

**ВЫБОР СХЕМ ЛЕЧЕБНО-ОЗДОРОВИТЕЛЬНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ ДЛЯ БОЛЬНЫХ ХРОНИЧЕСКИМИ ОБЛИТЕРИРУЮЩИМИ ЗАБОЛЕВАНИЯМИ АРТЕРИЙ НИЖНИХ КОНЕЧНОСТЕЙ С УЧЕТОМ СИСТЕМНЫХ ВЗАИМОСВЯЗЕЙ ЦЕНТРАЛЬНОЙ И РЕГИОНАЛЬНОЙ ГЕМОДИНАМИКИ**

А.В. БЫКОВ\*, Н.А. КОРЕНЕВСКИЙ\*, С.А. ПАРХОМЕНКО\*\*, С.Н. РОДИОНОВА\*, Е.В. ЦЫМБАЛ\*\*

\*ФГБОУ ВО Юго-Западный государственный университет,  
ул. 50 лет Октября, д. 94, Курск, 305040, Россия

\*\*ФГБУ «3 Центральный военный клинический госпиталь им. А.А. Вишневецкого»,  
ул. Новый поселок, стр. 1, пос. Новый – госпиталь, п/о Архангельское, Красногорский р-н,  
Московская обл., 143420, Россия, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

**Аннотация.** Целью исследования является разработка математических моделей оценки степени тяжести ишемического поражения центральной гемодинамической системы, нижних конечностей, сердца и головного мозга алгоритма выбора адекватных схем лечения ориентированных на использование в системах поддержки принятия решения врачей сосудистых хирургов и ангиологов.

Результаты, предлагаемые в данной работе, основываются на шестилетнем (с 2011 года) наблюдением за 400 больными с хроническими облитерирующими заболеваниями артерий нижних конечностей, у части которых имелись сочетания ишемического поражения центральной гемодинамической системы, сердца и головного мозга. Пациенты имели различные стадии заболевания, вплоть до критической ишемии, переходящей в гангрену, требующей ампутации нижних конечностей.

В качестве математического аппарата исследований была выбрана методология синтеза гибридных нечетких решающих правил.

В ходе разведочного анализа было отобрано 8 информативных признаков, по которым синтезировали нечеткие математические модели, классифицирующие пациентов по классам: норма, латентное, реверсивное и критическое состояние по нижним конечностям, сердцу и головному мозгу. Для каждого выделенного класса степени тяжести по каждому из исследуемых органов была определена индивидуальная схема лечения, реализуемая соответствующим алгоритмом принятия решений, управляющей работой интеллектуальной системы поддержки принятия решений.

В ходе проведенных статистических испытаний было показано, что по сравнению с традиционными схемами лечения использование предлагаемого алгоритма позволяет увеличить скорость достижения положительных результатов в 2,4 раза (на 58%) и снизить риск ампутации конечности в 2,5 раза (на 73%).

Полученные математические модели следует использовать в медицинской практике сосудистых хирургов и ангиологов как в виде программного обеспечения смартфонов и планшетных компьютеров так и в составе мощных систем поддержки принятия решений, включая телемедицинские системы.

**Ключевые слова:** облитерирующее заболевание артерий нижних конечностей, ишемия нижних конечностей, нечеткие математические модели, алгоритм выбора схем лечения.

**SELECTION OF THERAPEUTIC FOR PATIENTS WITH CHRONIC OBLITERATING DISEASES OF THE LOWER EXTREMITIES ARTERIES, TAKING INTO ACCOUNT THE SYSTEM RELATIONSHIPS OF CENTRAL AND REGIONAL HEMODYNAMICS**

A.V. BYKOV\*, N.A. KORENEVSKII\*, A.S. PARKHOMENKO\*\*, S.N. RODIONOVA\*, E.V. TSYMBAL\*\*

\*South-Western State University, 50 let Oktyabrya St., 94, Kursk, 305040, Russia

\*\*3 Central military clinical hospital named after A. A. Vishnevsky, ul. New village, p. 1, POS. New-hospital, p/o Arkhangelsk, Krasnogorsk district, Moscow region, 143420, Russia, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

**Abstract.** The research purpose is to develop mathematical models for assessing the severity of ischemic damage to the central hemodynamic system, lower extremities, heart and brain of the algorithm for selecting adequate treatment regimens oriented on the use of vascular surgeons and angiologists in decision support systems of doctors.

The results proposed in this paper are based on a six-year (since 2011) follow-up of 400 patients with chronic obliterating diseases of the lower extremity arteries, some of whom had a combination of ischemic lesions of the central hemodynamic system, heart and brain. Patients had various stages of the disease, up to critical ischemia, passing into gangrene, requiring amputation of the lower extremities.

The methodology of synthesis of hybrid fuzzy decision rules was chosen as a mathematical apparatus of research.

During the exploratory analysis, 8 informative features were selected, according to which fuzzy mathematical models were synthesized, classifying patients by classes: norm, latent, reversible and critical condition for the lower limbs, heart and brain. For each selected class of severity for each of the studied organs, an individual treatment scheme was determined, implemented by an appropriate decision-making algorithm that controls the work of the intellectual decision support system.

In the course of statistical tests it was shown that compared with traditional treatment regimens, the use of the proposed algorithm can increase the speed of achieving positive results by 2.4 times (by 58%) and reduce the risk of amputation by 2.5 times (by 73%).

The obtained mathematical models should be used in the medical practice of vascular surgeons and angiologists both in the form of software for smartphones and tablets and as part of powerful decision support systems, including telemedicine systems.

**Key words:** obliterating diseases of the lower extremities arteries, lower limb ischemia, fuzzy mathematical models, algorithm of treatment regimens selection.

**Введение.** Несмотря на значительные усилия мировой медицины проблема успешного лечения мультицентричной ишемической болезни далека от своего эффективного решения. Это в полной мере относится к *хроническим облитерирующим заболеваниям артерий нижних конечностей (ХОЗАНК)* и особенно, при злокачественном их развитии – к *критической ишемии нижних конечностей (КИНК)*.

Это подтверждается тем, что в России ХОЗАНК страдает до 3% населения, что составляет около 3-х миллионов человек, а КИНК развивается в 30-35% случаев хронических облитерирующих заболеваний артерий нижних конечностей. При этом в течение года умирает 15-20% пациентов, а 20% переносит высокую ампутацию конечностей. Скандинавские исследования показали, что в мировом масштабе в течение 5 лет погибает до 50% пациентов.

Большинство современных подходов к анализу состояния ишемизированных больных основываются на представлениях о краткосрочных воздействиях различного вида: нейрогенные, фармакологические, физические и т.д. [1-3].

В тоже время наши наблюдения показывают, что патологические состояния сердца и сосудов, включая сосуды головного мозга и нижних конечностей сосуществуют длительно, приобретая хроническую взаимоотношающую связь. При этом нарушения регионарной гемодинамики определяют центральную, а изменения последней усугубляют состояние органов [4,5].

Анализ известной отечественной и зарубежной литературы показывает, что вопросы рациональной тактики ведения больных с сочетанной ишемической патологией *центральной гемодинамической системы (ЦГС), сердца (С), головного мозга (М) и нижних конечностей (К)* изучены не достаточно глубоко, например, в работе [5] синтезируются математические модели для оценки тяжести развития ишемического процесса в сердце, головном мозге и нижних конечностях с учетом ишемии центральной гемодинамической системы, однако часть исходных данных в этих моделях носят нечеткий, субъективный характер, формула для оценки степени тяжести ишемии ЦГС обладает низкой чувствительностью и специфичностью, а вопросы выбора рациональных схем профилактики и лечения с учетом степени тяжести ишемических процессов в рассматриваемых органах не рассматриваются.

**Цель исследования** – улучшение качества оказания медицинской помощи больным с хроническими облитерирующими заболеваниями нижних конечностей путем учета системных взаимосвязей центральной и региональной гемодинамики с использованием современных математических методов, информационных и интеллектуальных технологий.

**Материалы и методы исследования.** Для синтеза моделей оценки состояния ишемизированных органов и алгоритма выбора рациональных схем лечебно-оздоровительных мероприятий в течении пяти лет (2011-2016 гг.) было организовано наблюдение за 400 больными с ХОЗАНК БМУ областной клинической больницы №1 г. Курска. В качестве контрольной группы наблюдались 150 здоровых доноров.

*Общими критериями включения* в группу наблюдения являлись:

1. Наличие у пациента ХОЗАНК с *хронической ишемией нижних конечностей (ХИНК)* 2-4 степени по А.В. Покровскому;

2. Возраст пациентов от 30 до 85 лет;

3. Наличие не менее двух курсов безрезультативного лечения в *хирургическом отделении (ХО)* по месту жительства;

4. Наличие *атеросклероза (А)* других жизненно важных регионов: *сердце (С), головной мозг (ГМ)* на фоне *атеросклероза нижних конечностей (АсНК)*, требующих коррекции в настоящее время;

5. Наличие обязательного поражения магистральных *артерий нижних конечностей (АНК)*;

6. Должны быть обязательно пациенты нереконструктабельной группы (критерии разделения по В.А. Лазаренко) [3].

7. Наличие информированного согласия на участие в исследовании и соблюдение указаний врача относительно назначенной терапии и проводимых клинико-лабораторных исследований.

*Критериями исключения* являлись отсутствие хотя бы одного из критериев включения.

Наибольшее количество больных страдало *атеросклерозом нижних конечностей* (АНК), что составило до 60% всех обследованных больных или 240 человек. Наибольший клинический интерес представляет группа больных с критической ишемией нижних конечностей, которые были подразделены по нозологии осложнения в соответствии с возрастом и полом, что представлено в табл. 1.

*Таблица 1*

**Распределение больных ХОЗАНК с КИНК по нозологии в соответствии с возрастом и полом**

Нозология \ Возраст, пол	М	М	М	М	Ж	Ж	Ж	Ж
	30-45 лет	46-55 лет	56-65 лет	66-85 лет	30-45 лет	46-55 лет	56-65 лет	66-85 лет
Атеросклероз	12	12	36	24	5	13	18	9
СД, сосудистые осложнения	3	11	9	3	5	15	16	12
Тромбангиит	3	11	8	3	2	6	6	2
Болезнь и синдром Рейно	1	6	4	2	1	5	4	3

Примечание: СД – сахарный диабет

Из таблицы следует, что 80% больных ХОЗАНК с КИНК страдают АНК и СД, а 20% приходится на тромбангиит и болезнь или синдром Рейно.

Несмотря на этиопатогенез КИНК в итоге развиваются тяжелые расстройства микроциркуляции.

Для выбора рациональных схем профилактики и лечения сочетанной ишемической патологии предложено ишемическое нарушение исследуемых органов и систем оценивать четырьмя классами степени тяжести:

- $\omega_n$  – нормальное состояние;
- $\omega_l$  – латентное состояние;
- $\omega_p$  – реверсивное состояние;
- $\omega_k$  – критическое состояние.

Задача выделения перечисленных классов состояний относится к задачам теории распознавания образов с плохоформализуемой структурой данных, которые целесообразно решать с использованием технологии малых вычислений и, в частности, теории нечеткой логики принятия решений [6-9].

Учитывая положительный опыт решения задач прогнозирования, ранней и дифференциальной диагностики со структурой данных аналогичной решаемой в данной работе [7-14] в качестве абсолютного математического аппарата была выбрана методология синтеза гибридных нечетких решающих правил, разработанная на кафедре биомедицинской инженерии Юго-Западного государственного университета [6-10].

В соответствии с общими рекомендациями по синтезу гибридных нечетких моделей на первом этапе исследований формируется группа высококвалифицированных экспертов, состав которой подбирается в соответствии с рекомендациями, принятыми в квалиметрии [7,12]. Согласованность действий экспертов проверялась по коэффициенту конкордации  $W$ . В результате было отобрано восемь высококвалифицированных экспертов с  $W=0,88$ , что позволило сделать вывод об их способности квалифицированно решить поставленные перед ними задачи.

В ходе дальнейших этапов синтеза для оценки степени тяжести ишемии ЦГС ( $ST_{Ц}$ ) были получены модели вида:

$$ST_{Ц} = \begin{cases} 0, & \text{если } ЦГС < 8; \\ 0,07, & \text{если } ЦГС = 0,55, \text{ или } 8 \leq ЦГС < 21; \\ 0,9, & \text{если } ЦГС \geq 21. \end{cases} \quad (1)$$

$$ЦГС = \frac{САД[Ca^{2+}] \cdot ЧСС}{30000} + 10 \frac{\Delta АД}{АЧТВ}, \quad (2)$$

где САД – систолическое АД в данный момент времени (мм.рт.ст.); ЧСС – число сердечных сокращений (количество ударов в минуту);  $\Delta АД$  – разница давления в настоящее время и 3 дня назад (мм.рт.ст.);

АЧТВ – активированное частичное тромбопластиновое время (в секундах);  $[Ca^{2+}]$  – концентрация  $Ca^{2+}$  в крови, моль/л.

Интегральный уровень тяжести ишемического процесса в сердце определяется системой моделей вида:

$$U_c(i+1) = U_c(i) + f_c(X_{i+1})[1 - U_c(i)];$$

$$f_c(X_1) = \begin{cases} 0,15, & \text{если } X_1 < -3; \\ -0,05X_1, & \text{если } -3 \leq X_1 < 0; \\ 0, & \text{если } 0 \leq X_1 < 3; \\ 0,02X_1 - 0,06, & \text{если } 3 \leq X_1 < 6; \\ 0,06, & \text{если } X_1 \geq 6, \end{cases}$$

$$f_c(X_2) = \begin{cases} 0,2, & \text{если } X_2 < -2; \\ -0,125X_2, & \text{если } -2 \leq X_2 < 0; \\ 0,19X_2, & \text{если } 0 \leq X_2 < 1; \\ 0,19, & \text{если } X_2 \geq 1, \end{cases}$$

$$f_c(X_3) = \begin{cases} 0, & \text{если } X_3 < 180; \\ 0,0011X_3 - 0,2, & \text{если } 180 \leq X_3 < 400; \\ 0,25, & \text{если } X_3 \geq 400, \end{cases}$$

$$f_c(X_4) = \begin{cases} 0, & \text{если } X_4 < 0,1; \\ 0,3 \frac{(X_4 - 0,1)^2}{24}, & \text{если } 0,1 \leq X_4 < 2,5; \\ 0,15 \left[ 1 - 2 \frac{(X_4 - 5)^2}{24} \right], & \text{если } 2,5 \leq X_4 < 5; \\ 0,15, & \text{если } X_4 \geq 5. \end{cases}$$

где  $U_c(1) = f_c(X_1)$ ;  $X_1$  – амплитуда  $T$ -зубца;  $X_2$  – смещение сегмента  $ST$  относительно изолинии;  $X_3$  – концентрация креатинфосфокиназы;  $X_4$  – концентрация тропанит  $T$ .

В приведенных выше выражениях  $f_c(X_i)$  – частные функции уровня тяжести ишемического процесса в сердце по каждому из признаков  $X_i$ .

Интегральный уровень тяжести ишемического процесса головного мозга определяется системой выражений вида:

$$U_m(i+1) = U_m(i) + f_m(Y_{i+1})[1 - U_m(i)];$$

$$f_m(Y_1) = \begin{cases} 0,15, & \text{если } 60 < Y_1; \\ -0,0025Y_1 + 0,3, & \text{если } 60 \leq Y_1 < 120; \\ 0,0018Y_1 - 0,218, & \text{если } 120 \leq Y_1 < 230; \\ 0,2, & \text{если } Y_1 \geq 230, \end{cases}$$

$$f_m(Y_2) = \begin{cases} 0,15, & \text{если } 70 < Y_2; \\ 0,0021Y_2 - 0,3, & \text{если } 70 \leq Y_2 < 140; \\ 0,0029Y_2 - 0,4, & \text{если } 140 \leq Y_2 < 210; \\ 0,2, & \text{если } Y_2 \geq 210, \end{cases}$$

$$f_m(Y_3) = \begin{cases} 0,15, & \text{если } 20 < Y_3; \\ -0,0011Y_3 + 0,172, & \text{если } 20 \leq Y_3 < 155; \\ 0,0031Y_3 - 0,477, & \text{если } 155 \leq Y_3 < 220; \\ 0,2, & \text{если } Y_3 \geq 220, \end{cases}$$

где  $U_M(1) = f_M(Y_1)$ ;  $Y_1$  – пиковая систолическая скорость кровотока (ПССК) ВСА;  $Y_2$  – ПССК ПА;  $Y_3$  – ПССК СМА;  $f_M(Y_i)$  – частные функции уровня тяжести ишемического поражения головного мозга по каждому из признаков  $Y_i$  ..

Интегральный уровень тяжести ишемического процесса нижних конечностей определяется системой выражений:

$$U_k(i+1) = U_k(i) + f_k(q_{i+1})[1 - U_k(i)],$$

$$f_k(q_1) = \begin{cases} 0,25, & \text{если } q_1 < 0,4; \\ 0,25 \left[ 1 - 2 \frac{(q_1 - 0,4)^2}{0,16} \right], & \text{если } 0,4 \leq q_1 < 0,6; \\ 0,25 \frac{(q_2 - 0,8)^2}{0,16}, & \text{если } 0,6 \leq q_1 < 0,8; \\ 0, & \text{если } q_1 \geq 0,8, \end{cases}$$

$$f_k(q_2) = \begin{cases} 0,25, & \text{если } 0,2 < q_2; \\ -1,25q_2 + 0,5, & \text{если } 0,2 \leq q_2 < 0,4; \\ 0, & \text{если } q_2 \geq 0,4, \end{cases}$$

$$f_k(q_3) = \begin{cases} 0, & \text{если } 0,1 < q_3; \\ 0,4 \frac{(q_3 - 0,1)^2}{396}, & \text{если } 0,1 \leq q_3 < 10; \\ 0,2 \left[ 1 - 2 \frac{(q_3 - 20)^2}{396} \right], & \text{если } 10 \leq q_3 < 20; \\ 0,2, & \text{если } q_3 \geq 20, \end{cases}$$

где  $U_k(1) = f_k(q_1)$ ;  $q_1$  – лодыжечно-плечевой индекс (ЛПИ);  $q_2$  – пальцево-плечевой индекс (ППИ);  $q_3$  – ЛПИ Тредмил-тест;  $f_k(q_i)$  – частные функции уровня тяжести ишемического поражения головного мозга по признакам  $q_i$ .

С учетом влияния ишемического процесса в ЦГС на развитие ишемии в исследуемых органах получаем выражения оценки степени тяжести с учетом гемодинамики ЦГС:

$$ST_C = U_C + ST_{Ц} - U_C \cdot ST_{Ц}, \quad (3)$$

$$ST_M = U_M + ST_{Ц} - U_M \cdot ST_{Ц}, \quad (4)$$

$$ST_k = U_k + ST_{Ц} - U_k \cdot ST_{Ц}. \quad (5)$$

На итоговом этапе синтеза гибридных нечетких моделей в соответствии с рекомендациями [5, 9, 12, 13] получены системы функций принадлежности к искомым классам состояний  $\omega_n, \omega_l, \omega_p, \omega_k$  с базовыми переменными  $ST_C, ST_M, ST_k$ ; для нижних конечностей –  $\mu_n(ST_k), \mu_l(ST_k), \mu_p(ST_k), \mu_k(ST_k)$ ; для сердца –  $\mu_n(ST_C), \mu_l(ST_C), \mu_p(ST_C), \mu_k(ST_C)$ ; для головного мозга –  $\mu_n(ST_M), \mu_l(ST_M), \mu_p(ST_M), \mu_k(ST_M)$ .

Графики перечисленных функций принадлежности приведены на рис. 1.

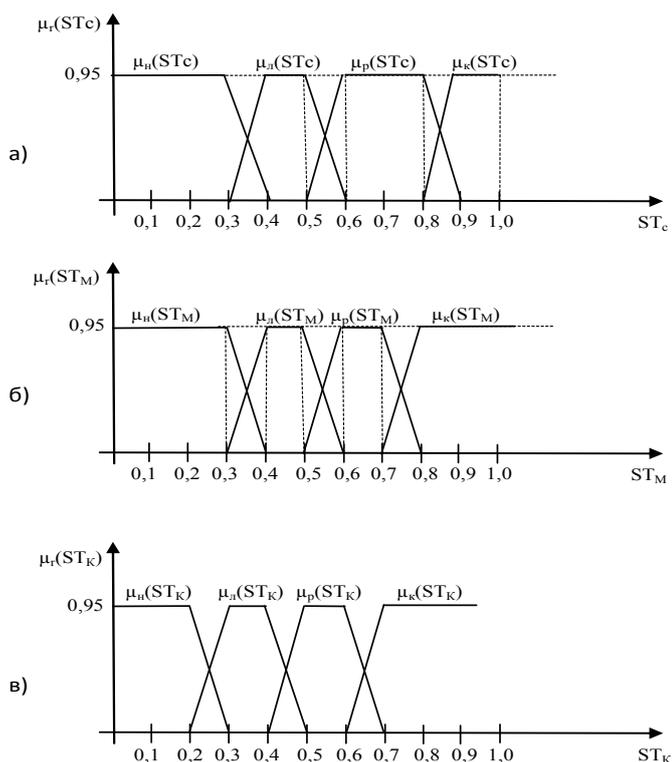


Рис. 1. Графики функций принадлежности к степеням тяжести ишемии  
 а) – сердца; б) – головного мозга; в) – нижних конечностей

Решение о классификации (о принадлежности к одному из классов  $\omega_\ell$  ( $\ell = n, l, p, k$ )) принимается в пользу класса имеющего величину максимальную функции принадлежности.

Уверенность в правильной классификации определяется по величине выбранной функции принадлежности.

Аналитически расчет уверенности в классификации  $\omega_\ell$  по каждому органу  $U_K, U_C, U_M$  определяется нечеткими выражениями вида:

$$U_K = \max[\mu_n(ST_K), \mu_l(ST_K), \mu_p(ST_K), \mu_k(ST_K)] \quad (6)$$

$$U_C = \max[\mu_n(ST_C), \mu_l(ST_C), \mu_p(ST_C), \mu_k(ST_C)] \quad (7)$$

$$U_M = \max[\mu_n(ST_M), \mu_l(ST_M), \mu_p(ST_M), \mu_k(ST_M)] \quad (8)$$

При равенстве двух функций принадлежности по органу решение принимается в пользу более тяжелой степени.

В случае двух ненулевых функций принадлежности врачу сообщается о величине уверенности (по величине  $\mu_\ell(ST_r)$ ) в обеих классах, что позволяет более гибко формировать схемы профилактики и лечения.

В результате математического моделирования и экспертного оценивания было установлено, что уверенность в правильной классификации с использованием предлагаемых моделей составляет 0,95, что является хорошим результатом для исследуемого класса задач.

Алгоритм выбора различных схем профилактики и лечения построен в виде табличной модели в которой каждой из 64 возможных комбинаций классов состояний исследуемых органов поставлена в соответствии своя схема лечения  $S_j$ . В силу ограничений на объем статьи полную таблицу из 64 схем лечения привести невозможно. Поэтому в табл. 2 приведен фрагмент табличного алгоритма схем лечения.

**Алгоритм выбора схем лечения (фрагмент)**

Комбинация классов состояний			Схемы профилактики и лечения $s_j$
Нижние конечности	сердце	головной мозг	
$\omega_H$	$\omega_H$	$\omega_H$	S1: Вессел–дуэф 2,0 парентерально №10, затем перорально 1 табл. 2 р/сутки в течение 2х месяцев
$\omega_H$	$\omega_H$	$\omega_L$	S2: S1 + сермион 2 мг в/м №10, затем перорально 5 мг 3 р/сутки в течение 2 мес.
*****			
$\omega_K$	$\omega_K$	$\omega_K$	S64: Алпростан парентерально 100 (200 мкг/сутки) N10-30 Фраксипарин 0.6 п/к N10 Вессел–дуэф 4.0 парантерально N10 (после фраксипарина), затем перорально вессел–дуэф 1тб. 2р/сутки в течение 2 мес. <b>ПРАДАКСА</b> 150 (110) мг. 2р/сутки в случае тромбоза или эмболии артерии длительно до 12 месяцев или при наследственных тромбофилиях на фоне ХОЗАНК. Неотон 1.0 парентерально N 10 Цераксон 500 мг в/м N 10 Деринат 5.0 N 5-10

При построении табличного алгоритма выбора схем профилактики и лечения в соответствии с рекомендациями [7, 15] производилась их оптимизация с использованием теории измерения латентных переменных на основе модели Г. Раша.

**Результаты и их обсуждение.** Полученные в работе решающие правила синтезировались с использованием опыта и интуиции высококвалифицированных экспертов, которые хотя и превосходят иногда по качественным показателям принятия решений работу формальных моделей, но при возможности требуют проведения соответствующих статистических испытаний [7, 12].

С целью объективизации оценки качества работы полученных решающих правил из наблюдаемой группы людей были сформированы 4 контрольные выборки по 100 человек с точно установленной степенью тяжести заболевания по каждому из контролируемых правил. Для каждой из контрольных выборок определялись такие, общепринятые показатели качества классификации как: *диагностическая чувствительность* (ДЧ); *диагностическая специфичность* (ДС); *диагностическая эффективность* (ДЭ) [13, 14].

Анализ результатов контрольных статистических испытаний показал, что все вычисляемые показатели имели значения не ниже 0,95, что позволяет рекомендовать полученные математические модели к использованию в медицинской практике сосудистых хирургов и ангиологов.

При оценке эффективности алгоритма выбора схем лечения 160 пациентам проводилась *традиционная терапия* (ТТ) в соответствии с рекомендациями [1-3] и 240 пациентам назначались схемы лечения в соответствии с алгоритмом табл. 2 (ПСЛ).

С учетом того, что ведущим заболеванием, исследуемым в данной работе, является ХОЗАНК, для контроля эффективности проводимого лечения использовался показатель степени тяжести ишемических поражений нижних конечностей, определяемый по выражению (5) и результаты классификации с оценкой в её уверенности, определяемые по выражению (6). При этом учитывались: исходное значение показателя  $ST_K$  ( $ST_{KO}$ ); значение  $ST_K$  после применения схем лечения ( $ST_{KL}$ ); время наблюдения за пациентами ( $\Delta t_n$ ); скорость изменения показателя  $ST_K$  ( $V = (ST_{KO} - ST_{KL}) / \Delta t_n$ ); количество людей с ухудшающимся состоянием ( $n_v$ ); количество людей с ампутированными нижними конечностями ( $n_a$ ); исходный класс состояний пациента (по отношению к нижним конечностям)  $\omega_r$  ( $r$  = норма(н), латентное состояние (л), реверсивное состояние (р), критическое состояние (к))

В табл. 3 приведены средние значения перечисленных выше показателей с указанием исходных классов состояний  $\omega_r$  и количества пациентов с ухудшающимся состоянием, вплоть до ампутации нижних конечностей.

Таблица 3

**Результаты использования различных схем лечебно-оздоровительных мероприятий к пациентам с ХОЗАНК**

Показатели СЛ/ $\omega_r$	Количество пациентов $n_0$	$\overline{ST}_{KO} \pm m_0$	$\overline{ST}_{KL} \pm m_{\Delta}$	$\Delta t_n$ (дни)	$\bar{V}$	$n_y$	$n_A$
ТТ/ $\omega_a$	20	0,22±0,02	0,18±0,01	10	0,004	8 (16%)	-
ТТ/ $\omega_b$	30	0,35±0,03	0,28±0,03	20	0,0035	12 (16%)	5 (16%)
ТТ/ $\omega_p$	60	0,52±0,04	0,44±0,03	30	0,0026	39 (16%)	12 (20%)
ТТ/ $\omega_k$	50	0,72±0,04	0,65±0,03	40	0,0018	35 (16%)	25 (50%)
ПСЛ/ $\omega_a$	30	0,23±0,02	0,15±0,01	10	0,008	1 (16%)	-
ПСЛ/ $\omega_b$	50	0,4±0,03	0,22±0,01	20	0,009	8 (16%)	-
ПСЛ/ $\omega_p$	90	0,55±0,04	0,38±0,02	30	0,006	27 (16%)	5(5%)
ПСЛ/ $\omega_k$	70	0,72±0,05	0,52±0,04	40	0,005	30 (16%)	10(14%)

Примечание: СЛ – тип схемы лечения, черта над показателем в верхней строке таблицы означает значение его математического ожидания

Качество проводимых лечебно-оздоровительных мероприятий проверялось по величине изменения  $ST_K (\Delta ST_K = ST_{K0} - ST_{KL})$ , по скорости изменения  $ST_K - V$ ; по количеству людей с ухудшающимися состояниями (по отношению к степени тяжести ишемии нижних конечностей) и по количеству людей с ампутированными конечностями (табл. 4).

Таблица 4

**Выборка людей с ампутированными конечностями**

ПЭ	Класс				Средняя по всем классам $\omega_r$
	$\omega_H$	$\omega_L$	$\omega_P$	$\omega_K$	
Эффективность по $\Delta ST_K$	2/50	2/50	2,1/33	2,9/65	2,25/54,5
Эффективность по $V$	2/50	2,6/61	2,3/57	2,8/64	2,4/58
Эффективность по $n_y$	8/88	1,5/33	1,4/29	1,2/14	3/41
Эффективность по $n_A$	*/*	*/100	2,4/58	2,5/60	2,5/73

Примечание: ПЭ – показатель эффективности; числитель-разы, знаменатель-проценты;  
 \* – математически некорректная операция

Анализ табл. 4 позволяет сделать вывод, что по всем показателям эффективность предлагаемых схем лечения выше традиционных. Например, по всем классам состояний эффективность по показателю  $\Delta ST_K$  выросла в 2,25 раза; по показателю  $V$  в 2,4 раза; по  $n_y$  – в 3 раза; по  $n_A$  – в 2,5 раза. В процентах рост составил: по  $\Delta ST_K$  – на 54,5%; по  $V$  – на 58%; по  $n_y$  – на 41%; по  $n_A$  – на 73%.

В результате проведенных исследований по синтезу решающих правил оценки степени тяжести ишемических процессов в различных органах и системах и алгоритма выбора рациональных схем профилактики и лечения был выбран адекватный математический аппарат исследования – метод синтеза гибридных нечетких решающих правил в сочетании с теорией измерения латентных переменных с моделью Г. Раша. С использованием выбранного математического аппарата получена система математических моделей оценки степени тяжести ишемических процессов в центральной гемодинамической системе, нижних конечностях, сердце и головном мозге, и классификации нормальных, латентных, реверсивных и критических состояний исследуемых органов. Для различных состояний этих классов состояний по исследуемым органам разработан алгоритм выбора рациональных схем профилактики и лечения.

Показано, что по сравнению с традиционными схемами лечения использование предлагаемого алгоритма по различным критериям оценки эффективности позволяет увеличить скорость достижения положительных результатов в 2,4 раза (на 58%) и снизить риск ампутации конечностей в 2,5 раза (на 73%).

Полученные математические модели следует использовать в медицинской практике сосудистых хирургов и ангиологов как в виде программного обеспечения смартфонов и планшетных компьютеров, так и в составе мощных систем поддержки принятия решений, включая телемедицинские системы.

Широкое внедрение полученных результатов в медицинскую практику позволит дифференцировать состояние пациентов с ХОЗАНК, выбирая адекватные схемы профилактики и лечения, а в случае развития критических состояний позволяет подобрать адекватную процессу нарастания некробиотических изменений в ишемизированной конечности схему лечения. Своевременная и адресная, узко специфичная помощь сохраняет опорную функцию конечности, даже при органосохраняющей ампутации, что снижает госпитализацию больных с ХОЗАНК.

**Заключение.** Полученные в работе математические модели позволяют дифференцировать степень тяжести ишемического поражения по четырем конечностям: норма, латентное, реверсивное и критическое состояние по нижним конечностям, сердцу и головному мозгу. Для выделенных классов разработан алгоритм выбора адекватных схем профилактики и лечения (всего 64 схемы). В ходе проведенных статистических испытаний было показано, что по сравнению с традиционными схемами лечения использование предлагаемого алгоритма позволяет увеличить скорость достижения положительных результатов в 2,4 раза (на 58 %) и снизить риск ампутации конечностей в 2,5 раза (на 73 %).

### Литература

1. Быков А.В., Устинов А.Г., Хрипина И.И. Модель прогнозирования возникновения осложнений ишемии нижних конечностей путем оценки функционального резерва организма // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2015. №4(17). С. 81–88.
2. Быков А.В., Корневский Н.А., Емельянов С.Г. Прогнозирование степени тяжести ишемического процесса сердца, головного мозга и нижних конечностей // Биомедицинская радиоэлектроника. 2016. №9. С. 4–9.
3. Воронцов И.М., Шаповалов В.В., Шерстюк Ю.М. Опыт разработки и обоснование применения автоматизированных систем для мониторинга и скринирующей диагностики нарушений здоровья. Санкт-Петербург: КОСТА, 2007. 429 с.
4. Корневский Н.А. Использование нечеткой логики принятия решений для медицинских экспертных систем // Медицинская техника. 2015. №1 (289). С. 33–35.
5. Корневский Н.А. Метод синтеза гетерогенных нечетких правил для анализа и управления состоянием биотехнических систем. Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика // Медицинское приборостроение. 2013. №2. С. 99–103.
6. Корневский Н.А., Рябкова Е.Б. Метод синтеза нечетких решающих правил для оценки состояния сложных систем по информации о геометрической структуре многомерных данных // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т.7, №8. С. 128–136.
7. Корневский Н.А., Артеменко М.В., Провоторов В.Н., Новикова Л.А. Метод синтеза нечетких решающих правил на основе моделей системных взаимосвязей для решения задач прогнозирования и диагностики заболеваний // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2014. Т. 13, №4. С. 881–886.
8. Корневский Н.А., Бойцова Е.А., Шуткин А.Н. Оценка и управление состоянием здоровья на основе моделей моделей Г.Раша // Медицинская техника. 2015. №6. С. 37–40.
9. 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, 2016. 472 с.
10. Корневский Н.А., Серебровский Н.А., Коптева В.И., Говорухина Н.А. Прогнозирование и диагностика заболеваний, вызываемых вредными производственными и экологическими факторами на основе гетерогенных моделей. Т.Н. – Курск: Изд-во Курск. гос. с.-х. ак, 2012. 231 с.
11. Корневский Н.А., Разумова К.В. Синтез коллективов гибридных нечетких моделей оценки состояния сложных систем // Научные технологии. 2014. Т.15, №12. С. 31–40.
12. Лазаренко В.А., Николаев С.Б., Быстрова Н.А., Конопля А.И. Способ лечения критической ишемии нижних конечностей различного генеза. Патент 2421221. 2011 июнь 20.
13. Савельев В.С., Кошкин В.М., Каралкин А.В. Патогенез и консервативное лечение тяжелых стадий облитерирующего атеросклероза артерий нижних конечностей: Руководство для врачей. М.: ООО “Медицинское информационное агентство”, 2010. 216 с.
14. Al-Kasasbeh R.T., Ionescu F., Kornevskiy N.A., Alshamasin M. Prediction and prenosological diagnostics of heart diseases based on energy characteristics of acupuncture points and fuzzy logic // Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering. 2012. Vol. 15, No. 7. P. 681–689.
15. Savelyeva V.S., Kiriyyenko A.I. Vascular Surgery. National leadership. M.: GEOTAR–Media, 2014. 464 p.

**References**

1. Bykov AV, Ustinov AG, Hripina II. Model' prognozirovaniya vozniknoveniya oslozhnenij ishemii nizhnih konechnostej putem ocenki funkcional'nogo rezerva organizma [Model of forecasting of complications of ischemia of the lower extremities by assessing the functional reserve of the organism]. Izvestiya YUgo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Medicinskoe priborostroenie. 2015;4(17):81-8. Russian.
2. Bykov AV, Korenevskij NA, Emel'yanov SG. Prognozirovanie stepeni tyazhesti ishemiche-skogo processa serdca, golovnogo mozga i nizhnih konechnostej [Prediction of severity of ischemic process of the heart, brain and lower extremities]. Biomedicinskaya radioelektronika. 2016;9:4-9. Russian.
3. Voroncov IM, SHapovalov VV, SHERstyuk YUM. Opyt razrabotki i obosnovanie primene-niya avtomatizirovannyh sistem dlya monitoringa i skriniruyushchej diagnostiki narushenij zdorov'ya [the Experience of the development and rationale for the use of automated systems for monitoring and srinilaya diagnosis of health disorders]. Sankt-Peterburg: KOSTA; 2007. Russian.
4. Korenevskij NA. Ispol'zovanie nechetkoj logiki prinyatiya reshenij dlya medicinskih ehks-pertnyh sistem [The use of fuzzy logic of decision-making for medical expert systems]. Medicinskaya tekhnika. 2015;1(289):33-5. Russian.
5. Korenevskij NA. Metod sinteza geterogennyh nechetkih pravil dlya analiza i upravleniya sostoyaniem biotekhnicheskikh sistem [Method of synthesis of heterogeneous fuzzy rules for analysis and control of biotechnical systems]. Izvestiya YUgo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Medicinskoe priborostroenie. 2013;2:99-103. Russian.
6. Korenevskij NA, Ryabkova EB. Metod sinteza nechetkih reshayushchih pravil dlya ocenki sostoyaniya slozhnyh sistem po informacii o geometricheskoy strukture mnogomernyh dannyh [The method of synthesis of fuzzy decision rules for the evaluation of the state of complex systems of information on the geometric structure of the multidimensional data]. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2011;7(8):128-36. Russian.
7. Korenevskij NA, Artemenko MV, Provotorov VN, Novikova LA. Metod sinteza nechetkih reshayushchih pravil na osnove modelej sistemnyh vzaimosvyazej dlya resheniya zadach prognozirovaniya i diagnostiki zabolevanij [Method for the synthesis of fuzzy decision rules based on models of system relationships for solving problems of forecasting and diagnostics of diseases]. Sistemnyj analiz i upravlenie v biomedicinskih sistemah. 2014;13(4):881-6. Russian.
8. Korenevskij NA, Bojcova EA, SHutkin AN. Ocenka i upravlenie sostoyaniem zdorov'ya na osnove modelej modelej G.Rasha [Assessment and management of health status on the basis of models of models of rash]. Medicinskaya tekhnika. 2015;6:37-40. Russian.
9. Korenevskij NA, SHutkin AN, Gorbatenko SA, Serebrovskij VI. Ocenka i upravlenie sostoyaniem zdorov'ya obuchayushchihsya na osnove gibridnyh intellektual'nyh tekhnologij [assessment and management of health status of students on the basis of hybrid intellectual technologies]: monografiya. Staryj Oskol: TNT; 2016. Russian.
10. Korenevskij NA, Serebrovskij NA, Kopteva VI, Govoruhina NA. Prognozirovanie i diagnostika zabo-levanij, vyzyvaemyh vrednymi proizvodstvennymi i ehkologicheskimi faktorami na osnove geterogennyh modelej [Prediction and diagnosis of diseases caused by harmful industrial and environmental factors based on heterogeneous models]. T.N. – Kursk: Izd-vo Kursk. gos. s.-h. ak; 2012. Russian.
11. Korenevskij NA, Razumova KV. Sintez kollektivov gibridnyh nechetkih modelej ocenki sostoyaniya slozhnyh sistem [Synthesis of hybrid ensembles of fuzzy models for the assessment of complex systems]. Naukoemkie tekhnologii. 2014;15(12):31-40. Russian.
12. Lazarenko VA, Nikolaev SB, Bystrova NA, Konoplya AI. Sposob lecheniya kriticheskoj ishemii nizhnih konechnostej razlichnogo gena [The method of treatment of critical ischemia of the lower extremities of various Genesis]. Russian Federation Patent 2421221. 2011 iyun' 20. Russian.
13. Savel'ev VS, Koshkin VM, Karalkin AV. Patogenez i konservativnoe lechenie tyazhelyh stadij oblite-riruyushchego ateroskleroza arterij nizhnih konechnostej [Pathogenesis and conservative treatment severe stages of arteriosclerosis obliterans of lower limb arteries: a Guide for physicians]: Rukovodstvo dlya vrachej. Moscow: OOO "Medicinskoe informacionnoe agentstvo"; 2010. Russian.
14. Al-Kasasbeh RT, Ionescu F, Korenevskiy NA, Alshamasin M. Prediction and prenosological diag-nostics of heart diseases based on energy characteristics of acupuncture points and fuzzy logic. Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering. 2012;15(7):681-9.
15. Savel'eva VS, Kiriyaenko AI. Vascular Surgery. National leadership. Moscow: GEOTAR-Media; 2014.

**Библиографическая ссылка:**

Быков А.В., Корневский Н.А., Пархоменко С.А., Родионова С.Н., Цымбал Е.В. Выбор схем лечебно-оздоровительных мероприятий для больных хроническими облитерирующими заболеваниями артерий нижних конечностей с учетом системных взаимосвязей центральной и региональной гемодинамики // Вестник новых медицинских технологий. Электронное издание. 2018. №6. Публикация 2-4. URL: <http://www.medtsu.tula.ru/VNMT/Bulletin/E2018-6/2-4.pdf> (дата обращения: 20.11.2018). DOI: 10.24411/2075-4094-2018-16230. \*

\* номера страниц смотреть после выхода полной версии журнала: URL: <http://medtsu.tula.ru/VNMT/Bulletin/E2018-6/e2018-6.pdf>