

УДК 616.05-073.7-510.6

Нечеткая логика при прогнозировании неблагоприятных сценариев кардиологических заболеваний

А. В. Фролов^{1,2}, М. А. Марценюк², Т. Г. Вайханская¹, В. Б. Поляков²¹Республиканский научно-практический центр «Кардиология», Минск, Беларусь²Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

Резюме

Введение. Прогнозирование неблагоприятных сценариев заболеваний сердечно-сосудистой системы имеет важное клиническое значение. Создан ряд прогностических моделей на основе метода пропорциональных рисков Кокса. Однако при дихотомических переменных и аппаратных погрешностях в окрестности пороговых значений возрастает вероятность ошибочного прогноза. Метод нечеткой логики нивелирует данный недостаток.

Цель работы. Разработка индивидуализированной модели риск-стратификации пациентов на основе нечеткой логики и ее тестирование у пациентов с хронической сердечной недостаточностью.

Материал исследования. Модель риск-стратификации основана на логит-регрессии Кокса в сочетании с методом нечетких множеств. Тестирование модели выполнено у 240 пациентов с хронической сердечной недостаточностью. Регистрировали цифровую ЭКГ с оценкой маркеров электрической нестабильности миокарда, проводили 24-часовое холтеровское мониторирование ЭКГ и эхокардиографию.

Результаты исследования. Исследована функция вероятности неблагоприятных кардиоваскулярных событий при дихотомических переменных. Выявлен ее скачкообразный характер. Предложено логит-регрессию Кокса дополнить нечеткими множествами с сигмоидальными функциями принадлежности.

Тестирование выполнено у 240 пациентов с хронической сердечной недостаточностью. Чувствительность разработанной модели индивидуальной риск-стратификации составила 81%, а специфичность — 99%.

Заключение. Метод нечетких множеств позволили нивелировать скачки при оценке вероятности неблагоприятных событий вблизи пороговых значений, что благоприятно повлияло на точность прогноза. Разработанная нами модель имеет 94% прогностическую точность.

Ключевые слова: ЭКГ; электрическая нестабильность миокарда; риск-стратификация; логит-регрессия; нечеткая логика.

Клін. інформат. і Телемед. 2017. Т.12. Вип.13. с.35–41. <https://doi.org/10.31071/kit2017.13.05>

Введение

При прогнозировании неблагоприятных сценариев развития заболеваний сердечно-сосудистой системы хорошо зарекомендовал себя метод пропорциональных рисков Кокса. На его базе создан ряд моделей риск-стратификации для пациентов с инфарктом миокарда, кардиомиопатией, хронической сердечной недостаточностью, диабетом [1–5]. Метод Кокса более робастный, чем параметрические методы, не требует соблюдения того или иного закона распределения, не нуждается в априорных данных об абсолютных рисках, может аккумулировать как дискретные, так и непрерывные данные [6, 7]. Результаты риск-стратификации легко интерпретируются и эффективно используются при выработке клинических решений, в частности, при переходе от медикаментозных к кардиохирургическим технологиям лечения.

Спектр медико-биологических данных чрезвычайно широк. Это анамнез, клиника, результаты инструментальных, биохимических и молекулярно-генетических исследований, имеющие разнородную размерность. Не случайно, что цифровые данные часто трансформируют в дихотомические, используя пороговые значения, заложенные в международных Guidelines. Как правило, используется следующая кодировка: $x_i(t) = 0$ трактуется как норма, а $x_i(t) = 1$ соответствует выходу параметра $x_i(t)$ за пределы допустимых значений.

Однако при дихотомии, систематических и случайных аппаратных погрешностях возникает неопределенность, особенно вблизи установленных порогов. Детерминированная неопределенность негативно отражается на точности стратификации риска и принимаемых лечебно-диагностических решений.

Целью работы является разработка индивидуализированной модели риск-стратификации на основе нечеткой логики и ее тестирование у пациентов с хронической сердечной недостаточностью.

Материал и методы исследования

Использованы методы пропорциональных рисков Кокса и нечеткой логики, предложенный Л. Заде. При обследовании пациентов применяли цифровую электрокардиографию 4-го поколения с оценкой электрической нестабильности миокарда: микроальтернация Т-зубца, турбулентность и замедление сердечного ритма, дисперсия интервала QT. Использовался цифровой электрокардиограф 4-го поколения «Интекард» (РБ); 24-час. холтеровское мониторирование ЭКГ выполняли с помощью кардиомонитора «КР-01» (РБ); эхокардиографическое обследование проводили на аппарате «Vivid 07» (GE).

Электрическая нестабильность миокарда устанавливалась в соответствии со стандартами: патологическая альтернатива Т-зубца ($TWA > 47$ мкВ); патологическая турбулентность сердечного ритма (начало $TO > 0\%$ и/или наклон $TS < 2,5$ мс/RR); низкое замедление сердечного ритма ($DC < 4,5$ мс), высокая дисперсия интервала QT ($dQT > 70$ мс). Эпизоды желудочковой экстрасистолии/тахикардии/фибрилляции выявлялись по данным 24-час. мониторинга ЭКГ. Левожелудочковая недостаточность фиксировалась при низкой фракции выброса ($EF < 30\%$).

В исследование включили 240 пациентов с хронической сердечной недостаточностью (ХСН). Средний возраст $50,5 \pm 12,1$ лет, функциональный класс по NYHA II-III, фракция выброса $32,8 \pm 10,9\%$. Фиксировались следующие неблагоприятные кардиоваскулярные события (КВС): внезапная сердечная смерть, желудочковая тахикардия/фибрилляция, эпизоды шоковой терапии имплантированных кардиовертеров-дефибрилляторов или ресинхронизирующих систем. Период наблюдения составил $36,8 \pm 5,7$ месяцев.

Проверка статистических гипотез выполнялась при критическом уровне достоверности $p = 0,05$.

Результаты исследования

При риск-стратификации пациентов использовалась модель пропорциональных рисков Кокса:

$$\ln \frac{h(t/\bar{x})}{h_0(t)} = a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_n x_n, \quad (1)$$

$h(t/\bar{x})$ – функция риска в момент времени t для вектора независимых бинарных предикторов (маркеров риска) $\bar{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, $x_i = 0$ – значение предиктора в норме, $x_i = 1$ – значение предиктора за пределами допустимых значений; $h_0(t)$ – базовая функция риска в момент времени t и $\bar{x} = 0$; a_1, a_2, \dots, a_n – коэффициенты влияния независимых предикторов на риск КВС.

При $a_i > 0$ риск неблагоприятных КВС возрастает в $\exp(a_i)$ раз, аналогично, при $a_i < 0$, риск уменьшается во столько же раз.

Базовая функция $h_0(t)$ играет роль «центрирования», поэтому при расчете относительного риска КВС не используется.

Вероятность неблагоприятных КВС оценивалась по формуле:

$$P(Z) = \frac{1}{1 + e^{-Z}}, \quad (2)$$

где $Z = a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_n x_n$ – характеристическая линейно-взвешенная функция.

При непрерывных x_1, x_2, \dots, x_n функция $P(Z)$ гладкая и непрерывная. При дихотомических переменных непрерывность нарушается, что вносит искажения в оценку вероятности $P(Z)$. На рис. 1 показаны график расчетной вероятности, полученный по формуле (2) (сплошная линия), и график реальной вероятности при дихотомических переменных (пунктирная линия). Представлен частный случай для трех независимых переменных x_1, x_2, x_3 с коэффициентами $a_1 = 1, a_2 = 2, a_3 = 3$. Наглядно видны искажения, возникающие из-за скачкообразных изменений дихотомических параметров. При возрастании количества параметров степень искажений будет только усиливаться. Для устранения данного недостатка предлагается использовать метод нечеткой логики [8, 9].

Переход числовой последовательности $x \in X$ к нечеткому множеству A означает следующее:

$$A = \{\gamma(x), x\}, \quad (3)$$

где $\gamma(x)$ – функция принадлежности, при этом $\gamma(x) \in [0; 1]$.

Функции принадлежности аппроксимируются кусочно-линейными, гауссовскими, сигмоидальными и тригонометрическими зависимостями. Для медицинских цифровых данных, имеющих пороговые значения, предпочтительны кусочно-линейные (треугольные) или сигмоидальные функции. К примеру, на рис. 2 изображены левая и правая сигмоидальные функции принадлежности *sigmf*, а их уравнение соответствует формуле (4):

$$\text{Sigmf: } \gamma(x) = \frac{1}{1 + \exp(-\alpha(x - b))}, \quad (4)$$

где b – пороговое значение, α – крутизна.

При $\alpha \geq 0$ получаем правую сигмоиду, при $\alpha < 0$ – левую.

В точке, равной пороговому уровню $x = b$, значение $\gamma(x) = 0,5$, при отклонении от порога $\gamma(x)$ плавно возрастает до 1 или плавно уменьшается до 0. С помощью коэффициента регулируется крутизна характеристики.

В качестве тестового примера, демонстрирующего возможности метода нечеткой логики при риск-стратификации пациентов с ХСН, использованы данные, опубликованные нами в работе [4]. Из 240 наблюдаемых пациентов с ХСН в течение периода наблюдения $36,8 \pm 5,7$ месяцев у 66 (27,5%) случились неблагоприятные КВС: внезапная сердечная смерть, желудочковые тахикардии или шоковые разряды имплантированных устройств. В табл. 1 представлены расчетные оценки отношений рисков неблагоприятных КВС по данным однофакторного анализа Кокса для контролируемых электрофизиологических параметров.

Среди них выбраны параметры, удовлетворяющие условию независимости $p < 0,047$, впоследствии включенные в многофакторную логистическую модель Кокса. Таковыми оказались патологическая альтернатива Т-зубца (TWA), неустойчивая желудочковая тахикардия (н.ЖТ), патологическая турбулентность сердечного ритма (HRT), высокая дисперсия интервала QT (dQT), желудочковая эктопия (PVC) и низкая фракция выброса (EF). В табл. 2 представлены аргументы и расчетные коэффициенты разработанной модели.

В отличие от предыдущей работы [4], единичные скачкообразные функции заменили сигмоидальными функциями принадлежности: $x_1 = \text{sigmf}(x_1, \alpha, 47 \text{ мкВ})$; $x_2 = \text{sigmf}(x_2, \alpha, 0)$; $x_3 = \text{sigmf}(x_3, \alpha, 0)$; $x_4 = \text{sigmf}(x_4, \alpha, 70 \text{ мс})$; $x_5 = \text{sigmf}(x_5, \alpha, 0)$; $x_6 = \text{sigmf}(x_6, \alpha, 23\%)$. Значения крутизны α подбирались эмпирически.

Это позволило повысить робастность прогностической модели при скачкообразных изменениях ее параметров. При прогнозе неблагоприятных КВС чувствительность модели составила 81%, а специфичность – 99%.

Обсуждение результатов

Клиницисты часто интуитивно используют нечеткую логику. И это не случайно. Современная кардиология оснащена широким спектром диагностической аппаратуры: электрофизиологической, биохимической, изотопной, молекулярно-генетической и т. п. При анализе многомерной информации возникает проблема «комбинаторного взрыва», а известно, что человек одновременно хранит в памяти всего 5–9 характеристик сложного объекта (Krauze, 1994). По этой причине большие массивы данных искусственно делятся на информационные гранулы типа «низкий–средний–высокий», нередко к ним добавляют «очень низкий–очень высокий». Тем самым искусственно переходят к описанию состояния сложного объекта в терминах нечеткой логики. Это рациональный шаг при создании интеллектуальных экспертных систем, в том числе в кардиологии.

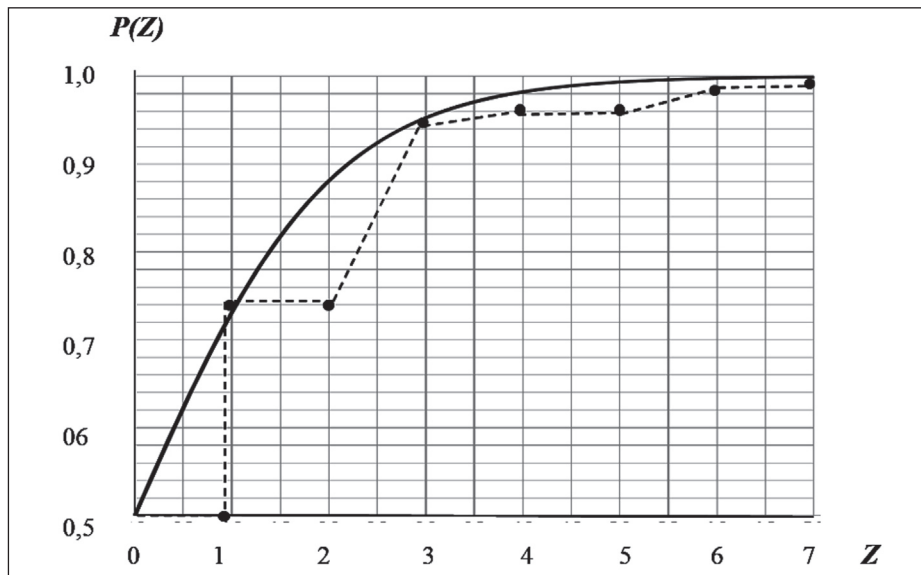


Рис. 1. Расчетная вероятность события $P(Z)$ при непрерывной характеристической функции Z (сплошная линия), реальная вероятность события $P(Z)$ при изменении дихотомических переменных (пунктирная линия).

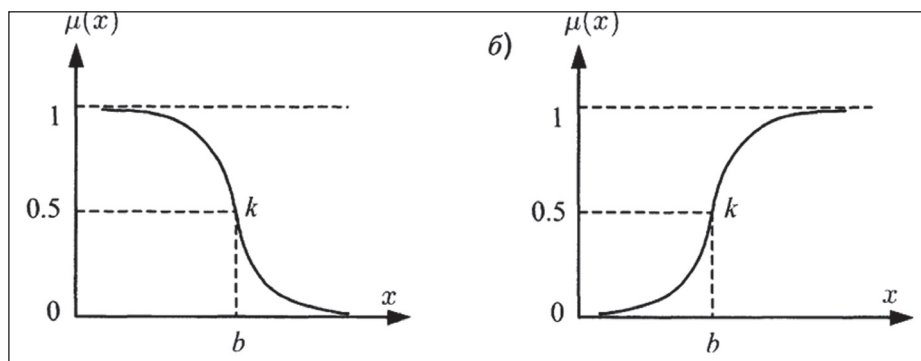


Рис. 2. Сигмоидальные функции принадлежности $\gamma(x)$ нечеткому множеству. Слева — левая сигмоида, справа — правая сигмоида, b — пороговое значение, k — центр сигмоиды, α — крутизна в формуле (4).

Табл. 1. Отношения рисков неблагоприятных сердечно-сосудистых событий у пациентов с хронической сердечной недостаточностью.

Маркеры нестабильности	Критерии	ОР	95% ДИ	р-уровень
Эпизоды неустойчивой желудочковой тахикардии (н.ЖТ)	> 5 комплексов при ЧСС > 150 мин ⁻¹	5,9	2,8–13,9	0,001
Патологическая альтернация Т-зубца (TWA)	TWA > 47мкВ	2,8	1,3–6,1	0,011
Высокая дисперсия QT (dQT)	dQT > 70 мс	3,0	1,6–5,7	0,018
Патологическая турбулентность сердечного ритма (HRT)	TO > 0% и/или TS < 2,5 мс/RR	2,7	1,2–5,2	0,017
Преждевременная желудочковая эктопия (PVC)	PVC > 1500 в 24 ч.	2,1	1,0–4,5	0,047
Широкий комплекс QRS	QRS > 120 мс	1,7	0,9–4,0	0,046
Низкая фракция выброса (EF)	EF < 23%	2,4	1,2–5,0	0,020
Низкое замедление сердечного ритма (DC)	DC < 4,5 мс	1,6	0,8–2,3	0,051

Табл. 2. Логистическая регрессионная модель прогноза неблагоприятных кардиоваскулярных событий для пациентов с хронической сердечной недостаточностью ($F = 31,2$; $\chi^2 = 143,2$; $p < 0,0001$).

Параметры	Константа	TWA	н.ЖТ	HRT	dQT	PVC	EF
Коэффициенты	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
Значения	7,25	-5,03	-4,35	-4,28	-1,46	-0,76	-0,38
Критерий χ^2	1414	0,01	0,01	0,01	0,23	0,47	0,68

Сокращения: TWA – альтернация Т-зубца, н.ЖТ – неустойчивая желудочковая тахикардия, HRT – турбулентность сердечного ритма, dQT – дисперсия интервала QT, PVC – преждевременная желудочковая эктопия, EF – фракция выброса.

В работах E. Sourla et al [10], P. Merlin и G. Prado-Arechiga [11], Т. А. Руденко и М. А. Власенко [12] представлен ряд экспертных систем, разработанных на основе нечеткой логики, показана их эффективность при диагностике артериальной гипертензии, инфаркта миокарда, сердечной недостаточности и других видов патологии. В частности, доказано, что диагностика артериальной гипертензии на основе нечеткой логики более точная. Так при детерминированной логике, систолическое АД, равное 139 мм рт. ст., трактуется как высокое нормальное давление, а при 141 мм рт. ст. уже диагностируется мягкая гипертензия. Учитывая, что АД является весьма вариабельным параметром и присутствие 5–10% ошибки измерений, вероятность гипер- или гиподиагностики весьма высокая. Нечеткая логика существенно снижает влияние данной ошибки. На ее основе интенсивно разрабатываются компьютерные программы и веб-приложения для мобильных устройств [13, 14, 15].

Полученные нами результаты расширяют область приложения нечеткой логики в сферу прогнозирования исходов заболеваний. Решена задача индивидуальной риск-стратификации пациентов с целью прогнозирования неблагоприятных КВС. При этом несколько повышаются вычислительные затраты, однако устраняются скачкообразные оценки состояния, не свойственные живому организму.

Вероятность риска неблагоприятных КВС предлагается разделить на 5 информационных гранул: 0,5–0,59 – низкий; 0,6–0,69 – средний; 0,7–0,79 – высокий; 0,8–0,89 – очень высокий; 0,9–0,99 – критический. На этой основе предложен алгоритм выбора адекватного лечения. При низком и среднем риске рекомендуется медикаментозное лечение. При очень высоком и критическом риске предлагается имплантация ритмоподдерживающих систем с целью профилактики внезапной сердечной смерти. При высоком риске необходимы дополнительные данные для альтернативного выбора: терапия или хирургия.

Выводы

1. Разработана индивидуализированная модель риск-стратификации на основе логит-регрессии Кокса и нечеткой логики.
2. Апробация модели у 240 пациентов с ХСН показала, что в 94% случаев неблагоприятные кардиоваскулярные события прогнозируются корректно.
3. Нечеткая логика позволяет разрабатывать решающие правила на основе синтеза разнородной логической, лингвистической и цифровой медицинской информации.

Статья посвящена светлой памяти профессора М. А. Марценюка.

Подготовлена в рамках гранта С-26/631 «Разработка высокоточного программно-аппаратного комплекса и информационной системы для диагностики заболеваний человека на основе анализа электрофизических процессов в биологических средах».

Исследование проводилось с соблюдением национальных норм биоэтики и положений Хельсинкской декларации (в ред. 2013 г.) с письменного согласия больных после подробного информирования о целях, продолжительности и процедуре обследования.

Авторы статьи – А. В. Фролов, Т. Г. Вайханская, В. Б. Поляков – подтверждают, что у них нет конфликта интересов.

Литература

1. Sulimov V., Okisheva E., Tsaregorodsev D. Non-invasive risk stratification for sudden cardiac death by heart rate turbulence and microvolt T-wave alternans in patients with myocardial infarction. *Europace*, 2012, vol. 14, iss. 12, pp. 1786–1792. doi: 10.1093/europace/eus238.
2. O'Machoni C., Jichi F., Pavlou M., Menserrat L., Anastasakis A. and oth. A novel clinical risk prediction model for sudden cardiac death in hypertrophic cardiomyopathy. *European Heart J.*, 2014, vol. 35, pp. 2010–2020. doi:10.1093/eurheartj/ah439.
3. Фролов А. В., Вайханская Т. Г., Мельникова О. П., Воробьев А. П., Гуль Л. М. От риск-стратификации пациентов с дилатационной кардиомиопатией к оптимальной тактике лечения. *Анналы аритмологии*, 2016, т. 13, № 2, сс. 80–86. doi: 10.15275/annaritm.2016.23.
4. Frolov A. V., Vaikhanskaya T. G., Melnikova O. P., Vorobiev A. P., Guel L. M. Risk stratification personalized model for prediction life-threatening ventricular tachyarrhythmias in patients with chronic heart failure. *Kardiologia Polska* [Polish Heart J.], 2017, vol. 75, iss. 7, pp. 682–688. doi: 10.5603/KPa2017.0060.
5. Jehn M., Guallar E., Clark J., Couper D., Duncan B. and oth. A prospective study of plasma ferritin level and incident diabetes. The atherosclerosis risk in communities study. *American J. of Epidemiology*, 2017, vol. 165, iss. 9, pp. 1047–1054. doi:10.1093/ajekwk093.
6. Lan D., and Wei L. The robust interference the Cox proportional hazard model. *J. of American Statistician Association*, 1989, vol. 84, pp. 1074–1078.
7. Vittinghoff E., Glidden D., Shiborski S., McCaloch C. Regression methods in biostatistics: linear, logistic, and repeated measures models. *Ed. By Dietz K. Springer Science-Business Media*, NY, 2005, 338 p.
8. Zade L. Soft computing and fuzzy logic. *IEEE Software J.*, 1994, iss. 11, pp. 48–56.
9. Перат А. Нечеткое моделирование и управление. М. *Бином*, 2013, 798 с.
10. Suarla E., Syrimpeis V., Stanatopoulou K., Merikoulias G., Tsakalidis A., Tzimas G. Exploiting fuzzy expert systems

- in cardiology. *Proc. Int. Conf. On Engineering and Applications of Neural Networks (EANN)*, 2013, pp. 80–89.
11. Merlin P., and Prado-Arechiga G. New hybrid intelligent systems for diagnosis and risk evaluating of arterial hypertension, *SpringerBriefs*, NY, 2017 (e-book). doi: 10.1007/978-3-319-61149-5.
 12. Руденко Т. А., Власенко М. А. Системи нечіткої логіки в діагностиці десинхронії міокарда. *Медичні науки*, 2015, Т. 4, № 5, сс. 52–61. doi:10.15587/2313-8416.2015.43286.
 13. Nofal M., and Fouad K. Developing web-based semantic and fuzzy expert systems using proposed tool. *Intern. J. of Computer Applications*, 2015, vol. 112, iss. 7, pp. 39–45. doi: 10.5120/19682-1414.
 14. Yunda L., Pacheco D., Millan J. A web-based fuzzy interference system based tool for cardiovascular diseases risk assessment. *Nova J. of Medical and Biological Sciences*, 2015, vol. 13, iss. 24, pp. 7–16. doi: 10.22490/24629448.1712.
 15. Varnavsky A., and Antonenko A. Determining of human cardiac pacemaker using fuzzy logic. *Proc. Intern. Conf. On Information Technologies on Business and Industry*, 2016. 7 p. doi:10.1088/1742-6569/803/1/012168.

Нечітка логіка при прогнозуванні несприятливих сценаріїв кардіологічних захворювань

О. В. Фролов^{1,2}, М. А. Марценюк², Т. Г. Вайханська¹, В. Б. Поляков²

¹Республіканській науково-практичний центр «Кардіологія», Мінськ, Білорусь

²Пермській державний національний дослідницький університет, Перм, Росія

Резюме

Вступ. Прогнозування несприятливих сценаріїв захворювань серцево-судинної системи має важливе клінічне значення. Створено ряд прогностичних моделей на основі методу пропорційних ризиків Кокса. Однак при дихотомічних змінних і апаратних похибках в околиці порогових значень зростає ймовірність помилкового прогнозу. Метод нечіткої логіки нівелює цей недолік.

Мета роботи. Розробка індивідуалізованої моделі ризик-стратифікації пацієнтів на основі нечіткої логіки і її тестування у пацієнтів з хронічною серцевою недостатністю.

Матеріал дослідження. Модель ризик-стратифікації заснована на логит-регресії Кокса в поєднанні з методом нечітких множин. Тестування моделі виконано у 240 пацієнтів з хронічною серцевою недостатністю. Реєстрували цифрову ЕКГ з оцінкою маркерів електричної нестабільності міокарда, проводили 24-годинне холтеровське моніторування ЕКГ і ехокардіографії.

Результати дослідження. Досліджено функцію ймовірності несприятливих кардіоваскулярних подій при дихотомічних змінних. Виявлено її стрибкоподібний характер. Запропоновано логит-регресію Кокса доповнити нечіткими множинами з сигмоїдальними функціями належності.

Тестування виконано у 240 пацієнтів з хронічною серцевою недостатністю. Чутливість розробленої моделі індивідуальної ризик-стратифікації склала 81%, а специфічність – 99%.

Висновок. Нечіткі множини дозволили нівелювати скачки при оцінці ймовірності несприятливих подій поблизу порогових значень, що сприятливо вплинуло на точність прогнозу. Розроблена нами модель має 94% прогностичну точність.

Ключові слова: ЕКГ; електрична нестабільність міокарда; ризик-стратифікація; логит-регресія; нечітка логіка.

Fuzzy logic in prediction of adverse scenarios of the cardiac diseases

A. V. Frolov^{1,2}, M. A. Martsenyuk², T. G. Vaikhanskaya¹, V. B. Polyakov²

¹Republican Scientific and Practical Centre «Cardiology», Minsk, Belarus

²Perm State National Research University, Perm, Russia

e-mail: Frolov.minsk@gmail.com

Abstract

Introduction. Prediction of adverse scenarios of the diseases of the cardiovascular system has an important clinical significance. A number of effective models based on Cox proportional hazard method have been created. However, with dichotomous variables and hardware errors in the neighborhood of the threshold values, the probability of an erroneous forecast is high. The method of fuzzy logic is able to reduce this disadvantage.

Purpose. Development of the model for individualized risk-stratification of patients based on fuzzy logic and its testing in patients with chronic heart failure.

Material and methods of the study. The risk-stratification model is based on the Cox logit-regression method in combination with the fuzzy logic. The model was tested in 240 patients with chronic heart failure. The digital ECG-study with an assessment of markers of the myocardium electrical instability, 24-hour holter monitoring and echocardiography were performed.

Results of the study. The probability function of adverse cardiovascular events in dichotomous variables was investigated. Its spasmodic character is revealed. The Cox logit regression is proposed to be supplemented with fuzzy sets in the form of sigmoidal membership functions. The model was tested in 240 patients with chronic heart failure. The sensitivity of the developed model of individual risk-stratification was 81%, and its specificity 99%.

Conclusions. Fuzzy logic allowed to reduce the jumps in assessing the probability of adverse events near threshold values, which favorably affected on the accuracy of the prognosis. The personal prognostic model developed by us has 94% predictive accuracy.

Key words: ECG; Electrical instability of the myocardium; Risk-stratification; Logit regression; Fuzzy logic.

©2017 Institute Medical Informatics and Telemedicine Ltd, ©2017 Ukrainian Association of Computer Medicine, ©2017 Kharkiv medical Academy of Postgraduate Education. Published by Institute of Medical Informatics and Telemedicine Ltd. All rights reserved.

ISSN 1812-7231 *Klin.inform.telemed.* Volume 12, Issue 13, 2017, Pages 35–41

http://kit-journal.com.ua/en/index_en.html

References (15)

References

- Sulimov V., Okisheva E., Tsaregorodsev D. Non-invasive risk stratification for sudden cardiac death by heart rate turbulence and microvolt T-wave alternans in patients with myocardial infarction. *Europace*, 2012, vol. 14, iss. 12, pp. 1786–1792. doi: 10.1093/europace/eus238.
- O'Machoni C., Jichi F., Pavlou M., Menserrat L., Anastasakis A. and oth. A novel clinical risk prediction model for sudden cardiac death in hypertrophic cardiomyopathy. *European Heart J.*, 2014, vol. 35, pp. 2010–2020. doi:10.1093/eurheartj/ahf439.
- Folov A. V., Vaikhanskaya T. G., Melnikova O. P., Vorobiev A. P., Guel L. M. *Ot risk stratifikacii pacientov c dilatacionnoj kardiomiopatiej k optimalnoj taktike lechenia* [From the risk stratification in patients with dilated cardiomyopathy to the optimal treatment strategy]. *Annaly Aritmologii* [Annals of Arrhythmology]. 2016, vol. 13, iss. 2, pp. 80–86. doi:10.15275/annaritmol.2016.23 (In Russ.).
- Frolov A. V., Vaikhanskaya T. G., Melnikova O. P., Vorobiev A. P., Guel L. M. Risk stratification personalized model for prediction life-threatening ventricular tachyarrhythmias in patients with chronic heart failure. *Kardilogia Polska* [Polish Heart J.], 2017, vol. 75, iss. 7, pp. 682–688. doi:10.5603/KPa2017.0060.
- Jehn M., Guallar E., Clark J., Couper D., Duncan B. and oth. A prospective study of plasma ferritin level and incident diabetes. The atherosclerosis risk in communities study. *American J. of Epidemiology*, 2017, vol. 165, iss. 9, pp. 1047–1054. doi:10.1093/aje/kw093.
- Lan D., and Wei L. The robust interference the Cox proportional hazard model. *J. of American Statistician Association*, 1989, vol. 84, pp. 1074–1078.
- Vittinghoff E., Glidden D., Shiborski S., McCulloch C. Regression methods in biostatistics: linear, logistic, and repeated measures models. Ed. By Dietz K. *Springer Science-Business Media*, NY, 2005, 338 p.
- Zade L. Soft computing and fuzzy logic. *IEEE Software J.*, 1994, iss. 11, pp. 48–56.
- Piegat A. *Nechetkoe modelirovanie i ypravlenie* [Fuzzy modeling and control]. Moscow, Binom Publ, 2013, 798 p. (In Russ.).
- Suarla E., Syrimpeis V., Stanatopoulou K., Merikoulias G., Tsakalidis A., Tzimas G. Exploiting fuzzy expert systems in cardiology. *Proc. Int. Conf. On Engineering and Applications of Neural Networks (EANN)*, 2013, pp. 80–89.
- Merlin P., and Prado-Arechiga G. New hybrid intelligent systems for diagnosis and risk evaluating of arterial hypertension, *SpringerBriefs*, NY, 2017 (e-book). doi: 10.1007/978-3-319-61149-5.
- Rydenko T. A., Vlasenko M.A. *Sistemy nechetkoi logiki v diagnostike decinchronii miokarda* [Fuzzy logic systems in desynchrony of the myocardium diagnostics]. *Medichni nayki Publ.*, 2015, vol. 4, iss. 5, pp. 52–61. doi:10.15587/2313-8416.2015.43286 (In Russ.).
- Nofal M., and Fouad K. Developing web-based semantic and fuzzy expert systems using proposed tool. *Intern. J. of Computer Applications*, 2015, vol. 112, iss. 7, pp. 39–45. doi: 10.5120/19682-1414.

14. Yunda L., Pacheco D., and Millan J. A web-based fuzzy interference system based tool for cardiovascular diseases risk assessment. *Nova J. of Medical and Biological Sciences*, 2015, vol. 13, iss. 24, pp. 7–16. doi:10.22490/24629448.1712.
15. Varnavsky A., and Antonenko A. Determining of human cardiac pacemaker using fuzzy logic. *Proc. Intern. Conf. On Information Technologies on Business and Industry*, 2016. 7 p. doi:10.1088/1742-6569/803/1/012168.

Переписка

д.б.н., профессор **А.В. Фролов**
Республиканский научно-практический центр
«Кардиология»
ул. Р. Люксембург, 110, Минск, 220036, Беларусь
тел. +375 (17) 256 05 23
эл. почта: Frolov.minsk@gmail.com