

Васильев В. И., Вульфин А. М., Кириллова А. Д., Черняховская Л. Р.

DOI: 10.14529/secur190406

ОБ ИНТЕРПРЕТИРУЕМОСТИ НЕЧЕТКИХ КОГНИТИВНЫХ МОДЕЛЕЙ НА ЭТАПЕ ОЦЕНКИ РИСКОВ ИННОВАЦИОННЫХ ПРОЕКТОВ¹

Рассматривается задача оценки и прогнозирования рисков, возникающих на различных стадиях создания и реализации инновационных проектов в сфере ИТ-технологий. Основное внимание уделяется вопросам интерпретации промежуточных и конечных результатов решения данной задачи с использованием технологии нечеткого когнитивного моделирования при активном участии группы экспертов – специалистов в данной проблемной области. В основе обсуждаемой процедуры лежит использование возможных альтернатив (т.е. конкурирующих методов решения возникающих при этом подзадач) на каждом из этапов когнитивного моделирования с целью лучше понять, объяснить и нагляднее представить (с соответствующим обоснованием) полученные результаты и рекомендации лицу, принимающему окончательное решение. В качестве иллюстрации рассматривается пример нечеткой когнитивной карты оценки рисков инновационных ИТ-проектов, приведенный в работе [12].

Ключевые слова: инновационный проект, риски, когнитивное моделирование, интерпретируемость, нечеткие когнитивные карты.

Vasilyev V. I., Vulfin A. M., Kirillova A. D., Chernyakhovskaya L. R.

ON THE INTERPRETABILITY OF FUZZY COGNITIVE MODELS AT THE STAGE OF RISKS ASSESSMENT FOR INNOVATIVE PROJECTS

The problem of assessing and predicting risks arising at the different stages of creation and implementation of innovative projects in the sphere of IT-technologies is considered. The main attention is paid to the issues of interpretation of intermediate and final results of this problem solution with use of fuzzy cognitive modeling technology under active participation of the

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 18-00-00238 КОМФИ

group of experts – specialists in this subject domain. The basis of discussed procedure is the use of possible alternatives (i.e. the competing methods of solving the arising here subtasks) at each of the stages of cognitive modeling in order to understand better, to explain and more clearly represent (with corresponding rationale) the obtained results and recommendations to the Decision Maker. As the illustration, the example of the fuzzy cognitive map for innovative IT projects risks assessment earlier presented in [12] is considered.

Keywords: *innovative project, risks, cognitive modeling, interpretability, fuzzy cognitive maps.*

Введение

Приметами нашего времени являются все возрастающие темпы цифровизации экономики, массовое внедрение инноваций и новых информационных технологий (ИТ) в различные сферы нашей жизни. В то же время, на практике внедрение инновационных проектов (ИП), связанных с разработкой и продвижением на рынок новых инновационных продуктов (товаров, технологий, услуг), так или иначе связано с определенными рисками, причем чем крупнее масштаб ИП, тем выше соответствующие риски. Так, по данным международной компании Standish Group [1], ежегодно анализирующей статистику рисков выполненных ИТ-проектов в области разработки программного обеспечения (ПО), в 2015 г. из общего числа изученных 50000 проектов только 29% были успешными, а остальные столкнулись с серьезными проблемами (52%) или оказались неудачными (провальными) – 19%, т.е. не уложились в заданный бюджет финансирования, сорвали плановые сроки реализации или не соответствовали заявленным в ИП требованиям. Причины возникновения подобных рисков связаны с наличием большого числа факторов неопределенности на всех этапах жизненного цикла ИП (компетентность персонала, ошибочность определения характеристик ИП, взаимоотношения с инвесторами, реакция рынка на выпускаемую продукцию, действия конкурентов и т.д.). Одним из эффективных способов избежания или снижения последствий указанных рисков является использование методов когнитивного моделирования, основанных на применении аппарата нечетких когнитивных карт.

Преимуществами нечетких когнитивных карт (Fuzzy Cognitive Maps, FCM), впервые предложенных в 1986 г. Б. Коско [2], являются их наглядность, выявление структуры причинно-следственных связей между элементами сложной системы (проблемы, ситуации), трудно поддающейся количественному анализу традиционными методами, использова-

ние знаний и опыта экспертов в конкретной предметной области. Сегодня существует большое число разновидностей нечетких когнитивных карт (НKK) – реляционные НKK [3], интервально-значные НKK [4], серые НKK [5], грубые (rough) НKK [6], интуиционистские НKK [7], продукционные НKK [8], динамические НKK [9] и др. Такое разнообразие когнитивных моделей имеет своей целью приспособиться к учету различных факторов неопределенности, отразить специфику их взаимного влияния и воздействия на исследуемую систему, предложить эффективный инструментарий моделирования сложных плохоформализуемых систем. Достаточно большое количество работ посвящено исследованию возможностей и перспектив применения НKK для решения задач, связанных с количественной оценкой и прогнозированием рисков ИП [10-16]. Вместе с тем, как отмечается многими авторами, попытки распространить данный подход на задачи моделирования сложных систем (крупных ИП) нередко сталкиваются с «проклятием размерности» – в результате моделирования получаются НKK, содержащие большое число концептов и их взаимосвязей, что существенно затрудняет их анализ (НKK становятся «непрозрачными» и плохо интерпретируемыми).

Таким образом, проблема *интерпретируемости* (interpretability) результатов, полученных с помощью нечетких когнитивных моделей, приобретает самостоятельный интерес и становится одной из центральных в методологии когнитивного моделирования и машинного обучения. Существуют различные трактовки этого понятия. Так, в [17] интерпретируемость понимается как прозрачность работы нечеткой модели для пользователя, ее способность отражать поведение исследуемой системы в понятной для человека манере. При этом подчеркивается, что одним из условий построения нечетких моделей с хорошей интерпретируемостью является их максимальное упрощение, т.е. уменьшение

числа входящих в них структурных компонент. В [18] отмечается, что проблема интерпретируемости должна решаться на 2-х уровнях: на уровне машинных моделей (где решается вопрос о выборе адекватных средств моделирования и формировании рекомендаций ЛПР по результатам моделирования) и на уровне человека-эксперта, который должен понять суть предложенных ему решений (альтернатив) и принять окончательное решение по существу поставленной задачи. В [19] под интерпретируемостью понимается способность объяснить полученные результаты или представить их с помощью терминологии, понятной человеку. При выборе критериев оценки интерпретируемости предлагается воспользоваться разделением возможных подходов на 3 класса: 1) учет специфики конкретной предметной области (Application-grounded Evaluation); 2) ориентация на знания и опыт эксперта (Human-grounded Metrics); 3) ориентация на известные, хорошо апробированные методы исследования (Functionally-grounded Evaluation).

В данной статье будут рассмотрены отдельные аспекты, связанные с решением данной проблемы на этапе формирования НКК, предназначенной для оценки рисков ИТ-проекта. С целью конкретности и большей наглядности изложение будет вестись на базе примера НКК, приведенной в работе Х. Салмерона [12].

1. Анализ интерпретируемости результатов когнитивного моделирования (на примере оценки рисков ИТ-проекта)

В соответствии с общепринятым определением, НКК – это модель исследуемой системы в виде ориентированного графа, заданного с помощью набора множеств

$$\text{НКК} = \{C, E, W\}, \quad (1)$$

где $C = \{C\}$ – множество вершин графа (концептов), представляющих собой факторы, наиболее существенные с точки зрения изучения рассматриваемой системы, ($i = 1, 2, \dots, n$);

$E = \{e_{ij}\}$ – множество направленных дуг (ребер) графа – связей между концептами;

$W = \{W_{ij}\}$ – множество отношений (весов связей) между концептами, $(i, j) \in \Omega$. Здесь $\Omega = \{(i_1, j_1), (i_2, j_2), \dots, (i_L, j_L)\}$ – множество пар индексов смежных (т.е. связанных между собой) вершин, $L \leq n(n-1)$.

Общая процедура построения и работы с НКК включает в себя следующие три этапа:

1. Определение структуры НКК (т.е. состава ее концептов и связей между ними).
2. Определение силы (весов) связей НКК.
3. Сценарное моделирование и формирование рекомендаций ЛПР.

На последнем этапе решаются уравнения состояния (динамики) НКК, которые записываются в виде

$$X_i(k+1) = f\left(\sum_{j=1, j \neq i}^n W_{ji}X_j(k) + X_i(k)\right), \quad (2)$$

где X_i – переменная состояния i -го концепта C_i ($i = 1, 2, \dots, n$); $k = 0, 1, 2, \dots$ – дискретное время; $f(\cdot)$ – функция активации, отображающая значения аргумента в интервал $[0, 1]$ или $[-1, 1]$. Наиболее часто в качестве функции $f(\cdot)$ выбирается сигмоидная функция

$$f(x) = 1/(1+e^{-x}) \quad (3)$$

или функция гиперболического тангенса (двухполярная сигмоида)

$$f(x) = (1 - e^{-x})/(1 + e^{-x}) = \text{th}\left(\frac{x}{2}\right). \quad (4)$$

Решение уравнений (2) предполагает предварительное задание начальных условий, т.е. вектора $X(0) = (X_1(0), X_2(0), \dots, X_n(0))$, который должен отражать информацию о начальном состоянии и внешних возмущениях (дестабилизирующих факторах), действующих на систему.

2. Исходная НКК для оценки рисков ИТ-проектов

Перейдем к рассмотрению примера построения НКК [12], выполняющего в нашем случае функцию иллюстрации подхода. На рисунке 1 приведена соответствующая схема НКК (будем называть ее исходной), предназначенная для оценки рисков ИТ-проектов.

В результате обсуждения и согласования позиций группой из 10 экспертов было предложено включить в состав рассматриваемой НКК концептов (вершин графа), представляющих наиболее существенные факторы рисков. Эти же эксперты определили $L = 33$ взаимосвязей между указанными концептами (т.е. 33 дуги графа), а также оценочные значения силы (весов) этих связей W_{ij} .

Общие сведения о составе концептов и силе связей НКК представлены в Таблице 1.

При назначении силы связей (весов) НКК использовалась процедура усреднения результатов опроса экспертов с использованием формулы

$$W_{ij} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{r=1}^N W_{ij}^{(r)}, \quad (5)$$

где $W_{ij}^{(r)}$ – значение силы связи между i -м и j -м концептами, присвоенное r -м экспертом. В свою очередь, при оценке веса $W_{ij}^{(r)}$ эксперт руководствовался некоторой нечеткой линг-

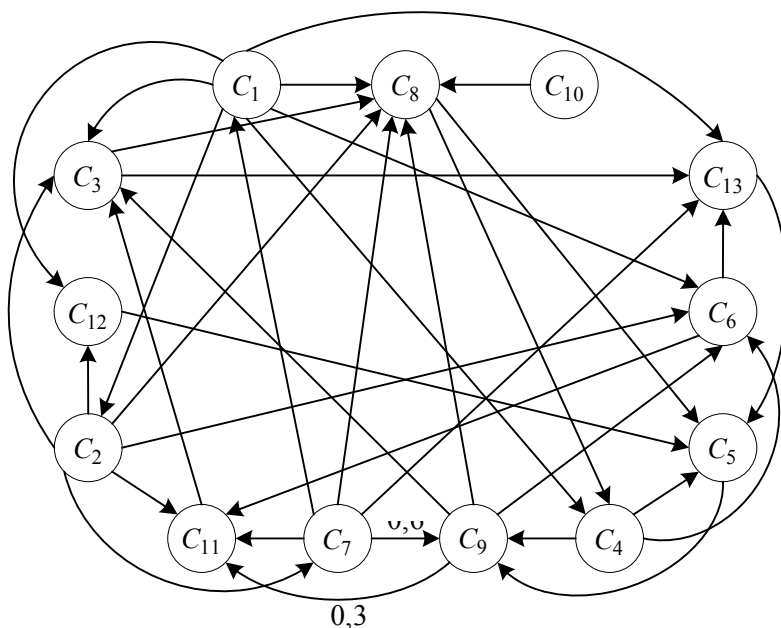


Рис. 1. Схема НКК для оценки рисков ИТ-проектов

Таблица 1

Общая характеристика состава НКК

Обозначение концепта	Наименование концепта	Сила связи
C_1	Неправильный выбор средств ИТ	$W_{12} = 0,4$ $W_{13} = 0,8$ $W_{14} = 0,4$ $W_{16} = 0,6$ $W_{18} = 0,2$ $W_{1,12} = 0,7$ $W_{1,13} = 0,6$
C_2	Нестабильность работы ПО ИТ	$W_{23} = 0,7$ $W_{26} = 0,5$ $W_{27} = 0,2$ $W_{28} = 0,3$ $W_{2,11} = 0,6$ $W_{2,12} = 0,7$
C_3	Сложности интеграции ИТ с существующей ИТ-инфраструктурой	$W_{38} = 0,8$ $W_{3,13} = 0,3$
C_4	Нереалистичные ожидания от результатов ИТ-проекта	$W_{45} = 0,6$ $W_{46} = 0,4$ $W_{49} = 0,1$
C_5	Недостаточная поддержка со стороны высшего руководства	$W_{59} = 0,5$
C_6	Недостаточное вовлечение потребителей в реализацию ИТ-проекта	$W_{6,11} = 0,2$ $W_{6,13} = 0,6$
C_7	Неэффективное взаимодействие со службой консалтинга	$W_{71} = 0,8$ $W_{78} = 0,9$ $W_{79} = 0,6$ $W_{7,11} = 0,7$ $W_{7,13} = 0,8$
C_8	Возрастание цены ИТ-проекта	$W_{84} = 0,7$ $W_{85} = 0,8$
C_9	Низкое качество менеджмента ИТ-проекта	$W_{93} = 0,3$

C_{10}	Высокие требования к надежности	$W_{10,8} = 0,4$
C_{11}	Неправильный учет нормативных требований	$W_{11,3} = 0,7$
C_{12}	Вопросы обеспечения безопасности ИТ	$W_{12,5} = 0,2$
C_{13}	Низкое качество продукции (услуг)	$W_{13,5} = 0,3$

Таблица 2

Оценка силы связей между концептами

Лингвистическое значение	Числовой диапазон
Не_влияет	0
Очень_слабая	(0; 0,15]
Слабая	(0,15; 0,35]
Средняя	(0,35; 0,6]
Сильная	(0,6; 0,85]
Очень_сильная	(0,85; 1]

вистической шкалой (образец такой шкалы приведен в Таблице 2).

Покажем далее, как, принимая определенные меры, можно повысить интерпретируемость результатов когнитивного моделирования.

3. Меры повышения интерпретируемости НКК

На этапе определения структуры НКК – первым необходимым шагом является оценка структурно-топологических свойств полученной НКК. При этом можно воспользоваться, например, следующими показателями структурной сложности НКК [20, 21]:

а) *плотность* (density) НКК – коэффициент, показывающий степень связности изображающего ее графа:

$$D = \frac{L}{n(n-1)}, \quad (6)$$

где L – общее число связей в НКК; n – число концептов НКК;

б) *центральность* (centrality) концепта – характеризует степень взаимодействия i -го концепта НКК с его соседями:

– *исходящая центральность* – подсчитывается как сумма сил связей, выходящих из рассматриваемого концепта C_i :

$$od_i = \sum_{k=1}^n W_{ik}; \quad (7)$$

– *входящая центральность* – подсчитывается как сумма сил связей W_{ji} , входящих в рассматриваемый концепт:

$$id_i = \sum_{k=1}^n W_{ki}; \quad (8)$$

– *общая центральность* концепта (или степень вершины графа):

$$td_i = od_i + id_i. \quad (9)$$

Поскольку в нашем случае (для НКК на рисунке 1): $L = 30$, $n = 13$, из (6) получаем зна-

чение $D = 0,21$, что говорит о достаточно большом количестве взаимных связей между концептами, т.е. о высокой плотности НКК. Подсчет показателей центральности показывает, что наиболее высокую *структурную значимость* имеют концепты C_1 и C_8 (показатели общей центральности $td_1 = td_8 = 4,8$), а также концепты C_7 , C_3 и C_2 (показатели td_7 , td_3 и td_2 равны соответственно 4,0; 3,6 и 3,4). Перечисленные концепты аккумулируют наибольшее количество связей от других концептов, т.е. выступают в качестве своеобразных центров влияния в НКК.

Следующий конструктивный шаг в изучении полученной НКК – ее декомпозиция на относительно независимые подсистемы (блоки, модули), объединяющие в своем составе группы из числа смежных, наиболее тесно взаимодействующих между собой концептов НКК [22-24].

Для решения задачи декомпозиции графа НКК, изображенного на рисунке 1, воспользуемся подходом, изложенным в [23].

Определение. Множество вершин графа, достижимых из вершины i , называется *достижимым множеством* $R(i)$:

$$R(i) = (i) \cup G^1(i) \cup G^2(i) \cup \dots \cup G^n(i), \quad (10)$$

где $G^k(i)$ – множество вершин, достижимых из вершины i с помощью путей длины k ; n – число вершин графа.

Определение. Контрдостижимое множество $Q(i)$ – это множество таких вершин, когда из любой вершины этого множества можно достигнуть вершину i :

$$Q(i) = (i) \cup G^{-1}(i) \cup G^{-2}(i) \cup \dots \cup G^{-k}(i), \quad (11)$$

где $G^{-k}(i)$ – множество вершин, из которых можно достигнуть i -ю вершину за k шагов.

Определение. Сильно связный подграф $G(V)$ – это множество таких его вершин $R(i) \cap Q(i)$, которые достижимы из i -й вершины и, кроме того, из каждой такой вершины достижима вершина i .

В соответствии с алгоритмом [23], выполняем следующие действия:

1. Для i -й вершины ($i = 1$) находим множества $R(1)$ и $Q(1)$:

$R(1) = \{1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 11; 12\}$; $Q(1) = \{1; 2; 7\}$.

2. Находим сильно связный подграф G_1 , включающий множество вершин

$V_1 = R(1) \cap Q(1) = \{1; 2; 7\}$.

3. Все вершины, принадлежащие $G_1(V_1)$, удаляются из исходного графа $G(V)$. После удаления сильно связного подграфа $G_1(V_1)$ исходный граф принимает вид (рисунок 2).

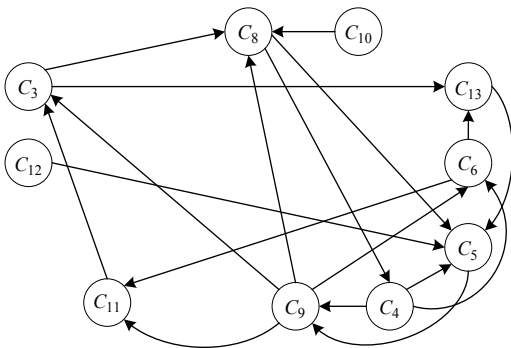


Рис. 2. Исходный граф НКК после удаления $G_1(V_1)$

4. Пункты 1, 2, 3 повторяются для $i = 1, 2, 3$, ..., до тех пор, пока все вершины исходного графа не будут сгруппированы в соответствующие сильно связные подграфы.

Итак, имеем: $i = 2$, но вершина C_2 входит в V_1 , поэтому $i = 3$. В результате анализа рисунка 2 получаем:

$R(3) = \{3; 4; 5; 6; 8; 9; 10; 11; 13\}$; $Q(3) = \{3; 4; 5; 6; 8; 9; 10; 11; 12; 13\}$, т. е.: $V_2 = R(3) \cap Q(3) = \{3; 4; 5; 6; 8; 9; 11; 13\}$.

5. Удаляем подграф $G_2(V_2)$, после чего получаем 2 несвязанных между собой концепта C_{10} и C_{12} .

6. Поскольку вершины 3, 4, 5, 6, 8, 9, 11 уже входят в подграф $G_2(V_2)$, сразу принимаем $i = 10$. Но тогда $R(10) = \{10\}$, $Q(10) = \{10\}$, и, следовательно, $V_3 = R(10) \cap Q(10) = \{10\}$.

7. Удаляем подграф $G_3(V_3)$, в результате остается один концепт C_{12} , и для $i = 12$ получаем: $R(12) = \{12\}$; $Q(12) = \{12\}$, откуда $V_4 = R(12) \cap Q(12) = \{12\}$.

Таким образом, окончательно мы имеем набор из 4-х блоков (связных подграфов) НКК, изображенных на рисунке 3.

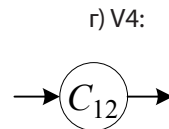
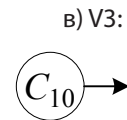
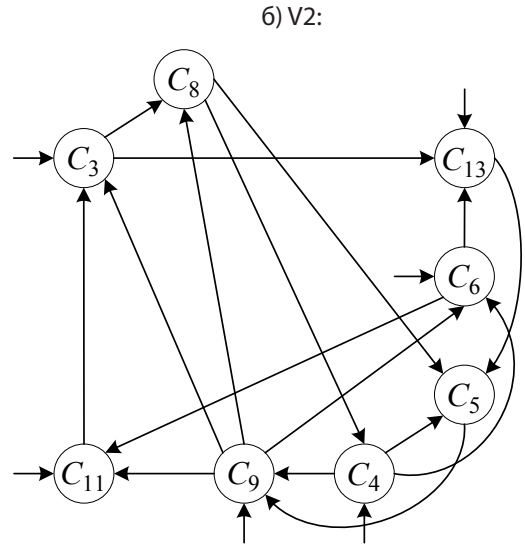
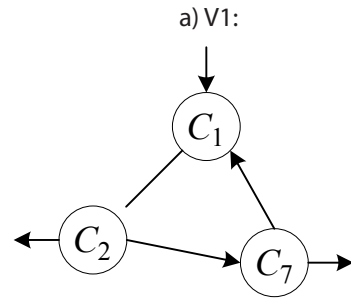


Рис. 3. Сильно связные подграфы:
а) $V_1 = \{1; 2; 7\}$; б) $V_2 = \{3; 4; 5; 6; 8; 9; 11; 13\}$;
в) $V_3 = \{10\}$; г) $V_4 = \{12\}$

Объединяем полученные подграфы в соответствии с исходным графом (рисунок 1), после чего получаем результат декомпозиции в виде следующей блок-схемы (рисунок 4).

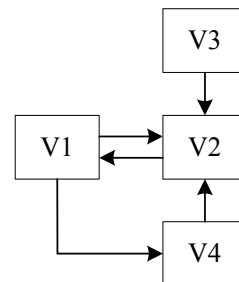


Рис. 4. Результат декомпозиции исходного графа НКК

Возвращаясь к Таблице 1, видно, что сильно связный подграф $G1(V1)$ является в данном случае доминирующим, поскольку в него вошли «доминантные» концепты (факторы риска) C_1 – «Неправильный выбор средств ИТ», C_2 – «Нестабильность работы ПО ИТ» и C_7 – «Неэффективное взаимодействие со службой консалтинга», обладающие наибольшими значениями показателя центральности в составе НКК. Подграф $G2(V2)$, также содержащий 2 концепта с высокими значениями показателя центральности: C_8 – «Возрастание цены ИТ-проекта» и C_3 – «Сложности интеграции ИТ существующей ИТ-инфраструктурой», скорее, играет здесь подчиненную роль, обусловленную воздействием на него других концептов, входящих в подграфы $G1(V1)$, $G3(V3)$ и $G4(V4)$. Подграфы $G3(V3)$ и $G4(V4)$, содержащие по одному концепту: C_{10} – «Высокие требования к надежности» и C_{12} – «Вопросы обеспечения безопасности» соответственно, имеют наименьшие значения показателя центральности ($td_{10} = 0,4$; $td_{12} = 1,6$); они характеризуют внешние факторы риска, связанные с требованиями надежности и безопасности функционирования предлагаемого ИТ-продукта.

Эффективной мерой повышения интерпретируемости модели НКК является *редукция* (упрощение) НКК, т. е. уменьшение количества концептов НКК за счет объединения близких по содержанию концептов, а также удаления из НКК наименее значимых концептов [24, 25].

Однако, в нашем случае (НКК на рисунке 1) осуществить снижение размерности НКК путем объединения концептов не представляется возможным ввиду высокой степени взаимозависимости концептов: только общее число циклов, т.е. замкнутых контуров рассматриваемого графа, равно 11: ($C_3 \rightarrow C_{13} \rightarrow C_5 \rightarrow C_9 \rightarrow C_3$); ($C_4 \rightarrow C_9 \rightarrow C_8 \rightarrow C_4$) и т.д. С другой стороны, возможно удаление из НКК 2-х концептов C_{10} и C_{12} , имеющих минимальные значения показателя центральности, хотя это незначительно уменьшит размерность НКК и вряд ли является целесообразным.

На этапе определения весов связей НКК важное значение имеет работа с экспертами, грамотное построение процедуры оценивания весов связей, внимательное отношение к мнению каждого эксперта (хотя разброс мнений и оценок экспертов является неизбежным и в определенной степени даже желательным).

Существуют различные подходы к обработке результатов опроса экспертов:

а) приведение полученного множества оценок экспертов к «точечным» значениям весов связей.

При этом могут использоваться как стандартные методы экспертных оценок [25], так и адаптированные к решению данной задачи метод планирования экспериментов [26], метод объединения (merging) ориентированных графов [24, 27], оптимизация структуры и значений весов НКК с помощью генетического алгоритма [28];

б) учет разброса оценок экспертов посредством описания силы связей между концептами в рамках различных модификаций НКК:

– представление весов связей с помощью нечетких терм-множеств (реляционные НКК [3]);

– представление весов связей с помощью интервальных чисел (интервально-значные НКК [4], «серые» НКК [5], «грубые» НКК [6], интуиционистские НКК [7]);

– описание силы связей с помощью нечетких продукционных правил (продукционные НКК [8], динамические НКК [9]).

Применение данного подхода к оценке рисков ИП позволяет получить в конечном итоге количественную оценку факторов риска в виде некоторых диапазонов значений риска (нижняя граница – «оптимистическая» оценка риска, верхняя граница – «пессимистическая» оценка), что дает ЛПР аргументы для более взвешенного принятия решений по управлению рисками.

На этапе сценарного моделирования проводится серия вычислительных экспериментов с полученной НКК с целью получения ответов на следующие ключевые вопросы:

– каковы ожидаемые риски от реализации ИП в краткосрочной и долгосрочной перспективе?

– какие из учитываемых факторов риска являются определяющими и какую долю они вносят в совокупную оценку значения риска ИП?

– какие управляющие факторы являются наиболее эффективными с учетом полученных оценок риска, насколько их применение позволит минимизировать (или удержать в заданных пределах) оценки ожидаемых рисков ИП?

По существу, НКК можно рассматривать в данном случае как «полигон» для проведения

испытаний, а сам процесс когнитивного моделирования как некоторую деловую игру для поиска решений поставленной задачи – оценки рисков ИП. Естественно, что выполнению указанной серии экспериментов должен предшествовать тщательно спланированный выбор сценариев моделирования. На данном этапе важно правильно оценивать адекватность выбранной для моделирования НКК, используя для этого различные метрики (критерии сравнительного анализа) НКК. В работе [29] предложено использовать для этих целей три группы метрик: а) основанные на анализе контента; б) основанные на анализе показателей структурной сложности НКК; в) основанные на анализе динамики поведения НКК. Последнее означает, что результаты расчета переменных состояния НКК с использованием уравнений (2) несут в себе определенную информацию о характере изменения состояния НКК во времени («быстро», «медленно»), что также должно учитываться при прогнозировании значений рисков ИП.

В работе [12] проводилось сценарное моделирование рисков ИТ-проектов с использованием изображенной на рисунке 1 НКК. Рассматривались 3 варианта сценариев, отличающиеся учетом различных факторов рисков:

1) *сценарий А* – активируются состояния концептов C_7 («Неэффективное взаимодействие со службой консалтинга») и C_9 («Низкое качество менеджмента ИТ-проекта»);

2) *сценарий В* – активируются состояния концептов C_5 («Недостаточная поддержка со стороны высшего руководства») и C_6 («Недостаточное вовлечение потребителей в реализацию ИТ-проекта»);

3) *сценарий С* – активируются состояния концептов C_1 («Неправильный выбор средств ИТ») и C_3 («Сложности интеграции с существующей ИТ-инфраструктурой»).

В отличие от [12], воспользуемся для моделирования аппаратом нечетких серых когнитивных карт (НСКК) [6], позволяющим учитывать разброс назначенных оценок весов связей. Допустим, что для сценария А переменные состояния активированных концептов C_7 и C_9 неизменны во времени и принимают «серые» значения внутри некоторого диапазона (интервала) $\otimes X_{i^*}(k) \in [0,8; 1]$ и $\otimes X_{i^*}(k) \in [0,8; 1]$ для всех $k = 0, 1, 2, \dots$

Будем полагать также, что начальные состояния остальных концептов $\otimes X_i(0)$ принимаются нулевыми, т.е. равными $[0; 0]$, а веса

связей $\otimes W_{ij} \in [\underline{W}_{ij}, \overline{W}_{ij}]$, где $\underline{W}_{ij}$ и $\overline{W}_{ij}$ – соответственно нижняя и верхняя границы «серого» числа $\otimes W_{ij}$. В рассматриваемом случае (сценарий А) примем: $\otimes W_{ij} \in [W_{ij}^0 - \delta W_{ij}^0; W_{ij}^0 + \delta W_{ij}^0]$, где δW_{ij}^0 – «серость», т.е. разброс оценки веса $\otimes W_{ij}$; W_{ij}^0 – центральное значение «серого» веса $\otimes W_{ij}$; $W_{ij}^0 = (\underline{W}_{ij} + \overline{W}_{ij})/2$. Ниже полагаем: $\delta W_{ij}^0 = 0,05 \cdot W_{ij}^0$, что соответствует 5%-ному разбросу значений весов НСКК; значения W_{ij}^0 возьмем из последнего столбца Таблицы 1. Функция активации концептов – гиперболический тангенс (формула (4)).

При моделировании полученной таким образом НСКК воспользуемся инструментальным программным средством «Cognitive Map Constructor», разработанным на кафедре вычислительной техники и защиты информации УГАТУ. Результаты расчета уравнений динамики (2), где в качестве переменных состояния концептов и весов связей рассматриваются их «серые» значения $\otimes X_i(k)$ и $\otimes W_{ij}$ ($i, j = 1, 2, \dots, i(E)$), приведены на рисунках 5, а-б.

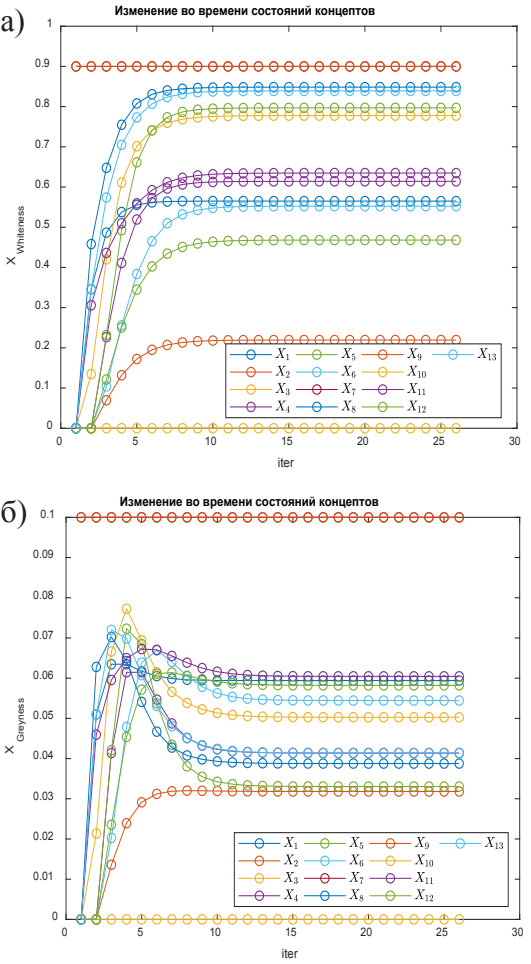


Рис. 5. Изменение во времени состояний концептов НСКК (сценарий А)

На графиках рис. 5, а отложены центральные значения (Whiteness) «серых» переменных состояния $X_i^0(k) = (X_i(k) + \bar{X}_i(k))/2$, а на рис. 5, б – значения «серости» (Greyness) этих переменных $\delta X_i(k)$, $(k = 0, 1, 2, \dots)$. Как видно из графиков, стабилизация состояний концептов осуществляется примерно за 12 итераций. Установившиеся значения (конечный диапазон) «серых» переменных $\otimes X_i(k)$, $(i = 1, 2, \dots, n)$ для сценария А приведены в Таблице 3. Там же приведены установившиеся значения переменных состояния $\otimes X_i(k)$, $(i = 1, 2, \dots, n)$ для сценариев В и С. Отметим, что при моделировании по сценарию В принимается:

$\otimes X_5(k) \in [0,8; 1]$; $\otimes X_6(k) \in [0,8; 1] \forall k = 0, 1, 2, \dots$ (начальные условия для всех остальных концептов – нулевые, т.е. $\otimes X_j(0) \in [0; 0]$ для $j \neq 5; 6$);

а в случае сценария С:

$\otimes X_1(k) \in [0,8; 1]$; $\otimes X_3(k) \in [0,8; 1] \forall k = 0, 1, 2, \dots$ (начальные условия для остальных концептов – нулевые, т.е. $\otimes X_j(0) \in [0; 0]$ для $j \neq 1; 3$).

- б) эффективное взаимодействие с внешней службой консалтинга;
 - в) высокий уровень менеджмента ИП;
 - г) вовлечение будущих потребителей ИТ-продукта в процесс разработки и реализации ИП;
 - д) правильный выбор заложенных в проект средств ИТ и способов их интеграции в существующую ИТ-инфраструктуру потребителей.
- Невыполнение этих условий может привести к возрастанию цены проекта и снижению качества планируемого к выпуску ИТ-продукта.
- И последнее – когнитивное моделирование требует для своей реализации, как правило, значительных ресурсов времени в силу необходимости рассмотрения и сравнения различных вариантов решения поставленной задачи. Выход из создавшейся ситуации – автоматизация основных этапов моделиро-

Таблица 3

Уставившиеся значения переменных состояния концептов

Пер-ная состояния	Установившиеся значения		
	Сценарий А	Сценарий В	Сценарий С
$\otimes X_1$	[0,506; 0,624]	[0; 0]	[0,8; 1]
$\otimes X_2$	[0,188; 0,251]	[0; 0]	[0,287; 0,379]
$\otimes X_3$	[0,727; 0,828]	[0,196; 0,281]	[0,8; 1]
$\otimes X_4$	[0,573; 0,656]	[0,097; 0,165]	[0,552; 0,665]
$\otimes X_5$	[0,764; 0,83]	[0,8; 1]	[0,711; 0,804]
$\otimes X_6$	[0,498; 0,607]	[0,8; 1]	[0,607; 0,724]
$\otimes X_7$	[0,8; 1]	[0; 0]	[0,055; 0,079]
$\otimes X_8$	[0,809; 0,887]	[0,147; 0,228]	[0,581; 0,706]
$\otimes X_9$	[0,8; 1]	[0,357; 0,465]	[0,381; 0,465]
$\otimes X_{10}$	[0; 0]	[0; 0]	[0; 0]
$\otimes X_{11}$	[0,574; 0,695]	[0,149; 0,204]	[0,297; 0,402]
$\otimes X_{12}$	[0,409; 0,526]	[0; 0]	[0,569; 0,693]
$\otimes X_{13}$	[0,798; 0,881]	[0,445; 0,567]	[0,712; 0,815]

Анализ полученных результатов показывает, что из 3-х рассмотренных сценариев (А, В, С) наиболее опасными являются риски ИТ-проектов, вытекающие из сценариев реализации А и С, – см. высокие значения переменных состояния $\otimes X_7$, $\otimes X_8$, $\otimes X_9$, $\otimes X_{13}$ – сценарий А; $\otimes X_7$, $\otimes X_{13}$ – сценарий С, что дает основания сформулировать обоснованные рекомендации, направленные на снижение рисков ИТ-проектов. Это, в первую очередь:

а) постоянная поддержка ИП со стороны руководства компании;

вания с применением специально разработанных для этих целей пакетов программ. Заметим, что применение указанных программных средств – это не только снижение времени расчетов, но и удобный интерфейс, визуализация промежуточных и конечных результатов (структурные схемы, графики, диаграммы), использование стандартных методов статистической обработки данных и т. д., что несомненно, способствует повышению интерпретируемости процесса когнитивного моделирования.

Заключение

Задачи анализа и управления рисками инновационных проектов традиционно относятся к классу слабоформализуемых задач, для решения которых в последнее время успешно применяются методы нечеткого когнитивного моделирования. В то же время, одной из первоочередных задач при построении и применении нечетких когнитивных моделей является проблема их интерпретируемости, т. е. прозрачности, понятности в терминах, доступных ЛППР по результатам моделирования. Первым шагом на пути решения данной проблемы является структурно-топологический анализ НКК, предложенный экспертами, позволяющий выявить наиболее структурно-значимые элементы в составе НКК, а также относительно независимые подсистемы НКК, играющие ключевую роль в поведении исследуемой системы. Другая группа методов связана с обработкой результатов опроса экспертов относительно характера взаимного влияния концептов, причем ре-

зультатом подобной процедуры может быть как агрегация мнений экспертов, так и переход к описанию НКК в виде интервально-значной (серой, интуиционистской) НКК, поведение которой описывается уравнениями интервальной математики. И наконец, на этапе сценарного моделирования с помощью НКК, повышение интерпретируемости полученных результатов достигается путем повышения вариативности (разнообразия) используемых сценариев. При этом оценивается влияние как отдельных факторов риска, так и комбинации этих факторов на показатели качества и эффективности ИП, в том числе путем расширения состава моделируемой НКК за счет включения в нее дополнительных управляющих факторов, направленных на снижение рисков ИП. Залогом успешной реализации перечисленных мер является автоматизация основных этапов когнитивного моделирования с использованием проблемно-ориентированных диалоговых средств моделирования НКК.

Литература

1. Standish Group 2015 Chaos Report. [Электронный ресурс]. URL: https://www.standishgroup.com/sample_research_files/CHAOSReport2015-Final.pdf
2. Kosko B. Fuzzy Cognitive Maps // Internal Journal of Man – Machine Studies. 1986. Vol. 1. P. 65–75.
3. Федулов А.С. Нечеткие реляционные когнитивные карты // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2005. № 1. С. 120–132.
4. Hajec P., Prochazka O. Interval-Valued Fuzzy Cognitive Maps for Supporting Business Decisions // Proc. of the IEEE Intern. Conf. on Fuzzy Systems, Vancouver, BC, Canada, July 2016. P. 531–536.
5. Salmeron J.L. Modelling Grey Uncertainty with Fuzzy Grey Cognitive Maps // Expert Systems with Applications. Dec. 2010. Vol. 37, Issue 12. P. 7581–7588.
6. Espinosa M.L., Depaire B., Vanhoof K. Fuzzy Cognitive Maps with Rough Concepts // Proc. of the 9th Intern. Conf. on Artificial Intelligence Applications and Innovations (IAI'2013), Paphos, Greece, Sept. 30 – Oct. 2, 2013. P. 527–536.
7. Papageorgiou E.I., Iakovidis D.K. Intuitionistic Fuzzy Cognitive Maps // IEEE Trans. on Fuzzy Systems. 2013. Vol. 21, № 2. P. 342–354.
8. Carvalho J.P., Tome J.A.B. Rule Based Fuzzy Cognitive Maps: Fuzzy Causal Relations // In: Computational Intelligence for Modeling, Control and Automation: Evolutionary Computation & Fuzzy Logic for Intelligent Control, Knowledge Acquisition & Information Retrieval / Ed.: Mohammadian, IOS Press, 1999.
9. Miao Y., Liu Z.-Q., Siew Ch.Y. Dynamical Cognitive Network – an Extension of Fuzzy Cognitive Map // IEEE Trans. on Fuzzy Systems. Oct. 2001. Vol. 9, Issue 5. P. 760–770.
10. Al-Shebab A.J., Hughes R.T., Winstanley G. Modelling Risks in IS/IT Projects through Causal and Cognitive Mapping // Electronic Journal of Information Systems Evaluation. 2005. Vol. 8. Issue 1. P. 1–10. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ejse.com/download...<pdfs.semanticscholar.org/>
11. Rodriguez-Repiso L., Setchi R., Salmeron J.L. Modelling IT Projects Success with Fuzzy Cognitive Maps // Expert Systems with Applications. 2007. Vol. 32. No. 2. P. 543–559.
12. Salmeron J.L. Fuzzy Cognitive Maps – Based IT Projects Risk Scenarios // Chapter in: Studies in Fuzziness and Soft Computing 247: 201–215, from book: Fuzzy Cognitive Maps: Advances in theory, methodology, tools and applications: July 2010.
13. Горелова Г.В., Колоденкова А.Е., Коробкин В.В. Построение комплексной оценки разработки информационно-управляющих систем на основе когнитивных моделей // Материалы XIII Междунар.

конф. «Проблемы управления и моделирования в сложных системах», Самара, 15-17 июня 2011 г. С. 326–331.

14. Градусов Д.А., Шутов А.В., Анцупова Д.П. Моделирование взаимовлияния целей и рисков проектов внедрения интегрированной системы управления предприятием на основе нечетких когнитивных карт // *Экономико-математическое моделирование*. 2013. № 37(340). С. 51–60.

15. Sharif A.M., Irani Z. Exploring Fuzzy Cognitive Mapping for IS Evaluation: A Research Note. [Электронный ресурс]. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/> – (дата обращения: 10.10.2019)

16. Case D.M., Stylios Ch. Fuzzy Cognitive Map to Model Project Management Problems // *Proc. of 2016 Annual Conf. of the North American Fuzzy Information Processing Society (NAFIPS)*, IEEE. 2016. P. 1–6.

17. Леденева Т.М., Моисеев С.А. Формализация свойств интерпретируемых лингвистических шкал и термов нечетких моделей // *Прикладная информатика*. 2012. № 4(40). С. 126–132.

18. Vallido A., Martin-Guerrero J.D., Lisboa P.J.G. Making Machine Learning Models Interpretable // *Proc. of European Symposium on Artificial Neural Networks, Computational Intelligence and Machine Learning*, 25-27 April 2012, Bruges, Belgium. P. 163–172.

19. Doshi-Velez F., Kim B. Towards a Rigorous Science of Interpretable Machine Learning. [Электронный ресурс]. URL: [https://www.arXiv:17.02.08608v2\[stat.ML\]2Mar.2017](https://www.arXiv:17.02.08608v2[stat.ML]2Mar.2017) – (дата обращения: 10.10.2019)

20. Ozesmi U., Ozesmi S.L. Ecological Models Based on People's Knowledge: a Multi-Step Fuzzy Cognitive Mapping Approach // *Ecological Modelling*. 2004. № 176. P. 43–64.

21. Кулинич А.А. Компьютерные системы анализа ситуаций и поддержки принятия решений на основе когнитивных карт: подходы и методы // *Проблемы управления*. 2011. № 4. С. 31–45.

22. Zhang J.Y., Liu Z.Q., Zhou S. Quotient FCMs – A Decomposition Theory for Fuzzy Cognitive Maps // *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*. Oct. 2003. Vol. 11, No. 5. P. 593–604.

23. Топологическая декомпозиция структур АСУ. Алгоритм декомпозиции структуры. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.studfiles.net/preview/1700576/page:9>. – (дата обращения: 10.10.2019)

24. Miao Y., Liu Z.-Q., Tao X.H., Shen Z., Li Ch.W. Simplification, Merging and Division of Fuzzy Cognitive Maps // *Intern. Journal of Computational Intelligence and Applications*. 2002. Vol. 2, № 2. P. 185–208.

25. Подвесовский А.Г., Исаев Р.А. Идентификация структуры и параметров нечетких когнитивных моделей: экспертные и статистические методы // *Intern. Journal of Open Information Technologies*. 2019. Vol. 7, № 6. С. 35–61.

26. Lavin E.A., Giabbanelli P.J. Analyzing and Simplifying Model Uncertainty in Fuzzy Cognitive Maps // *Proc. of 2017 Winter Simulation Conference*. 2017. P. 1868–1879.

27. Kandasami W.B.V., Vasuki R., Thuliskanam K. New Merged Fuzzy Cognitive Maps // *Ultra Scientist*. 2014. Vol. 26(3)B. P. 187–192.

28. Poczeka K., Yastrebov A., Papageorgiou E.I. Learning Fuzzy Cognitive Maps Using Structure Optimization Genetic Algorithm // *Proc. of the Federated Conf. on Computer Science and Information Systems, ACSIS*. 2015. Vol. 5. P. 547–554.

29. Yoon B.S., Jetter A.J. Comparative Analysis for Fuzzy Cognitive Mapping // *Proc. of 2016 Portland Intern. Conf. on Management of Engineering and Technology (PICMET)*. 2016. P. 1897–1908.

References

1. Standish Group 2015 Chaos Report. Available at: https://www.standishgroup.com/sample_research_files/CHAOSReport2015-Final.pdf (accessed October 10, 2019).

2. Kosko B. Fuzzy Cognitive Maps. *Internal Journal of Man // Machine Studies*. 1986. Vol. 1. pp. 65–75.

3. Fedulov A.S. Nечеткие реляционные когнитивные карты // *Izv. RAN. Teoriya i sistemy upravleniya*. 2005. No. 1. pp. 120–132.

4. Hajek P., Prochazka O. Interval-Valued Fuzzy Cognitive Maps for Supporting Business Decisions // *Proc. of the IEEE Intern. Conf. on Fuzzy Systems*. Vancouver, BC, Canada. 2016. pp. 531–536.

5. Salmeron J.L. Modelling Grey Uncertainty with Fuzzy Grey Cognitive Maps // *Expert Systems with Applications*. 2010. Vol. 37. No. 12. pp. 7581–7588.

6. Espinosa M.L., Depaire B., Vanhoof K. Fuzzy Cognitive Maps with Rough Concepts // *Proc. of the 9th Intern. Conf. on Artificial Intelligence Applications and Innovations (AIAI'2013)*. Paphos, Greece, Sept. 30 – Oct. 2, 2013. pp. 527–536.

7. Papageorgiou E.I., Iakovidis D.K. Intuitionistic Fuzzy Cognitive Maps. *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*. 2013. Vol. 21. No. 2. pp. 342–354.

8. Carvalho J.P., Tome J.A.B. Rule Based Fuzzy Cognitive Maps: Fuzzy Causal Relations. In: *Computational Intelligence for Modeling, Control and Automation: Evolutionary Computation & Fuzzy*

9. Miao Y., Liu Z.-Q., Siew Ch.Y. Dynamical Cognitive Network – an Extension of Fuzzy Cognitive Map // IEEE Trans. on Fuzzy Systems. 2001. Vol. 9. No. 5. pp. 760–770.
10. Al-Shebab A.J., Hughes R.T., Winstanley G. Modelling Risks in IS/IT Projects through Causal and Cognitive Mapping // Electronic Journal of Information Systems Evaluation. 2005. Vol. 8. No. 1. pp. 1-10. Available at: <https://www.ejse.com/download...pdfs.semanticscholar.org/>. (accessed October 10, 2019).
11. Rodriguez-Repiso L., Setchi R., Salmeron J.L. Modelling IT Projects Success with Fuzzy Cognitive Maps // Expert Systems with Applications. 2007. Vol. 32. No. 2. pp. 543–559.
12. Salmeron J.L. Fuzzy Cognitive Maps – Based IT Projects Risk Scenarios // Chapter in: Studies in Fuzziness and Soft Computing 247: 201-215, from book: Fuzzy Cognitive Maps: Advances in theory, methodology, tools and applications. 2010.
13. Gorelova G.V., Kolodenkova A.E., Korobkin V.V. Postroenie kompleksnoj ocenki razrabotki informacionno-upravlyayushchih sistem na osnove kognitivnyh modelej // Materialy XIII Mezhdunar. konf. "Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnyh sistemah" [XIII Intern. scientific conf. "Complex Systems: Control and Modeling Problems"]. Samara. 2011. pp. 326–331.
14. Gradusov D.A., Shutov A.V., Ancupova D.P. Modelirovanie vzaimovliyaniya celej i riskov proektov vnedreniya integrirovannoj sistemy upravleniya predpriyatiem na osnove nechetkih kognitivnyh kart // Ekonomiko-matematicheskoe modelirovanie. 2013. Vol. 37. No. 340. pp. 51–60.
15. Sharif A.M., Irani Z. Exploring Fuzzy Cognitive Mapping for IS Evaluation: A Research Note. Available at: <https://pdfs.semanticscholar.org/> (accessed October 10, 2019).
16. Case D.M., Stylios Ch. Fuzzy Cognitive Map to Model Project Management Problems // Proc. of 2016 Annual Conf. of the North American Fuzzy Information Processing Society (NAFIPS). IEEE. 2016. pp. 1–6.
17. Ledeneva T.M., Moiseev S.A. Formalizatsiya svojstv interpretiruemykh lingvisticheskikh shkal i termov nechetkih modelej // Prikladnaya informatika 2012. Vol. 4(40). pp. 126–132.
18. Vallido A., Martin-Guerrero J.D., Lisboa P.J.G. Making machine learning models interpretable // Proc. of European Symposium on Artificial Neural Networks, Computational Intelligence and Machine Learning. 25-27 April 2012, Bruges, Belgium. pp. 163–172.
19. Doshi-Velez F., Kim B. Towards a Rigorous Science of Interpretable Machine Learning. Available at: [https://www.arXiv:17.02.08608v2\[stat.ML\]2Mar.2017](https://www.arXiv:17.02.08608v2[stat.ML]2Mar.2017) (accessed October 10, 2019).
20. Ozesmi U., Ozesmi S.L. Ecological Models Based on People's Knowledge: a Multi-Step Fuzzy Cognitive Mapping Approach // Ecological Modelling. 2004. Vol. 176. pp. 43–64.
21. Kulnich A.A. Kompyuternye sistemy analiza situacij i podderzhki prinyatiya reshenij na osnove kognitivnyh kart: podhody i metody // Problemy upravleniya. 2011. Vol. 4. pp. 31–45.
22. Zhang J.Y., Liu Z.Q., Zhou S. Quotient FCMs – A Decomposition Theory for Fuzzy Cognitive Maps. IEEE Trans. on Fuzzy Systems. 2003. Vol. 11. No. 5. pp. 593–604.
23. Topologicheskaya dekompozitsiya struktur ASU. Algoritm dekompozitsii struktury. Available at: <https://www.studfiles.net/preview/1700576/page:9> (accessed October 10, 2019).
24. Miao Y., Liu Z.-Q., Tao X.H., Shen Z., Li Ch.W. Simplification, Merging and Division of Fuzzy Cognitive Maps // Intern. Journal of Computational Intelligence and Applications. 2002. Vol. 2. No. 2. pp. 185–208.
25. Podvesovskij A.G., Isaev R.A. Identifikatsiya struktury i parametrov nechetkih kognitivnyh modelej: ekspertnye i statisticheskie metody // International Journal of Open Information Technologies. 2019. Vol. 7. No. 6. pp. 35–61.
26. Lavin E.A., Giabbanelli P.J. Analyzing and Simplifying Model Uncertainty in Fuzzy Cognitive Maps // Proc. of 2017 Winter Simulation Conference. 2017. pp. 1868–1879.
27. Kandasami W.B.V., Vasuki R., Thuliskanam K. New Merged Fuzzy Cognitive Maps // Ultra Scientist. 2014. Vol. 6. No. 3B. pp. 187–192.
28. Poczeka K., Yastrebov A., Papageorgiou E.I. Learning Fuzzy Cognitive Maps using Structure Optimization Genetic Algorithm // Proc. of the Federated Conf. on Computer Science and Information Systems, ACSIS. 2015. Vol. 5. pp. 547–554.
29. Yoon B.S., Jetter A.J. Comparative analysis for Fuzzy Cognitive Mapping // Proc. of 2016 Portland Intern. Conf. on Management of Engineering and Technology (PICMET). 2016. pp. 1897–1908.

ВУЛЬФИН Алексей Михайлович, кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительной техники и защиты информации ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Россия, 450008, г. Уфа, ул. К.Маркса, 12. E-mail: vulfin.alexey@gmail.com

КИРИЛЛОВА Анастасия Дмитриевна, аспирант кафедры вычислительной техники и защиты информации ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Россия, 450008, г. Уфа, ул. К.Маркса, 12. E-mail: kirillova.andm@gmail.com

ЧЕРНЯХОВСКАЯ Лилия Рашитовна, доктор технических наук, профессор кафедры технической кибернетики ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Россия, 450008, г. Уфа, ул. К.Маркса, 12. E-mail: lrchern@yandex.ru

VASILYEV Vladimir Ivanovich, Doctor of the Technical Sciences, Professor of the Department of "Computer Engineering and Information Security" FGBOU VO "Ufa State Aviation Technical University". 12, K. Marx Str., Ufa, Russia, 450008. E-mail: vasilyev@ugatu.ac.ru

VULFIN Alexey Mikhailovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of «Computer Engineering and Information Protection» FGBOU VO «Ufa State Aviation Technical University». 12, K. Marx Str., Ufa, Russia, 450008. E-mail: vulfin.alexey@gmail.com

KIRILLOVA Anastasiya Dmitrievna, Postgraduate Student, Department of Computer Engineering and Information Protection, Federal State Budgetary Educational Establishment of Higher Education "Ufa State Aviation Technical University". 12, K.Marx Str., Ufa, Russia, 450008. E-mail: kirillova.andm@gmail.com

CHERNYAKHOVSKAYA Liliya Rashitovna, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Technical Cybernetics, FGBOU VO "Ufa State Aviation Technical University". 12, K. Marx Str., Ufa, Russia, 450008. E-mail: lrchern@yandex.ru