

7. Федотов А.А. Амплитудно-временной метод детектирования характерных точек сигнала пульсовой волны // Медицинская техника. 2012. № 6. С. 22-28.
8. Fu T.H. et al. Heart rate extraction from photoplethysmogram waveform using wavelet multi-resolution analysis // Journal of Medical and Biological Engineering. 2008. Vol. 28 (4). PP. 229-232.
9. Han H. et al. Development of real-time motion artifact reduction algorithm for a wearable photoplethysmography / Proceedings of the 29th Annual International Conference of the IEEE EMBS. 2007. PP. 1538-1541.
10. McSharry P.E., Clifford G.D. A realistic coupled nonlinear artificial ECG, BP and respiratory signal generator for assessing noise performance of biomedical signal processing algorithms // Proceedings of the SPIE. 2004. Vol. 5467. PP. 290-301.
11. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. – М.: Энергоатомиздат, 1991. 304 с.

Александр Александрович Федотов,  
канд. техн. наук, доцент,  
кафедра лазерных и биотехнических систем,  
ФГАОУ ВО «Самарский национальный  
исследовательский университет  
им. акад. С.П. Королева»,  
г. Самара,  
e-mail: fedoaleks@yandex.ru

А.В. Быков, Н.А. Корневский, С.Н. Родионова, М.В. Артеменко

## Интеллектуальная поддержка выбора схем лечебной стабилизации при смешанном ишемическом поражении

### Аннотация

С использованием методологии синтеза гибридных нечетких моделей получена система математических моделей оценки степени тяжести ишемических процессов в центральной гемодинамической системе, нижних конечностях, сердце и головном мозге и классификация нормальных, латентных, реверсивных и критических состояний исследуемых органов. Для различных 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 %).

### Введение

Несмотря на значительные усилия мировой медицины, проблема успешного лечения мультицентричной ишемической болезни далека от своего эффективного решения. Одной из проблем, связанной с ведением ишемических больных, является частое сочетание сосудистых поражений различных органов, включая головной мозг, сердце и нижние конечности [1]-[4].

Проведенные исследования показали, что патологические состояния сердца и сосудов, включая сосуды головного мозга и нижних конечностей, сосуществуют длительное время, приобретая хроническую взаимоотношающую связь [2], [3].

Такое течение хронических ишемических процессов требует разработки адекватных способов профилактики и лечения, ориентированных на комплексную терапию всех пораженных систем и органов с учетом степени тяжести патологического процесса.

С учетом сказанного, *целью рассматриваемой работы* является повышение эффективности профилактики и лечения пациентов с сочетанной ишемической патологией центральной гемодинамической системы, нижних конечностей, сердца и головного мозга.

Медицинская поддержка работы выполнялась экспертами – группой врачей под руководством доктора А. Быкова.

### Методы и модели

Для достижения поставленной цели предполагается использовать интеллектуальную систему поддержки принятия решений, в которой выбор схем лечебной стабилизации при сочетанной ишемии центральной гемодинамической системы, нижних конечностей, сердца и головного мозга базируется на оценке степени тяжести поражения исследуемых систем и органов, по которым определяются такие классы их состояний, как нор-

мальное состояние (класс  $\omega_n$ ), латентное состояние (класс  $\omega_l$ ), реверсивное состояние (класс  $\omega_p$ ) и критическое состояние (класс  $\omega_k$ ). Для различных классов состояний выбираются адекватные базовые схемы профилактики или лечения, состав и количество которых оптимизированы с использованием теории измерения латентных переменных с моделью Г. Раша [5]-[7].

Математические модели оценки степени тяжести ишемического поражения центральной гемодинамической системы –  $ST_B$ , сердца –  $ST_C$ , головного мозга –  $ST_M$ , нижних конечностей –  $ST_K$  достаточно хорошо описаны в работах [3], [8].

Модели оценки степени тяжести получены в соответствии с общими рекомендациями по синтезу гибридных нечетких правил, описанными в работах [6]-[8], [9]-[12], в которых основными элементами являются функции 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 –  $\mu_n(ST_M), \mu_l(ST_M), \mu_p(ST_M), \mu_k(ST_M)$ .

Аналитические описания всех функций приведены в работах [3], [8], [9].

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

Уверенность в правильной классификации определяется по величине выбранной функции принадлежности:

$$U_K = \max[\mu_n(ST_K), \mu_l(ST_K), \mu_p(ST_K), \mu_k(ST_K)]; \quad (1)$$

$$U_C = \max[\mu_n(ST_C), \mu_l(ST_C), \mu_p(ST_C), \mu_k(ST_C)]; \quad (2)$$

$$U_M = \max[\mu_n(ST_M), \mu_l(ST_M), \mu_p(ST_M), \mu_k(ST_M)]. \quad (3)$$

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

В случае двух ненулевых функций принадлежности врачу сообщается о степени уверенности в обоих 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 с использованием графовой и табличной моделей. В графовой модели схемы лечения  $S_q$  ( $q = 1, \dots, 64$ ) связаны с классами состояний  $\omega_n, \omega_p, \omega_r$  и  $\omega_k$  графом, вершины которого соответствуют базовым схемам лечения  $S_q$  по исследуемым органам:  $нк$  – нижние конечности;  $c$  – сердце;  $m$  – головной мозг. Над дугами графа изображены определяемые в ходе вычислений классы состояний:  $n$  – норма;  $л$  – латентное;  $p$  – реверсивное;  $к$  – критическое.

Проход по графу осуществляется по ветвям классов с максимальными значениями функций принадлежности к выбранным классам состояний. Для вычисления номера  $q$  схемы лечения  $S_q$  зададим цифровые обозначения степеней тяжести:  $n = 1, л = 2, p = 3, к = 4$  – и обозначим идентификатором  $t$  номер функции принадлежности  $\mu_r(ST_K)$  с максимальным значением  $\max[\mu_r(ST_K)]$ ; идентификатором  $j$  – номер функции принадлежности  $\mu_r(ST_C)$  с максимальным значением  $\max[\mu_r(ST_C)]$ ; идентификатором  $s$  – номер функции принадлежности  $\mu_r(ST_M)$  с максимальным значением  $\max[\mu_r(ST_M)]$  ( $r = n, л, p, к$ ).

Тогда номер схемы лечения  $S_q$  определяется выражением

$$q = s + 4(j - 1) + 16(t - 1). \quad (4)$$

Уверенность в выборе схемы лечения  $S_q$  определяется выражением

$$US_q = \min[\mu_s(ST_M), \mu_j(ST_C), \mu_t(ST_K)]. \quad (5)$$

При динамическом наблюдении за состоянием больного изменение схем лечения осуществляется в зависимости от изменения величин  $ST_p, US_q$  путем перехода на соответствующие дуги и в зависимости от скорости изменения показателей  $ST_p$  ( $p = к, c, m$ ).

Учет скорости изменения показателей  $ST_p$  осуществляется через коэффициент коррекции  $KK_p$ , определяемый следующим образом. Рассчитываются  $ST_p$  на номере интервала наблюдений  $h - ST_p(h)$ . Через заданный интервал времени наблюдения  $\Delta t_h = t_{h+1} - t_h$  вновь рассчитывается значение  $ST_p(h + 1)$ . Определяется скорость изменения  $ST_p$  на интервале  $\Delta t_h$  по формуле

$$V_p(h) = \frac{ST_p(h + 1) - ST_p(h)}{\Delta t_h}. \quad (6)$$

Рекомендуемая величина  $\Delta t_h$  – одна неделя.

Коэффициенты коррекции  $KK_p(h)$  связаны со скоростью  $V_p(h)$  зависимостью

$$KK_p(h) = \begin{cases} -0,625 \cdot V_p(h) + 0,125, & \text{если } V_p(h) < -0,2; \\ 0, & \text{если } -0,2 \leq V_p(h) < 0,2; \\ 1,25 \cdot V_p(h) - 0,25, & \text{если } 0,2 \leq V_p(h) < 0,6; \\ 0,5, & \text{если } V_p(h) \geq 0,6. \end{cases} \quad (7)$$

Введение показателя  $KK_p(h)$  вместо  $V_p(h)$  позволяет организовать простое управление коррекцией схем лечения в зависимости от динамики состояния здоровья пациента с использованием выражения (4).

Коррекция схем лечения с учетом выражения (4) осуществляется следующим способом. По показателям, измеренным в момент времени  $h + 1$ , определяется схема  $ST_p(h + 1)$ . По формуле (4) определяется схема  $S_q$ .

По формуле (6) определяется величина  $V_p(h)$ , и по формуле (7) – величина  $KK_p(h)$ .

Если для каких-либо  $p$   $KK_p(h) = 0,5$ , то рекомендуется изменить базовую схему лечения  $S_q$  на  $S_q^*$  следующим образом. Осуществляется пересчет  $ST_p$  для тех составляющих, для которых  $KK_p(h) = 0,5$ , по формуле

$$S_p^* = ST_p + 0,5(1 - ST_p).$$

По формуле (4) с учетом найденного значения  $S_p^*$  определяется  $S_q^*$ .

Если  $KK_p(h) = 0$ , то схемы лечения не корректируются.

Если  $0 < KK_p(h) < 0,5$ , то базовые схемы лечения, выбранные для времени  $h + 1$ , корректируются по следующей схеме.

Для  $0 < KK_p(h) < 0,25$  схема  $S_q$  корректируется до схемы  $S_q^*$ . Для  $0,25 \leq KK_p(h) < 0,5$  схема  $S_q$  корректируется до схемы  $S_q^{**}$ . Для  $-0,25 < KK_p(h) < 0$  схема  $S_q$  корректируется до схемы  $S_q^+$ . Для  $-0,5 \leq KK_p(h) \leq -0,25$  схема  $S_q$  корректируется до схемы  $S_q^{**}$ .

Фрагмент табличной модели выбора схемы лечения приведен табл. 1.

При построении табличного алгоритма выбора схем профилактики и лечения в соответствии с рекомендациями [5]-[7], [13] производилась их оптимизация с использованием теории измерения латентных переменных на основе модели Г. Раша.

## Результаты

В данной статье приведены результаты исследований на пациентах, страдающих хроническими облитерирующими заболеваниями артерий нижних конечностей (ХОЗАНК). Для оценки эффективности алгоритма выбора схем лечения 160 пациентам проводилась традиционная терапия в соответствии с рекомендациями [5]-[7], [13] и 240 пациентам назнача-

Таблица 1

Алгоритм выбора схем лечения (фрагмент)

Комбинация классов состояний			Схемы профилактики и лечения $S_j$
Нижние конечности	Сердце	Головной мозг	
$\omega_n$	$\omega_n$	$\omega_n$	S1: вессел-дуэф 2,0 парентерально № 10, затем перорально 1 табл. 2 раз/сут. в течение 2 мес.
$\omega_n$	$\omega_n$	$\omega_n$	S2: S1 + сермион 2 мг в/м № 10, затем перорально 5 мг 3 раз/сут. в течение 2 мес.
			.....
$\omega_k$	$\omega_k$	$\omega_k$	S64: алпростан парентерально 100 (200 мкг/сут.) № 10...30. Фраксипарин 0,6 г/к № 10. Вессел-дуэф 4,0 парентерально № 10 (после фраксипарина), затем перорально вессел-дуэф 1 табл. 2 раз/сут. в течение 2 мес. Прадакса 150 (110) мг. 2 раз/сутки в случае тромбоза или эмболии артерии длительно до 12 мес. или при наследственных тромбофилиях на фоне ХОЗАНК. Неотон 1,0 парентерально № 10. Цераксон 500 мг в/м № 10. Деринат 5,0 № 5...10

лись схемы лечения в соответствии с алгоритмом табл. 1 (модель 4). Для контроля эффективности проводимого лечения использовали показатель степени тяжести ишемических поражений нижних конечностей и результаты классификации с оценкой в ее уверенности, определяемые по выражению (1). При этом учитывались: исходное значение показателя  $ST_k$  ( $ST_{ко}$ ); значение  $ST_k$  после применения схем лечения ( $ST_{кл}$ ); время наблюдения за пациентами ( $\Delta t_n$ ); скорость изменения показателя  $ST_k$  [ $V = (ST_{ко} - ST_{кл}) / \Delta t_n$ ]; количество людей с ухудшающимся состоянием ( $ny$ ); количество людей с ампутированными нижними конечностями ( $na$ ); исходный класс состояний пациента (по отношению к нижним конечностям)  $\omega_r$  [ $r =$  норма ( $n$ ); латентное состояние ( $л$ ); реверсивное состояние ( $p$ ); критическое состояние ( $к$ )].

В табл. 2 приведены средние значения перечисленных выше показателей с указанием исходных классов состояний  $\omega_r$  и количества пациентов с ухудшающимся состоянием, вплоть до ампутации нижних конечностей.

Качество проводимых лечебно-оздоровительных мероприятий проверялось по величине изменения  $ST_k$  ( $\Delta ST_k = ST_{ко} - ST_{кл}$ ), скорости изменения ( $ST_k - V$ ); количеству людей с ухудшающимся состоянием (по отношению к степени тяжести ишемии нижних конечностей) и количеству людей с ампутированными конечностями.

Анализ табл. 2 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  $ny$  – в 3 раза; по  $na$  – в 2,5 раза. В процентах рост составил: по  $\Delta ST_k$  – на 54,5 %; по  $V$  – на 58 %; по  $ny$  – на 41 %; по  $na$  – на 73 %.

## Заключение

Полученные в работе математические модели позволяют дифференцировать степень тяжести ишемического поражения по четырем классам: норма, латентное, реверсивное и критическое состояния 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 и снизить риск ампутации конечностей в 2,5 раза.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-31-90067.*

## Список литературы:

1. 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.
2. Быков А.В., Устинов А.Г., Хритина 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.
3. 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.
4. Savelyeva V.S., Kiriyenko A.I. Vascular Surgery. National Leadership. – М.: GEOTAR – Media, 2014. 464 p.
5. Корневский Н.А., Бойцова Е.А., Шуткин А.Н. Оценка и управление состоянием здоровья на основе моделей Г. Раша // Медицинская техника. 2015. № 6. С. 37-40.
6. Корневский Н.А., Родионова С.Н., Хритина И.И. Методология синтеза гибридных нечетких решающих правил для медицинских интеллектуальных систем поддержки принятия решений / Монография. – Старый Оскол: ТНТ, 2019. 472 с.
7. 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.
8. Быков А.В., Корневский Н.А., Корневская С.Н., Филатова О.И. Способ комплексной терапии при сочетанной ишемии центральной гемодинамической системы, нижних конечностей, сердца и головного мозга / Патент РФ № 2478968. 2018. Бюл. № 33.
9. 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.
10. Корневский Н.А. Использование нечеткой логики принятия решений для медицинских экспертных систем // Медицинская техника. 2015. № 1 (289). С. 33-35.

Таблица 2

### Результаты применения различных схем лечебно-оздоровительных мероприятий к пациентам с ХОЗАНК

Показатели СЛ / $\omega_r$	Количество пациентов $n_0$	$\overline{ST}_{ко} \pm m_o$	$\overline{ST}_{кл} \pm m_d$	$\Delta t_n$ , дней	$V$	$ny$	$na$
ТТ / $\omega_n$	20	0,22 ± 0,02	0,18 ± 0,01	10	0,004	8	–
ТТ / $\omega_n$	30	0,35 ± 0,03	0,28 ± 0,03	20	0,0035	12	5
ТТ / $\omega_p$	60	0,52 ± 0,04	0,44 ± 0,03	30	0,0026	39	12
ТТ / $\omega_k$	50	0,72 ± 0,04	0,65 ± 0,03	40	0,0018	35	25
ПСЛ / $\omega_n$	30	0,23 ± 0,02	0,15 ± 0,01	10	0,008	1	–
ПСЛ / $\omega_n$	50	0,4 ± 0,03	0,22 ± 0,01	20	0,009	8	–
ПСЛ / $\omega_p$	90	0,55 ± 0,04	0,38 ± 0,02	30	0,006	27	5
ПСЛ / $\omega_k$	70	0,72 ± 0,05	0,52 ± 0,04	40	0,005	30	10

П р и м е ч а н и е : СЛ – тип схемы лечения, черта над показателем в верхней строке таблицы означает значение его математического ожидания; ТТ – традиционная терапия; ПСЛ – предлагаемые варианты схем лечения.

11. Корневский Н.А., Серебровский В.В., Разумова К.В., Хрипина И.И. Метод синтеза гибридных нечетких моделей принятия решений по оценке состояния и управлению биотехническими системами // Биомедицинская радиоэлектроника. 2016. № 9. С. 68-74.
12. Корневский Н.А., Рябова 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.
13. Быков А.В., Корневский Н.А., Колесник А.И., Говорухина Т.Н. Оптимизация схем лечебно-оздоровительных мероприятий при хронических облитерирующих заболеваниях артерий нижних конечностей с использованием теории измерения латентных переменных // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2018. Т. 6. № 4. С. 72-83.

Александр Владимирович Быков,  
канд. мед. наук, доцент,  
Николай Алексеевич Корневский,  
д-р техн. наук, профессор,  
зав. кафедрой,  
Софья Николаевна Родионова,  
аспирант,  
Михаил Владимирович Артеменко,  
канд. биолог. наук, доцент,  
кафедра биомедицинской инженерии,  
ФГБОУ ВО «Юго-Западный  
государственный университет»,  
г. Курск,  
e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

**Международное научно-техническое общество приборостроителей и метрологов (МНТО ПМ) –  
издатель журнала «ПРИБОРЫ»**

Международное научно-техническое общество приборостроителей и метрологов издает отраслевой научно-технический и производственный журнал «ПРИБОРЫ», отражающий состояние современного российского рынка приборостроительной продукции, интересы предприятий и потребителей, результаты деятельности разработчиков новых изделий и систем автоматизации, аналитические обзоры состояния этой сферы науки, техники и производства. Журнал ориентирован на широкий круг специалистов промышленности, предпринимателей, работников фирм и вузов, заинтересованных в систематическом получении актуальной и достоверной информации о выпускаемых в России и странах СНГ приборах и средствах автоматизации, о новых изделиях, предлагаемых потребителям, а также о действующих нормативных документах и рекомендациях. Журнал публикует материалы о новых методах измерений, сбора и представления измерительной и контрольной информации, новых конструкторских и технологических решениях, новых технологиях и материалах, составляющих основу создания новой конкурентоспособной продукции, осуществляет систематические публикации материалов по созданию и эксплуатации систем автоматизации различного назначения для отраслей промышленности, науки, по информационным технологиям, программно-техническим комплексам. Публикуется информация о профиле и продукции отдельных приборостроительных предприятий, их новых разработках, производственных и технологических возможностях и интересах. Тесные связи нашего Общества и редакции с Международной конфедерацией по измерениям (ИМЕКО) позволяют постоянно знакомить наших читателей с материалами этой весьма авторитетной международной профессиональной организации.

**Журнал зарегистрирован в ВАК РФ как научное издание.**

Журнал выходит 12 раз в год и распространяется по подписке.

В редакции можно оформить льготную подписку на 2020 год.  
Стоимость годовой подписки (12 экз.) – 14400 руб.

Заявки принимаются по тел./факсу: (495) 695-10-71  
или по e-mail: kavalero@mail.ru.

Более подробная информация о журнале «Приборы» – на сайте: [www.pribory-smi.ru](http://www.pribory-smi.ru).