

МОДЕЛИРОВАНИЕ В МЕДИЦИНСКИХ И ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

MODELING IN MEDICAL AND TECHNICAL SYSTEMS

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-4-164-180>



УДК 621.391.26

Нечеткие модели для оценки уровня адаптационного потенциала центральной нервной системы у инженерно-технического персонала

Н. А. Корневский¹, Р. И. Сафронов², О. Ю. Лукаш¹,
С. Н. Родионова¹, Г. В. Сипливый³, В. В. Аксёнов¹ ✉

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

² Курский государственный аграрный университет имени И. И. Иванова
ул. К. Маркса, д. 70, г. Курск 305021, Российская Федерация

³ Курский государственный медицинский университет Министерства здравоохранения Российской Федерации
ул. К. Маркса, д. 3, г. Курск 305021, Российская Федерация

✉ e-mail: aksenchik777@gmail.com

Резюме

Целью исследования является разработка метода оценки уровня адаптационного потенциала центральной нервной системы, позволяющего обеспечить повышение качества принимаемых решений в задачах прогнозирования и диагностики заболеваний, характерных для инженерно-технического персонала.

Методы. Показано, что адаптационный потенциал представляют собой нечеткую переменную, описываемую в рамках классической теории нечеткой логики. В рамках этой методологии для синтеза решающих правил оценки уровня адаптационного потенциала центральной нервной системы вводятся нормирующие функции уровня адаптации для показателей, выбираемых из набора тестовых методик, описывающих состояние исследуемой системы, которые агрегируются в искомую гибридную нечеткую модель. Учитывая, что инженерный труд часто сопровождается высоким уровнем психоэмоционального напряжения и утомления, для оценки состояния центральной нервной системы выбран прибор контроля функций внимания и памяти, позволяющий сформировать необходимый для решения поставленных задач объем исходных данных.

Результаты. В ходе проведенных исследований для синтеза решающих правил оценки уровня адаптационного потенциала центральной нервной системы, с учетом специфики труда инженерно-технических работников был сформирован набор информативных признаков: уровень личной и ситуативной тревожности, концентрированность внимания и показатель, характеризующий состояние блоков оперативной памяти, вычисляемый по методике определения отсутствующей цифры. Для этого набора показателей были получены соответствующие нормирующие функции уровня адаптации, агрегация которых дает искомую нечеткую математическую модель оценки уровня адаптационного потенциала центральной нервной системы.

© Корневский Н. А., Сафронов Р. И., Лукаш О. Ю., Родионова С. Н., Сипливый Г. В., Аксёнов В. В., 2024

Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление,
вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024;14(4):164–180

Заключение. В ходе проведенных исследований был разработан метод оценки уровня адаптационного потенциала центральной нервной системы и получена соответствующая нечеткая модель оценки уровня этого потенциала с ориентацией на особенности труда инженерно-технических работников. В ходе экспертного оценивания и математического моделирования было показано, что уверенность в правильной оценке уровня адаптационного потенциала центральной нервной системы превышает величину 0,9.

Ключевые слова: адаптационный потенциал; центральная нервная система; инженерно-технический персонал; математические модели; 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: Нечеткие модели для оценки уровня адаптационного потенциала центральной нервной системы у инженерно-технического персонала / Н. А. Корневский, Р. И. Сафронов, О. Ю. Лукаш, С. Н. Родионова, Г. В. Сипливый, В. В. Аксёнов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024. Т. 14, № 4. С. 164–180. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-4-164-180>

Поступила в редакцию 10.10.2024

Подписана в печать 08.11.2024

Опубликована 27.12.2024

Fuzzy models for assessing the level of adaptive potential of the central nervous system in engineering and technical personnel

Nikolay A. Korenevsky¹, Ruslan I. Safronov², Olesya Y. Lukash¹, Sofya N. Rodionova¹, Gennady V. Siplivy³, Vitaly V. Aksenov¹ ✉

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

² Kursk State Agricultural Academy named after I. I. Ivanov
70 K. Marx Str., Kursk 305021, Russian Federation

³ Kursk State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation
3 K. Marx Str., Kursk 305021, Russian Federation

✉ e-mail: aksenchik777@gmail.com

Abstract

The purpose of the research is to develop a method for assessing the level of adaptive potential of the central nervous system, which allows improving the quality of decisions made in the tasks of forecasting and diagnosing diseases characteristic of engineering and technical personnel.

Methods. It is shown that the adaptive potential is a fuzzy variable described in the framework of the classical theory of fuzzy logic. Within the framework of this methodology, for the synthesis of decisive rules for assessing the level of adaptive potential of the central nervous system, normalizing functions of the level of adaptation are introduced for indicators selected from a set of test methods describing the state of the system under study, which are aggregated into the desired hybrid fuzzy model. Considering that engineering work is often accompanied by a high level of psychoemotional stress and mental fatigue, a device for monitoring the functions of attention and memory was chosen to

assess the state of the central nervous system, which allows forming the volume of initial data necessary to solve the tasks.

Results. In the course of the conducted research, to synthesize the decisive rules for assessing the level of adaptive potential of the central nervous system, taking into account the specifics of the work of engineering and technical workers, a set of informative signs was formed consisting of the level of personal and situational anxiety, concentration of attention and an indicator characterizing the state of RAM blocks, calculated by the method of determining the missing digit. For this set of indicators, the corresponding normalizing functions of the level of adaptation were obtained, the aggregation of which gives the desired fuzzy mathematical model for assessing the level of adaptive potential of the central nervous system.

Conclusion. In the course of the conducted research, a method for assessing the level of adaptive potential of the central nervous system was developed and a corresponding fuzzy model for assessing the level of this potential was obtained, focusing on the peculiarities of the work of engineering and technical workers. During the expert assessment and mathematical modeling, it was shown that the confidence in the correct assessment of the level of adaptive potential of the central nervous system exceeds 0.9.

Keywords: adaptive potential; central nervous system; engineering and technical personnel; mathematical models; fuzzy decision rules.

Funding: The work was carried out within the framework of the Southwestern 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: Korenevsky N.A., Safronov R.I., Lukash O.Y., Rodionova S.N., Siplivy G.V., Aksenov V.V. Fuzzy models for assessing the level of adaptive potential of the central nervous system in engineering and technical personnel. *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.* 2024;14(4):164–180. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-4-164-180>

Received 10.10.2024

Accepted 08.11.2024

Published 27.12.2024

Введение

Решаемые в работе задачи относятся к большой проблеме повышения надежности работы человеко-машинных систем и снижения риска появления и развития заболеваний, провоцируемых производственными факторами риска и, в частности, факторами, связанными с нагрузкой на головной мозг при творческой работе. В этой области опубликовано огромное число работ. Например, в работе [1, с. 232] описаны основные проблемы инженерной психологии, куда составной частью входят решаемые в работе задачи, а в работе [2, с. 153] показано влияние процессов проектирования

сложных человеко-машинных систем на психофизиологические характеристики операторов, в работе [3, с. 61] рассматриваются общие вопросы влияния человеко-машинных систем на производительность и здоровье работников, в [4, с. 79] получены математические модели оценки качества работы операторов в сложных человеко-машинных системах. В [5, с. 295] исследуется влияние сложных условий жизни и труда на когнитивные функции и нейрофизиологические процессы адаптации, в [6, с. 115] изучаются когнитивные эффекты умственного утомления, в [7, с. 582] решаются задачи классификации когнитивного

дефицита, а в [8, с. 244] исследуются вопросы когнитивных расстройств у пациентов умственного труда. В работе [9, с.58] изучается структура когнитивных нарушений у больных с непсихотическими депрессивными расстройствами, а работа [10, с. 33] исследует вопросы особенности работы оператора в интегрированных системах управления и т. д.

Анализ перечисленных и других работ, связанных с инженерным трудом, показал, что ряд инженерных профессий в процессе трудовой деятельности формирует состояние напряжения, а нередко и перенапряжения функционального состояния (ФС) организма, что провоцирует трудноразрешимые психологические состояния, приводящие к появлению и развитию пограничных психических расстройств, неврозов, заболеваний сердечно-сосудистой системы. Имеются работы, показывающие наличие высокой корреляционной связи между ухудшением функционального состояния центральной нервной системы (ЦНС) и развитием заболеваний нервной и сердечно-сосудистой систем [4 с. 87].

В работе [11, с. 188] было обосновано, что ФС человека и его систем тесно связано как с состоянием здоровья, так и с адаптационным потенциалом (АП), под которым в общем случае понимают показатель уровня приспособляемости организма человека к различным и меняющимся факторам внешней среды. Основоположник современной адаптологии Р. М. Баевский убедительно показал,

что показатель уровня АП является надежным предиктором при решении задач прогнозирования и ранней диагностики заболеваний, вызываемых производственными факторами риска. С учетом этого в данной работе была поставлена задача разработки метода оценки АП ЦНС с получением соответствующих математических моделей с дальнейшим их использованием при построении решающих правил прогнозирования и ранней диагностики заболеваний, провоцируемых особенностями инженерно-технических профессий.

С математической точки зрения решаемые в работе задачи относятся к классу плохоформализуемых задач, для решения которых разработано множество методов. Например, в работе [12, с. 115] показывается эффективность использования гибридных нечетких моделей при решении задач прогнозирования и ранней диагностики заболеваний нервной системы, провоцируемых комбинированным воздействием разнородных факторов риска; в работе [13, с. 146] приводится описание использования моделей этого класса при решении задач прогнозирования, диагностики и оценки степени тяжести некоторых классов сердечно-сосудистых заболеваний; в работе [14, с. 140] показана эффективность применения гибридных нечетких моделей при прогнозировании и оценке степени тяжести ишемии сердца; в работе [15, с. 70] обсуждаются вопросы применимости слабых классификаторов для прогнозирования сердечно-сосудистых рисков;

в [16, с. 180] обсуждается применимость мультиагентной интеллектуальной системы для прогноза риска сердечно-сосудистых осложнений; в [17, 130] исследуется применимость моделей латентных предикторов в интеллектуальных системах прогнозирования состояния живых систем; в [18, с. 400] показываются перспективы использования гибридных нечетких технологий в медицинских исследованиях; в [19, с. 47] обсуждаются возможности искусственных нейронных сетей; в [20, с. 63] исследуются перспективы использования систем символьной обработки данных в медицинской практике и т. д.

В работе [11, с. 185] было показано, что АП представляют собой нечеткую лингвистическую переменную, описываемую в рамках классической теории нечеткой логики, являющейся разновидностью технологии мягких вычислений. Анализ структуры классов, принятых в адаптации, и методов решения аналогичных задач показал, что из множества методов, моделей и алгоритмов, принятых в технологии мягких вычислений, целесообразно использовать методологию синтеза гибридных нечетких решающих правил (МСГНРП), разработанную в Юго-Западном государственном университете [18, с. 350]. В рамках этой методологии интеллектуальные возможности экспертов клиницистов и инженеров когнитологов объединяются с методами искусственного интеллекта, что позволяет работать с классами плохоформализуемых задач. В качестве

основных элементов МСГНРП используются функции принадлежности $\mu_{\omega_\ell}(x_i)$ к гипотезам (классам) ω_ℓ , а в качестве базовых переменных наиболее часто выбираются информативные признаки, комплексные показатели, характеризующие объекты исследования, коэффициенты уверенности KU_{ω_ℓ} (по событиям ω_ℓ и т. д.).

Материалы и методы

С учетом специфики решаемой задачи и рекомендаций работы [3, с. 60] для синтеза решающих правил оценки уровня АП ЦНС дополнительно к функциям принадлежности вводятся нормирующие функции уровня адаптации (ФУА) ЦНС $f_{\text{Ц}j}(s)$, где j – идентификатор используемых для оценки АП методик оценки состояния ЦНС, s – идентификатор измерительной шкалы. Область значений этих функций определена на интервале $[0, \dots, 1]$. Нулевому значению ФУА соответствует слом адаптивных механизмов. Единичное значение ФУА определяет такой уровень АП, который позволяет сохранить здоровье и работоспособность организма с требуемым качеством при заданных рабочих нагрузках. Если АП ЦНС определяется по нескольким показателям, то в рамках МСГНРП предлагается один из трех способов агрегации $f_{\text{Ц}j}(s)$.

Если отобранные показатели удовлетворяют свойствам модели Э. Шортлифа, то используется агрегатор типа [18, с. 381]:

$$UAP_{цj}(s+1) = UAP_{цj}(s) + f_{цj}(Q_{s+1})[1 - UAP_{цj}(s)], \quad (1)$$

где $j = 1, \dots, J$; $s = 1, \dots, S$; $UAP_{цj}(1) + f_{цj}(Q_1)$.

Если эксперты считают возможным принимать решение по той составляющей уровня адаптации, которая принимает максимальное значение, с возможным игнорированием «слабого звена», используют агрегатор типа [18, с. 381]:

$$UAP_{цj} = \max[f_{цj}(Q_s)]. \quad (2)$$

Если эксперты при синтезе решающих правил ориентируются в оценке уровня адаптации всего организма на самое «слабое звено» адаптации, следует использовать агрегатор вида [18, с. 381]:

$$UAP_{цj} = \min[f_{цj}(Q_s)]. \quad (3)$$

Известно, что инженерный труд часто сопровождается высоким уровнем психоэмоционального напряжения и умственного утомления с преобладающей нагрузкой на когнитивные функции внимания и памяти. Проведенные исследования показали, что в этих условиях для оценки состояния ЦНС целесообразно использовать прибор контроля функций внимания и памяти (ПКФ-ВП) [21, с. 88], пример эффективного практического использования описан в работе [22, с. 88].

С учетом общих рекомендаций МСГНРП и особенностей решаемой задачи нами был разработан метод синтеза моделей оценки адаптационного потенциала центральной нервной системы, состоящий из следующей последовательности действий.

1. Инженер по знаниям, владеющий МСГНРП, формирует группу экспертов психологов, имеющих дополнительную подготовку по адапталоги. С учетом рекомендаций работ [11, с. 187] в качестве базового элемента искомых моделей выбираются нормирующие функции уровня адаптации ЦНС $f_{цj}(s)$.

2. Составляется список тестовых опросников, используемых для оценки уровня адаптации ЦНС, и производится их оптимизация с учетом нечеткой структуры данных с получением списка информативных показателей $T_{цтj}$.

3. Производится синтез нормирующих функций уровня адаптации ЦНС $f_{цтj}(T_{цтj})$. С учетом экспертного анализа роли информативных тестовых опросников в общей оценке уровня АП ЦНС выбирается тип функции агрегации $AG_{цтj}$ из набора моделей (1), (2) или (3) и осуществляется синтез частного решающего правила вида

$$UAP_{цт} = AG_{цтj}[f_{цтj}(T_{цтj})]. \quad (4)$$

4. С использованием метода комплексной оценки уровня информативности классификационных признаков в условиях нечеткой структуры данных или нечеткой модификации теории измерения латентных переменных с моделью Г. Раша производится оптимизация списка показателей, характеризующих состояния свойств внимания и памяти, определяемых с помощью ПКФ-ВП с выбором состава информативных показателей $S_{цсрj}$.

5. Синтезируются нормирующие функции уровня адаптации ЦНС $f_{\text{цсрj}}(S_{\text{цсрj}})$ по группе тестов типа «Сложная зрительно-моторная реакция» и аналогично п. 3, с учетом экспертного анализа роли информативных показателей внимания и оперативной памяти в общей оценке уровня АП получают частное решающее правило вида

$$UAP_{\text{цср}} = AG_{\text{цсрj}} [f_{\text{цсрj}}(S_{\text{цсрj}})]. \quad (5)$$

6. С учетом экспертного анализа роли $UAP_{\text{цт}}$ и $UAP_{\text{цср}}$ в общей оценке уровня АП ЦНС выбирается тип функции агрегации для финальной модели вида:

$$UAP_{\text{цнс}} = AG_{\text{цнс}} [UAP_{\text{цт}}, UAP_{\text{цср}}]. \quad (6)$$

Результаты и их обсуждение

В соответствии с описанным выше методом на первом этапе синтеза в качестве информативных тестовых опросников, используемых для оценки уровня адаптации ЦНС, были отобраны тесты Спилбергера-Ханина личностной тревожности (ЛТ) и ситуативной тревожности (СТ). При синтезе нормирующих функции уровня адаптации ЦНС $f_{\text{цт}}(\text{ЛТ})$ $f_{\text{цт}}(\text{СТ})$ необходимо учитывать, что значения ЛТ и СТ находятся в диапазоне от 20 до 80 баллов. Уровень ситуативной тревожности определяется в соответствии со следующими правилами:

$СТ \leq 30$ – низкий уровень ситуативной тревожности (СТ); $30 < СТ \leq 44$ – умеренный уровень СТ; $СТ \geq 45$ – высокий уровень СТ. По этому же алгоритму (с этими же диапазонами границ) оценивается уровень личностной тревожности.

Для построения графиков нормирующих функций привлекались эксперты имеющие компетенции в области адаптации и МСГНРП, которые отвечали на следующие вопросы. При каких значениях $ЛТ_{\text{min}}$ и $СТ_{\text{min}}$ нормирующие функции уровня адаптации ЦНС $f_{\text{цт min}}(\text{ЛТ})$ и $f_{\text{цт min}}(\text{СТ})$ имеют минимальные значения и каковы эти значения? При каких значениях $ЛТ_{\text{max}}$ и $СТ_{\text{max}}$ нормирующие функции уровня адаптации ЦНС $f_{\text{цт max}}(\text{ЛТ})$ и $f_{\text{цт max}}(\text{СТ})$ имеют максимальные значения и каковы эти значения? Какую геометрическую форму имеют линии связи между минимальными и максимальными значениями нормирующих функций уровня адаптации ЦНС?

Эксперты определили, что уровень доверия к оценке АП ЦНС с использованием тестов личной и ситуативной тревожности лежит в интервале от 0,4 до 0,5, что определило значения $f_{\text{цт max}}(\text{ЛТ})$ и $f_{\text{цт max}}(\text{СТ})$.

Рассмотрим результаты опроса экспертов по шкалам ЛТ и СТ (табл. 1 и 2).

Таблица 1. Результаты опроса экспертов для шкалы ЛТ

Table 1. Results of the expert survey for the LT scale

Граничный параметр	Эксперты							Среднее значение
	11	22	23	24	25	26	77	
$ЛТ_{\min}$	30	30	25	30	25	30	30	30
$f_{цт \min}(ЛТ)$	0,1	0,0	0,05	0,1	0,0	0,05	0,1	0,05
$ЛТ_{\max}$	50	45	40	45	40	50	45	45
$f_{цт \max}(ЛТ)$	0,4	0,1	0,2	0,15	0,2	0,25	0,2	0,2
Форма графика	ЛН	ЛН	КВ	КВ	ЛН	КВ	КВ	КВ

Примечание. В таблицах 1 – 3 введены следующие обозначения: ЛН – линейная форма; КВ – квадратичная форма.

Таблица 2. Результаты опроса экспертов для шкалы СТ

Table 2. Results of the expert survey for schools with

Граничный параметр	Эксперты							Среднее значение
	11	22	23	24	25	26	77	
$СТ_{\min}$	30	40	30	40	30	35	40	35
$f_{цп \min}(СТ)$	0,2	0,0	0,05	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1
$СТ_{\max}$	50	45	45	55	45	60	50	50
$f_{цп \max}(СТ)$	0,4	0,2	0,3	0,3	0,4	0,3	0,2	0,3
Форма графика	ЛН	ЛН	КВ	КВ	ЛН	КВ	КВ	КВ

По рассчитанным средним значениям были определены нормирующие функции, описываемые следующими выражениями:

$$f_{цт}(ЛТ) = \begin{cases} 0,2, & \text{если } ЛТ < 30, \\ 0,2 - 0,0012(ЛТ - 30)^2, & \\ \text{если } 30 \leq ЛТ < 37,5, \\ 0,05 + 0,0013(ЛТ - 45)^2, & \\ \text{если } 37,5 \leq ЛТ < 45, \\ 0,05, & \text{если } ЛТ \geq 45, \end{cases} \quad (7)$$

$$f_{цт}(СТ) = \begin{cases} 0,3, & \text{если } СТ < 35, \\ 0,3 - 0,0018(СТ - 35)^2, & \\ \text{если } 33 \leq СТ < 42, \\ 0,1 + 0,0018(СТ - 50)^2, & \\ \text{если } 42,5 \leq СТ < 50, \\ 0,1, & \text{если } СТ \geq 50. \end{cases} \quad (8)$$

С учетом рекомендаций МСГНРП и мнения отобранной группы экспертов уровень АП ЦНС $UAP_{цт}$ по паре показателей ЛТ и СТ определяется агрегатором вида

$$UAP_{\text{цт}} = f_{\text{цт}}(\text{ЛТ}) + f_{\text{цт}}(\text{СТ}) - f_{\text{цт}}(\text{ЛТ}) f_{\text{цт}}(\text{СТ}). \quad (9)$$

При выборе тестов типа «Сложная зрительно-моторная реакция» мы исходили из того, что практически все методики, реализуемые ПКФ-ВП, относятся именно к этой группе тестов, причем они тестируют состояние двух когнитивных функций, наиболее нагружаемых в ходе выполнения инженерной деятельности. Этот прибор реализует 6 методик, оценивающих различные свойства внимания, и 5 методик оценки состояния блоков оперативной памяти.

Анализ литературы и собственные исследования показали, что при

реализации инженерной деятельности наиболее нагруженной является свойство концентрации внимания (КВ), а методика определения отсутствующей цифры (ООЦ) нагружает блоки, осуществляющие семантические преобразования на уровне взаимодействия кратковременной и долговременной памяти, что также характерно для исследуемого класса деятельности. Для получения нормировочной функции по данным концентрированности внимания $f_{\text{цв}}(\text{КВ})$ эксперты построили таблицу 3 граничных значений этой функции аналогично таблицам 1 и 2.

Таблица 3. Результаты опроса экспертов для шкалы КВ

Table 3. Results of the expert survey for the KV scale

Граничный параметр	Эксперты							Среднее значение
	11	22	23	24	25	26	77	
KV_{\min}	140	140	160	150	150	150	160	150
$f_{\text{цв min}}(\text{КВ})$	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1
KV_{\max}	240	250	260	250	250	250	250	250
$f_{\text{цв max}}(\text{КВ})$	0,4	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,4
Форма графика	КВ	ЛН	КВ	КВ	ЛН	КВ	КВ	КВ

По рассчитанным средним значениям была получена соответствующая аналитическая модель вида

$$f_{\text{цв}}(\text{КВ}) = \begin{cases} 0,4, & \text{если } \text{КВ} < 150, \\ 0,4 - 0,00006(\text{КВ} - 150)^2, & \\ \text{если } 150 \leq \text{КВ} < 200, \\ 0,1 + 0,00006(\text{КВ} - 250)^2, & \\ \text{если } 200 \leq \text{КВ} < 250, \\ 0,1, & \text{если } \text{КВ} \geq 250. \end{cases} \quad (10)$$

Аналогично эксперты получили нормирующую функцию уровня адаптации ЦНС по данным методики определения отсутствующей цифры $f_{\text{цт}}(\text{ООЦ})$:

$$f_{\text{цт}}(\text{ООЦ}) = \begin{cases} 0,4, & \text{если } \text{ООЦ} < 1500, \\ 0,4 - 0,0000375(\text{ООЦ} - 1700)^2, & \\ \text{если } 1500 \leq \text{ООЦ} < 1700, \\ 0,1 + 0,0000375(\text{ООЦ} - 1900)^2, & \\ \text{если } 1700 \leq \text{ООЦ} < 1900, \\ 0,1, & \text{если } \text{ООЦ} \geq 1900. \end{cases} \quad (11)$$

С учетом рекомендаций МСГНРП и мнения экспертов уровень АП ЦНС $UAP_{цсп}$ по паре показателей КВ и ООЦ определяется агрегатором вида

$$UAP_{цсп} = f_{цв}(КВ) + f_{цп}(ООЦ) - f_{цв}(КВ) f_{цп}(ООЦ). \quad (12)$$

Агрегация моделей (9) и (12) дает нечеткую модель оценки уровня адаптационного потенциала центральной нервной системы:

$$UAP_{цнс} = UAP_{цт} + UAP_{цсп} - UAP_{цт} UAP_{цсп}. \quad (13)$$

Экспертная оценка полученного решающего правила, проводимая по методике, описанной в работе [18, с. 198–214], показала, что уровень доверия к модели (11) превышает величину 0,90. В ходе математического моделирования, проводимого по исходным данным, сформированным экспертами, была получена уверенность на уровне 0,95, что является хорошим результатом для задач оценки адаптационного потенциала органов и систем человека при нечетком описании исследуемых классов состояний.

Выводы

В работе предложен метод оценки уровня адаптационного потенциала центральной нервной системы у инженерно-технического персонала по информативным признакам, характеризующим процессы адаптации в этой составляющей нервной системы, учитывающий особенности структуры исследуемых классов состояний и способы их обработки с целью достижения требуемых для медицинских и психологических приложений показателей качества принимаемых решений. Используя предложенный метод, получена нечеткая математическая модель оценки уровня адаптационного потенциала центральной нервной системы по таким показателям, как уровни личной и ситуативной тревожности, концентрированность внимания и состояние блоков оперативной памяти, определяемое по методике определения отсутствующей цифры. В ходе экспертного оценивания и математического моделирования было показано, что уверенность в правильной оценке уровня искомого адаптационного потенциала превышает величину 0,9.

Список литературы

1. Ломов Б. Ф. Основные проблемы инженерной психологии // Институт психологии Российской академии наук. Организационная психология и психология труда. 2022. Т. 7, № 1. С. 226–262. https://doi.org/10.38098/ipran.opwp_2022_22_1_011
2. Брумштейн Ю. М., Молимонов Д. А. Модели, методы, технические средства управления рисками проектирования, создания и эксплуатации сложных человеко-машинных систем с учетом психофизиологических характеристик людей-операторов // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2019. № 3 (47). С. 143–162.

3. Матель В. А., Шишлянникова О. А. Система «человек-машина» и анализ и влияние факторов среды на производительность и здоровье работников // Российский экономический вестник. 2023. Т. 6, № 2. С. 58–63.
4. Брумштейн Ю. М., Молимонов Д. А. Математические модели и методы решения задач информационного обеспечения, управления и оценки качества работы операторов в сложных человеко-машинных системах // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2019. № 3. С. 73–89. <https://doi.org/10.24143/2072-9502-2019-3-73-89>
5. Анализ когнитивных функций и нейрофизиологических процессов при адаптации человека к условиям арктики / Е. П. Муртазина, И. И. Коробейникова, Л. В. Поскоятинова, Н. А. Каратыгин, С. С. Перцов // Российский медико-биологический вестник имени академика И. П. Павлова. 2023. Т. 31, № 2. С. 293–304. <https://doi.org/10.17816/P/AVLOVJ109581>
6. Величковский Б. Б. Когнитивные эффекты умственного утомления // Вестник Московского университета. Серия 14: Психология. 2019. № 1. С. 108–122. <https://doi.org/10.11621/vsp.2019.01.108>
7. Применение инструментов дискретной оптимизации для классификации когнитивного дефицита: особенности использования минимаксного и аддитивного критериев / Ю. А. Мезенцев, О. М. Разумникова, П. С. Павлов, И. В. Тарасова, О. А. Трубникова // Программные продукты и системы. 2021. № 4. С. 579–588. <https://doi.org/10.15827/0236-235X.136.579-588>
8. Когнитивные расстройства у пациентов умственного труда с хронической ишемией головного мозга, их профессиональная дезадаптация и выгорание / М. А. Трещинская, В. Д. Мишиев, Л. Н. Сулий, М. В. Глоба // Психиатрия, психотерапия и клиническая психология. 2019. Т. 10, № 2. С. 241–250.
9. Ахапкин Р. В., Файзуллоев А. З. Структура когнитивных нарушений у больных с не психотическими депрессивными расстройствами // Кремлевская медицина. Клинический вестник. 2020. № 3. С. 54–64.
10. Фешин Б. Н. Оператор-диспетчер в интегрированных системах управления. Информационно-психологическая подготовка // Автоматика. Информатика. 2020. № 2. С. 31–35.
11. Родионова С. Н. Метод оценки 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>

12. Математические модели прогнозирования и ранней диагностики заболеваний нервной системы, провоцируемых комбинированным воздействием разнородных факторов риска / Т. Н. Говорухина, М. А. Мясоедова, И. Ю. Григоров, А. В. Поляков // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2019. Т. 18, № 2. С. 110–116. <https://doi.org/10.25987/VSTU.2019.18.2.022>

13. Быков А. В. Метод и нечеткая модель оценки степени тяжести ишемической болезни центральной гемодинамической системы // Вестник новых медицинских технологий. 2019. Т. 24, № 4. С. 144–150. https://doi.org/10.12737/article_5a38fb1e7bef61.32280165

14. Прогнозирование и оценка степени тяжести ишемии сердца на основе гибридных нечётких моделей / И. А. Комлев, О. В. Шаталова, С. В. Дегтярев, А. В. Серебровский // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2019. Т. 9, № 1 (30). С. 133–145. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50423113>

15. Методы и алгоритмы формирования слабых классификаторов в ансамбле классификаторов прогнозирования сердечно-сосудистых рисков / З. У. Протасова, О. В. Шаталова, А. А. Б. Дафалла, С. В. Дегтярев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2019. Т. 9, № 3 (32). С. 64–83.

16. Шаталова О. В., Медников Д. А., Протасова З. У. Мультиагентная интеллектуальная система для прогноза риска сердечно-сосудистых осложнений с синергетическими каналами // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2020. Т. 19, № 3. С. 177–188. <https://doi.org/10.36622/VSTU.2020.19.3.023>

17. Модели латентных предикторов в интеллектуальных системах прогнозирования состояния живых систем / А. В. Киселев, О. В. Шаталова, З. У. Протасова, С. А. Филист, Н. С. Стадниченко // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2020. Т. 10, № 1. С. 114–133.

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. Стародубцева Л. В. История разработки аналоговых нейронных сетей и перспективы их использования для медицинских приложений в разработках советских ученых // Медицинская техника. 2022. № 4 (334). С. 46–48.

20. Стародубцева Л. В. Вклад курских исследователей в развитие систем обработки символической информации // История и педагогика естествознания. 2021. № 3-4. С. 61–65. <https://doi.org/10.24412/2226-2296-2021-3-4-61-65>

21. Метод синтеза математических моделей прогнозирования и ранней диагностики нарушений когнитивных функций / Н. А. Корневский, А. В. Поляков, С. Н. Родионова, Т. Н. Говорухина // Системный анализ и управление в биотехнических системах. 2019. Т. 18, № 4. С. 85–92. <https://doi.org/10.25987/VSTU.2020.18.4.011>

22. Метод и нечеткие модели оценки функциональных состояний оперативной памяти / А. Ю. Рыбаков, С. Н. Родионова, К. В., Разумова, Н. А. Милостная, Н. Л. Коржук // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024. Т. 14, № 2. С. 106–125. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-2-106-125>

References

1. Lomov B.F. The main problems of engineering psychology. *Institut psihologii Rossijskoj akademii nauk. Organizacionnaya psihologiya i psihologiya truda = Institute of Psychology of the Russian Academy of Sciences. Organizational Psychology and Labor Psychology*. 2022;7(1):226–262. (In Russ.) https://doi.org/10.38098/ipran.opwp_2022_22_1_011

2. Brumstein Y.M., Molimonov D.A. Models, methods, technical means of risk management for designing, creating and operating complex human-machine systems taking into account the psychophysiological characteristics of human operators. *Prikaspijskij zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii = Caspian Journal: Management and High Technologies*. 2019;(3):143–162. (In Russ.)

3. Matel V.A., Shishlyannikova O.A. The «man-machine» system and the analysis and influence of environmental factors on productivity and health of workers. *Rossijskij ekonomicheskij vestnik = Russian Economic Bulletin*. 2023;6(2):58–63. (In Russ.)

4. Brumstein Y.M., Molimonov D.A. Mathematical models and methods for solving problems of information support, management and evaluation of the quality of operator work in complex human-machine systems. *Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika = Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Engineering and Computer Science*. 2019;(3):73–89. (In Russ.) <https://doi.org/10.24143/2072-9502-2019-3-73-89>

5. Murtazina E.P., Korobeynikova I.I., Poskotinova L.V., Karatygin N.A., Pertsov S.S. Analysis of cognitive functions and neurophysiological processes in human adaptation to Arctic conditions. *Rossijskij mediko-biologicheskij vestnik imeni akademika I.P. Pavlova = Russian Biomedical Bulletin named after Academician I.P. Pavlov*. 2023;31(2):293–304. (In Russ.) <https://doi.org/10.17816/P AVLOVJ109581>

6. Velichkovsky B.B. Cognitive effects of mental fatigue. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 14: Psihologiya = Bulletin of the Moscow University. Episode 14: Psychology*. 2019;(1):108–122. (In Russ.) <https://doi.org/10.11621/vsp.2019.01.108>

7. Mezentsev Y.A., Razumnikova O.M., Pavlov P.S., Tarasova I.V., Trubnikova O.A. The use of discrete optimization tools for the classification of cognitive deficits: features of using minimax and additive criteria. *Programmnye produkty i sistemy = Software Products and Systems*. 2021;(4):579–588. (In Russ.) <https://doi.org/10.15827/0236-235X.136.579-588>

8. Treshchinskaya M.A., Mishiev V.D., Suliy L.N., Globa M.V. Cognitive disorders in mental health patients with chronic cerebral ischemia, their professional maladaptation and burnout. *Psihiatriya, psihoterapiya i klinicheskaya psihologiya = Psychiatry, Psychotherapy and Clinical Psychology*. 2019;10(2):241–250. (In Russ.)

9. Akhupkin R.V., Fayzulloev A.Z. The structure of cognitive impairment in patients with nonpsychotic depressive disorders. *Kremlevskaya medicina. Klinicheskij vestnik = Kremlin Medicine. Clinical Bulletin*. 2020;(3):54–64. (In Russ.)

10. Feshin B.N. Operator-dispatcher in integrated control systems. Information and psychological training. *Avtomatika. Informatika = Automation. Computer Science*. 2020;(2):31–35. (In Russ.)

11. Rodionova S.N. The method of assessing the nonspecific protection of the human body by indicators characterizing the processes of adaptation. *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*. 2023;13(4):175–192. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-4-175-192>

12. Govorukhina T.N., Myasoedova M.A., Grigorov I.Yu., Polyakov A.V. Mathematical models of forecasting and early diagnosis of diseases of the nervous system provoked by the combined effects of heterogeneous risk factors. *Sistemnyj analiz i upravlenie v biomedicinskih sistemah = System Analysis and Management in Biomedical Systems*. 2019;8(2):110–116. (In Russ.) <https://doi.org/10.25987/VSTU.2019.18.2.022>

13. Bykov A.V. Method and fuzzy model for assessing the severity of ischemic disease of the central hemodynamic system. *Vestnik novyh medicinskih tekhnologij = Bulletin of New Medical Technologies*. 2019;24(4):144–150. (In Russ.) https://doi.org/10.12737/article_5a38fb1e7bef61.32280165

14. Komlev I.A., Shatalova O.V., Degtyarev S.V., Serebrovsky A.V. Prediction and assessment of the severity of cardiac ischemia based on hybrid fuzzy models. *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. 2019; 9(1):133–145. (In Russ.)

15. Protasova Z.U., Shatalova O.V., Dafalla A.A.B., Degtyarev S.V. Methods and algorithms for the formation of weak classifiers in the ensemble of classifiers for predicting cardiovascular risks. *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.* 2019;9(3):64–83. (In Russ.)

16. Shatalova O.V., Mednikov D.A., Protasova Z.U. Multi-agent intelligent system for predicting the risk of cardiovascular complications with synergetic channels. *Sistemnyj analiz i upravlenie v biomeditsinskih sistemah = System Analysis and Management in Biomedical Systems.* 2020;19(3):177–188. (In Russ.) <https://doi.org/10.36622/VSTU.2020.19.3.023>

17. Kiselyov A.V., Shatalova O.V., Protasova Z.U., Filist S.A., Stadnichenko N.S. Models of latent predictors in intelligent systems for predicting the state of living 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.* 2020;10(1):114–133. (In Russ.)

18. Korenevsky N.A., Rodionova S.N., Khripina I.I. Methodology of synthesis of hybrid fuzzy decision rules for medical intelligent decision support systems. *Stary Oskol: TNT;* 2019. 472 p. (In Russ.)

19. Starodubtseva L.V. The history of the development of analog neural networks and the prospects of their use for medical applications in the development of Soviet scientists. *Medicinskaya tekhnika = Medical Technology.* 2022;(4):46–48. (In Russ.)

20. Starodubtseva L.V. Contribution of Kursk researchers to the development of symbolic information processing systems. *Istoriya i pedagogika estestvoznaniya = History and Pedagogy of Natural Science.* 2021; (3-4):61–65. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2226-2296-2021-3-4-61-65>

21. Korenevsky N.A., Polyakov A.V., Rodionova S.N., Govorukhina T.N. Method of synthesis of mathematical models for forecasting and early diagnosis of cognitive impairment. *Sistemnyj analiz i upravlenie v biotekhnicheskikh sistemah = System Analysis and Management in Biotechnical Systems.* 2019;18(4):85–92. (In Russ.) <https://doi.org/10.25987/VSTU.2020.18.4.011>

22. Rybakov A.Y., Rodionova S.N., Razumova K.V., Milostnaya N.A., Korzhuk N.L. Method and fuzzy models for evaluating the functional states of RAM. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Medicinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series:*

Информация об авторах / Information about the Authors

Корневский Николай Алексеевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-2048-0956

Nikolay A. Korenevsky, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Professor of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-2048-0956

Сафронов Руслан Игоревич, кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и электроэнергетики, Курский государственный аграрный университет имени И. И. Иванова, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: russafronov@yandex.ru, ORCID: 0009-0004-5151-4711

Ruslan I. Safronov, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor of the Department of Electrical Engineering and Electric Power Engineering, Kursk Agricultural University named after I. I. Ivanov, Kursk, Russian Federation, e-mail: russafronov@yandex.ru, ORCID: 0009-0004-5151-4711

Лукаш Олеся Юрьевна, аспирант кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: Lukash.o@ya.ru, ORCID: 0000-0003-3148-8371

Olesya Y. Lukash, Post-Graduate Student of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-3148-8371

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

Sofya N. Rodionova, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: knsofia@mail.ru, ORCID: 0000-0002-4477-3975

Сипливый Геннадий Вячеславович, доктор медицинских наук, профессор, профессор кафедры анатомии, Курский государственный медицинский университет Министерства здравоохранения Российской Федерации, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: sigena2005@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-0175-3445

Gennady V. Siplivy, Doctor of Sciences (Medical), Professor, Professor of the Department of Anatomy, Kursk State Medical University Ministry of Health of the Russian Federation, Kursk, Russian Federation, e-mail: sigena2005@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-0175-3445

Аксёнов Виталий Вячеславович, старший преподаватель кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: aksenchik777@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6516-1871

Vitaly V. Aksenov, Senior Lecturer of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: aksenchik777@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6516-1871