

УДК 616-005.4

Н.А. Кореневский¹, А.В. Быков¹, Е.В. Цымбал², В.В. Аксёнов¹,
Д.С. Родионов¹

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И РЕЦИДИВА ИНСУЛЬТОВ ГОЛОВНОГО МОЗГА НА ОСНОВЕ ГИБРИДНЫХ НЕЧЕТКИХ МОДЕЛЕЙ

¹ ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»

² ФГБУ «3 Центральный военный клинический госпиталь им. А.А.
Вишневского»

Работа посвящена актуальной проблеме повышения качества и оперативности прогнозирования возникновения и рецидивов инсульта головного мозга за счет использования методологии синтеза гибридных нечетких математических моделей, разработанной на кафедре биомедицинской инженерии Юго-Западного государственного университета. В ходе проведенных исследований было сформировано пространство информативных признаков, объединенных в три подгруппы: данные опросов и осмотров; инструментальные методы исследования; ультразвуковая доплерография (всего 27 признаков). В соответствии с общей методологией синтеза гибридных нечетких решающих правил используя информативные признаки как базовые переменные в интерактивном режиме получены соответствующие функции принадлежности к классам высокий риск возникновения и рецидивов инсульта головного мозга по которым, с использованием модифицированных моделей Е. Шортлифа, синтезированы финальные прогностические модели. В результате экспертного оценивания и математического моделирования было показано, что полученные модели возникновения и рецидивов инсульта головного мозга обеспечивают уверенность в правильном прогнозе на уровне 0,9 и выше в зависимости от количества и качества информации собираемой о состоянии пациента. Этот показатель качества был подтвержден в ходе статистических испытаний на репрезентативных контрольных выборках, что позволяет рекомендовать их для использования в практике сосудистых хирургов и врачей ангиологов.

Ключевые слова: инсульт головного мозга, функции принадлежности, уверенность в принимаемом решении, прогноз.

Введение

Инсульты, или острые нарушения мозгового кровообращения (ОНМК) стоят на втором месте в общем количестве летальных исходов, после инфаркта миокарда. Обширный инсульт поражает значительные участки мозга и имеет тяжелые последствия - пожизненную инвалидность или гибель больного. Ситуация усугубляется частыми рецидивами (до 40 % переболевших).

Одним из возможных вариантов борьбы с этим заболеванием являются своевременные прогнозы возникновения и рецидивов инсультов головного мозга с использованием современных математических методов, информационных и интеллектуальных технологий.

В медицинской практике находят применение множество математических методов прогнозирования, диагностики и принятия решений по управлению состоянием здоровья [1, 2, 9, 13, 16, 17, 25, 27, 29, 31, 32, 33].

Следует отметить, что большинство задач прогнозирования заболеваний, включая мозговые инсульты, относят к классу плохоформализуемых не имеющих четких границ между здоровьем и прогнозируемой болезнью [5, 6, 9, 12, 13, 18, 19, 22, 26, 28]. Опыт кафедры биомедицинской инженерии ЮЗГУ показывает, что в таких случаях целесообразно использование методологии синтеза гибридных нечетких решающих правил, описанных в работах [6, 7, 8, 12, 13, 15, 16, 17, 19, 20, 21, 22].

На первом этапе этого синтеза с привлечением методов разведочного анализа под руководством инженера по знаниям эксперты формируют пространство информативных признаков [6, 7, 12, 15, 19, 20].

Известно, что к наиболее информативным признакам по отношению к мозговым инсультам относят длительно протекающую гипертонию и атеросклероз, однако часто инсульты возникают и без длительной гипертонии.

Материал и методы

Проведенный разведочный анализ показал, что в задачах прогнозирования возникновения и рецидивов инсульта головного мозга при отсутствии признака «наличие в анамнезе длительной гипертонии» увеличивается «классификационная неопределенность». Учитывая важность прогностической задачи при отсутствии названного признака эксперты пользуясь рекомендациями [1] и собственным опытом, выбрали следующий состав прогностических признаков, объединяемый со способом получения.

Данные опросов и осмотров, сопутствующие болезни, условия жизни и труда (X1 - атеросклероз сосудов головного мозга; X2 – проходящие нарушения мозгового кровообращения; ... ; X17 – напряженный умственный труд).

Инструментальные методы исследования (X18 – по данным ЭКГ значительные изменения; X19 – по данным ЭКГ мерцательная аритмия пароксизмальная тахикардия, инфаркт миокарда; ... ; X23 – уровень психоэмоционального напряжения; X24 – уровень хронического утомления, определяемый по показателям внимания).

Методами доплеровских ультразвуковых исследований определяются:

X25 – пиковая систолическая скорость кровотока ВСА;

X26 - пиковая систолическая скорость кровотока ПА;

X27 - пиковая систолическая скорость кровотока СМА.

Комбинированным способом по данным лабораторных и инструментальных средств исследований определяется признак X28 – уровень защитных механизмов организма по отношению к инсульту головного мозга.

На втором этапе исследования в соответствии с рекомендациями [6,7,8,12] по каждому из выбранных признаков строятся две группы функций принадлежности: к классу $\Omega_{ви}$ - высокий риск возникновения инсультов; к классу $\Omega_{ри}$ - высокий риск рецидива инсультов.

Признаки

$X_3, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8, X_9, X_{10}, X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{14}, X_{16}, X_{17}, X_{18}, X_{19}, X_{20}$ носят двоичный характер. Для них функция принадлежности описывается выражениями

$$\mu_{\omega_{ви}}(x_i) = \begin{cases} 0, & \text{если признак отсутствует;} \\ a_i, & \text{если признак присутствует.} \end{cases}$$

$$\mu_{\omega_{ри}}(x_i) = \begin{cases} 0, & \text{если признак отсутствует;} \\ b_i, & \text{если признак присутствует.} \end{cases}$$

В соответствии с рекомендациями [6, 7, 12, 13, 19] получены следующие величины коэффициентов уверенности в принимаемых решениях по классам $\Omega_{ви}$ и $\Omega_{ри}$:

$$a_3 = 0,25; a_4 = 0,1; a_5 = 0,2; a_6 = 0,2; a_7 = 0,1; a_8 = 0,3; a_9 = 0,3;$$

$$a_{10} = 0,2; a_{11} = 0,25; a_{12} = 0,2; a_{13} = 0,1; a_{14} = 0,3; a_{16} = 0,2;$$

$$a_{17} = 0,2; a_{18} = 0,1; a_{19} = 0,3; a_{20} = 0,2.$$

$$b_3 = 0,3; b_4 = 0,15; b_5 = 0,25; b_6 = 0,25; b_7 = 0,15; b_8 = 0,35; \\ b_9 = 0,35; b_{10} = 0,25; b_{11} = 0,3; b_{12} = 0,25; b_{13} = 0,15; b_{14} = 0,35; \\ b_{16} = 0,25; b_{17} = 0,25; b_{18} = 0,15; b_{19} = 0,35; b_{20} = 0,25.$$

Признак x_1 кодируется тремя градациями с функциями принадлежности вида:

$$\mu_{\omega_{ви}}(x_1) = \begin{cases} 0,1, \text{ если } C_1; \\ 0,2, \text{ если } C_2; \\ 0,4, \text{ если } C_3. \end{cases} \quad \mu_{\omega_{при}}(x_1) = \begin{cases} 0,15, \text{ если } C_1; \\ 0,25, \text{ если } C_2; \\ 0,45, \text{ если } C_3. \end{cases},$$

где C_1 – неврастеноподобные явления, постоянное головокружение, снижение памяти на текущие события; C_2 – почти постоянный шум в голове, головокружение, плаксивость, вязкость мышления, снижение критики; C_3 – грубые нарушения памяти, повторные церебральные кризы, деменция.

Признак x_2 определяется двумя градациями:

$$\mu_{\omega_{ви}}(x_2) = \begin{cases} 0,2, \text{ если } d_1; \\ 0,3, \text{ если } d_2. \end{cases} \quad \mu_{\omega_{при}}(x_2) = \begin{cases} 0,25, \text{ если } d_1; \\ 0,35, \text{ если } d_2. \end{cases},$$

где d_1 - вертебрально-базилярный; d_2 - каротидный.

Признак x_{15} определяется функциями принадлежности вида

$$\mu_{\omega_{ви}}(x_{15}) = \begin{cases} 0,2, \text{ если } g_1; \\ 0,25, \text{ если } g_2. \end{cases} \quad \mu_{\omega_{при}}(x_{15}) = \begin{cases} 0,25, \text{ если } g_1; \\ 0,3, \text{ если } g_2. \end{cases},$$

где g_1 – избыток веса на $1/3, \dots, 1/2$; g_2 – избыток веса более $1/2$.

Прогностическая роль признака X_{22} определяется в соответствии с рекомендациями.

Анализ атласов меридиан показал, что с нарушениями мозгового кровообращения связаны точки С9, VB21, Е39, МС9 и TR10 [23], причем точки МС9 и TR10 связывают с предынсультным состоянием. С учетом этого для класса $\omega_{ви}$ в качестве информативных были выбраны все перечисленные точки, а для класса $\omega_{при}$ без двух последних БАТ.

Методы синтеза комбинированных нечетких математических моделей по энергетическим характеристикам БАТ описаны в работах [3, 4,

10, 18, 26, 28]. Пользуясь этими рекомендациями, для класса $\omega_{\text{ВИ}}$ было получено правило определения уверенности в риске возникновения инсульта вида:

$$\text{ЕСЛИ}(\delta R_{\text{MC9}} \text{ и } \delta R_{\text{TR10}}) \geq 10\% , \text{ ТО} \\
 \{U_{\text{ВИ}}(j+1) = U_{\text{ВИ}}(j) + \mu_{\omega_{\text{ВИ}}}(\delta R_{j+1})[1 - U_{\text{ВИ}}(j)]\} \quad (1)$$

ИНАЧЕ ($U_{\text{ВИ}} = 0$),

где δR_j - относительные отклонения сопротивления R_j от своего номинального значения в процентах; $j = \text{MC9, TR10; C9, VB21, R6, E39}$;
 $U_{\text{ВИ}}(1) = \mu_{\omega_{\text{ВИ}}}(\delta R_{\text{MC9}})$;

$$\mu_{\omega_{\text{ВИ}}}(\delta R_{\text{MC9}}) = \begin{cases} 0 & , \text{при } \delta R_{\text{MC9}} < 10\% \\ 0,00375\delta R_{\text{MC9}} - 0,0375 & , \text{при } 10\% \leq \delta R_{\text{MC9}} < 50\% \\ 0,15 & , \text{при } \delta R_{\text{MC9}} \geq 50\% \end{cases}$$

$$\mu_{\omega_{\text{ВИ}}}(\delta R_{\text{TR10}}) = \begin{cases} 0 & , \text{при } \delta R_{\text{TR10}} < 10\% \\ 0,00375\delta R_{\text{TR10}} - 0,0375 & , \text{при } 10\% \leq \delta R_{\text{TR10}} < 50\% \\ 0,15 & , \text{при } \delta R_{\text{TR10}} \geq 50\% \end{cases}$$

$$\mu_{\omega_{\text{ВИ}}}(\delta R_{\text{C9}}) = \begin{cases} 0 & , \text{при } \delta R_{\text{C9}} < 10\% \\ 0,005\delta R_{\text{C9}} - 0,05 & , \text{при } 10\% \leq \delta R_{\text{C9}} < 40\% \\ 0,15 & , \text{при } \delta R_{\text{C9}} \geq 40\% \end{cases}$$

$$\mu_{\omega_{\text{ВИ}}}(\delta R_{\text{VB21}}) = \begin{cases} 0 & , \text{при } \delta R_{\text{VB21}} < 10\% \\ 0,0025\delta R_{\text{VB21}} - 0,025 & , \text{при } 10\% \leq \delta R_{\text{VB21}} < 50\% \\ 0,1 & , \text{при } \delta R_{\text{VB21}} \geq 50\% \end{cases}$$

$$\mu_{\omega_{\text{ВИ}}}(\delta R_{\text{R6}}) = \begin{cases} 0 & , \text{при } \delta R_{\text{R6}} < 10\% \\ 0,001\delta R_{\text{R6}} - 0,01 & , \text{при } 10\% \leq \delta R_{\text{R6}} < 60\% \\ 0,1 & , \text{при } \delta R_{\text{R6}} \geq 60\% \end{cases}$$

$$\mu_{\omega_{\text{ви}}}(\delta R_{\text{E39}}) = \begin{cases} 0 & , \text{при } \delta R_{\text{E39}} < 10\% \\ 0,00125\delta R_{\text{E39}} - 0,0125 & , \text{при } 10\% \leq \delta R_{\text{E39}} < 50\% \\ 0,1 & , \text{при } \delta R_{\text{E39}} \geq 50\% \end{cases}$$

По всей группе БАТ

$$\mu_{\omega_{\text{ви}}}(x_{22}) = U_{\text{ви}} \quad (2)$$

Для класса $\omega_{\text{ри}}$ гибридное нечетное решающее правило имеет вид:

ЕСЛИ $(\delta R_{\text{C9}}$ и $\delta R_{\text{VB21}}) > 10\%$, ТО

$$\{U_{\text{ри}}(j+1) = U_{\text{ри}}(j) + \mu_{\omega_{\text{ри}}}(\delta R_{j+1})[1 - U_{\text{ри}}(j)]\} \quad (3)$$

ИНАЧЕ ($U_{\text{ри}} = 0$), где $j = \text{C9, VB21, R}_{\text{E39}}$; $U_{\text{ри}}(1) = \mu_{\omega_{\text{ри}}}(\delta R_{\text{C9}})$.

При $\mu_{\omega_{\text{ви}}}(\delta R_j) = \mu_{\omega_{\text{ри}}}(\delta R_j)$, то $\mu_{\text{ри}}(x_{22}) = 1,3U_{\text{ри}}$ (4)

Уровни психоэмоционального напряжения (ПЭН) ($Y_P = X_{23}$) и утомления ($Y_U = X_{24}$) определяются по методикам достаточно подробно представлены в работах [11, 14, 19, 24, 30].

В соответствии с выражениями:

$$Y_P = f_P(PB, PB, PT); \quad (5)$$

$$Y_U = f_U(UB, UB, UT), \quad (6)$$

где pB, tB – уровни ПЭН и утомления определяемые по показателям внимания: PB, UB – по энергетическому разбалансу БАТ; PT, UT – по компьютерным тестовым методикам; f_P, f_U – соответствующие функциональные зависимости.

Графики функций принадлежности к классу $\mu_{\text{ви}}$ с базовыми переменными $X_{23} = Y_P$ и $X_{24} = Y_U$ приведены на Рисунке 1:

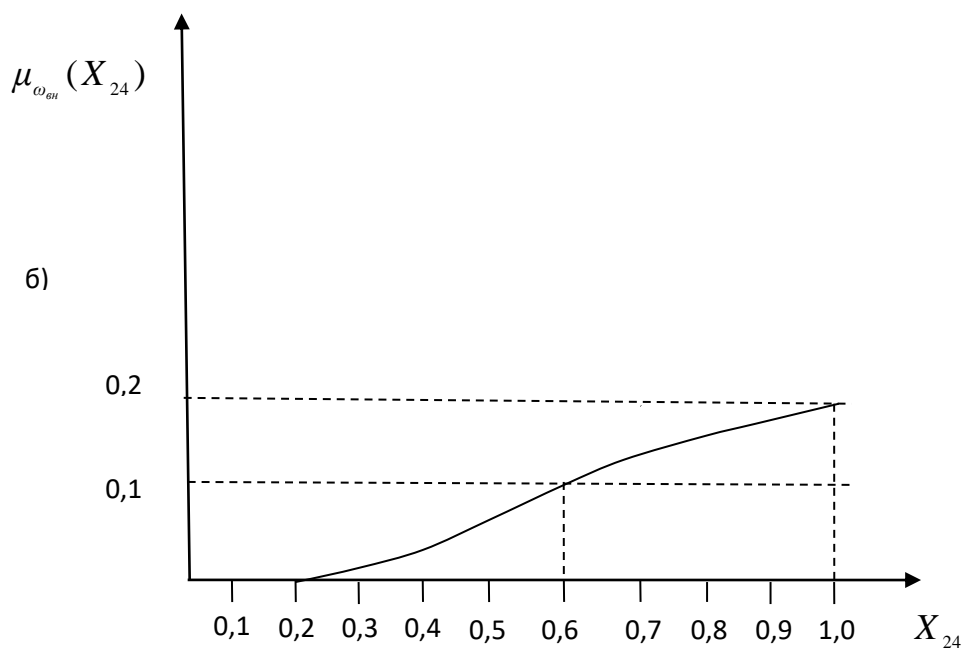
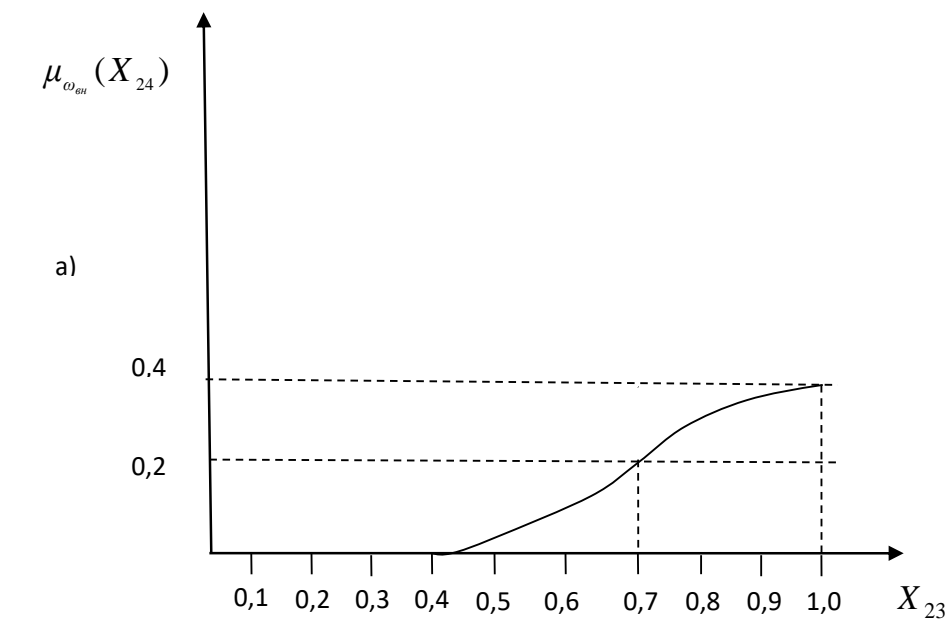


Рисунок 1 - Графики функций принадлежат к классу $\Omega_{ви}$ с базовыми переменными: а) – X_{23} ; б) X_{24} .

Аналитические графики, приведенные на Рисунке 1 описываются выражениями:

$$\mu_{\omega_{\text{вн}}}(X_{23}) = \begin{cases} 0, & \text{если } x_{23} < 0,4; \\ 2,22(X_{23} - 0,4)^2, & \text{если } 0,4 \leq X_{23} < 0,7; \\ 0,4 - 2,22(X_{23} - 1)^2, & \text{если } 0,7 \leq X_{23} < 1; \\ 0,4, & \text{если } X_{23} = 1, \end{cases}$$

$$\mu_{\omega_{\text{вн}}}(X_{24}) = \begin{cases} 0, & \text{если } X_{24} < 0,2; \\ 0,625(X_{24} - 0,2)^2, & \text{если } 0,2 \leq X_{24} < 0,6; \\ 0,2 - 0,625(X_{24} - 1)^2, & \text{если } 0,6 \leq X_{24} < 1; \\ 0,2, & \text{если } X_{24} = 1. \end{cases}$$

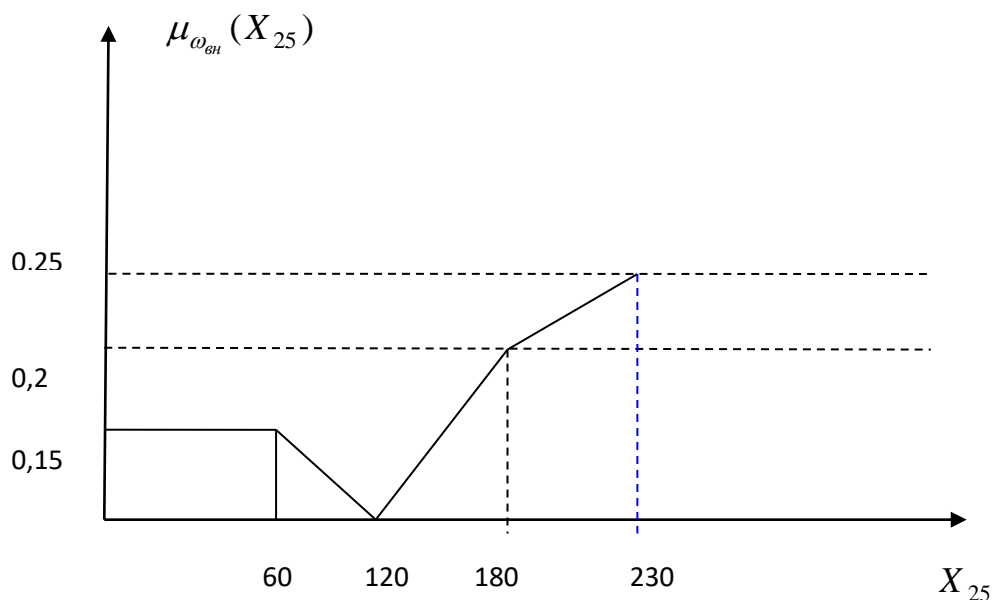
Для класса $\omega_{\text{рн}}$ получены соотношения:

$$\mu_{\omega_{\text{рн}}}(X_{23}) = 1,25\mu_{\omega_{\text{вн}}}(X_{23})$$

$$\mu_{\omega_{\text{рн}}}(X_{24}) = 1,2\mu_{\omega_{\text{вн}}}(X_{24})$$

Возможность измерения показателей YP и YU исключают из исходного пространства признаки X_{14} и X_{17} .

По признакам X_{25}, \dots, X_{27} для класса $\omega_{\text{вн}}$ получены функции принадлежности графики которых приведены на Рисунке 2.



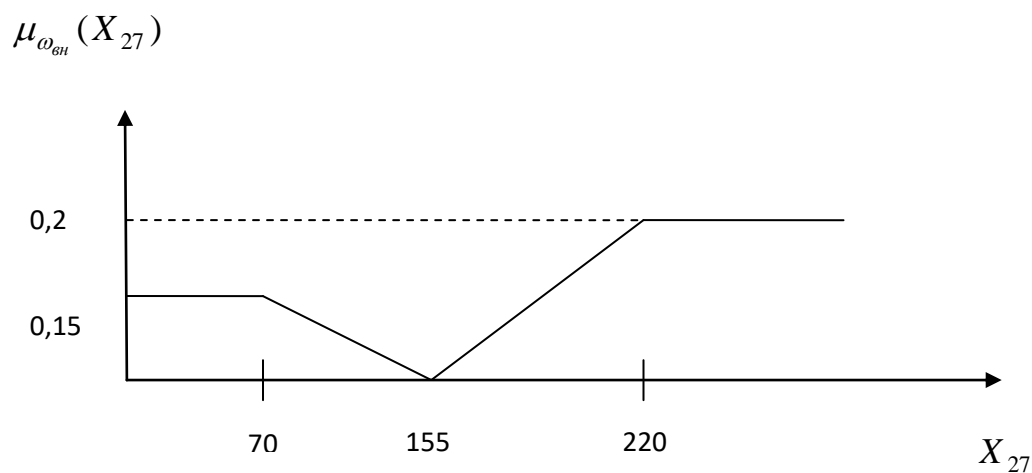
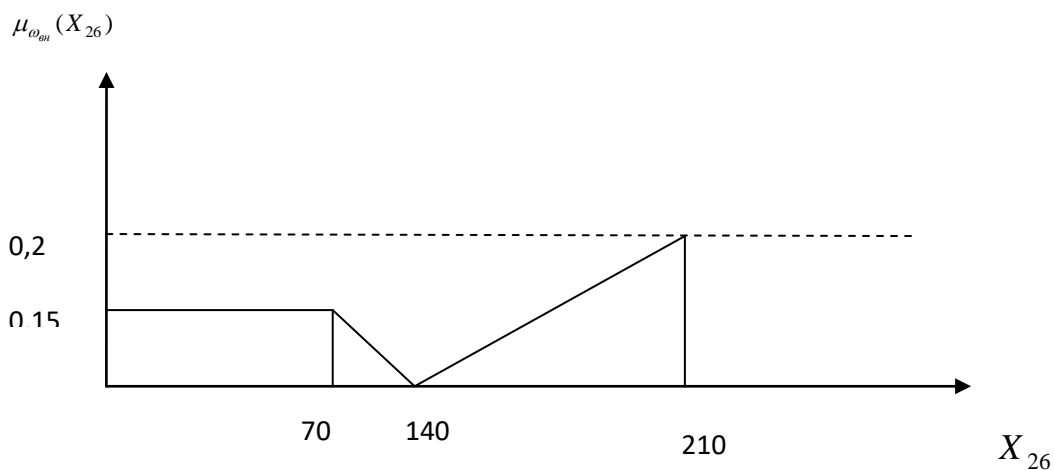


Рисунок 2 - Графики функций принадлежности к классу $\omega_{вн}$ с базовыми переменными:
а) – X_{25} ; б) – X_{26} ; в) – X_{27} .

Аналитические графики приведенные на Рисунке 2 описываются выражениями:

$$\mu_{\omega_{ви}}(X_{25}) = \begin{cases} 0,15, \text{ если } 60 < X_{25}; \\ -0,0025X_{25} - 0,3, \text{ если } 06 \leq X_{25} < 120; \\ 0,0033X_{25} - 0,4, \text{ если } 120 \leq X_{25} < 180; \\ 0,001X_{25} - 0,4, \text{ если } 180 \leq X_{25} < 230; \\ 0,25, \text{ если } X_{25} \geq 230, \end{cases}$$

$$\mu_{\omega_{ви}}(X_{26}) = \begin{cases} 0,15, \text{ если } 70 < X_{26}; \\ 0,0021X_{26} + 0,3, \text{ если } 70 \leq X_{26} < 140; \\ 0,0029X_{26} - 0,4, \text{ если } 140 \leq X_{26} < 210; \\ 0,2, \text{ если } X_{26} \geq 210, \end{cases}$$

$$\mu_{\omega_{ви}}(X_{27}) = \begin{cases} 0,15, \text{ если } 20 < X_{27}; \\ -0,0011X_{27} + 0,172, \text{ если } 20 \leq X_{27} < 155; \\ 0,0031X_{27} - 0,477, \text{ если } 155 \leq X_{27} < 220; \\ 0,2, \text{ если } X_{27} \geq 220. \end{cases}$$

Для класса ω_{pn} для базовых переменных X_{25}, X_{26}, X_{27} получены следующие выражения:

$$\mu_{\omega_{pn}}(X_{25}) = 1,3\mu_{\omega_{ви}}(X_{25});$$

$$\mu_{\omega_{pn}}(X_{26}) = 1,25\mu_{\omega_{ви}}(X_{26});$$

$$\mu_{\omega_{pn}}(X_{27}) = 1,25\mu_{\omega_{ви}}(X_{27}).$$

Механизм оценки защитных свойств организма описан в работах [18,19]. В этих работах уровень защитных свойств организма UZ определяется через величину адаптационного потенциала (АП), по показателю адаптационного соотношения (ПАС) и по набору лабораторных показателей. Аналитические выражения для значения величины UZ можно найти в работах [18,19].

На третьем этапе исследования полученные функции принадлежности и комплексный показатель UZ агрегируются в финальные решающие правила.

При этом учитывается, что признаки X_1, \dots, X_{27} увеличивают уверенность в прогнозе, поэтому в соответствии с рекомендациями [6,7,12] для финальных решающих правил по классам $\omega_{ви}$ и ω_{pn} выбираются модифицированные формулы Е.Шортлифа:

$$UB(p+1) = UB_a + \mu_{\omega_{pu}}(X_{i+1})[1 - UB(q)]; \quad (7)$$

$$UP(p+1) = UP_q + \mu_{\omega_{pu}}(X_{i+1})[1 - UP(q)]; \quad (8)$$

где UB – уверенность в прогнозе возникновения инсульта без учета UZ; UP – уверенность в прогнозе рецидива инсульта без учёта UZ; $UB(1) = \mu_{\omega_{ви}}(X_1)$; $UP(1) = \mu_{\omega_{пу}}(X_1)$, p- номер итерации, $i = 1, \dots, 27$.

Показатель UZ обладает тем свойством, что его увеличение уменьшает риск развития и рецидива заболевания. Для его учёта в правилах (7) и (8), согласно рекомендациям [19] по отношению к классам $\omega_{ви}$ и $\omega_{пу}$ построена функция $f(UZ)$ защиты от инсультов (Рисунок 3).

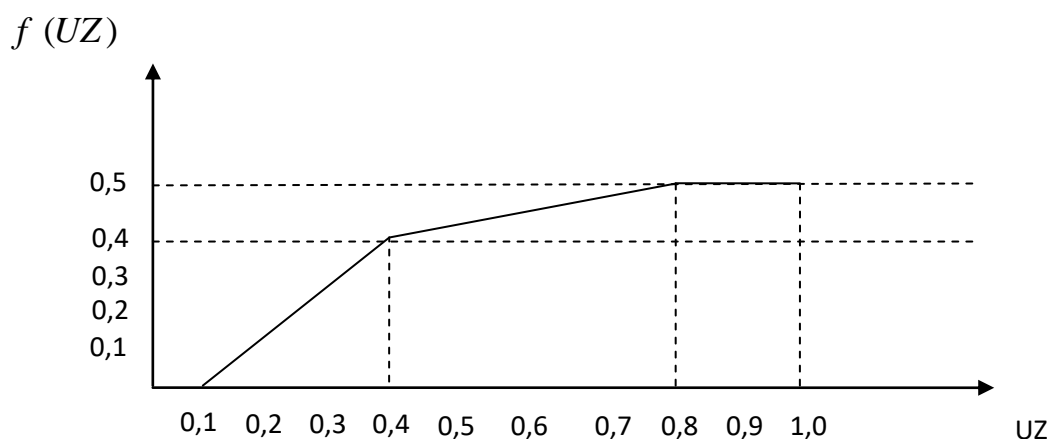


Рисунок 3 - График функции защиты от инсультов UZ.

Аналитически график защиты от инсультов описывается выражением:

$$f(UZ) = \begin{cases} 0, & \text{если } UZ < 0,1 \\ 1,33UZ, & \text{если } 0,1 \leq UZ < 0,4 \\ 0,25UZ + 0,3, & \text{если } 0,4 \leq UZ < 0,8 \\ 0,5, & \text{если } UZ > 0,8 \end{cases} \quad (9)$$

С учётом рекомендаций [19] финальные прогностические решающие правила принимают вид:

$$UBZ = \begin{cases} UB - f(UZ), & \text{если } UBZ > 0,1 ; \\ 0,1, & \text{если } UBZ \leq 0,1. \end{cases} \quad (10)$$

Величину 0,1 эксперты выбрали из условия что нельзя исключать появления и рецидивов инсультов из-за того, что $f(UZ) > UB$.

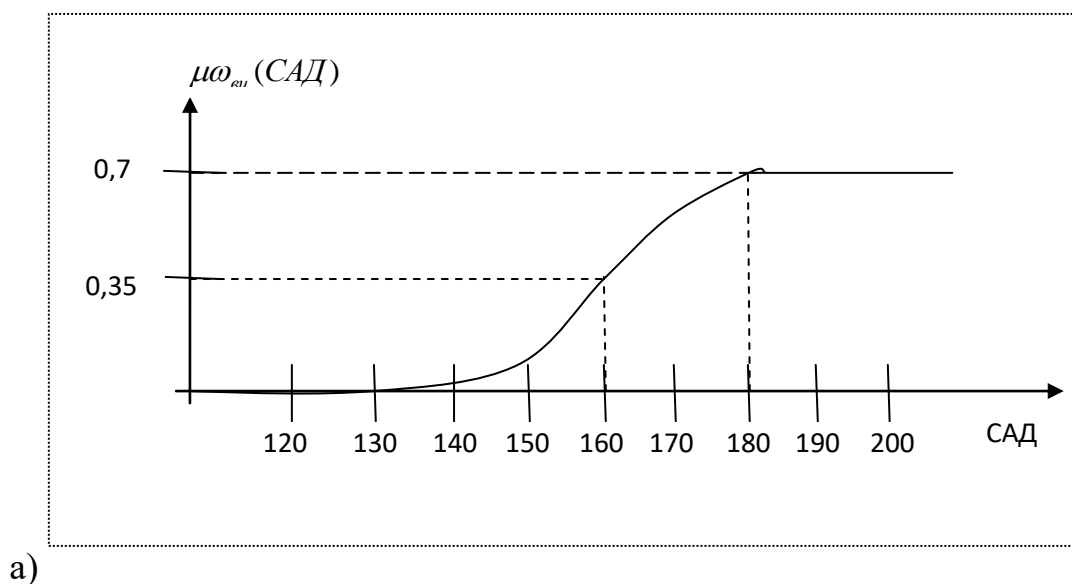
Аналогично для UPZ:

$$UPZ = \begin{cases} UP - f(UZ), & \text{если } UPZ > 0,1 ; \\ 0,1, & \text{если } UPZ \leq 0,1. \end{cases} \quad (11)$$

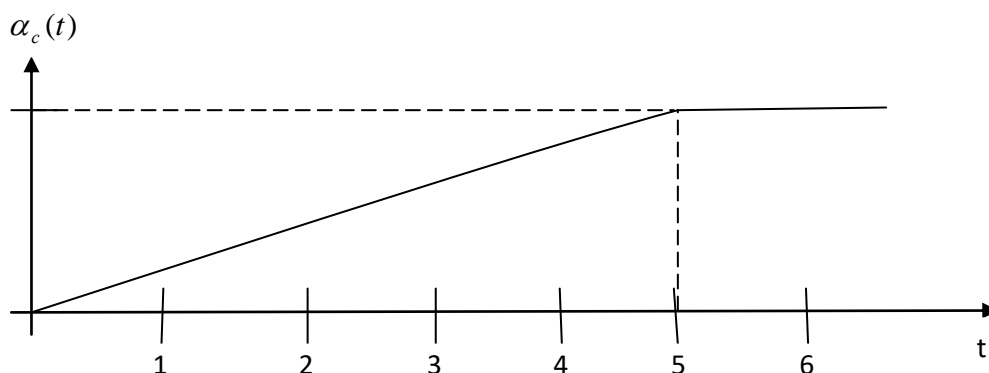
где UBZ и UPZ - уверенности в соответствующих прогнозах с учетом защитных свойств организма.

Выше отмечалось, что одним из существенных факторов риска является наличие у пациентов длительного повышения систолического (САД) и диастолического (ДАД) артериального давления. Для учета этого фактора риска при плохо коррегируемом артериальном давлении (АД) на экспертном уровне было предложено использовать функции принадлежности к классу $\mu_{\omega_{\text{ви}}}(\text{САД})$ и $\mu_{\omega_{\text{ви}}}(\text{ДАД})$ роль которых в прагностической задаче корректируется коэффициентом временных коррегирующих поправок $a_c(t)$ и $a_d(t)$ (время измеряется в годах и их долях).

Для систолического артериального давления графики $\mu_{\omega_{\text{ви}}}(\text{САД})$ и $a_c(t)$ приведены на Рисунке 4.



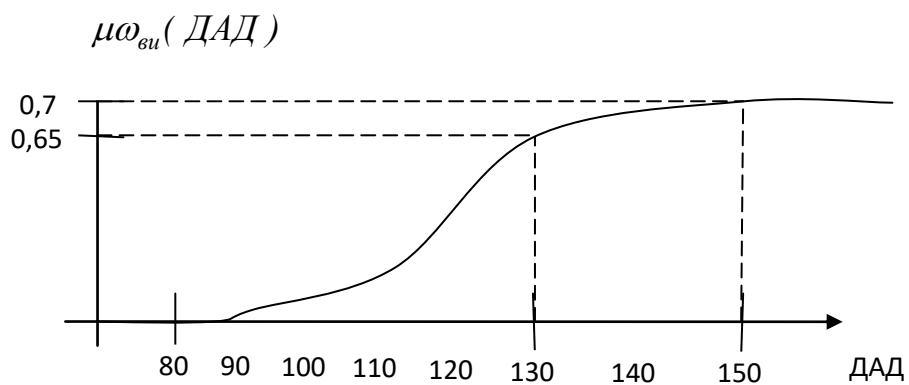
б)

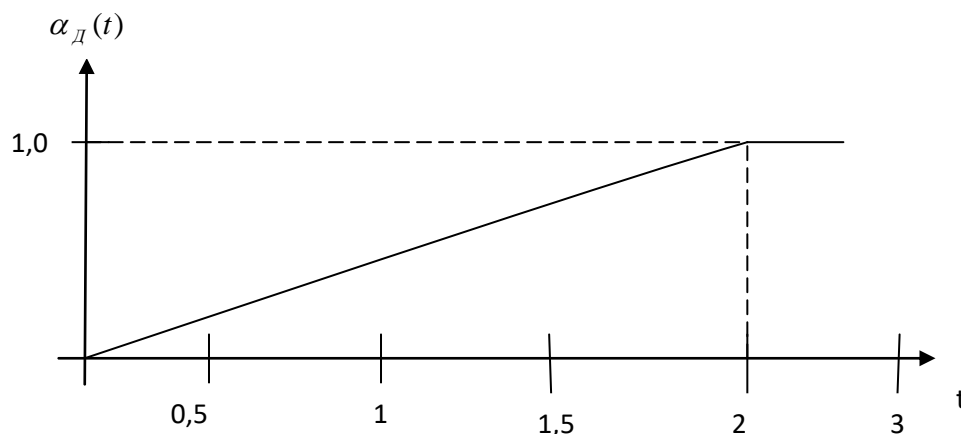


Рисунке 4 - Графики: а) $\mu_{\omega_{ви}}$ (САД); б) $\alpha_c(t)$

Для диастолического артериального давления соответствующие графики приведены на Рисунке 5

а)





Рисунке 5 - Графики: а) $\mu_{\text{вы}}(\text{ДАД})$; б) $\alpha_{\text{д}}(t)$

С учетом поправочных коэффициентов уверенность в том, что у пациента может возникнуть инсульт из-за высокого давления САД определяется выражением:

$$UC_{\text{вы}} = \alpha_c(t) \cdot \mu_{\text{вы}}(\text{САД}) \quad (12)$$

По отношению к ДАД: $UD_{\text{вы}} = \alpha_{\text{д}}(t) \cdot \mu_{\text{вы}}(\text{ДАД}) \quad (13)$

В выражениях (12) и (13):

$$\mu_{\text{вы}}(\text{САД}) = \begin{cases} 0, & \text{если САД} < 140; \\ 0,00875(\text{САД}-140)^2, & \text{если } 140 \leq \text{САД} < 160; \\ 0,7 - 0,00875(\text{САД}-150)^2, & \text{если } 160 \leq \text{САД} < 180; \\ 0,7, & \text{если САД} \geq 180, \end{cases}$$

$$\alpha_c(t) = \begin{cases} 0,2t, & \text{если } t < 5; \\ \alpha, & \text{если } t \geq 5, \end{cases}$$

$$\mu_{\text{вы}}(\text{ДАД}) = \begin{cases} 0, & \text{если ДАД} < 90; \\ 0,01625\text{ДАД}, & \text{если } 90 \leq \text{ДАД} < 130; \\ 0,0025\text{ДАД} - 0,325, & \text{если } 130 \leq \text{ДАД} < 150; \\ 0,7, & \text{если ДАД} \geq 150, \end{cases}$$

$$\alpha_d(t) = \begin{cases} 0,5t, & \text{если } t < 2; \\ 1, & \text{если } t \geq 2. \end{cases}$$

По величинам САД и ДАД уверенность в классе $\omega_{ви}$ от фактора АД определяется выражением

$$UAD_{ви} = \max\{UC_{ви}, UD_{ви}\} \quad (14)$$

Для класса $\omega_{ри}$:

$$UAD_{ри} = 1,25 \cdot UAD_{ви} \quad (15)$$

Для регулярно коррегируемого АД

$$UAD_{ви}^k = 0,7 UAD_{ви} \quad (16)$$

$$UAD_{ри}^k = 0,7 UAD_{ри} \quad (17)$$

С учетом (14)...(17) при наличии у пациентов длительного коррегируемого и некоррегируемого артериального давления

Формулы (7),(8) модифицируется

$$UBA = UB + UAD_{ви} - UB \cdot UAD_{ви} \quad (19)$$

$$UPA = UP + UAD_{ри} - UP \cdot UAD_{ри} \quad (20)$$

В случае коррегируемого АД в формулах (19),(20) $UAD_{ви}$ и $UAD_{ри}$ заменяются на $UAD_{ви}^k$ и $UAD_{ри}^k$

В ходе экспертного оценивания и в результате математического моделирования было показано, что при использовании всех информативных признаков уверенность в правильном прогнозе по обоим исследуемым классам превышает величину 0,9.

Результаты

Синтезированные в работе нечеткие математические модели использовали функции принадлежности, форма и параметры которых выбирались с учетом мнения экспертов. Для уточнения прогностических качеств полученных моделей на репрезентативных контрольных выборках в течение четырех лет наблюдений фиксировалось число правильных и ошибочных решений совершаемых обеими прогностическими моделями с расчетом таких показателей качества как диагностическая чувствительность, диагностическая специфичность, прогностическая значимость положительных и отрицательных результатов и диагностическая эффективность.

В результате четырехлетних наблюдений было установлено, что в течение первого года все показатели качества находятся на достаточно низком уровне, но к концу второго года они стабилизируются на уровне 0,9, что свидетельствует о том, что двухлетнему прогнозу и далее можно доверять с большой долей уверенности.

Обсуждение

В ходе выполнения работы выбран адекватный математический аппарат исследования и получены нечеткие модели для расчета уверенности в прогнозе возникновения и рецидива инсульта головного мозга.

Проведенные экспертное оценивание, математическое моделирование и статистические испытания на репрезентативных контрольных выборках показали, что предложенные математические модели обеспечивают уверенность в искомом двухлетнем прогнозе на уровне 0,9 и выше, что позволяет их использовать в практике сосудистых хирургов и врачей ангиологов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Антонов И.П. Справочник по диагностике и прогнозированию нервных болезней в таблицах и перечнях / И.П. Антонов, Я.А. Лупьян. - Мн.: Беларусь, 1986.-288 с.
2. Бакурский С.Н. Достоверность показателей состояния опорно-двигательной системы, полученных с помощью компьютерной фотометрии / С.Н. Бакурский, Н.В. Репалова, Д.Е. Скопин, И.А. Пашин // Хирургия позвоночника. -2005. -№4. -С. 66-71.
3. Буняев В.В. Донозологическая диагностика методами рефлексологии / В.В. Буняев, Н.А. Корневский // Биомедицинская радиоэлектроника. - 2001. -№ 3. -С. 21-28.
4. Гадалов В.Н. Математические модели рефлекторных систем организма человека и их использование для прогнозирования и диагностики заболеваний / В.Н. Гадалов, Н.А. Корневский, В.Н. Снопков // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. -2012. Т. 11, № 2 -С. 515-521
5. Заде Л.А. Понятие лингвистической переменной и ее применение к принятию приближенных решений / Л.А. Заде.-М.: Мир, 1976.-312 с.
6. Корневский Н.А. Метод синтеза гетерогенных нечетких правил для анализа и управления состоянием биотехнических систем / Н.А. Корневский // Известия Юго-Западного государственного

- университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение.-2013. -№ 2 -С. 99-103.
7. Корневский Н.А. Использование нечеткой логики принятия решений для медицинских экспертных систем / Н.А. Корневский // Медицинская техника. -2015. -№ 1. -С. 33-35.
 8. Корневский Н.А. Метод прогнозирования и диагностики состояния здоровья на основе коллективов нечетких решающих правил / Н.А. Корневский, Р.В. Руцкой, С.Д. Долженков // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. -2013. -Т. 12. -№ 4. -С. 905-909.
 9. Корневский Н.А. Компьютерные системы ранней диагностики состояния организма методами рефлексологии / Н.А. Корневский, В.В. Буняев, С.М. Яцун. - Юж.-Рос. Гос. Техн.-ун-т НПИ. Министерство образования Российской Федерации. Новочеркасск, 2003. 206 с.
 10. Корневский Н.А. Энергоинформационные модели рефлексодиагностики / Н.А. Корневский, Л.П. Лазурина, ОМЦП. Курск, 2000 177 с.
 11. Корневский Н.А. Комплексная оценка уровня психоэмоционального напряжения / Н.А. Корневский, О.И. Филатова, М.И. Лукашов, Р.А. Крупчатников // Биомедицинская радиоэлектроника. -2009. -№5. -С. 4-9.
 12. Корневский Н.А. Метод синтеза нечетких решающих правил для оценки состояния сложных систем по информации о геометрической структуре многомерных данных / Н.А. Корневский, Е.Б. Рябкова // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2011. -Т. 7, № 8. -С. 128-136.
 13. Корневский Н.А. Принципы и методы построения интерактивных систем диагностики и управления состоянием здоровья человека на основе полифункциональных моделей / Корневский Н.А: Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. - Санкт-Петербург, 1993-32с.
 14. Корневский Н.А. Комплекс для исследования особенностей внимания и памяти / Н.А. Корневский, Д.Е. Скопин, Р.Т. Аль-Касасбех, А.А. Кузьмин // Медицинская техника. -2010. -№1. -С. 36-40.
 15. Тутов Н.Д. Способы представления разнотипных данных в задачах медицинских и экологических исследований / Н.Д. Тутов, Н.А. Корневский, И.М. Корженевич // Известия Юго-Западного государственного университета. -1998. -№ 2. -С. 56-63.
 16. Корневский Н.А. Прогнозирование и диагностика заболеваний, вызываемых вредными производственными и экологическими

- факторами на основе гетерогенных нечетких модолей / Н.А. Кореневский, В.И. Серебровский, Н.А. Коптева, Т.Н. Говорухина. - Курск. ГОСТ. с-х. ак., Курск, 2012 С. 231.
17. Кореневский Н.А. Метод синтеза нечетких решающих правил на основе моделей системных взаимосвязей для решения задач прогнозирования и диагностики заболеваний / Н.А. Кореневский, М.В. Артеменко, В.Я. Провоторов, Л.А. Новикова // Системный анализ и управления в биомедицинских системах. -2014. -Т. 13, №4. -С. 881-886.
 18. Кореневский Н.А. Теоретические основы биофизики акупунктуры с приложениями в медицине, психологии и экологии на основе не четких сетевых моделей / Н.А. Кореневский, Р.А. Крупчатников, Р.Т. Аль-Касасбех. – Старый Оскол: ТНТ, 2013. – 528с.
 19. Кореневский Н.А. Оценка и управление состоянием здоровья обучающихся на основе гибридных интеллектуальных технологий: монография / Н.А. Кореневский, А.Н. Шуткин, С.А. Горбатенко, В.И. Серебровский. – Старый Оскол: ТНТ, 2016, -С. 472.
 20. Кореневский Н.А. Синтез коллективов гибридных нечетких моделей оценки состояния сложных систем / Н.А. Кореневский, К.В. Разумова // Научно-технические технологии. -2014. -Т. 15, №12. -С. 31-39.
 21. Кореневский Н.А. Проектирование систем принятия решений на нечетких сетевых моделях в задачах медицинской диагностики и прогнозирования / Н.А. Кореневский // Телекоммуникации. -2006. -№6. -С. 25-31.
 22. Кореневский Н.А. Синтез нечетких классификационных правил в многомерном пространстве признаков для медицинских приложений. / Н.А. Кореневский, К.В. Разумова // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. -2012. -№ 2-1. -С. 223-227.
 23. Лувсан Г. Очерки методы восточной рефлексотерапии / Г. Лувсан // 3-е изд., перераб. И доп. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-е, 1991. -С. 402.
 24. Лукашов М.И. Определение уровня длительного физического утомления как фактора риска рецидивов хронических заболеваний / М.И. Лукашов, Н.А. Кореневский, А.В. Ерёмин // Биомедицинская радиоэлектроника. -2009. -№5. -С. 10-15.
 25. Abu-Ein A.A.K.H. Distributed barrier synchronization procedure with the dynamic limitation of the coordinating signal propagation area / A.A.K.H. Abu-Ein, I.V. Zotov, H.M.D.A.M. Hatamleh, D.E. Skopin // International Review on Computers and Software. -2012. -Т. 7, № 3. -С. 991-995.

26. Al-Kasasbeh R. Prediction and prenosological diagnostics of heart diseases based on energy characteristics of acupuncture pointes and fuzzy logic / Al-R. Kasasbeh, M. Alshamasin, N. Korenevsky, A. Kuzmin, F. Ionescou // Computer methods in biomechanics and biomedical engineering. -2012. -Т. 15.-№ 7. -С. 681-689.
27. Al-Kasasbeh R.T. Modelling and parameter estimation for operator intelligence in man-machine systems / R.T. Al-Kasasbeh, M.S. Alshamasin, F. Ionescou, N. Korenevsky // International Journal of Modelling, International and Control. -2012. -Т. 15. -№1. -С. 69-85.
28. Al-Kasasbeh R. Prediction of gastric ulcers based on the change in electrical resistance of acupuncture pointes using fuzzy logic decision-making / R. Al-Kasasbeh, M. Alshamasin, N. Korenevsky, F. Ionescou, A. Smith // Computer methods in biomechanics and biomedical engineering. -2013. -Т. 16, № 3. -С. 302-313.
29. Al-Kasasbeh R.T. Automated detection and selection of artifacts in encephalography signals / R.T. Al-Kasasbeh, M. Shamaseen, D. Skopin // Biomedical Engineering. -2008. -Т. 42. -С. 293.
30. Al-Kasasbeh R. Fuzzy determination of the humans level of psycho-emotional / R. Al-Kasasbeh, M. Alshamasin, N. Korenevsky, F. Ionescou, A.P. Smith, E. Alkasasbeh // В сборнике: IFMBE Proceedings Сер. "4th International Conference on Biomedical Engineering in Vietnam." -2013. -С. 213-216.
31. Kursk S.M. The artificial neural network based approach for mortality structure analysis / S.M. Kursk, R.J. Rasras, D. Skopin // American Journal of Applied Sciences. -2006. -Т. 3. -С. 1698.
32. Mesleh A. Heart rate extraction from vowel speech signals / A. Mesleh, D. Skopin, S. Baglikov, A. Quteishat // Journal of Computer Science and Technology. -2012. -Т. 27, № 6. -С. 1243.
33. Taha Al-Kasasbeh R. Automated detection of artifacts in electroencephalography signals using a linear prediction model. / R. Taha Al-Kasasbeh, M. Alshamasin, D.E. Skopin, O. Barbarawi, V.V. Geppener Biomedical Engineering. -2009. -Т. 43, № 1. -С. 31-35.

N.A. Korenevskiy¹, A.V. Bykov¹, E.V. Tsymbal², V.V. Aksenov¹, D.S. Rodionov¹

PREDICTING THE EMERGENCE AND RECURRENCE OF BRAIN STROKE BASED ON HYBRID FUZZY MODELS

¹ «South-West state University»

² «3 Central military clinical hospital. A. A. Vishnevsky»

The work is devoted to the actual problem of improving the quality and efficiency of predicting the occurrence and recurrence of brain stroke by using the methodology of synthesis of hybrid fuzzy mathematical models developed at the Department of biomedical engineering of Southwestern state University. In the course of the conducted research the space of informative signs was formed in three subgroups: data of surveys and examinations; instrumental methods of research; Doppler ultrasound (27 signs in total). In accordance with the General methodology for the synthesis of hybrid fuzzy decision rules using informative features as basic variables in the interactive mode, the corresponding functions of belonging to the classes of high risk of occurrence and recurrence of brain stroke for which, using modified models E. Shortlife synthesized final predictive model. As a result of expert evaluation and mathematical modeling, it was shown that the obtained models of occurrence and recurrence of brain stroke provide confidence in the correct prognosis at the level of 0.9 and higher, depending on the amount and quality of information collected about the patient's condition. This quality indicator was confirmed during statistical tests on representative control samples, which allows to recommend them for use in the practice of vascular surgeons and angiologists.

Keywords: stroke, cerebral membership function, the confidence in the decision being taken, the prognosis.

REFERENCES

1. Antonov I.P. Spravochnik po diagnostike i prognozirovaniyu nervnyh boleznej v tablicah i perechnyah / I.P. Antonov, YA.A. Lup'yan. - Mn.: Belarus', 1986.-288 s.
2. Bakurskij S.N. Dostovernost' pokazatelej sostoyaniya oporno-dvigatel'noj sistemy, poluchennyh s pomoshch'yu komp'yuternoj fotometrii / S.N. Bakurskij, N.V. Repalova, D.E. Skopin, I.A. Pashin // Hirurgiya pozvonochnika. -2005. -№4. -S. 66-71.
3. Bunyaev V.V. Donozologicheskaya diagnostika metodami refleksologii / V.V. Bunyaev, N.A. Korenevskij // Biomedicinskaya radioelektronika. - 2001. -№ 3. -S. 21-28.
4. Gadalov V.N. Matematicheskie modeli reflektornyh sistem organizma cheloveka i ih ispol'zovanie dlya prognozirovaniya i diagnostiki zabolevanij / V.N. Gadalov, N.A. Korenevskij, V.N. Snopkov //Sistemnyj analiz i upravlenie v biomedicinskih sistemah. -2012. T. 11, № 2 -S. 515-521

5. Zade L.A. Ponyatie lingvisticheskoy peremennoy i ee primeneniye k prinyatiyu priblizhennykh reshenij / L.A. Zade.-M.: Mir, 1976.-312 s.
6. Korenevskij N.A. Metod sinteza geterogennykh nechetkih pravil dlya analiza i upravleniya sostoyaniem biotekhnicheskikh sistem / N.A. Korenevskij // Izvestiya YUgo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Medicinskoe priborostroeniye.-2013. -№ 2 -S. 99-103.
7. Korenevskij N.A. Ispol'zovaniye nechetkoj logiki prinyatiya reshenij dlya medicinskih ehkspertnykh sistem / N.A. Korenevskij // Medicinskaya tekhnika. -2015. -№ 1. -S. 33-35.
8. Korenevskij N.A. Metod prognozirovaniya i diagnostiki sostoyaniya zdorov'ya na osnove kollektivov nechetkih reshayushchih pravil / N.A. Korenevskij, R.V. Ruckoj, S.D. Dolzhenkov // Sistemnyy analiz i upravlenie v biomedicinskih sistemah. -2013. -T. 12. -№ 4. -S. 905-909.
9. Korenevskij N.A. Komp'yuternye sistemy rannej diagnostiki sostoyaniya organizma metodami refleksologii / N.A. Korenevskij, V.V. Bunyaev, S.M. YAcun. - YUzh.-Ros. Gos. Tekhn.-un-t NPI. Ministerstvo obrazovaniya Rossijskoj Federacii. Novochoerkassk, 2003. 206 s.
10. Korenevskij N.A. EHnergoinformacionnye modeli refleksodiagnostiki / N.A. Korenevskij, L.P. Lazurina, OMCP. Kursk, 2000 177 s.
11. Korenevskij N.A. Kompleksnaya ocenka urovnya psihoehmotsional'nogo napryazheniya / N.A. Korenevskij, O.I. Filatova, M.I. Lukashov, R.A. Krupchatnikov // Biomedicinskaya radioehlektronika. -2009. -№5. -S. 4-9.
12. Korenevskij N.A. Metod sinteza nechetkih reshayushchih pravil dlya ocenki sostoyaniya slozhnykh sistem po informacii o geometricheskoy strukture mnogomernykh dannykh / N.A. Korenevskij, E.B. Ryabkova // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universitete. -2011. -T. 7, № 8. -S. 128-136.
13. Korenevskij N.A. Principy i metody postroeniya interaktivnykh sistem diagnostiki i upravleniya sostoyaniem zdorov'ya cheloveka na osnove polifunktsional'nykh modelej / Korenevskij N.A: Avtoreferat dissertacii na soiskaniye uchenoj stepeni doktora tekhnicheskikh nauk. -Sankt-Peterburg, 1993-32s.
14. Korenevskij N.A. Kompleks dlya issledovaniya osobennostej vnimaniya i pamyati / N.A. Korenevskij, D.E. Skopin, R.T. Al'-Kasasbekh, A.A. Kuz'min // Medicinskaya tekhnika. -2010. -№1. -S. 36-40.
15. Tutov N.D. Sposoby predstavleniya raznotipnykh dannykh v zadachah medicinskih i ehkologicheskikh isledovaniy / N.D. Tutov, N.A. Korenevskij, I.M. Korzhenevich // Izvestiya YUgo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. -1998. -№ 2. -S. 56-63.

16. Korenevskij N.A. Prognozirovanie i diagnostika zabolevanij, vyzyvaemyh vrednymi proizvodstvennymi i ehkologicheskimi faktorami na osnove geterogennyh nechetkih modelej / N.A. Korenevskij, V.I. Serebrovskij, N.A. Kopteva, T.N. Govoruhina. - Kursk. GOST. s-h. ak., Kursk, 2012 S. 231.
17. Korenevskij N.A. Metod sinteza nechetkih reshayushchih pravil na osnove modelej sistemnyh vzaimosvyazey dlya resheniya zadach prognozirovaniya i diagnostiki zabolevanij / N.A. Korenevskij, M.V. Artemenko, V.YA. Provotorov, L.A. Novikova // Sistemnyj analiz i upravleniya v biomedicinskih sistemah. -2014. -T. 13, №4. -S. 881-886.
18. Korenevskij N.A. Teoreticheskie osnovy biofiziki akupunktury s prilozheniyami v medicine, psihologii i ehkologii na osnove ne chetkih setevykh modelej / N.A. Korenevskij, R.A. Krupchatnikov, R.T. Al'-Kasasbekh. – Staryj Oskol: TNT, 2013. – 528s.
19. Korenevskij N.A. Ocenka i upravlenie sostoyaniem zdorov'ya obuchayushchihsya na osnove gibridnyh intellektual'nyh tekhnologij: monografiya / N.A. Korenevskij, A.N. SHutkin, S.A. Gorbatenko, V.I. Serebrovskij. – Staryj Oskol: TNT, 2016, -S. 472.
20. Korenevskij N.A. Sintez kollektivov gibridnyh nechetkih modelej ocenki sostoyaniya slozhnyh sistem / N.A. Korenevskij, K.V. Razumova // Naukoemkie tekhnologii. -2014. -T. 15, №12. -S. 31-39.
21. Korenevskij N.A. Proektirovanie sistem prinyatiya reshenij na nechetkih setevykh modelyah v zadachah medicinskoj diagnostiki i prognozirovaniya / N.A. Korenevskij // Telekomunikacii. -2006. -№6. -S. 25-31.
22. Korenevskij N.A. Sintez nechetkih klassifikacionnyh pravil v mnogomernom prostranstve priznakov dlya medicinskih prilozhenij. / N.A. Korenevskij, K.V. Razumova // Izvestiya YUgo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Medicinskoe priborostroenie. -2012. -№ 2-1. -S. 223-227.
23. Luvsan G. Ocherki metody vostochnoj refleksoterapii / G. Luvsan // 3-e izd., pererab. I dop. – Novosibirsk: Nauka. Sib. otd-e, 1991. -S. 402.
24. Lukashov M.I. Opredelenie urovnya dlitel'nogo fizicheskogo utomleniya kak faktora riska recidivov hronicheskikh zabolevanij / M.I. Lukashov, N.A. Korenevskij, A.V. Eryomin // Biomedicinskaya radioehlektronika. -2009. - №5. -S. 10-15.
25. Abu-Ein A.A.K.H. Distributed barrier synchronization procedure with the dynamic limitation of the coordinating signal propagation area / A.A.K.H. Abu-Ein, I.V. Zotov, H.M.D.A.M. Hatamleh, D.E. Skopin // International Review on Computers and Software. -2012. -T. 7, № 3. -C. 991-995.
26. Al-Kasasbeh R. Prediction and prenosological diagnostics of heart diseases based on energy characteristics of acupuncture pointes and fuzzy logic / Al-

- R. Kasasbeh, M. Alshamasin, N. Korenevsky, A. Kuzmin, F. Ionescou // Computer methods in biomechanics and biomedical engineering. -2012. -Т. 15.-№ 7. -С. 681-689.
27. Al-Kasasbeh R.T. Modelling and parameter estimation for operator intelligence in man-machine systems / R.T. Al-Kasasbeh, M.S. Alshamasin, F. Ionescou, N. Korenevsky // International Journal of Modelling, International and Control. -2012. -Т. 15. -№1. -С. 69-85.
28. Al-Kasasbeh R. Prediction of gastric ulcers based on the change in electrical resistance of acupuncture points using fuzzy logic decision-making / R. Al-Kasasbeh, M. Alshamasin, N. Korenevsky, F. Ionescou, A. Smith // Computer methods in biomechanics and biomedical engineering. -2013. -Т. 16, № 3. -С. 302-313.
29. Al-Kasasbeh R.T. Automated detection and selection of artifacts in encephalography signals / R.T. Al-Kasasbeh, M. Shamaseen, D. Skopin // Biomedical Engineering. -2008. -Т. 42. -С. 293.
30. Al-Kasasbeh R. Fuzzy determination of the humans level of psycho-emotional / R. Al-Kasasbeh, M. Alshamasin, N. Korenevsky, F. Ionescou, A.P. Smith, E. Alkasasbeh // V sbornike: IFMBE Proceedings Ser. "4th International Conference on Biomedical Engineering in Vietnam." -2013. -С. 213-216.
31. Kursk S.M. The artificial neural network based approach for mortality structure analysis / S.M. Kursk, R.J. Rasras, D. Skopin // American Journal of Applied Sciences. -2006. -Т. 3. -С. 1698.
32. Mesleh A. Heart rate extraction from vowel speech signals / A. Mesleh, D. Skopin, S. Baglikov, A. Quteishat // Journal of Computer Science and Technology. -2012. -Т. 27, № 6. -С. 1243.
33. Taha Al-Kasasbeh R. Automated detection of artifacts in electroencephalography signals using a linear prediction model. / R. Taha Al-Kasasbeh, M. Alshamasin, D.E. Skopin, O. Barbarawi, V.V. Geppener Biomedical Engineering. -2009. -Т. 43, № 1. -С. 31-35.