих выборок по классам уровней защиты (например, от крайне низкого уровня до отличного), определяемым по некоторым внешним критериям, например с использованием высокотехнологичного медицинского оборудования, то рекомендуется на шкалах AP_i и AR_i построить соответствующие признаковые гистограммы выделенных классов УЗО, по которым с использованием общих рекомендаций МСГНРП синтезировать соответствующие функции уровня защиты или функции принадлежности.

Алгоритм построения искомых функций по признаковым гистограммам достаточно подробно описан в работах [4; 8].

Результаты и их обсуждение

Используя описанный выше метод для неспецифической оценки уровня защиты, экспертная группа из восьми человек после трех итераций по методу Дельфы получила согласованные усредненные данные для построения функций уровня защиты на общесистемном уровне по показателям AP_i , приведенным ниже (табл. 1).

Таблица 1. Таблица опроса экспертов для построения функций уровня защиты**Table 1.** Expert survey table for building security level functions

Показатель	X1	Z1	X2	Z2	X3
ПАРС	2	0,6	9	0,2	кв
АП	7,2	0,5	9,8	0,2	кл
НПСА	12	0,5	24	0,3	кл
ИЭСА	28-34	0,4	<15 >45	0,2	кл

Примечание. Введены следующие обозначения: X1 – значения параметра можно с достаточной степенью уверенности считать, что при заданных условиях жизнедеятельности вероятность появления и развития исследуемых классов заболеваний практически отсутствует; Z1 – уровень защиты, соответствующий значению параметра X1; X2 – значения параметра, при котором можно с достаточной степенью уверенности считать, что при заданных условиях жизнедеятельности вероятность появления и развития исследуемых классов заболеваний критически высока (по мнению эксперта, болезнь либо существует, либо почти неизбежно наступит в ближайшее время); Z2 – уровень защиты, соответствующий значению параметра X2; X3 – характер зависимости (кл – кусочно-линейный; кв – квадратичный; лг – логарифмический; эп – экспоненциальный;...).

По данным таблицы 1 был получен следующий набор функций уровня защиты:

$$f_{Z_{\text{Парс}}}(\text{ПАРС}) = \begin{cases} 0,6, & \text{если ПАРС} < 2, \\ 0,6 - 0,016(2 - \text{ПАРС})^2, & \text{если } 2 \leq \text{ПАРС} < 5,5, \\ 0,2 + 0,016(9 - \text{ПАРС})^2, & \text{если } 5,5 \leq \text{ПАРС} < 9, \\ 0,2, & \text{если ПАРС} \geq 9, \end{cases}$$

$$f_{Z_{\text{Ап}}}(\text{АП}) = \begin{cases} 0,5, & \text{если АП} < 7,2, \\ -0,115 \text{ АП} + 1,327, & \text{если } 7,2 \leq \text{АП} < 9,8, \\ 0,2, & \text{если АП} \geq 9,8, \end{cases}$$

$$f_{Z_{\text{Нпса}}}(\text{НПСА}) = \begin{cases} 0,5, & \text{если НПСА} < 12, \\ -0,017 \text{ НПСА} + 0,708, & \text{если } 12 \leq \text{НПСА} < 24, \\ 0,3, & \text{если НПСА} \geq 24, \end{cases}$$

$$f_{Z_{\text{Иэса}}}(\text{ИЭСА}) = \begin{cases} 0,2, & \text{если ИЭСА} < 15, \\ 0,015 \text{ ИЭСА} - 0,03, & \text{если } 15 \leq \text{ИЭСА} < 28, \\ 0,4, & \text{если } 28 \leq \text{ИЭСА} < 34, \\ -0,018 \text{ ИЭСА} + 1,0,2, & \text{если } 34 \leq \text{ИЭСА} < 45, \\ 0,2, & \text{если ИЭСА} \geq 45. \end{cases}$$

Финальное выражение для оценки функций уровня защиты. При этом выбор типа функций агрегации определяют путем агрегации выбранных функций в соответствии с целями и задачами

использования показателя УЗО с учетом рекомендаций МСГНРП.

Если считается, что каждая из выбранных систем защиты вносит свой вклад в общий интегральный показатель таким образом, что увеличение защитных функций каждой системы увеличивает общий уровень защиты организма, то УЗО на общесистемном уровне UZI определяется с использованием модифицированной формулы Е. Шортлифа вида

$$UZI(q+1) = UZI(q) + Q(q+1)[1 - UZI(q)], \quad (4)$$

где $UZI(1) = UZ_{ПАРС} = Q(1)$; $Q(2) = UZ_{АП}$; $Q(3) = UZ_{НПСА}$; $Q(4) = UZ_{ИЭСА}$.

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

$$UZI = \min(UZ_{ПАРС}, UZ_{АП}, UZ_{НПСА}, UZ_{ИЭСА}). \quad (5)$$

В последнем выражении не используемый в расчетах показатель заменяется единицей.

После синтеза решающих правил оценки уровня защиты на общесистемном, системном и органном уровнях в соответствии с общими рекомендациями МСГНРП устанавливается и обосновывается вид функций принадлежности к лингвистическим переменным, которые определяют частные уверенности в появлении и развитии патологии по задаче p ($p = \text{прогноз, ранняя стадия заболевания, степень тяжести патологии и др.}$).

Для повышения точности принимаемых решений для органов мишеней ω_ℓ определяются сопутствующие факторы риска, связанные с экологией, эргономикой, индивидуальными особенностями организма. Для оценки индивидуального состояния организма рекомендуется использовать: уровни психоэмоционального напряжения и утомления, данные опросов, осмотров, инструментальных и лабораторных исследований, принятых в традиционной медицинской практике.

Например, в работе [8] для решения задач прогнозирования, ранней и, возможно, дифференциальной диагностики исследуемого класса заболеваний предлагается синтезировать гибридные модели вида

$$F_\ell^P = AG_\ell^P(UZO_\ell^P, UFS_{B\ell}^P, UFR_{B\ell}^P, UFS_{D\ell}^P, UFR_{D\ell}^P, UFB_\ell^P, UER_\ell^P, UEK_\ell^P, UD_\ell^P), \quad (6)$$

где AG_ℓ^P – агрегатор составляющих финального решающего правила; UZO_ℓ^P – уверенность в ω_ℓ по задаче p от УЗО на общесистемном уровне; $UFS_{B\ell}^P, UFR_{B\ell}^P$ – уверенность в ω_ℓ по энергетическому разбалансу биологически активных точек (БАТ), связанных с уровнями функционального состояния (ФС) и функционального резерва (ФР); $UFS_{D\ell}^P, UFR_{D\ell}^P$ – уверенность в ω_ℓ , рассчитываемая по ФС и ФР, определяемая традиционными методами исследования; UFB_ℓ^P – уверенность в ω_ℓ , определяемая по электрическим характеристикам БАТ, связанных с

патологией ω_ℓ ; 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.

В работе [7] приводятся другие варианты «встраивания» показателей УЗО в прогностические и диагностические модели.

Выводы

В работе предложен метод оценки уровня защиты по базовым показателям, характеризующим процессы адаптации, учитывающий специфику структуры данных и способы их обработки с целью достижения наилучших результатов по качеству и времени принимаемых решений. Используя предложенный метод, получены нечеткие функции уровня защиты по таким показателям, как показатель активности регуляторных систем по Р. М. Баевскому, показатель адапционного потенциала системы

кровообращения, показатель характеризующий иммунно-эндокринную составляющую адаптации по Л. Х. Гаркави, показатель, характеризующий нервно-психическую составляющую адаптации по шкале И. Н. Гурвича, по которым определяется интегральная оценка уровня защиты организма.

Для этих показателей получены функции уровня защиты и обобщенный показатель уровня защиты организма в виде нечеткого решающего правила. Показан механизм встраивания этого показателя в прогностические и диагностические решающие правила. В результате экспертного оценивания и математического моделирования было показано, что качество принятия решений с использованием предложенных моделей увеличивается на 10 – 15% в зависимости от типа решаемых задач по сравнению с моделями, не использующими показатели уровня защиты организма, что позволяет рекомендовать полученные результаты к практическому использованию в системе здравоохранения.

Список литературы

1. Орлов Р. С., Ноздрачев А. Д. Нормальная физиология. 2-е изд. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2010. 832 с.
2. Адо А. Д. Общее учение о болезни. Патологическая физиология / под ред. А. Д. Адо, В. И. Пыцкого, Г. В. Порядина, Ю. А. Владимирова. М.: Триада – X, 2000. С. 8–16.
3. Кузьмина В. Е., Беляков В. И. Основы адаптологии. 2-е изд. Самара: Самарский университет, 2013. 236 с.
4. Оценка и управление состояния здоровья обучающихся на основе гибридных интеллектуальных технологий: монография / Н. А. Корневский, А. Н. Шуткин,

С. А. Горбатенко, В. И. Серебровский. Старый Оскол: Тонкие наукоемкие технологии, 2016. 472 с.

5. Использование информационных технологий для прогнозирования и диагностики инфекционных заболеваний (на примере генитального герпеса): монография / М. И. Лукашов, Н. А. Корневский, В. И. Серебровский [и др.]. Курск: Курская государственная сельскохозяйственная академия имени И. И. Иванова, 2011. 123 с.

6. Оценка защитных механизмов организма и их роль в задачах прогнозирования и медицинской диагностики / С. В. Харьков, С. Д. Долженков, С. Н. Корневская, А. Г. Коцарь // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2012. Т. 11, № 1. С. 44–49.

7. 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.

8. 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. Т. 3, № 333. С. 24–27.

9. Корневский Н. А. Использование нечеткой логики принятия решений для медицинских экспертных систем // Медицинская техника. 2015. Т. 1, № 289. С. 33–35.

10. Корневский Н. А. Проектирование нечетких решающих сетей, настраиваемых по структуре данных для задач медицинской диагностики // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2005. Т. 4, № 1. С. 12–20.

11. Корневский Н. А. Метод синтеза гетерогенных нечетких правил для анализа и управления состоянием биотехнических систем // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2013. № 2. С. 99–103.

12. Синтез нечетких решающих правил для прогнозирования и ранней диагностики заболеваний, вызываемых состоянием окружающей среды, с учетом индивидуальных особенностей организма / Н. А. Корневский, Ю. А. Иванков, Е. А. Яковлева, Н. Н. Савченко // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2007. Т. 6, № 2. С. 395–400.

13. Серебровский В. В., Корневский Н. А. Метод оценки функционального резерва человека-оператора на основе комбинированных правил нечеткого вывода // Биотехносфера. 2012. Т. 1, № 19. С. 44–49.

14. Корневский Н. А., Башир А. С., Горбатенко С. А. Синтез гибридных нечетких правил для прогнозирования, оценки и управления состоянием здоровья в экологически неблагоприятных регионах // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2013. № 4. С. 69–73.
15. Корневский Н. А., Быков А. В., Устинов У. Г. Нечеткий алгоритм прогноза развития ишемической болезни конечностей для различных этапов ведения пациентов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2016. Т. 2, № 19. С. 142–155.
16. Корневский Н. А., Коптева Н. А., Крупчатников Р. А. Прогнозирование и ранняя диагностика заболеваний сельскохозяйственных рабочих на основе нечеткой логики принятия решений // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2008. Т. 4, № 7. С. 86–89.
17. Корневский Н. А., Тутов Н. Д., Лазурина Л. П. Проектирование медико-экологических информационных систем. Курск: Курский государственный технический университет, 2001. 193 с.
18. Корневский Н. А., Родионова С. Н., Хрипина И. И. Методология синтеза гибридных нечетких решающих правил для медицинских интеллектуальных систем поддержки принятия решений: монография. Старый Оскол: ТНТ, 2019. 472 с.
19. Метод комплексной оценки уровня информативности классификационных признаков в условиях нечеткой структуры данных / Н. А. Корневский, В. В. Аксенов, С. Н. Родионова, С. Н. Гонтарев, Л. П. Лазурина, Р. И. Сафронов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. № 3. С. 80–96.
20. Баевский Р. М., Берсенева А. П. Оценка адаптационных возможностей организма и риска заболеваний. М.: Медицина, 1997. 128 с.
21. Баевский Р. М., Иванов Г. Г. Вариабельность сердечного ритма: теоретические аспекты и возможности клинического применения. М.: Медицина. 2000. 295 с.
22. Гаркави Л. Х., Уколова М. А., Квакина Е. Б. Закономерность развития качественно отличающихся общих неспецифических адаптационных реакций организма // Научные открытия России. URL: <https://ross-nauka.narod.ru/03/03-158.html> (дата обращения: 10.09.2023).
23. Гаркави Л. Х., Квакина Е. Б., Уколова М. А. Адаптационные реакции и резистентность организма. Ростов н/Д: Ростовский университет, 1990. 224 с.
24. Гурвич И. Н. Социальная психология здоровья. СПб.: Издательство Санкт-Петербургского университета, 1999. 1023 с.

25. Хурса Р. В., Еремина Н. М., Корзун Н. Н. Скрининговые методы оценки адаптации организма в амбулаторной практике. Минск: Белорусский государственный медицинский университет, 2018. 43 с.
26. Оценка и управление состоянием здоровья на основе моделей Г. Раша / Н. А. Корневский, А. Н. Шуткин, Е. А. Бойцова, В. В. Дмитриева // Медицинская техника. 2015. Т. 6, № 294. С. 37–40.
27. Smith E. V., Smith M. S. Introduction to Rasch Measurement Theory, Models and Applications. Marle Grove, Minnesota: JAM Press, 2004. 689 p.
28. Маслак А. А. Измерение латентных переменных в социально-экономических системах: монография. Славянск-на-Кубани: Издательский центр СГПИ, 2006. 333 с.
29. Andrich D. Rasch Models for Development. London: Sage Publications, Inc., 1988. 94 p.
30. Bond T. G., Fox C. M. Applying the Rasch model. Fundamental Measurement in the Human Sciences. Mahwah, New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates, Inc., Publishers, 2001. 255 p.
31. Rasch G. Probabilistic models for some intelligence anent tests (Expanded edition, with foreword and afterword by Benjamin D. Wright). Chicago: University of Chicago Press, 1980. 199 p.
32. Совершенствование оценки функциональных резервов организма – приоритетное направление развития донозологической диагностики преморбидных состояний / А. Н. Курзанов, А. Н. Заболотских, Д. В. Ковалев, Д. А. Бузиашили // Международный журнал экспериментального образования. 2015. № 10-1. С. 67–70.
33. Курзанов А. Н., Заболотских Н. В., Ковалев Д. В. Функциональные резервы организма: монография. М.: Издательский дом Академии естествознания, 2016. 96 с.

References

1. Orlov R. S., Nozdrachev A. D. Normal'naya fiziologiya [Normal physiology]. 2nd ed. Moscow, GEOTAR-Media Publ., 2010. 832 p.
2. Ado A. D. Obshchee uchenie o bolezni. Patologicheskaya fiziologiya [The general doctrine of the disease. Pathological physiology]; ed. by A. D. Ado, V. I. Pytsky, G. V. Ordin, Yu. A. Vladimirova. Moscow, Triad Publ.– X, 2000, pp. 8–16.
3. Kuzmina V. E., Belyakov V. I. Osnovy adaptologii [Fundamentals of adaptology]. 2nd ed. Samara, Samara University Publ., 2013. 236 p.
4. Korenevsky N. A., Shutkin A. N., Gorbatenko S. A., Serebrovsky V. I. Ocenka i upravlenie sostoyaniya zdorov'ya obuchayushchihsya na osnove gibridnyh intellektual'nyh tekhnologij [Assessment and management of the health status of students based on hybrid intelligent technologies]. Stary Oskol, Thin science-intensive technologies Publ., 2016. 472 p.

5. Lukashov M. I., Korenevsky N. A., Serebrovsky V. I. eds. Ispol'zovanie informacionnyh tekhnologij dlya prognozirovaniya i diagnostiki infekcionnyh zabolevanij (na primere genital'nogo gerpesa) [The use of information technologies for the prediction and diagnosis of infectious diseases (using the example of genital herpes)]. Kursk, Kursk State Agricultural Academy named after I. I. Ivanov Publ., 2011. 123 p.

6. Kharkov S. V., Dolzhenkov S. D., Korenevskaya S. N., Kotsar A. G. Ocenka zashchitnyh mekhanizmov organizma i ih rol' v zadachah prognozirovaniya i medicinskoj diagnostiki [Assessment of the protective mechanisms of the body and their role in the tasks of forecasting and medical diagnostics]. *Sistemnyj analiz i upravlenie v biomedicinskih sistemah = System Analysis and Management in Biomedical Systems*, 2012, vol. 11, no. 1, pp. 44–49.

7. Safronov R. I., Rodionova S. N., Krikunova E. V., Starodubtseva L. V., Sergeeva S. S., Titova A. V. Ispol'zovanie pokazatelej, harakterizuyushchih adaptacionnye mekhanizmy, dlya ocenki urovnya zashchity organizma ot vozdejstviya vneshnih faktorov riska [The use of indicators characterizing adaptive mechanisms to assess the level of protection of the body from the effects of external risk factors]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Medicinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2021, vol. 11, no. 4, pp. 163–179.

8. Korenevsky N. A., Rodionova S. N., Krikunova E. V., Safronov R. I., Belozarov V. A. Metody kolichestvennoj ocenki zashchitnyh mekhanizmov organizma na razlichnyh ego urovnjah na osnove gibridnyh nechetkih modelej i ih ispol'zovanie v zadachah prognozirovaniya i medicinskoj diagnostiki [Methods of quantitative assessment of the protective mechanisms of the body at its various levels based on hybrid fuzzy models and their use in forecasting and medical diagnostics]. *Medicinskaya tekhnika = Medical Equipment*, 2022, vol. 3, no. 333, pp. 24–27.

9. Korenevsky N. A. Ispol'zovanie nechetkoj logiki prinyatiya reshenij dlya medicinskih ekspertnyh sistem [Using fuzzy decision logic for medical expert systems]. *Medicinskaya tekhnika = Medical Equipment*, 2015, vol. 1, no. 289, pp. 33–35.

10. Korenevsky N. A. Proektirovanie nechetkih reshayushchih setej, nastraivaemyh po strukture dannyh dlya zadach medicinskoj diagnostiki [Design of fuzzy decision networks, configurable by data structure for medical diagnostics tasks]. *Sistemnyj analiz i upravlenie v biomedicinskih sistemah = System Analysis and Management in Biomedical Systems*, 2005, vol. 4, no. 1, pp. 12–20.

11. Korenevsky N. A. Metod sinteza geterogennyh nechetkih pravil dlya anali-za i upravleniya sostoyaniem biotekhnicheskikh sistem [Method of synthesis of heterogeneous fuzzy rules for the analysis and management of the state of biotechnical systems]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Medicinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University*.

Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering, 2013, no. 2, pp. 99–103.

12. Korenevsky N. A., Ivankov Yu. A., Yakovleva E. A., Savchenko N. N. Sintez nechetkih reshayushchih pravil dlya prognozirovaniya i rannej diagnostiki zabolevanij, vyzyvayemyh sostoyaniem okruzhayushchej sredy, s uchetom individual'nyh osobennostej organizma [Synthesis of fuzzy decision rules for the prediction and early diagnosis of diseases caused by the state of the environment, taking into account the individual characteristics of the body]. *Sistemnyj analiz i upravlenie v biomeditsinskih sistemah = System Analysis and Management in Biomedical Systems*, 2007, vol. 6, no. 2, pp. 395–400.

13. Serebrovsky V. V., Korenevsky N. A. Metod ocenki funkcional'nogo rezerva cheloveka-operatora na osnove kombinirovannyh pravil nechetkogo vyvoda [A method for assessing the functional reserve of a human operator based on combined rules of fuzzy inference]. *Biotekhnosfera = Biotechnosphere*, 2012, vol. 1, no. 19, pp. 44–49.

14. Korenevsky N. A., Bashir A. S., Gorbatenko S. A. Sintez gibridnyh nechetkih pravil dlya prognozirovaniya, ocenki i upravleniya sostoyaniem zdorov'ya v ekologicheski neblagopriyatnyh regionah [Synthesis of hybrid fuzzy rules for forecasting, assessment and management of health in ecologically unfavorable regions]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Medicinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2013, no. 4, pp. 69–73.

15. Korenevsky N. A., Bykov A. V., Ustinov U. G. Nechetkij algoritm prognoza razvitiya ishemicheskoy bolezni konechnostej dlya razlichnyh etapov vedeniya pacientov [Fuzzy algorithm for predicting the development of ischemic limb disease for various stages of patient management]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Series: Management, Computer engineering, computer science. Medical instrumentation = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2016, vol. 2, no. 19, pp. 142–155.

16. Korenevsky N. A., Kopteva N. A., Krupchatnikov R. A. Prognozirovanie i rannaya diagnostika zabolevanij sel'skohozyajstvennyh rabochih na osnove nechetkoj logiki prinyatiya reshenij [Forecasting and early diagnosis of diseases of agricultural workers based on fuzzy logic of decision-making]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Voronezh State Technical University*, 2008, vol. 4, no. 7, pp. 86–89.

17. Korenevsky N. A., Tutov N. D., Lazurina L. P. Proektirovanie mediko-ekologicheskikh informacionnyh sistem [Design of medical and environmental information systems]. Kursk, Kursk State Technical University Publ., 2001. 193 p.

18. Korenevsky N. A., Rodionova S. N., Khripina I. I. Metodologiya sinteza gibridnyh nechetkih reshayushchih pravil dlya medicinskih intellektual'nyh sistem podderzhki prityani

reshenij [Methodology of synthesis of hybrid fuzzy decision rules for medical intelligent decision support systems]. Stary Oskol, TNT Publ., 2019. 472 p.

19. Korenevsky N. A., Aksenov V. V., Rodionova S. N., Gontarev S. N., Lazurina L. P., Safronov R. I. Metod kompleksnoj ocenki urovnya informativnosti klassifikacionnyh priznakov v usloviyah nechetkoj struktury dannyh [The method of complex assessment of the level of informativeness of classification features in conditions of a fuzzy data structure]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Series: Management, Computer engineering, computer science. Medical instrumentation = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2023, no. 3, pp. 80–96.

20. Baevsky R. M., Berseneva A. P. Ocenka adaptacionnyh vozmozhnostej organizma i riska zabolevanij [Assessment of the adaptive capabilities of the body and the risk of diseases]. Moscow, Medicine Publ., 1997. 128 p.

21. Baevsky R. M., Ivanov G. G. Variabel'nost' serdechnogo ritma: teoreticheskie aspekty i vozmozhnosti klinicheskogo primeneniya [Heart rate variability: theoretical aspects and possibilities of clinical application]. Moscow, Medicine Publ., 2000. 295 p.

22. Garkavi L. H., Ukolova M. A., Kvakina E. B. Zakonomernost' razvitiya kachestvenno otlichayushchih obshchih nespecificheskikh adaptacionnyh reakcij organizma [The pattern of development of qualitatively different general nonspecific adaptive reactions of the body]. *Nauchnye otkrytiya Rossii [Scientific discoveries of Russia]*. Available: <https://rossnauka.narod.ru/03/03-158.html>. (accessed 10.09.2023)

23. Garkavi L. H., Kvakina E. B., Ukolova M. A. Adaptacionnye reakcii i rezistentnost' organizma [Adaptive reactions and resistance of the body]. Rostov-on-Don, Rostov University Publ., 1990. 224 p.

24. Gurvich I. N. Social'naya psihologiya zdorov'ya [Social psychology of health]. St. Petersburg, St. Petersburg University Press Publ., 1999. 1023 p.

25. Khurs R. V., Eremina N. M., Korzun N. N. Skriningovye metody ocenki adaptacii organizma v ambulatornoj praktike [Screening methods for assessing the adaptation of the body in outpatient practice]. Minsk, Belarusian State Medical University Publ., 2018. 43 p.

26. Korenevsky N. A., Shutkin A. N., Boitsova E. A., Dmitrieva V. V. Ocenka i upravlenie sostoyaniem zdorov'ya na osnove modelej G. Rasha [Assessment and management of health status based on G. Rush models]. *Medicinskaya tekhnika = Medical Technology*, 2015, vol. 6, no. 294, pp. 37–40.

27. Smith E. V., Smith M. S. Introduction to Rasch Measurement Theory, Models and Applications. Marle Grove, Minnesota, JAM Press Publ., 2004. 689 p.

28. Maslak A. A. Izmerenie latentnyh peremennyh v social'no-ekonomicheskikh sistemah [Measurement of latent variables in socio-economic systems]. Slavyansk-on-Kuban, Publishing Center of the SSPI, 2006. 333 p.

29. Andrich D. Rasch Models for Development. London, Sage Publications, Inc. Publ., 1988. 94 p.
30. Bond T. G., Fox C. M. Applying the Rasch model. Fundamental Measurement in the Human Sciences. Mahwah, New Jersey, Lawrence Erlbaum Associates, Inc., Publishers, 2001. 255 p.
31. Rasch G. Probabilistic models for some intelligence anent tests (Expanded edition, with foreword and afterword by Benjamin D. Wright). Chicago, University of Chicago Press, 1980. 199 p.
32. Kurzanov A. N., Zabolotskikh A. N., Kovalev D. V., Buziashvili D. A. Sovershenstvo-
vanie ocenki funktsional'nykh rezervov organizma – prioritnoe napravlenie razvitiya donozo-
logicheskoy diagnostiki premorbidnykh sostoyanij [Improving the assessment of functional re-
serves of the body is a priority direction for the development of prenosological diagnosis of
premorbid conditions]. *Mezhdunarodnyj zhurnal eksperimental'nogo obrazovaniya = Interna-
tional Journal of Experimental Education*, 2015, vol. 10, no. 1, pp. 67–70.
33. Kurzanov A. N., Zabolotskikh N. V., Kovalev D. V. Funktsional'nye rezervy or-
ganizma [Functional reserves of the body]. Moscow, Publishing House of the Academy of
Natural Sciences, 2016. 96 p.

Информация об авторе / Information about the Author

Родионова Софья Николаевна, кандидат
технических наук, доцент кафедры
биомедицинской инженерии, Юго-Западный
государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: knsofia@mail.ru,
ORCID: 0000-0002-4477-3975,
Scopus ID: 57195455825,
WOS ID: Q-1060-2017

Sofia N. Rodionova, Cand. of Sci. (Engineering),
Associate Professor, Department of Biomedical
Engineering, Southwest State University,
Kursk, Russian Federation,
e-mail: knsofia@mail.ru,
ORCID: 0000-0002-4477-3975,
Scopus ID: 57195455825,
WOS ID: Q-1060-2017