

Метод и нечеткие модели оценки функциональных состояний оперативной памяти

А. Ю. Рыбаков¹, С. Н. Родионова¹✉, К. В. Разумова¹,
Н. А. Милостная¹, Н. Л. Коржук²

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

² Тульский государственный университет
пр-т им. Ленина, д. 92, г. Тула 300012, Российская Федерация,

✉ e-mail: knsofia@mail.ru

Резюме

Цель исследования – повышение качества оценки функциональных состояний оперативной памяти путем разработки метода синтеза нечетких решающих правил.

Методы. Для контроля состояния различных блоков оперативной памяти выбран набор методик: оценка времени реакции; поиск сигнала в шуме; «опознание»; полное воспроизведение; определение отсутствующей цифры; объем памяти. Для синтеза решающих правил дополнительно использовались методики оценки таких свойств внимания, как переключаемость, концентрированность и устойчивость, для реализации которых применен прибор контроля свойств функции внимания и памяти. Для выбора адекватного математического аппарата исследований проведен разведочный анализ структуры обрабатываемых данных, по которому установлено, что выбранные классы состояний оперативной памяти имеют нечеткую природу с неопределенными границами их пересечений. С учетом этого в качестве математического аппарата исследований выбрана методология синтеза гибридных нечетких решающих правил, которая была модифицирована путем разработки нового метода нечеткой оценки функционального состояния оперативной памяти по характеристикам её свойств.

Результаты. В ходе проведенных исследований синтезированы модели для оценки таких характеристик функционального состояния, как уровни утомления, психоэмоционального напряжения и функционального состояния оперативной памяти по методике полного воспроизведения. Полученные модели могут быть использованы для синтеза решающих правил прогнозирования, ранней и дифференциальной диагностики функционального состояния, оценки качества работы оператора человеко-машинных систем и состояния здоровья оперативной памяти.

Заключение. В работе предложен метод синтеза нечетких решающих правил для оценки функционального состояния оперативной памяти по характеристикам её свойств с использованием методик, полученных по результатам микроструктурного анализа. Получены нечеткие решающие правила для оценки уровня утомления, психоэмоционального напряжения и функционального состояния оперативной памяти по методике полного воспроизведения. В ходе экспертного оценивания и математического моделирования показано, что уверенность в правильной оценке уровня функционального состояния превышает величину 0,95.

Ключевые слова: оперативная память; функциональное состояние; утомление; психоэмоциональное напряжение; 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: 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>

Поступила в редакцию 17.04.2024

Подписана в печать 15.05.2024

Опубликована 28.06.2024

The method and fuzzy models for evaluating the functional states of RAM

Anton Y. Rybakov¹, Sofia N. Rodionova¹ ✉, Ksenia V. Razumova¹,
Natalia A. Milostnaya¹, Nikolay L. Korzhuk¹

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

² Tula State University
92 Lenin Ave., Tula 300012, Russian Federation

✉ e-mail: knsofia@mail.ru

Abstract

The purpose of the research is to improve the quality of assessment of functional states of working memory by developing a method for synthesizing fuzzy decision rules.

Methods. To monitor the state of various RAM blocks, a set of techniques was selected: reaction time assessment; searching for a signal in noise; "identification"; full reproduction; identification of missing digits; Memory. To synthesize decision rules, additional methods were used to assess such properties of attention as switchability, concentration and stability, for the implementation of which a device for monitoring the properties of the attention and memory function was used. To select an adequate mathematical research apparatus, an exploratory analysis of the structure of the processed data was carried out, according to which it was established that the selected classes of RAM states are of a fuzzy nature with uncertain boundaries of their intersections. Taking this into account, the methodology for the synthesis of hybrid fuzzy decision rules was chosen as a mathematical research tool, which was modified by developing a new method for fuzzy assessment of the functional state of RAM based on the characteristics of its properties.

Results. In the course of the research, models were synthesized to assess such characteristics of the functional state as levels of fatigue, psycho-emotional stress and the functional state of RAM using the full reproduction method. The resulting models can be used to synthesize decision rules for forecasting, early and differential diagnostics of the functional state, assessing the quality of work of the operator of human-machine systems and the health status of RAM.

Conclusion. The paper proposes a method for synthesizing fuzzy decision rules for assessing the functional state of RAM based on the characteristics of its properties using techniques obtained from the results of microstructural analysis. Fuzzy decision rules were obtained for assessing the level of fatigue, psycho-emotional stress and the functional state of RAM using the full reproduction method. During expert assessment and mathematical modeling, it was shown that confidence in the correct assessment of the level of functional state exceeds 0,95.

Keywords: RAM; functional state; fatigue; psycho-emotional stress; fuzzy decisive rules.

Funding: The work was carried out within the framework of the development program of the Southwest State University of the project "Priority 2030".

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

For citation: Rybakov A.Y., Rodionova S.N., Razumova K.V., Milostnaya N.A., Korzhuk N.L. The method and fuzzy models for evaluating the functional states of RAM. *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(2):106–125. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-2-106-125>

Received 17.04.2024

Accepted 15.05.2024

Published 28.06.2024

Введение

Значительное место среди психических заболеваний занимают нарушения когнитивных функций, отвечающих за коммуникативный контакт человека с людьми и окружающей средой. Кроме того, как в повседневной жизни, так и в производственной сфере важную роль играет и функциональное состояние этих функций. В психологической науке к когнитивным функциям относят внимание, память, мышление, осознанную речь и др. [1, с. 9; 2, с. 91; 3, с. 93; 4, с. 154; 5, с. 295; 6, с. 85; 7, с. 22; 8, с. 85].

Существует несколько различных определений функционального состояния (ФС). В данной работе под ФС будем понимать текущую способность системы (конкретно – оперативной памяти), качественно выполнять присущие ей функции [9, с. 57–63].

Целью работы является оценка и контроль функциональных состояний (ФС) человека, его систем и органов, включая оперативную память. Данные показатели важны в двух основных аспектах – оценка эффективности деятельности в процессе выполнения профессиональных задач и оценка здоровья

человека, подвергающегося воздействию психического перенапряжения, монотонии, утомления, являющихся разновидностями ФС. Анализ роли оценки ФС организма человека в целом и его когнитивной функции памяти позволяет сделать вывод о важности показателей, характеризующих функциональное состояние исследуемых структур организма при проектировании средств управления сложными объектами, при обосновании эргономических и экологических решений по рабочим местам, при разработке адаптивных автоматизированных систем, для оптимизации процессов управления уровнем психической нагрузки и т. д. [10, с. 112; 11, с. 147; 12, с. 59; 13, с. 76]. Исследователи, занимающиеся оценкой ФС человека, его систем и органов, отмечают, что, несмотря на огромное количество работ в данном направлении, проблема ФС остается далека от своего решения [9, с. 58–72; 10, с. 112; 14, с. 254–290]. В работах [9, с. 48–52; 10, с. 112; 14, с. 254–302] приводится описание различных методов и средств, позволяющих получать количественные оценки, характеризующие ФС организма человека и его

систем. Для количественных оценок состояния памяти и её составляющих также разработано достаточно большое количество тестов [15, с. 43–53; 16, 86–87; 17, с. 28]. В наших исследованиях для тестирования состояния оперативной памяти был выбран прибор контроля свойств функции внимания и памяти (ПВП), хорошо зарекомендовавший себя при оценке состояний когнитивной функции внимания с расчетом количественных характеристик ФС и таких его составляющих, как оперативный покой, утомление и психоэмоциональное напряжение [6, с. 89; 14, с. 254–302; 16, с. 88; 17, с. 28].

Выбор математического аппарата исследований сопровождался активным использованием методов разведочного анализа, в ходе которого было установлено, что задачи оценки ФС и его составляющих решаются в условиях нечеткой структуры данных с неопределенными границами пересечений исследуемых классов функциональных состояний. В таких условиях в работах [10, с. 112; 18, с. 246–290] рекомендуется использовать методологию синтеза гибридных нечетких решающих правил (МСГНРП), разработанную на кафедре биомедицинской инженерии Юго-Западного государственного университета, которая хорошо зарекомендовала себя при решении задач оценки ФС и его составляющих по показателям внимания, энергетического разбаланса биологически активных точек, по тестам личной и ситуативной тревожности и др.

Материалы и методы

В работе [15, с. 56] для контроля состояния блоков оперативной памяти предлагается использовать методики поиска сигнала в шуме (ПСШ), опознания (ОП), полного воспроизведения (ПВВ), определения отсутствующей цифры (ООЦ) и оценки объема памяти (ОБП). В этой же работе приведено подробное описание этих методик и условий их применения.

Для реализации этих методик на кафедре БМИ ЮЗГУ был разработан прибор контроля свойств функции внимания и памяти (ПВП) на базе планшетного компьютера с сенсорным экраном и программой распознавания словесных реакций испытуемого с оценкой правильности этих реакций. Этот прибор позволяет реализовывать все перечисленные методики оценки блоков оперативной памяти и такие свойства внимания, как концентрированность, объем, селективность, переключаемость, распределяемость и устойчивость [6, с. 89, 14, с. 254–270; 16, с. 88; 17, с. 28]. Дополнительное исследование свойств внимания при оценке состояния когнитивной функции памяти связано с тем, что показатели, характеризующие состояние внимания, позволяют учитывать совместное проявление этих двух когнитивных функций, не дифференцируя их проявления. Кроме того, этот прибор позволяет производить количественную оценку таких составляющих ФС, как оперативный покой, утомление и психоэмоциональное напряжение.

Для получения нечетких решающих правил классификации функциональных состояний по показателям, характеризующим состояние оперативной памяти S_j ($j = 1$ для методики оценки ВР, $j = 2$ для ПСШ, $j = 3$ для ОП, $j = 4$ для ПВВ, $j = 5$ для ООЦ, $j = 6$ для ОБП) на первом этапе исследований формировались обучающие выборки.

Для формирования группы людей класса нормы в смысле отсутствия нарушений когнитивной функции памяти рекомендуется использовать хорошо зарекомендовавшие себя эталонные тесты со шкалами T_i (i – номер теста в батарее тестов), ориентируясь на те свойства оперативной памяти, которые подвержены большей нагрузке от участия в конкретной операторской деятельности. В данном исследовании в качестве эталонных тестов T_i были выбраны показатели, характеризующие когнитивную функцию внимания, вычисляемые с помощью прибора ПВП.

В условиях выбранной нечеткой парадигмы для выбора формы и параметров функций принадлежности с базовой переменной T_i привлекаются эксперты, прошедшие подготовку по синтезу гибридных нечетких решающих правил с использованием метода Дельфы, которые необходимую смысловую информацию получают из профессиональной литературы, собственного опыта, и по возможности организуя модельные эксперименты. Количественный и качественный состав экспертной группы определяется с учетом требований квалиметрии и рекомендаций МСГНРП.

На основе информации о свойствах измерительных шкал T_i и их диагностических возможностей каждый из экспертов независимо друг от друга отвечает на следующие вопросы: для каких диапазонов измерительных шкал T_i и с какой уверенностью следует говорить о том, что оперативная память обследуемых находится в норме; для каких диапазонов измерительных шкал T_i и с какой уверенностью можно считать, что уверенность нахождения оперативной памяти в состоянии нормы практически равна нулю или принимает минимальное, но неизменное значение, определяемое существом решаемой задачи; какую форму имеют линии связи между соответствующими минимальными и максимальными уровнями уверенности.

Ответы на эти вопросы позволяют строить графики соответствующих функций принадлежности $\mu_H(T_i)$, которые уточняются под руководством инженера по знаниям по методу Дельфы. Применительно к оценке ФС речь идет о построении функций принадлежности к классу *нормальное функциональное состояние* $\mu_{ФН}(T_i)$. Аналогично могут быть построены функции принадлежности к классам *отклонение от номинального функционального состояния, активация, психоэмоциональное напряжение, утомление и др.*

При переходе от оценки состояния ОП по эталонным шкалам к шкалам S_j могут решаться следующие задачи:

– определение функции принадлежности $\mu_{ФН}(S_j)$ к лингвистической

переменной «нормальное функциональное состояние ОП» для шкал S_j ;

– синтез нечеткой модели оценки уровня соответствия классу нормальное функциональное состояние ОП путем агрегации функций принадлежности $\mu_{\text{ФН}}(S_j)$:

$$YSNF = Ag_{\text{ФН}_j} [\mu_{\text{ФН}}(S_j)], \quad (1)$$

где $Ag_{\text{ФН}_j}$ – агрегатор функций принадлежности $\mu_{\text{ФН}}(S_j)$;

– определение функций принадлежности к лингвистическим переменным, определяющим уровень функционального состояния составляющих характеризующих ОП важных для решения исследуемых классов задач, например, уровня психоэмоционального напряжения $\mu_{\text{YP}}(S_j)$, умственного утомления $\mu_{\text{YU}}(S_j)$ и т. д. для шкал S_j ;

– синтез нечетких моделей оценки уровня функционального состояния важных для решения исследуемых классов задач путем агрегации соответствующих функций принадлежности, например, для оценки уровня психоэмоционального напряжения

$$YP = Ag_{\text{YP}_j} [\mu_{\text{YP}}(S_j)], \quad (2)$$

для оценки уровня утомления

$$YU = Ag_{\text{YU}_j} [\mu_{\text{YU}}(S_j)]. \quad (3)$$

Для решения первой задачи (определение параметров функции принадлежности $\mu_{\text{ФН}}(S_j)$) предлагается следующий алгоритм действий.

Формируется группа испытуемых, которые не имеют нарушений когнитивной функции памяти, но должны находиться в различных функциональных состояниях от функционального покоя до психоэмоционального перенапряжения и умственного переутомления.

Причем возможен вариант, когда люди из состояния покоя различными нагрузочными тестами переводятся в заданные ФС, например, в качестве нагрузочных тестов можно использовать интенсивное и длительное выполнение методик, реализуемых ПВП. Для увеличения эффекта моделирования психоэмоционального напряжения (ПЭН) выбранная методика модифицируется следующим образом. Испытуемому сообщается, что успешное ее выполнение очень важно в его жизнедеятельности и что на экране монитора будет индцироваться то, чего обязательно нужно достичь и каков его результат.

При этом программа работает так, что каков бы ни был результат работы испытуемого, на экране он видит, что он не достигает заданной цели, создавая предпосылки для возникновения ПЭН. Уровень ПЭН и утомления при этом легко контролируется по параметрам переключаемости, концентрированности и устойчивости с использованием моделей, описанных в работах [14, с. 258–270; 16, с. 88; 17, с. 28]. В этих работах была получена функция принадлежности к классу нормальное функциональное состояние $\mu_{\text{ФН}}(Z)$:

$$\mu_{\text{ФН}}(Z) = \begin{cases} 1, & \text{если } z \leq 20, \\ 1 - 0,00031(z - 20)^2, & \text{если } 20 < z < 60, \\ 0,00031(z - 100)^2, & \text{если } 60 \leq z < 100, \\ 0, & \text{если } z \geq 100, \end{cases} \quad (4)$$

где $Z = |Y1| + |Y2|$; $Y1 = (ПВ - ПВ_0) + (KB - KB_0)$; $Y2 = UB - UB_0$; $ПВ$, $ПВ_0$ – текущая переключаемость внимания и переключаемость внимания, измеренная в состоянии спокойного бодрствования; KB , KB_0 – соответствующие показатели концентрирования внимания; UB , UB_0 – соответствующие показатели устойчивости внимания.

У людей, находящихся в различных ФС, вычисляются значения $\mu_{\text{ФН}}(Z)$ (модель 4) и измеряются значения S_j , т. е. каждый обследуемый описывается парой $\{\mu_{\text{ФН}}(Z); S_j\}$. По этой паре определение

параметров функции принадлежности $\mu_{\text{ФН}}(S_j)$ предлагается производить в графической форме с использованием в качестве оси абсцисс шкалы S_j , которая разбивается на интервалы ΔS_j , определяемые аналогично тому, как это делается при построении гистограмм.

Для обследуемых с номером q , попадающих в интервал с номером k по вычисленным значениям $\mu_{\text{ФНК}}(Z_q)$, определяются средние значения функций принадлежности для лингвистической переменной *нормальное функциональное состояние*:

$$\overline{\mu}_{jk} = \frac{1}{N_k} \sum_{q=1}^{N_k} \mu_{\text{ФНК}}(Z_q). \quad (5)$$

Далее строится график ступенчатой функции, высота «столбика» которой для интервала k равна $\overline{\mu}_{jk}$, пример такого графика приведен ниже (рис. 1).

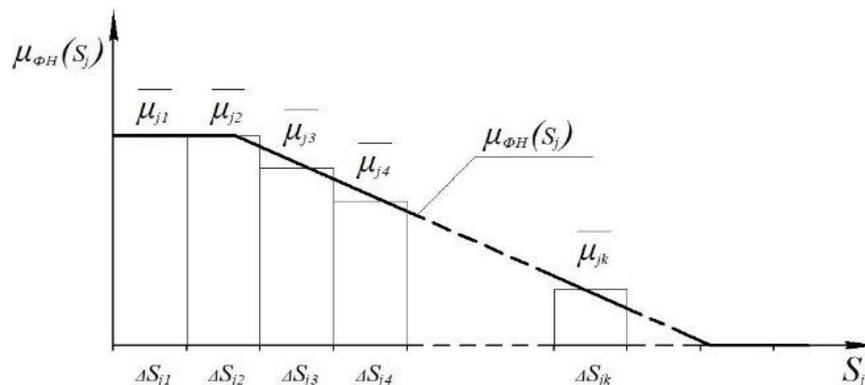


Рис. 1. Пример графика усредненных значений для лингвистической переменной «нормальное функциональное состояние»

Fig. 1. An example of a graph of averaged values for the linguistic variable "normal functional state"

Полученный график ступенчатой функции служит основой для

построения искомой функции принадлежности $\mu_{\text{ФН}}(S_j)$ при использовании

тех же рекомендаций, которые в рамках МСГНРП используют для построения функций принадлежности по признаковым и дистальным гистограммам.

На рисунке 1 жирной линией показан вариант функции принадлежности $\mu_{\text{ФН}}(S_j)$, построенной экспертами с их ориентацией на форму ступенчатой функции $\overline{\mu_{jk}}$.

Можно воспользоваться и другим формальным подходом – построить регрессионную модель по точкам с координатами $\{S_{jk}^c, \overline{\mu_{jk}}\}$:

$$S_{jk}^c = \frac{(S_{jk}^e - S_{jk}^h)}{2}, \quad (6)$$

где S_{jk}^e, S_{jk}^h – верхняя и нижняя границы k -го интервала ($k = 1, \dots, K$).

Функцию принадлежности $\mu_{\text{ФО}}(S_i)$ к лингвистической переменной «отклонение функционального состояния исследуемой характеристики S_j , определяющей состояние ОП от нормы» удобно определять как обратную по отношению к функции принадлежности $\mu_{\text{ФН}}(S_j)$:

$$\mu_{\text{ФО}}(S_i) = \mu_{\text{ФН}}^{\max}(S_i) - \mu_{\text{ФН}}(S_i), \quad (7)$$

где $\mu_{\text{ФН}}^{\max}(S_i)$ – максимальное значение $\mu_{\text{ФН}}(S_j)$ (в пределе единица).

Вторую задачу синтеза нечеткой модели оценки уровня соответствия классу *нормальное функциональное состояние (НФС) ОП* с использованием модели (1) будем рассматривать как синтез модели

оценки уверенности в классе НФС по набору шкал, характеризующих состояние ОП.

Исходными данными для решения этой задачи являются функции принадлежности $\mu_{\text{ФН}}(S_j)$, полученные при решении первой задачи. При этом показатели S_j по отношению к решаемой задаче следует рассматривать как многомерное пространство признаков, для которого определяется состав информативных признаков.

С учетом нечеткой природы используемых данных для оценки информативной ценности измерительных шкал S_j рекомендуется выбрать метод, описанный в работе [19, с. 90].

Полученные оценки информативности служат основанием для включения показателей S_j в модель (1). Функции агрегации модели (1) определяются экспертами в соответствии с рекомендациями МСГНРП по следующим правилам.

Если добавление функций принадлежности $\mu_{\text{ФН}}(S_j)$ для отобранных информативных показателей S_j увеличивает значение оценки уровня соответствия классу *нормальное функциональное состояние ОП*, то выбирается агрегатор типа:

$$YSNF(j+1) = YSNF(j) + \mu_{\text{ФН}}(S_{j+1})[1 - YSNF(j)]. \quad (8)$$

Если эксперты считают, что оценка уровня соответствия классу *нормальное функциональное состояние ОП* должна осуществляться по показателю с

максимальным значением $\mu_{\Phi H}(S_j)$, т. е. по той характеристике оперативной памяти, которая на момент регистрации имеет наилучшее функциональное состояние, то выбирается агрегатор типа

$$YSNF = \max_j [\mu_{\Phi H}(S_j)]. \quad (9)$$

Если оценка уровня соответствия классу *нормальное функциональное состояние ОП* осуществляется по той характеристике оперативной памяти, которая на момент регистрации имеет наихудшее функциональное состояние, то выбирается агрегатор типа

$$YSNF = \min_j [\mu_{\Phi H}(S_j)]. \quad (10)$$

Если эксперты считают, что характеристики оперативной памяти, включенные в интегральную оценку уровня соответствия классу *нормальное функциональное состояние ОП*, вносят различный «вклад» в показатель $YSNF$, то рекомендуется использовать агрегатор типа

$$YSNF = \frac{\sum_{j=1}^N \alpha_j \cdot \mu_{\Phi H}(S_j)}{\sum_{j=1}^N \alpha_j}, \quad (11)$$

где α_j – весовые коэффициенты, определяемые экспертами с учетом информативности показателей S_j и (или) типов решаемых задач.

Оценку уверенности в том, что испытуемый находится в классе *отклонение функционального состояния от нормы* $YSOF$, удобно определять как обратную по отношению к $YSNF$ функцию:

$$YSOF = YSNF_{\max} - YSNF. \quad (12)$$

где $YSNF_{\max}$ – максимальное значение $YSNF$ (в пределе единица).

Если у экспертов возникают сложности по выбору параметров функций принадлежности и функций агрегации, то следует сформировать обучающие выборки из обследуемых, находящихся в искомым функциональных состояниях (как минимум в двух классах НФС и отклонение ФС от нормы (ОФС)). С использованием эталонных тестов со шкалами T_i обучающие выборки разделяются на таблицы экспериментальных данных (ТЭД) по выбранным классам функциональных состояний, например, ТЭД для класса $\omega_{\text{НФ}}$ – нормальное ФС и ТЭД для класса $\omega_{\text{ОФ}}$ – ФС имеет отклонение от нормы.

В полученных ТЭД показатели S_j рассматриваются как информативные признаки в классической постановке задач теории распознавания образов.

По ТЭД синтез решающих правил отнесения объектов к классам $\omega_{\text{НФ}}$ и $\omega_{\text{ОФ}}$ может осуществляться как классическими методами теории распознавания образов, включая искусственные нейронные сети, так и с использованием МСГНРП. В случае применения МСГНРП на первом этапе синтеза рекомендуется использовать разведочный анализ, ориентированный на нечеткое описание данных, позволяющий не только произвести анализ структуры данных, но и сформировать рекомендации по выбору параметров функций

принадлежности и видов функций агрегации [10, с. 114; 14, с. 260–264; 20, с. 18].

При решении третьей задачи по определению функций принадлежности к лингвистическим переменным, определяющим уровень функционального состояния составляющих, характеризующих ОП на первом этапе, эксперты выбирают соответствующие эталонные тесты со шкалами T_i .

В специальной литературе можно найти достаточный арсенал тестов по диагностике функциональных состояний.

Четвертая задача синтеза нечетких моделей оценки уровня функционального состояния важных для решения исследуемых классов задач осуществляется аналогично решению второй задачи путем агрегации соответствующих функций принадлежности, но в качестве исходных данных используются функции принадлежности, определяющие уровни психоэмоционального напряжения, умственного утомления и т. д. для шкал S_j . Функции агрегации выбираются по тем же правилам, что и для моделей (8) – (11), или решается классическая задача распознавания образов в пространстве признаков S_j по таблицам экспериментальных данных размеченных по исследуемым классам ФС с помощью эталонных тестов.

Результаты и их обсуждение

В данной работе рассмотрен вариант оценки таких функциональных состояний, как ПЭН и утомление определяемых прибором ПВП по показателям внимания с использованием моделей, описанных в работах [14, с. 268–270; 16, с. 89; 17, с. 29].

В этих работах тестовая (эталонная) оценка уровня ПЭН определяется с использованием нечеткой модели вида

$$FUP = \min[UP(Y1), UP(Y2)] \quad (13)$$

где FUP – функция уровня ПЭН; Y_1 и Y_2 – функции, определяемые так же, как и для модели (4);

$$UP(Y1) = \begin{cases} 0, & \text{если } Y1 < 20, \\ 0,00448(Y1 + 20)^2, & \text{если } -20 \leq Y1 < 10, \\ 0,8 - 0,0044(Y1 - 40)^2, & \text{если } 10 \leq Y1 < 40, \\ 0,8 < & \text{если } Y1 \geq 20; \end{cases}$$

$$UP(Y2) = \begin{cases} 0, & \text{если } Y2 < -20, \\ 0,00448(Y2 + 20)^2, & \text{если } -20 \leq Y2 < 0, \\ 0,8 - 0,001(Y2 - 20)^2, & \text{если } 0 \leq Y2 < 20, \\ 0,8 < & \text{если } Y2 \geq 20. \end{cases}$$

Тестовая функция уровня утомления FUU определяется с использованием нечеткой модели вида

$$FUU = \max \left\{ \min [UU_1(Y1), UU_1(Y2)], \min [UU_2(Y1), UU_2(Y2)] \right\}, \quad (14)$$

$$UP_1(Y1) = \begin{cases} 0,8, & \text{если } Y1 < -60, \\ 0,8 - 0,0044(Y1 + 60)^2, & \text{если } -60 \leq Y1 < -30, \\ 0,0044(Y1 + 30)^2, & \text{если } -30 \leq Y1 < 0, \\ 0, & \text{если } Y1 \geq 0; \end{cases}$$

$$UU_2(Y1) = \begin{cases} 0, & \text{если } Y1 < -10, \\ 0,00044(Y1 + 10)^2, & \text{если } -10 \leq Y1 < 20, \\ 0,8 - 0,00044(Y1 - 50)^2, & \text{если } 20 \leq Y1 < 50, \\ 0,8, & \text{если } Y1 \geq 50; \end{cases}$$

$$UP(Y1) = \begin{cases} 0,8, & \text{если } Y2 < -80, \\ 0,8 - 0,00025(Y2 + 80)^2, & \text{если } -80 \leq Y1 < -40, \\ 0,00025(Y2)^2, & \text{если } -40 \leq Y1 < 0, \\ 0, & \text{если } Y2 \geq 0. \end{cases}$$

Переход от тестовых шкал FUP и FUU к функциям принадлежности, высокий уровень ПЭН $\mu_{WP}(S_j)$ и высокий уровень утомления $\mu_{WU}(S_j)$ с базовыми переменными по шкалам S_j осуществляются в соответствии с первым вариантом предлагаемого способа аналогично решению задачи определения функции принадлежности $\mu_{ФН}(S_j)$ к лингвистической переменной *нормальное функциональное состояние ОП*.

На первом этапе решения этой задачи шкалы S_j разбивается на интервалы ΔS_j , например по правилам, принятым при построении гистограмм.

Далее формируется группа испытуемых, которые не имеют нарушений когнитивной функции памяти, но должны иметь различные уровни ПЭН или утомления, которые могут моделироваться

интенсивным и длительным выполнением методик, реализуемых ПВП, так как это описано для определения $\mu_{ФН}(S_j)$. У людей, имеющих различный уровень ПЭН с использованием модели 13, определяются их показатели FUP и параллельно измеряются значения по выбранным шкалам S_j , т. е. каждый обследуемый описывается парой $\{FUP, S_j\}$. Аналогично для состояния утомления формируются пары $\{FUU, S_j\}$.

Далее аналогично $\mu_{ФН}(S_j)$ строятся графики ступенчатых функций средних значений FUP и FUU для каждого интервала ΔS_j каждого из выбранных показателей S_j , по которым эксперты строят графики соответствующих функций принадлежности.

Рассмотрим пример графика для такого ФС, как утомление (рис. 2).

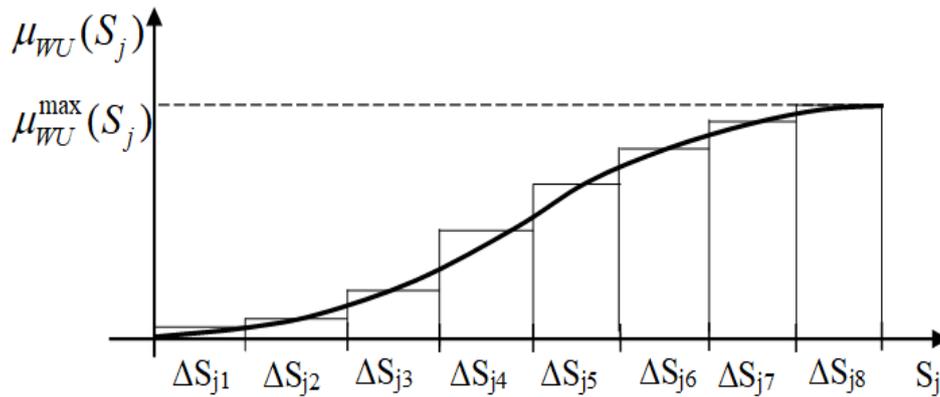


Рис. 2. Пример графика усредненных значений и функции принадлежности к лингвистической переменной высокий уровень утомления ($\mu_{WU}(S_j)$)

Fig. 2. An example of a graph of averaged values and the function of belonging to the linguistic variable high fatigue level ($\mu_{WU}(S_j)$)

Функции принадлежности к лингвистическим переменным *отсутствие утомления* и *ПЭН* определяются как обратная по отношению к ($\mu_{WP}(S_j)$) и ($\mu_{WU}(S_j)$):

$$\mu_{NU}(S_j) = \mu_{WU}^{\max}(S_j) - \mu_{WU}(S_j), \quad (15)$$

$$\mu_{NP}(S_i) = \mu_{WP}^{\max}(S_i) - \mu_{WP}(S_i). \quad (16)$$

Оценивая ФС оперативной памяти, в целом принималось во внимание то, что по данным работы [15, с. 40] методика ПВВ тестирует работу всех основных блоков ОП. С учетом этого на экспертном уровне было принято решение показатель, характеризующий ФС ОП, определять по методике ПВВ. Для получения модели оценки ФС эксперты при построении графика функции принадлежности $\mu_{\text{НФС}}(\text{ПВВ})$ лингвистической

переменной «нормальное функциональное состояние оперативной памяти» (НФС ОП) определяли: максимальное значение и левую координату максимального значения $\mu_{\text{НФС}}(\text{ПВВ})$; минимальное значение и правую координату минимального значения $\mu_{\text{НФС}}(\text{ПВВ})$; форму $\mu_{\text{НФС}}(\text{ПВВ})$ переходного участка между максимальным и минимальным значением. При выборе минимального значения эксперты исходили из того, что у человека, способного выполнять тестовое задание, не может отсутствовать ФС.

Рассмотрим результаты опроса экспертов (табл. 1).

График ФП $\mu_{\text{НФС}}(\text{ПВВ})$, построенный по усредненным данным таблицы 1, приведен ниже (рис. 3).

Таблица 1. Базовые параметры функции принадлежности $\mu_{\text{НФС}}(\text{ПВВ})$ **Table 1.** Basic parameters of the accessory function $\mu_{\text{НФС}}(\text{ПВВ})$

Эксперты	Параметр				
	max ФП	левая граница	min ФП	правая граница	форма кривой
1	1,0	900	0,05	1900	КВ
2	1,0	1200	0,1	2000	ЛГ
3	0,9	1200	0,15	1700	ЛГ
4	1,0	1000	0,1	1700	КВ
5	1,0	950	0,05	1500	КВ
6	1,0	1000	0,1	1800	КВ
7	0,9	900	0,1	2000	ЭК
Среднее	1,0	1000	0,1	1800	КВ

Примечание: Введены следующие обозначения: *ФП* – функция принадлежности; *ЛН* – линейная; *КВ* – квадратичная; *ЛГ* – логарифмическая; *ЭК* – экспоненциальная.

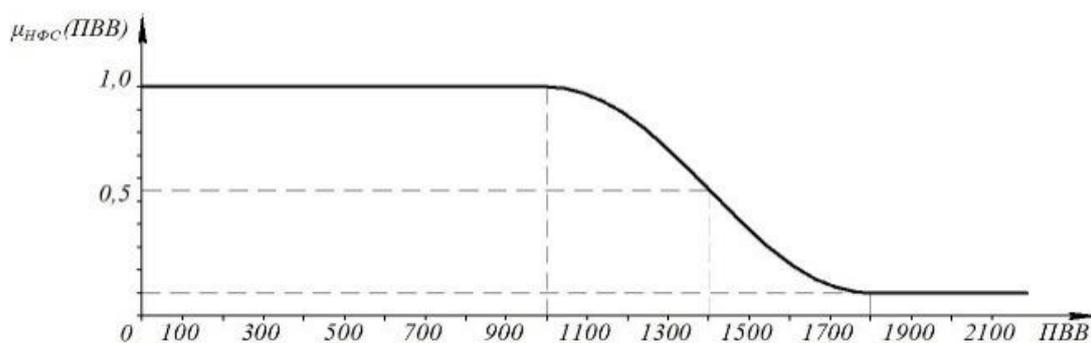
**Рис. 3.** График ФП $\mu_{\text{НФС}}(\text{ПВВ})$ **Fig. 3.** Graph of the membership function $\mu_{\text{НФС}}(\text{FP})$

График функции (рис. 3) описывается выражением

$$\mu_{\text{НФС}}(\text{ПВВ}) = \begin{cases} 1, & \text{если } \text{ПВВ} < 1000, \\ 1 - 0,0000028(\text{ПВВ} - 1000)^2, & \text{если } 1000 \leq \text{ПВВ} < 1400, \\ 1 + 0,0000028(\text{ПВВ} - 1800)^2, & \text{если } 1400 \leq \text{ПВВ} < 1800, \\ 0,1, & \text{если } \text{ПВВ} \geq 1800. \end{cases} \quad (17)$$

С учетом принятых допущений функциональное состояние ОП $FS_{\text{ОП}}$ количественно определяется рассчитанной величиной функции принадлежности $\mu_{\text{НФС}}(\text{ПВВ})$:

$$FS_{\text{ОП}} = \mu_{\text{НФС}}(\text{ПВВ}). \quad (18)$$

Экспертная оценка полученного решающего правила, проводимая по методике, описанной в работах [18, с. 198–214; 19, с. 83], показала уровень доверия

к модели (18) на уровне 0,96. В ходе математического моделирования, проводимого по исходным данным, сформированным экспертами, была получена уверенность на уровне 0,97, что является хорошим результатом для задач оценки ФС с нечетким представлением данных [21; 22; 23].

Выводы

В работе предложен метод синтеза нечетких решающих правил для оценки функционального состояния оперативной памяти по характеристикам её

свойств с использованием методик, полученных по результатам микроструктурного анализа. Получены нечеткие решающие правила для оценки таких характеристик функционального состояния, как уровни утомления, психоэмоционального напряжения и функционального состояния оперативной памяти в целом по методике полного воспроизведения. В ходе экспертного оценивания и математического моделирования было показано, что уверенность в правильной оценке уровня функционального состояния превышает величину 0,95.

Список литературы

1. 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>
2. Поиск ассоциации полиморфизма I/D гена ACE с самооценкой работоспособности, памяти и состоянием сердечно-сосудистой системы у представителей профессионального сообщества лидеров / А. В. Власов, Е. В. Богданенко, Л. П., Кузьмина, А. А. Ёлов // Медицина труда и промышленная экология. 2024. Т. 64, № 2. С. 91–98. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2024-64-2-91-98>
3. Особенности проявления соматических и когнитивных нарушений у лиц юношеского возраста, перенесших COVID-19 / Л. А. Варич, Я. И. Брюханов, А. В. Серый, А. В. Солодухин // Вестник психофизиологии. 2022. № 4. С. 92–99. <https://doi.org/10.34985/f0194-0574-8740-f>
4. Факторная структура функционального состояния у лиц юношеского возраста в период пандемии COVID-19 / А. В. Солодухин, А. В. Серый, Л. А. Варич, Я. И. Брюханов // Сибирский психологический журнал. 2023. № 89. С. 152–163. <https://doi.org/10.17223/17267080/89/9>
5. Анализ когнитивных функций и нейрофизиологических процессов при адаптации человека к условиям арктики / Е. П. Муртазина, И. И. Коробейникова, Л. В. Поскотина, 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. Метод синтеза математических моделей прогнозирования и ранней диагностики нарушений когнитивных функций / Н. А. Корневский, С. Н. Родионова, А. В. Поляков, Т. Н. Говорухина // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2019. Т. 18, № 4. С. 85–92. <https://doi.org/10.25987/VSTU.2020.18.4.011>
7. Малкова А. А., Пустовалова А. Д., Борисова Е. А. Оценка когнитивных функций у пациентов с артериальной гипотонией // Пермский медицинский журнал. 2022. Т. 39, № 4. С. 19–25. <https://doi.org/10.17816/pmj39419%25>
8. Игнатова Ю. П., Макарова И. И., Страхов К. А. Когнитивные вызванные потенциалы: P300 в нейрофизиологии и клинической практике // Крымский журнал экспериментальной и клинической медицины. 2022. Т. 12, № 4. С. 80–91. <https://doi.org/10.29039/2224-6444-2022-12-4-80-91>
9. Мурик С. Э. Оценка функционального состояния организма человека: в 2 ч. Иркутск: Издательство Иркутского государственного университета, 2013. Ч. 1. 159 с.
10. 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>
11. 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.
12. 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.
13. 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>
14. Корневский Н. А., Шуткин А. Н., Горбатенко С. А., Серебровский В. И. Оценка и управление состоянием здоровья обучающихся на основе гибридных интеллектуальных технологий: монография. Старый Оскол: ТНТ, 2020. 472 с.
15. Зинченко В. П., Леонова А. Б., Стрелков Ю. К. Психометрика утомления. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1977. 109 с.
16. 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>

17. An expert system for assessment of the state of cognitive functions using a fuzzy hybrid knowledge base / N. A. Korenevskiy, S. N. Rodionova, V. V. Aksenov, N. L. Korzhuk // Biomedical Engineering. 2021. Vol. 55, N 4. P. 263–268

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. 2022. № 3. С. 80–96. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-3-80-96>

20. Prediction of operators cognitive degradation and impairment using hybrid fuzzy modelling / N. A. Korenevskiy, Riad Taha Al-Kasasbeh, Fawaz Al-Shawawreh, Tareq Ahram, S. N. Rodionova, S. Mahdi, S. A. Filist, M. Namazov, A. Shaqadan, M. Ilyash // Theoretical Issues in Ergonomics Science. 2022. N 24(2). P. 1–26. <https://doi.org/10.1080/1463922X.2022.2086645>

21. Булгакова О. С. Динамика некоторых свойств мышления и образной и слуховой видов памяти в фоне и после функциональной нагрузки // Мир науки. Педагогика и психология. 2023. Т. 11, № 6. С. 1–13.

22. Апробация методики оценки психофизиологического состояния оператора при виртуализации рабочего информационного пространства / И. В. Тарасова, М. С. Никитенко, О. А. Трубникова, И. Н. Кухарева, Д. С. Куприянова, А. С. Соснина, О. Л. Барбараш // Фундаментальная и клиническая медицина. 2021. Т. 6, № 2. С. 66–74. <https://doi.org/10.23946/2500-0764-2021-6-2-66-74>

23. Лисова Н. А., Черенева Е. А., Шилов С. Н. Взаимосвязь уровня нейрометаболизма со степенью когнитивного дефицита у пожилых людей // Психология. Психофизиология. 2022. Т. 15, № 4. С. 84–93.

References

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

2. Vlasov A.V., Bogdanenko E.V., Kuz'mina L.P., Elov A.A. Search for an association of the I/D polymorphism of the ACE gene with self-assessment of performance, memory and the state of the cardiovascular system among representatives of the professional community of

leaders. *Meditsina truda i promyshlennaya ehkologiya = Russian Journal of Occupational Health and Industrial Ecology*. 2024;64(2):91–98. (In Russ.) <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2024-64-2-91-98>

3. Varich L.A., Bryukhanov Y.I., Seryi A.V., Solodukhin A.V. Features of the manifestation of somatic and cognitive disorders in adolescents who have had COVID-19. *Vestnik psikhofiziologii = Psychophysiology News*. 2022;(4):92–99. (In Russ.) <https://doi.org/10.34985/f0194-0574-8740-f>

4. Solodukhin A.V., Seryi A.V., Varich L.A., Bryukhanov Y.I. Factor of the functional state stream in young people during the COVID-19 pandemic. *Sibirskii psikhologicheskii zhurnal = Siberian Journal of Psychology*. 2023;(89):152–163. (In Russ.) <https://doi.org/10.17223/17267080/89/9>

5. Murtazina E.P., Korobeinikova I.I., Poskotinova L.V., Karatygin N.A., Pertsov S.S. Analysis of cognitive functions and neurophysiological processes during human adaptation to Arctic conditions. *Rossiiskii mediko-biologicheskii vestnik imeni akademika I. P. Pavlova = I. P. Pavlov Russian Medical Biological Herald*. 2023;31(2):293–304. (In Russ.) <https://doi.org/10.17816/PAVLOVJ109581>

6. Korenevskii N.A., Rodionova S.N., Polyakov A.V., Govorukhina T.N. Method for synthesizing mathematical models for forecasting and early diagnosis of cognitive impairment. *Sistemnyi analiz i upravlenie v biomeditsinskikh sistemakh = System Analysis and Management in Biomedical Systems*. 2019;18(4):85–92. (In Russ.) <https://doi.org/10.25987/VSTU.2020.18.4.011>

7. Malkova A.A., Pustovalova A.D., Borisova E.A. Assessment of cognitive functions in patients with arterial hypotension. *Permskii meditsinskii zhurnal = Perm Medical Journal*. 2022;39(4):19–25. (In Russ.) <https://doi.org/10.17816/pmj39419%25>

8. Ignatova Y.P., Makarova I.I., Strakhov K.A. Cognitive evoked potentials: P300 in neurophysiology and clinical practice. *Krymskii zhurnal ehksperimental'noi i klinicheskoi meditsiny = Crimean Journal of Experimental and Clinical Medicine*. 2022;12(4):80–91. (In Russ.) <https://doi.org/10.29039/2224-6444-2022-12-4-80-91>

9. Murik S.E. Assessment of the functional state of the human body. Pt. 1. Irkutsk: Izdatel'stvo IGU; 2013. 159 p. (In Russ.)

10. Govorukhina T.N., Myasoedova M.A., Grigorov I.Y., Polyakov A.V. Mathematical models for prediction and early diagnosis of nervous system diseases provoked by the combined influence of diverse risk factors. *Sistemnyi Analiz i upravlenie v biomeditsinskikh sistemakh = Systems Analysis and Management in Biomedical Systems*. 2019;18(2):110–116. (In Russ.) <https://doi.org/10.25987/VSTU.2019.18.2.022>

11. Brumshtein Y.M., Molimonov D.A. Models, methods, technical means of risk management for the design, creation and operation of complex human-machine systems, taking into account the psychophysiological characteristics of human operators. *Prikaspiiskii*

zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii = Caspian Journal: Control and High Technologies. 2019;(3):143–162. (In Russ.)

12. Matel' V.A. Shishlyannikova O.A. Man-machine system and analysis, and the influence of environmental factors on the productivity and health of workers. *Rossiiskii ekonomicheskii vestnik = Russian Economic Bulletin*. 2023;6(2):58–63. (In Russ.)

13. Brumshtein Y.M. Molimonov D.A. Mathematical models and methods for solving problems of information support, management and assessment of the quality of work of operators in complex human-machine systems. *Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. Seriâ: Upravlenie, vyčislitel'naâ tehnika i informatika = Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics*. 2019;(3):73–89. (In Russ.) <https://doi.org/10.24143/2072-9502-2019-3-73-89>

14. Korenevsky N.A., Shutkin A.N., Gorbatenko S.A., Serebrovsky V.I. Assessment and management of the health status of students based on hybrid intelligent technologies. Saryi Oskol: TNT; 2020. 472 p.

15. Zinchenko V.P., Leonova A.B., Strelkov Y.K. Psychometrics of fatigue. Moscow: Izdatel'stvo Moskovskogo universiteta; 1977. 109 p. (In Russ.)

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

17. Korenevskiy N.A., Rodionova S.N., Aksenov V.V., Korzhuk N.L. An expert system for assessment of the state of cognitive functions using a fuzzy hybrid knowledge base. *Bio-medical engineering*. 2021;55(4):263–268.

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

19. Korenevskii N.A., Aksenov V.V., Rodionova S.N., Gontarev S.N., Lazurina L.P., Safonov R.I. Method for a comprehensive assessment of the level of information content of classification features in conditions of a fuzzy data structure. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya upravlenie, vychislitel'naya tehnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2022;(3):80–96. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-3-80-96>

20. Korenevskiy N.A., Riad Taha Al-Kasasbeh, Fawaz Al-Shawawreh, Tareq Ahram, Rodionova S.N., Mahdi Salman, Filist S.A., Namazov M., Shaqadan A., Ilyash M. Prediction of operators cognitive degradation and impairment using hybrid fuzzy modelling. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*. 2022;(24):1–26. <https://doi.org/10.1080/1463922X.2022.2086645>

21. Bulgakova O.S. Dynamics of some properties of thinking and figurative and auditory types of memory in the background and after functional load. *Mir nauki. Pedagogika i psikhologiya = World of Science. Pedagogy and Psychology*. 2023;11(6):1–13. (In Russ.)

22. Tarasova I.V., Nikitenko M.S., Trubnikova O.A., Kukhareva I.N., Kupriyanova D.S., Sosnina A.S., Barbarash O. Approbation of a methodology for assessing the psychophysiological state of the operator during virtualization of the working information space. *Fundamental'naya i klinicheskaya meditsina = Fundamental and Clinical Medicine*. 2021;6(2):66–74. (In Russ.) <https://doi.org/10.23946/2500-0764-2021-6-2-66-74>

23. Lisova N.A., Chereueva E.A., Shilov S.N. Relationship between the level of neurometabolism and the degree of cognitive deficit in older people. *Psikhologiya. Psikhofiziologiya = Psychology. Psychophysiology*. 2022;15(4):84–93. (In Russ.) <http://dspace.susu.ru/xmlui/handle/00001.74/51076>

Информация об авторах / Information about the Authors

Рыбаков Антон Юрьевич, аспирант кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Anton Y. Rybakov, Post-Graduate Student of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

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

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

Разумова Ксения Викторовна, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: myelectronworld@mail.ru, ORCID: 0009-0007-7942-8083

Ksenia V. Razumova, Candidate of Sciences (Engineering), Senior Lecturer of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation e-mail: myelectronworld@mail.ru, ORCID: 0009-0007-7942-8083

Милостная Наталья Анатольевна, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник кафедры программной инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: nat_mil@mail.ru, ORCID: 0000-0002-3779-9165, Scopus ID: 57191472450, WOS ID: O-3596-2015

Коржук Николай Львович, кандидат технических наук, доцент кафедры приборов и биотехнических систем, Тульский государственный университет, г. Тула, Российская Федерация, e-mail: nikolaikorzhuk@mail.ru, ORCID: 0009-0009-1738-8914, Scopus ID: 24802282500

Natalia A. Milostnaya, Doctor of Sciences (Engineering), Leading Researcher of the Department of Software Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation e-mail: nat_mil@mail.ru, ORCID: 0000-0002-3779-9165, Scopus ID: 57191472450, WOS ID: O-3596-2015

Nikolay L. Korzhuk, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor of the Department of Devices and Biotechnical Systems, Tula State University, Tula, Russian Federation, e-mail: nikolaikorzhuk@mail.ru, ORCID: 0009-0009-1738-8914, Scopus ID: 24802282500