

15. Mayr A., Binder H., Gefeller O., Schmid M. The evolution of boosting algorithms – From machine learning to statistical modeling, *Methods in Med.*, 2014, Vol. 53 (6), pp. 419-427.
16. Freund Y. and Schapire R. Experiments with a new boosting algorithm, *In Thirteenth International Conference on Machine Learning*. Bari, Italy, 1996, pp. 148-156,
17. Freund Y. and Schapire R. A decision-theoretic generalization of on-line learning and an application to boosting, *Journal of Computer and System Sciences*, 1997, Vol. 55 (1), pp. 119-139.
18. Kuncheva L. Combining Pattern Classifiers: Methods and Algorithms. Wiley, 2004.
19. Radha C, Rong J, Timothy C.H, Anil K.J. Scalable Kernel Clustering: Approximate Kernel k-means. *Computer Vision and Pattern Recognition*, 2014.
20. Kureychik V.M., Kureychik V.V., Rodzin S.I. Modeli parallelizma evolyucionnykh vychisleniy [Models of parallelism of evolutionary calculations], *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Vestnik RGUPS], 2011, No. 3 (43), pp. 93-97.
21. Kureychik V.M., Kureychik V.V., Rodzin S.I., Gladkov L.A. Osnovy teorii evolyucionnykh vychisleniy [Fundamentals of the theory of evolutionary computation]. Rostov-on-Don: YuFU, 2010.
22. Rodzin S.I., Kureychik V.V. Teoreticheskie voprosy i sovremennye problemy razvitiya kognitivnykh bioinspirirovannykh algoritmov optimizatsii [Theoretical questions and contemporary problems of the development of cognitive bio-inspired algorithms for optimization], *Kibernetika i programirovanie* [Cybernetics and programming], 2017, No. 3, pp. 51-79.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.И. Финаев.

**Кравченко Юрий Алексеевич** – Южный федеральный университет; e-mail: yakravchenko@sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371651; кафедра систем автоматизированного проектирования; доцент.

**Нацкевич Александр Николаевич** – e-mail: natskevich.a.n@gmail.com; кафедра систем автоматизированного проектирования; аспирант.

**Курситыс Илона Олеговна** – e-mail: i.kursitys@mail.ru; кафедра систем автоматизированного проектирования; аспирант.

**Kravchenko Yury Alekseevich** – Southern Federal University; e-mail: yakravchenko@sfedu.ru; 44, Nekrasovskiy lane, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371651; the department of computer aided design; associate professor.

**Natskevich Alexander Nikolaevich** – e-mail: natskevich.a.n@gmail.com; the department of computer aided design; graduate student.

**Kursitys Iona Olegovna** – e-mail: i.kursitys@mail.ru; the department of computer aided design; graduate student.

УДК 519.113: 681.3

DOI 10.23683/2311-3103-2018-5-131-142

**А.И. Долгий, С.М. Ковалев**

### **ИНТЕРПРЕТИРУЕМОСТЬ НЕЧЕТКИХ ТЕМПОРАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ\***

*Рассматривается проблема оценки интерпретационной пригодности математических моделей, основанных на нечеткой логике. Показывается, что интерпретируемость является одной из основных причин популярности нечеткой логики и широкого распространения технологий нечеткого моделирования. Разрабатывается подход к оценке интерпретируемости нечетких темпоральных моделей, описывающих динамику процессов. Нечеткие темпоральные модели представлены в виде продукционных правил, antecedentes которых заданы с использованием нечеткого временного отношения предшествования. Идея предлагаемого подхода базируется на предположении, что интерпретируемость*

\* Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты: №№ 16-07-00032-а, 16-07-00086-а).

нечеткой темпоральной модели напрямую связана с интерпретируемостью входящих в нее темпоральных лингвистических переменных. Формулируется принцип интерпретируемости темпоральной лингвистической переменной, в соответствии с которым под интерпретируемостью понимается способность темпоральной лингвистической переменной сохранять временные отношения на семействе нечетких подмножеств, соответствующих термам темпоральной переменной. Формулируются необходимые и достаточные условия интерпретируемости темпоральной лингвистической переменной в виде соответствующего утверждения. Рассматриваются примеры интерпретируемых и не интерпретируемых темпоральных лингвистических переменных. Предложенный подход к установлению интерпретируемости темпоральных лингвистических переменных может быть применен не только к простым, но и составным лингвистическим переменным, полученным путем интегрирования в них темпоральных модификаторов, основанных на временных отношениях.

*Модель нечеткая темпоральная; интерпретируемость; темпоральное отношение; темпоральная лингвистическая переменная; нечеткая темпоральная формула.*

**A.I. Dolgy, S.M. Kovalev**

### **INTERPRETABILITY OF FUZZY TEMPORAL MODELS**

*The problem of estimating the interpolation suitability of mathematical models based on fuzzy logic is considered. It is shown that interpretability is one of the main reasons for the popularity of fuzzy logic and the wide spread of fuzzy modeling technologies. An approach to the estimation of the interpretability of fuzzy models describing the dynamics of processes is developed. A fuzzy temporal model is presented in the form of production rules, the antecedents of which are determined by using fuzzy correlation temporal priority. The idea of the proposed approach is based on the assumption that the interpretability of the fuzzy temporal model is directly related to the interpretability of its temporal linguistic variables. The principle of interpretability of a time linguistic variable is formulated, according to which interpretability is the ability of a time linguistic variable to maintain time relations on a family of fuzzy subsets corresponding to the terms of a time variable. Necessary and sufficient conditions of interpretability of the linguistic time variable in the form of the corresponding statement are formulated. Examples of interpreted non-interpreted time linguistic variables. The proposed approach to the establishment of the interpretability of temporal linguistic variables can be applied not only to simple but also to compound linguistic variables obtained by integrating temporal modifiers based on temporal relations. The model of fuzzy temporal interpretability, a temporary thing, a temporary linguistic variable, fuzzy temporal formula.*

*Model fuzzy temporal; interpretability; temporal relations; temporal linguistic variable; fuzzy temporal formula.*

**Введение.** Популярность нечеткой логики, как одной из парадигм представления неопределенности в математическом моделировании, в настоящее время признана большинством специалистов в области управления, исследования операций и принятия решений. Она обуславливается следующими причинами:

- ◆ возможностью интерпретируемого представления алгоритмов и результатов решения задач в понятном для пользователя виде;
- ◆ возможностью оперативного прототипирования создаваемых на ее основе новых технических устройств и простотой их адаптации;
- ◆ возможностью обработки лингвистических описаний и автоматизации решения задач с лингвистическими данными;
- ◆ возможностью формулировки поведения системы посредством лингвистических правил и, как следствие, более глубокого качественного понимания исследуемого процесса;
- ◆ относительной простотой математического аппарата.

Среди вышеперечисленных свойств и достоинств нечетких моделей ключевым, очевидно, является их способность к восприятию и разумному объяснению результатов работы человеку-эксперту. Это свойство удобно назвать *интерпретируемостью*.

Если пренебречь интерпретируемостью, нечеткие модели становятся мало отличимыми от обычных моделей типа «черного ящика», реализующих отношение вход-выход, и все их преимущества перед нейронными сетями и иными чисто вычислительными методами полностью теряются. Именно свойство интерпретируемости нечетких моделей наиболее полно отвечало изначальным идеям Л. Заде [1] при создании им аппарата нечеткой логики и его использования в задачах управления. Однако по мере развития нечеткой логики и ее приложений специалисты все чаще в качестве основного критерия разработки нечетких моделей стали использовать «точность» (описания объекта) и для ее повышения разрабатывать новые классы адаптивных и самообучающихся нечетких моделей. В результате адаптации к обучающим данным нечеткие модели могут терять свойство интерпретируемости, и лишаться основного преимущества перед традиционными математическими моделями.

И, тем не менее, в последнее десятилетие положение стало меняться. По мере вовлечения в сферу автоматизации новых классов слабо структурированных объектов и развития новых направлений в области искусственного интеллекта, таких как искусственные иммунные системы, гранулярные вычисления и когнитивные измерения, в научном сообществе вновь появилось осознание необходимости учитывать интерпретируемость в качестве важнейшего критерия разработки нечетких систем [2–9]. Появилось множество работ, посвященных проблемам интерпретируемости нечетких систем и методам разработки интерпретируемых нечетких моделей. Всестороннее обсуждение этой проблемы можно найти в работах [10–12].

Следует признать, что аппарат нечеткой логики сам по себе не гарантирует получение интерпретируемых моделей по определению и требует применения специальных средств, обеспечивающих данное свойство. Разработка таких средств предполагает решение ряда задач и ответа на ряд вопросов. Среди них основными являются определение интерпретируемости и как оно соотносится с такими базовыми элементами нечеткой модели, как лингвистическая переменная, лингвистические значения и функции принадлежности. В статье [13] частично даны ответы на эти вопросы в части интерпретируемости лингвистических переменных, заданных на количественных шкалах статических числовых признаков. В данной статье данный подход развивается на случай темпоральных признаков и темпоральных лингвистических переменных, используемых при разработке нечетких темпоральных моделей (НТМ), описывающих динамику процессов [14–18].

**1. Базовые определения.** Далее, для простоты, будем отождествлять нечеткие множества  $A$  и нечеткие переменные  $\alpha$  с их функциями принадлежности (ФП) и использовать для них соответствующие обозначения  $\mu_A(*)$  и  $\mu_\alpha(*)$ .

Для данного непустого множества  $X$  обозначим множество всех его нечетких подмножеств через  $\mathfrak{R}(X)$ .

Как обычно, нечеткое множество  $A \in \mathfrak{R}(X)$  называется нормированным, если

$$\exists x \in X, \mu_A(x) = 1.$$

Треугольные нормы и конормы [19] являются общепринятыми стандартами для формализации нечетких союзов и операций. Мы будем использовать их для формализации операций пересечения и объединения, а также для формализации нечетких операторов конъюнкции и дизъюнкции. Наиболее удобными для наших целей представляются операции в базисе Лукасевича

$$\begin{aligned} T_L(x, y) &= \max(x + y - 1, 0), \\ S_L(x, y) &= \min(x + y, 1). \end{aligned}$$

Для построения интерпретируемых нечетких ЛП важную роль играют нечеткие разбиения признаков шкал, на которых заданы ЛП. В этом плане особо следует выделить разбиение Руспини [20]. Семейство нечетких множеств  $\mathfrak{A} \subset \mathfrak{R}(X)$  образует разбиение Руспини, если

$$\forall x \in X, \sum_{A \in \mathfrak{A}} \mu_A(x) = 1.$$

Для формализации ЛП будем использовать принятое за стандарт определение Л. Заде [21–23], допускающее естественную интеграцию в него лингвистических модификаторов и связок.

Лингвистическая переменная (ЛП) определяется пятеркой [21]

$$\langle N, T, X, G, M \rangle,$$

где  $N$  – имя переменной;  $T$  – терм-множество значений ЛП;  $X$  – базовое множество (интервал) значений ЛП;  $G$  – грамматика образования имен значений ЛП;  $M$  – семантическое отображение  $T \rightarrow \mathfrak{R}(X)$ , сопоставляющее каждому терму из  $T$  нечеткое подмножество из  $\mathfrak{R}(X)$ .

Грамматику  $G$  удобно задавать в нотациях Бекуса-Наура, которую далее будем использовать для описания синтаксиса темпоральных ЛП.

Интерпретируемость нечеткой модели тесно связана с нашим интуитивным пониманием смысла элементарных лингвистических высказываний и отношений, входящих в нечеткие правила ее базы знаний (БЗ). Поэтому, для формализации понятия интерпретируемости, прежде всего, необходимо формализовать семантику лингвистических высказываний и отношений между ними путем сопоставления им соответствующих нечетких множеств и отношений. В этом случае интерпретируемость будет означать способность сохранять семантику отношений между лингвистическими высказываниями при их отображении на нечеткие множества. Опираясь на эту идею в [6] была предложена следующая математическая формализация этого понятия.

*Определение 1* [6]. Рассмотрим лингвистическую переменную  $V = (N, T, X, G, S)$  и множество индексов  $I$ . Пусть  $R = \{R_i\}$ ,  $i \in I$  – семейство отношений на множестве вербальных значений  $T$ , где каждое отношение  $R_i$  имеет конечную арность  $\alpha_i$ . Предположим, что для любого отношения  $R_i$  существует отношение  $Q_i$  на множестве всех нечетких подмножеств  $\mathfrak{R}(X)$  той же арности. Тогда лингвистическая переменная  $V$  называется  $(R - Q)$  – интерпретируемой если и только если для всех  $i \in I$  и всех  $x_1, x_2, \dots, x_{\alpha_i} \in T$  имеет место

$$R_i(x_1, x_2, \dots, x_{\alpha_i}) \Rightarrow Q_i(S(x_1), S(x_2), \dots, S(x_{\alpha_i})).$$

**2. Нечеткая темпоральная модель и темпоральная лингвистическая переменная.** Обычно во всех приложениях нечеткой логики нечеткие (лингвистические) термы ЛП, входящие в описания продукционных правил нечеткой модели, несут информацию о значениях ЛП. Лингвистические значения представлены на числовой шкале в виде упорядоченных нечетких подмножеств и имеют смысл выражений МАЛОЕ, БОЛЬШОЕ, СРЕДНЕЕ и т.п. Путем комбинирования нечетких термов с использованием нечетко-логических операций формируются описания предусловий нечетких ЕСЛИ-ТО правил, образующие базу знаний нечеткой модели.

В [6] было предложено интерпретируемость нечеткой модели рассматривать с позиций оценки интерпретируемости отдельных ЛП, входящих в описания нечетких правил. Заимствуя методологию из [6], свяжем интерпретируемость НТМ с интерпретируемостью темпоральной ЛП. Нечеткие термы темпоральной ЛП  $\mathfrak{S}$ ,

входящие в описания продукционных правил НТМ, несут информацию о времени свершения событий, связанных с появлением тех или иных значений признаков относительно текущего момента времени  $t^c$ . Нечеткие термы темпоральной ЛП представлены упорядоченными нечеткими подмножествами на шкале относительного времени и имеют смысл выражений: В ПРЕДШЕСТИВИИ (текущего момента времени  $t^c$ ), НЕЗАДОЛГО, НЕКОТОРОЕ ВРЕМЯ ТОМУ НАЗАД, ДАВНО и т.п. Нечетко-темпоральные формулы, входящие в описания предусловий продукционных правил НТМ, образованы путем комбинирования нечетких числовых признаков и нечетких темпоральных термов с использованием логических и темпоральных операторов.

Рассмотрим общую структуру нечетко-темпоральной формулы для класса НТМ, ориентированных на обработку темпоральных данных, представленных временными рядами.

Временной ряд представляет упорядоченную последовательность элементов-отсчетов произвольной семантики, соотнесенных с фиксированными моментами времени  $t_i = i$  на дискретной временной шкале  $T$

$$X = (x(t_1), x(t_2), \dots, x(t_i), \dots),$$

где  $x(t_i)$  – отсчет ВР в  $i$ -й момент времени.

Модель представления темпорального знания определяется относительно текущего момента времени  $t^c$  в виде продукции:

$$\text{ЕСЛИ } G(t^c, t \mid (t \leq t^c)), \text{ ТО } r(t) \mid (t > t^c), \quad (1)$$

где  $G(t^c, t \mid (t \leq t^c))$  – нечетко-темпоральная формула, описывающая временной сценарий развития событий на предшествующем временном интервале  $[t^c - k, t^c]$ ;  $k$  – числовой параметр, характеризующий глубину анализа временного ряда (окно анализа);  $r(t)$  – прогнозируемое событие в последующий момент времени  $t > t^c$ .

Нечеткая продукция (1), отражает причинную связь между значениями временного ряда, предшествующими текущему моменту времени  $t^c$ , и последующими значениями или событиями, свершившимися в момент времени  $t > t^c$ .

В качестве прогнозируемых событий  $r(t)$ , представляющих консеквенты нечетких продукций в (1), в зависимости от типа НТМ, могут выступать числовые значения  $x(t)$ , метки классов темпоральных паттернов  $\lambda_i (i = 1, 2, \dots, n)$ , функции от предшествующих значений  $F_i(x(t^c), x(t^c - 1), \dots, x(t^c - k))$  или лингвистические значения (нечеткие термы)  $\alpha_i$  числовых ЛП.

Формула  $G(t^c, t \mid (t < t^c))$  описывающая антецедент нечеткой продукции (1), задана в следующем виде

$$G(t^c, t) := \forall t \leq t^c, \bigvee_{j=1}^m [\bigwedge_{i=1}^{k_m} P_{i_m}(x(t)) \wedge (t^c - t = \tau_{i_m})], \quad (2)$$

где  $\tau_{i_j} \in \mathfrak{Z}$  – терм множество темпоральной ЛП СРОК (время свершения события относительно текущего момента  $t^c$ );  $P_{i_j}(x(t))$  – нечеткий предикат, описывающий темпоральное событие, свершившееся в момент времени  $t$ , например,  $P_{i_j}(x(t)) := x(t) \geq 0.9$  либо  $P_{i_j}(x(t)) := x(t) - \text{very small}$ .

Темпоральная ЛП СРОК  $\mathfrak{Z}$  определена на дискретной шкале относительного времени  $\Delta = [1, 2, \dots, k]$ , значения которой представляют собой разницу между текущим моментом времени  $t^c$  и рассматриваемым моментом времени  $t < t^c$ . Пример представления темпоральной ЛП  $\mathfrak{Z}$  с тремя нечеткими термами  $\tau_1(\text{long time ago})$ ,  $\tau_2(\text{average time ago})$ ,  $\tau_3(\text{some time ago})$  приведен ниже на рис 1.

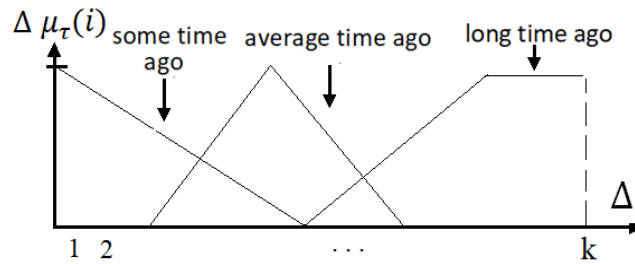


Рис. 1. Графики ФП для трех нечетких термов темпоральной ЛП СРОК

Значение ФП  $\mu_{\tau_i}(\delta)$  для нечеткого терма  $\tau_i$  характеризует истинность утверждения «Временной момент  $t^c - \delta$  есть  $\tau_i$ », например,  $\mu_{\text{НЕЗАДОЛГО}}(3) = 0.8$  означает, что событие, свершившееся в момент  $t^c - 3$ , произошло НЕЗАДОЛГО до текущего  $t^c$  со степенью уверенности 0.8.

В общем случае темпоральная ЛП  $\mathfrak{S}$  содержит  $n$  упорядоченных во времени нечетких термов  $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ , для которых условие упорядоченности формулируется следующим образом

$$\forall \tau_i \in \mathfrak{S}, \exists t(\tau_i) \in \Delta, \quad (\forall t < t(\tau_i), \mu_{\tau_{i-1}}(t) > \mu_{\tau_i}(t)) \ \& \ (\forall t \geq t(\tau_i), \mu_{\tau_{i-1}}(t) < \mu_{\tau_i}(t)). \quad (3)$$

Таким образом, нечетко-темпоральная формула (2) описывает некоторый темпоральный сценарий, сложившейся во временном ряду к текущему моменту времени  $t^c$ . В практическом плане предполагается, что данный сценарий является значимым для принятия решений, например, предшествует появлению некоторого целевого символа или устанавливает причинную связь между предшествующим и последующим темпоральными паттернами. Ниже приведен пример нечеткой темпоральной формулы, описывающей antecedent одного из диагностических правил нечеткой модели контроля отрицательной динамики вагона [24]

$$\forall t \leq t^c, \quad (x(t) = large) \wedge (t^c - t = st) \vee (x(t) = small) \wedge (t^c - t = NL(at)),$$

где  $x(t)$  – значение временного ряда, характеризующее отклонение центра вагона от нормали в момент времени  $t$ ; *large*, *small* – нечеткие термы ЛП ОТКЛОНЕНИЕ; *st*(*sam time ago*) и *at*(*average time ago*) – нечеткие термы ЛП СРОК; *NL*(*not later then*) – темпоральный модификатор.

Формула (e1) описывает нечетко-темпоральный сценарий нарастания амплитуды колебаний вагона, предшествующий нештатной аварийной ситуации. Атомарное выражение  $(t^c - t = \tau_i)$  описывает нечеткий срок свершения события относительно текущего момента времени  $t^c$ .

Определим более строго грамматику представления нечетко-темпоральных формул вида (2) в нотациях Бекуса-Наура. Обозначим через  $\mathfrak{S} = \{\tau_i\}$ , ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) упорядоченное во времени терм множество одноименной темпоральной ЛП. Для повышения выразительности грамматики добавим в терм множество  $\mathfrak{S}$  два темпоральных модификатора *NE* и *NL*, применяемых к нечетким термам из  $\mathfrak{S}$  и имеющих смысл выражений *NE* – не ранее, *NL* – не позже. Семантика темпоральных модификаторов *NE* и *NL* приведена ниже

$$\begin{aligned} \forall t < t^c, \quad \mu_{NE}(\mu_{\tau_i}(t)) &= \sup\{\mu_{\tau_i}(t^*) \mid t^* \geq t\}; \\ \forall t < t^c, \quad \mu_{NL}(\mu_{\tau_i}(t)) &= \sup\{\mu_{\tau_i}(t^*) \mid t^* \leq t\}. \end{aligned} \quad (4)$$

Ниже на рис. 2 дана иллюстрация действий темпоральных модификаторов на ФП  $\mu_{\tau_i}(t)$  нечеткого темпорального термина  $\tau_i$ .

Обозначим через  $\mathbb{Q} = \{P_i \mid i = 1, 2, \dots, n\}$  множество темпоральных событий, представленных предвкатками  $P_i(x(t))$ . В общем случае, для описания множества событий  $\mathbb{Q}$  требуется самостоятельная грамматика, однако, в нашем случае это не является принципиальным.

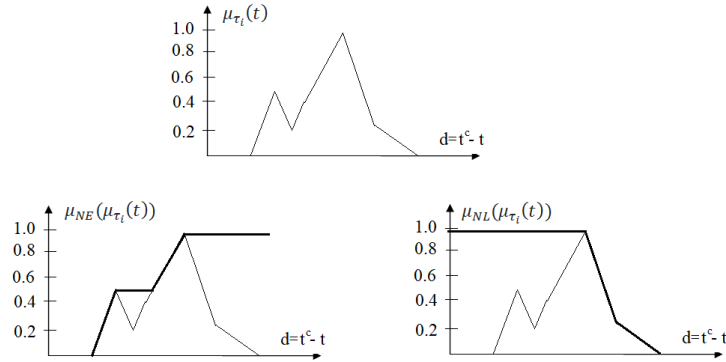


Рис. 2. Иллюстрация действий темпоральных модификаторов NE и NL на ФП нечеткого темпорального термина  $\tau_i$

Грамматика  $\Gamma$  для представления нечетко-темпоральных формул, описывающих антецеденты продукций базы знаний НТМ, задается следующей системой правил:

Start :=  $\exists t \leq t^c$ , formula |  $\forall t \leq t^c$ , formula  
 Formula :=  $P_i < diz >$   
 diz := fuztemp | fuztemp  $\vee$  fuztemp  
 fuztemp :=  $(t^c - t = \tau_i)$  |  $(t^c - t = adverb \tau_i)$   
 adverb := NE | NL

$$P_i \in \mathbb{Q}_i, \tau_i \in \mathfrak{Z}.$$

Таким образом, база знаний НТМ включает систему ЕСЛИ-ТО нечетких продукций вида (1), антецеденты которых определяются грамматикой  $\Gamma$ , а заключениями являются элементы множества  $\mathbb{R}$ , в качестве которых могут выступать числовые или символьные значения  $x(t)$ , метки классов темпоральных паттернов  $\lambda_i$ , функции от предшествующих значений  $F_i(x(t^c), x(t^c - 1), \dots, x(t^c - k))$  или нечеткие термы нечетких числовых переменных  $\alpha_i$ .

**3. Интерпретируемость НТМ и темпоральной ЛП.** Интерпретируемость НТМ напрямую связана с интерпретируемостью темпоральной ЛП  $\mathfrak{Z}$ , входящей в описания нечетких правил НТМ. В общем случае темпоральная ЛП  $\mathfrak{Z}$  содержит  $n$  ЛЗ, упорядоченных на шкале относительного времени  $\Delta = [1, 2, \dots, k]$ . Формально темпоральную ЛП СРОК представим пятеркой

$$\langle \mathfrak{Z}, T, \Delta, G, M \rangle, \quad (5)$$

где  $\mathfrak{S}$  – название ЛП СРОК;  $T = \{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n\}$  – терм множество;  $\Delta = [1, 2, \dots, k]$  – дискретная шкала относительного времени;  $G$  – грамматика;  $M$  – семантическое отображение  $T \rightarrow \mathfrak{R}(\Delta)$ .

Грамматика  $G$  для темпоральной ЛП  $\mathfrak{S}$  в нотациях Бекуса задается следующей системой правил:

Variable := < fuztemp > | < adverb > < fuztemp >

< fuztemp > :=  $\tau_i$  |  $\tau_i \in \mathfrak{S}$

< adverb > := NE | NL

Очевидно, что на основе грамматики  $G$  для темпоральной ЛП  $\mathfrak{S}$  может быть выведено  $3n$ -элементное множество термов

$$T = \{\tau_1, \dots, \tau_n, NE_{\tau_1}, \dots, NE_{\tau_n}, NL_{\tau_1}, \dots, NL_{\tau_n}\}.$$

На семантическое отображение  $M: T \rightarrow \mathfrak{R}(\Delta)$  накладывается единственное ограничение упорядоченности нечетких множеств (3).

На множестве ЛЗ  $T$  определим отношение временного порядка  $\Psi$ , используя для упрощения инфиксную запись  $\Psi := (<)$ . Базовые термы из терм множества  $T$  упорядочены следующим образом

$$\tau_1 < \tau_2 < \dots < \tau_n.$$

Например, для трехэлементного терм множества  $T$  имеем следующий порядок

$$Long\ time < Average\ time < Some\ time.$$

Полная диаграмма Хассе для отношения порядка  $<$  на трехэлементном множестве термов представлена ниже на рис. 3.

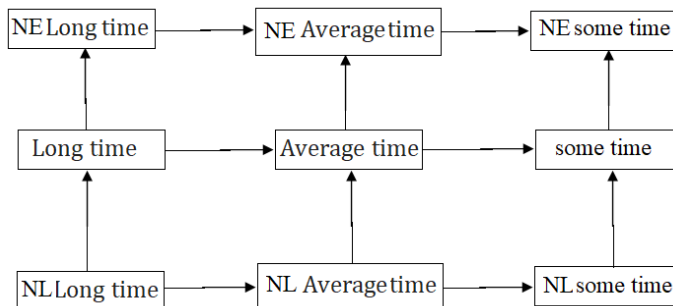


Рис. 3 Диаграмма Хассе для отношения временного порядка на трехэлементном множестве термов темпоральной ЛП СРОК

Представляются обоснованными следующие условия монотонности для всех атомарных выражений из множества  $T$ :

$$\forall \tau \in T \quad \tau < NE_{\tau},$$

$$\forall \tau \in T \quad \tau < NL_{\tau},$$

$$\forall \tau_i, \tau_j \in T \quad \tau_i < \tau_j \Rightarrow NE_{\tau_i} < NE_{\tau_j},$$

$$\forall \tau_i, \tau_j \in T \quad \tau_i < \tau_j \Rightarrow NL_{\tau_i} < NL_{\tau_j}.$$



Формализуем отношение временного порядка  $\prec$  на семантическом уровне, для чего воспользуемся известным определением упорядоченности нечетких чисел, предложенным на основе принципа обобщения в [19].

*Определение 2.* Пусть на универсуме  $\Delta$  определено отношение линейного порядка  $<$ . Тогда отношение порядка  $\prec$  между нечеткими множествами  $A$  и  $B$  может быть определено либо на основании (4), либо на основе принципа обобщения [19].

Теперь можно дать определение интерпретируемости темпоральной ЛП, по аналогии с определением [6].

*Определение 3.* Пусть  $\mathfrak{T}$  – темпоральная ЛП, определенная в виде пятерки (5). Тогда  $\mathfrak{T}$  называется интерпретируемой, если и только если

$$\forall \tau_i, \tau_j \in T \quad \tau_i \prec \tau_j \Rightarrow M(\tau_i) \subseteq M(\tau_j).$$

Иными словами, в рассматриваемом варианте интерпретируемость темпоральной ЛП означает, что семантическое отображение  $M$  сохраняет на множестве  $\mathfrak{R}(\Delta)$  отношение временного порядка между лингвистическими термами. То есть, имеет место следующее необходимое и достаточное условие интерпретируемости.

*Утверждение.* Темпоральная ЛП  $\mathfrak{T}$  с упорядоченным множеством лингвистических значений  $\tau_1 \prec \tau_2 \prec \dots \prec \tau_n$  будет интерпретируемой тогда и только тогда, когда для всех нечеткие множества  $M(\tau_1), M(\tau_2), \dots, M(\tau_n)$  имеет место

$$M(\tau_1) \subseteq M(\tau_2) \subseteq \dots \subseteq M(\tau_n).$$

Для темпоральной ЛП с трехэлементным множеством

$$\mathfrak{T} = \{Long\ time\ ago, Average\ time\ ago, Some\ time\ ago\}$$

условие интерпретируемости означает

$$M(Long\ time\ ago) \subseteq M(Average\ time\ ago) \subseteq M(Some\ time\ ago).$$

Ниже на рис. 4 приведены примеры нечетких множеств, описывающих интерпретируемые и не интерпретируемые темпоральные ЛП.

Следует отметить, что приведенное условие интерпретируемости темпоральной ЛП находится в полном соответствии со здравым смыслом и другими определениями интерпретируемости ЛП, данными, например, в [6], однако в настоящей работе оно получило строгое обоснование.

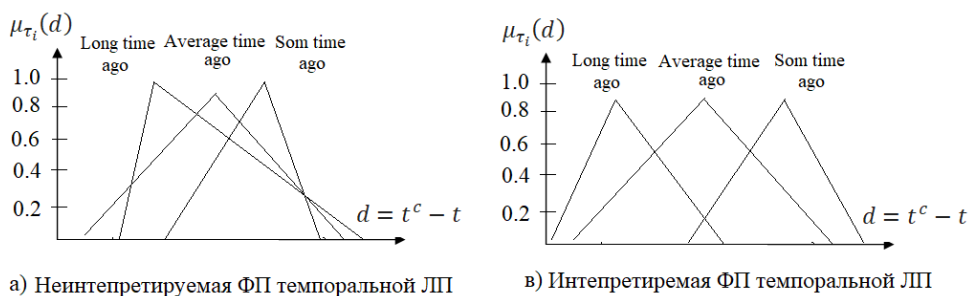


Рис. 4. Примеры интерпретируемой ФП (б) и неинтерпретируемой ФП темпоральной ЛП (а)

**Заключение.** Настоящая статья посвящена интерпретируемости НТМ и темпоральных ЛП. Сделано предположение, что интерпретируемость НТМ напрямую связана с интерпретируемостью входящих в нее темпоральных ЛП. Дано формальное определение интерпретируемости темпоральной ЛП, устанавливающее связь между временными отношениями на двух множествах – множестве лингвистических значений темпоральной ЛП и семействе соответствующих нечетких подмножеств.

Предложенный подход к установлению интерпретируемости темпоральных ЛП может быть применен не только к простым, но и к составным ЛП, полученным путем интегрирования в ЛП темпоральных модификаторов, основанных на временных отношениях.

Предложенный подход может быть применен к разработке интерпретируемых моделей, описывающих динамику процессов на основе использования темпоральных отношений.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Zadeh L.A.* Fuzzy sets // Inform, and Control. – 1965. – No. 8. – P. 338-353.
2. *Babuska R.* Construction of fuzzy systems - interplay between precision and transparency // In: Proc Europ. Symp. on Intelligent Techniques. – Aachen 2000. – P. 445-452.
3. *Bikdash M.* A highly interpretable form of Sugeno inference systems // IEEE Trans. Fuzzy Systems. – 1999. – No. 7. – P. 686-696.
4. *Bodenhofer U. and Bauer P.* Towards an axiomatic treatment of "interpretability" // In: Proc. 6th Internat. Conference on Soft Computing, Iizuka 2000. – P. 334-339.
5. *Cordon O. and Herrera F.* A proposal for improving the accuracy of linguistic modeling // IEEE Trans. Fuzzy Systems. – 2000. – No. 8. – P. 335-344.
6. *Espinosa J. and Vandewalle J.* Constructing fuzzy models with linguistic integrity from numerical data - AFRELI algorithm // IEEE Trans. Fuzzy Systems. – 2000. – No. 8. – P. 591-600.
7. *Setnes M., Babuska R., and Verbruggen H.B.* Rule-based modeling: Precision and transparency // IEEE Trans. Systems Man Cybernet. – 1998. – C 28. – P. 165-169.
8. *Setnes M. and Roubos H.* GA-fuzzy modeling and classification: Complexity and performance // IEEE Trans. Fuzzy Systems. – 2000. – No. 8. – P. 509-522.
9. *Yen J., Wang L., and Gillespie C.W.* Improving the interpretability of TSK fuzzy models by combining global learning and local learning // IEEE Trans. Fuzzy Systems. – 1998. – No. 6. – P. 530-537.
10. *Casillas J., Cordon O., Herrera F., and Magdalena L. (eds.)* Interpretability Issues in Fuzzy Modeling (Studies in Fuzziness and Soft Computing 128). – Springer-Verlag, Berlin, 2003.
11. *Mencar C., Castiello C., Cannone R., Fanelli A.* Interpretability assessment of fuzzy knowledge bases: A cointension based approach // International Journal of Approximate Reasoning. – 2011. – Vol. 52. – P. 501-518.
12. *Alonso J., Castiello C., Mencar C.* Interpretability of Fuzzy Systems: Current Research Trends and Prospects. – Springer Handbook of Computational Intelligence, 2015. – P. 219-237.
13. *Bodenhofer U., Bauer P.* Interpretability of linguistic variables: A formal account // Kybernetika. – 2005. – Vol. 41, No. 2. – P. 227-248.
14. *Ковалев С.М.* Модели анализа слабо формализованных динамических процессов на основе нечетко-темпоральных систем // Известия вузов. Сев.-Кав. регион. Естественные науки. – 2002. – № 2. – С. 10-13.
15. *Еремеев А.П., Ковалев С.М.* Темпоральные и нечетко-темпоральные модели в интеллектуальных системах управления перевозочными процессами // Вестник РГУПС. – 2011. – № 3. – С. 72-80.
16. *Кудинов Ю.И., Кудинов И.Ю., Суслова С.А.* Нечеткие модели динамических процессов: монография. – Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2009. – 372 с.
17. *Sugeno M., Yasukawa T.* A fuzzy-logic-based approach to qualitative modeling // IEEE Trans. on Fuzzy Systems. – 1993. – Vol. 1. – P. 7-31.

18. *Mamdani E.H.* Application of fuzzy algorithms for control of a simple dynamic plant // Proc. Inst. Elect. Eng. – 1974. – Vol. 121. – P. 1585-1588.
19. *Klement E., Mesiar R., and Pap E.* Triangular Norms (Trends in Logic 8). – Kluwer Academic Publishers, Dordrecht 2000.
20. *Ruspini E.H.* A new approach to clustering // Inform. and Control. – 1969. – Vol. 15. – P. 22-32.
21. *Zadeh L.A.* The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning I // Inform. Sci. – 1975. – No. 8. – P. 199-250.
22. *Zadeh L.A.* The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning II // Inform. Sci. – 1975. – No. 8. – P. 301-357.
23. *Zadeh L.A.* The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning III // Inform. Sci. – 1975. – No. 9. – P. 43-80.
24. *Kovalev S.M., Tarassov V.B., Dolgiy A.I., Dolgiy I.D., Koroleva M.N., Khatlamadzhyan A.E.* Intelligent Measurement in Railcar On-Line Monitoring: From Measurement Ontologies to Hybrid Information Granulation System // Proceedings of the Second International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry” (IITI'17). – 2017. – Vol. 1. – P. 169-181.

#### REFERENCES

1. *Zadeh L.A.* Fuzzy sets, *Inform. and Control*, 1965, No. 8, pp. 338-353.
2. *Babuska R.* Construction of fuzzy systems - interplay between precision and transparency, *In: Proc. Europ. Symp. on Intelligent Techniques. Aachen, 2000*, pp. 445-452.
3. *Bikdash M.* A highly interpretable form of Sugeno inference systems, *IEEE Trans. Fuzzy Systems*, 1999, No. 7, pp 686-696.
4. *Bodenhofer U. and Bauer P.* Towards an axiomatic treatment of "interpretability", *In: Proc. 6th Internat. Conference on Soft Computing, Iizuka, 2000*, pp. 334-339.
5. *Cordon O. and Herrera F.* A proposal for improving the accuracy of linguistic modeling, *IEEE Trans. Fuzzy Systems*, 2000, No. 8, pp. 335-344.
6. *Espinosa J. and Vandewalle J.* Constructing fuzzy models with linguistic integrity from numerical data - AFRELI algorithm, *IEEE Trans. Fuzzy Systems*, 2000, No. 8, pp. 591-600.
7. *Setnes M., Babuska R., and Verbruggen H.B.* Rule-based modeling: Precision and transparency, *IEEE Trans. Systems Man Cybernet*, 1998, C 28, pp. 165-169.
8. *Setnes M. and Roubos H.* GA-fuzzy modeling and classification: Complexity and performance, *IEEE Trans. Fuzzy Systems*, 2000, No. 8, pp. 509-522.
9. *Yen J., Wang L., and Gillespie C.W.* Improving the interpretability of TSK fuzzy models by combining global learning and local learning, *IEEE Trans. Fuzzy Systems*, 1998, No. 6, pp. 530-537.
10. *Casillas J., Cordon O., Herrera F., and Magdalena L. (eds.)* Interpretability Issues in Fuzzy Modeling (Studies in Fuzziness and Soft Computing 128). Springer-Verlag, Berlin, 2003.
11. *Mencar C., Castiello C., Cannone R., Fanelli A.* Interpretability assessment of fuzzy knowledge bases: A cointension based approach, *International Journal of Approximate Reasoning*, 2011, Vol. 52, pp. 501-518.
12. *Alonso J., Castiello C., Mencar C.* Interpretability of Fuzzy Systems: Current Research Trends and Prospects. Springer Handbook of Computational Intelligence, 2015, pp. 219-237.
13. *Bodenhofer U., Bauer P.* Interpretability of linguistic variables: A formal account, *Kybernetika*, 2005, Vol. 4 1, No. 2, pp. 227-248.
14. *Kovalev S.M.* Modeli analiza slabo formalizovannykh dinamicheskikh protsessov na osnove nechetko-temporal'nykh sistem [Models of analysis of poorly formalized dynamic processes based on fuzzy-temporal systems], *Izvestiya vuzov. Sev.-Kav. region. Estestvennye nauki* [Izvestiya universities. North-Caucasus. region. Natural Sciences], 2002, No. 2, pp. 10-13.
15. *Eremeev A.P., Kovalev S.M.* Temporal'nye i nechetko-temporal'nye modeli v intellektual'nykh sistemakh upravleniya perevozochnymi protsessami [Temporal and fuzzy-temporal models in intelligent control systems of transportation processes], *Vestnik RGUPS* [Vestnik RGUPS], 2011, No. 3, pp. 72-80.
16. *Kudinov Yu.I., Kudinov I.Yu., Suslova S.A.* Nechetkie modeli dinamicheskikh protsessov: monografiya [Fuzzy models of dynamic processes: monograph]. Lipetsk: Izd-vo LGTU, 2009, 372 p.

17. Sugeno M., Yasukawa T. A fuzzy-logic-based approach to qualitative modeling, *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*, 1993, Vol. 1, pp. 7-31.
18. Mamdani E.H. Application of fuzzy algorithms for control of a simple dynamic plant, *Proc. Inst. Elect. Eng.*, 1974, Vol. 121, pp. 1585-1588.
19. Klement E., Mesiar R., and Pap E. *Triangular Norms (Trends in Logic 8)*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht 2000.
20. Ruspini E.H. A new approach to clustering, *Inform. and Control*, 1969, Vol. 15, pp. 22-32.
21. Zadeh L.A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning I, *Inform. Sci.*, 1975, No. 8, pp. 199-250.
22. Zadeh L.A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning II, *Inform. Sci.*, 1975, No. 8, pp. 301-357.
23. Zadeh L.A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning III, *Inform. Sci.*, 1975, No. 9, pp. 43-80.
24. Kovalev S.M., Tarassov V.B., Dolgiy A.I., Dolgiy I.D., Koroleva M.N., Khatlamadzhiyan A.E. Intelligent Measurement in Railcar On-Line Monitoring: From Measurement Ontologies to Hybrid Information Granulation System, *Proceedings of the Second International Scientific Conference "Intelligent Information Technologies for Industry" (IITI'17)*, 2017, Vol. 1, pp. 169-181.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.В. Боженюк.

**Ковалев Сергей Михайлович** – Центр Интеллектуальных технологий Ростовского филиала АО «НИИАС»; e-mail: ksm@rfniias.ru; 344038, г. Ростов-на-Дону, ул. Ленина, 44/13; начальник; д.т.н.; профессор РГУПС.

**Долгий Александр Игоревич** – e-mail: adolgy@list.ru; первый заместитель директора; к.т.н.; доцент РГУПС.

**Kovalev Sergey Mikhailovich** – Intellectual Technologies Center of Rostov Branch of JSC "NIIAS"; e-mail: ksm@rfniias.ru; 44/13, Lenin street, Rostov-on-don, 344038, Russia; head; dr. of eng. sc.; professor of RGUPS.

**Dolgy Alexander Igorevich** – e-mail: adolgy@list.ru; first deputy director; cand. of eng. sc.; associate professor of the RSTU.

УДК 004.067

DOI 10.23683/2311-3103-2018-5-142-151

**Ю.А. Брюхомицкий**

### **ТЕКСТОНЕЗАВИСИМАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЛИЧНОСТИ ПО ДИНАМИЧЕСКИМ БИОМЕТРИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ НА ОСНОВЕ ИММУННОЙ МОДЕЛИ КЛОНАЛЬНОЙ СЕЛЕКЦИИ**

*Предлагается иммунологический подход к решению задачи распознавания сигналов динамической биометрии, базирующийся на принципах массово-параллельной децентрализованной обработки данных, использующихся в искусственных иммунных системах. Особенностью подхода является представление сигналов динамической биометрии последовательностями информационных единиц определенного формата, с последующей обработкой в темпе их поступления на основе иммунологической модели клональной селекции с положительным отбором. В качестве информационных единиц выступают синтаксически связанные фрагменты текста соответствующей модальности, которые представлены многомерными векторами в рабочем пространстве признаков. В фазе обучения создается начальная популяция детекторов в метрике векторов исследуемой последовательности биометрических данных. Затем по принципу положительного отбора выявляются детекторы начальной популяции, которые в пространстве признаков наиболее близки к областям распределения соответствующих биометрических данных. Близость векторов в пространстве признаков моделирует*