

Применение нечетких когнитивных моделей как инструмента моделирования организационных систем

А.В. Боженьюк, Л.А. Гинис

Южный федеральный университет, Таганрог

Аннотация: В данной работе рассматривается подход, позволяющий получить научно обоснованные управленческие решения по развитию организационных систем. Цель работы – показать на конкретном примере процесс разработки нечеткой когнитивной модели, провести анализ модели на устойчивость, определить комплексы активизирующих вершин. В основу инструментария описания и анализа нечеткой когнитивной модели, положены базовые понятия теории нечетких графов. Приведены результаты имитационного моделирования, посвященного разработке возможных сценариев развития ситуаций социально-экономической системы Ростовской области. Результаты наглядно проиллюстрированы примерами четырнадцати сценариев, сопоставление которых по основным факторам, позволило определить множество пессимистических и оптимистических, и дать рекомендации лицу, принимающему решение.

Ключевые слова: управление, организационная система, когнитивная модель, имитационное моделирование, нечеткий граф, устойчивость.

Введение

Вопросы моделирования принятия решений в организационных системах были и остаются актуальными современными исследованиями. Принятие решений в условиях неопределенности с учетом большого количества критериев рассматриваются в [1], интересен подход в вопросе принятия управленческого решения, основанный на применении геоинформационного моделирования и пространственных данных [2, 3]. Для управления в организационных системах моделирование становится важным этапом, такие системы, как правило, содержат большое число переменных, взаимодействующих между собой, а также реагируют на изменения как извне, так и соседствующих переменных. Считаем, что именно когнитивное моделирование наиболее применимо в этих условиях. Разработка сценариев развития и моделирование организационных систем с помощью когнитивного моделирования относится к классу имитационного

моделирования. Оно позволяет имитировать поведение объекта, а также исследовать внутренние структурные организации [4].

Согласно [5] и Ф.С. Робертс будем понимать «организационную систему как объединение людей, совместно реализующих некоторую программу или цель и действующих на основе определенных процедур и правил». Тогда традиционную социально-экономическую систему (далее - СЭС) можно считать классическим примером современной организационной системы и поэтому для эффективного управления в ней, необходимо не только управлять процессом на его базе, но и разрабатывать новые научно-обоснованные и прикладные решения.

Постановка задачи и решение

Целью работы является разработка когнитивной модели взаимовлияния отраслей сельского хозяйства, населения и окружающей среды на конечную сельскохозяйственную продукцию в Ростовской области. Также в задачи исследования входит проведение анализа разработанной модели на устойчивость, разработка плана вычислительного эксперимента, определение пространства возможных прогнозных сценариев развития с целью выявления наиболее экономически эффективных и перспективных отраслей инвестирования с помощью импульсного моделирования.

Эффективность управления зависит и от различного рода взаимосвязей [6] и от организационной устойчивости [7].

Были проанализированы экономические показатели различных секторов сельского хозяйства за 20-ти летний период, и выявлены наиболее распространенные и развивающиеся составляющие (далее будем называть концептами/ вершинами) СЭС по Ростовской области, которые положены в основу когнитивной модели. Тогда социально-экономическая система, включающая основные факторы, влияющие на продукцию сельского хозяйства в Ростовской области, описывается следующими концептами: V1

животноводство, V2 сельскохозяйственная продукция, V3 лесное хозяйство, V4 население, V5 окружающая среда, V6 рыболовство и рыбоводство, V7 растениеводство. Отообразим структуру исследуемой СЭС в виде схемы причинно-следственных связей, т.е. в виде четкой когнитивной модели (ЧКМ) рис.1.

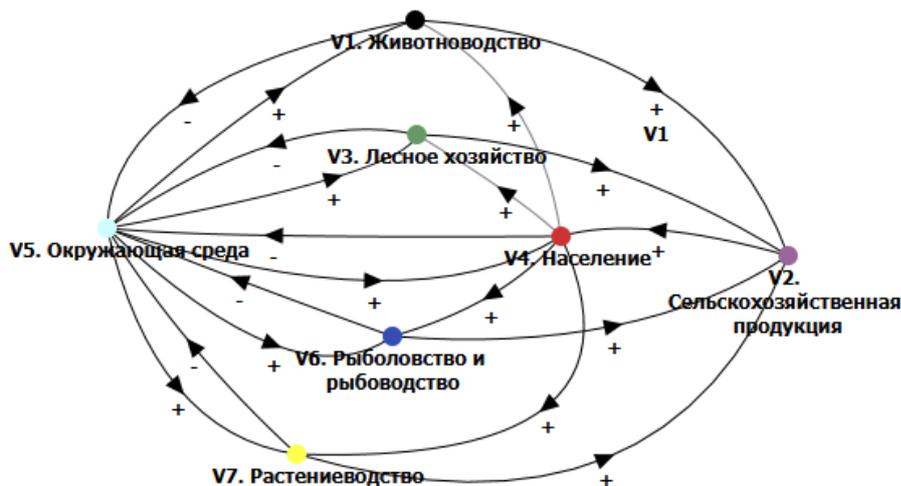


Рис. 1. – Четкая когнитивная модель СЭС Ростовской области

Моделирование по ЧКМ, при наличии преимуществ, имеет некоторые недостатки, главное из которых – большое допущение при определении влияния одной вершины на другую. Такое влияние мы можем установить «тройкой»: «положительное» – «+1», «отрицательное» – «-1», «отсутствие» – «0», однако в реальности, нельзя его так однозначно определить. Второй проблемой является отсутствие возможности учитывать наличие вариативности взаимодействия, взаимозаменяемости и неопределенностей, поэтому и предлагается для моделирования использовать инструментарий нечетких когнитивных моделей (НКМ).

В основу разработанного инструментария положены базовые понятия теории нечетких графов, раскрытые в [8], прикладной аспект был описан в [9], остановимся кратко на нем. НКМ определяется как нечеткий ориентированный граф первого или второго рода следующим образом. НКМ – это пара множеств $\tilde{G} = (X, \tilde{U})$, у которой $X = \{x_i\}$, $i \in I = \{1, 2, \dots, n\}$ – четкое

множество концептов, а $\tilde{U} = \{ \langle \mu_u \langle x_i, x_k \rangle / \langle x_i, x_k \rangle \rangle \}$ – это нечеткое множество ребер (или дуг), где $\langle x_i, x_k \rangle \in X^2$, а $\mu_u \langle x_i, x_k \rangle$ – это степень принадлежности ориентированного ребра $\langle x_i, x_k \rangle$ нечеткому множеству ориентированных ребер \tilde{U} . Для НКМ определяется нечеткий ориентированный путь из вершины x_i в вершину x_m как $\tilde{L}(x_i, x_m)$, и это направленная последовательность нечетких дуг, ведущая из вершины x_i в вершину x_m , в которой конечная вершина всякой дуги, отличной от последней, является начальной вершиной следующей дуги:

$$\tilde{L}(x_i, x_m) = \langle \mu_U \langle x_i, x_j \rangle / \langle x_i, x_j \rangle \rangle, \langle \mu_U \langle x_j, x_k \rangle / \langle x_j, x_k \rangle \rangle, \dots \\ \dots, \langle \mu_U \langle x_l, x_m \rangle / \langle x_l, x_m \rangle \rangle .$$

Далее, необходимо проанализировать структуру НКМ и нас будет интересовать уровень прочности взаимосвязи между концептами и степень достижимости. Для этого по матрице смежности оргафа R строится нечеткая матрица степеней достижимости N , содержащая степени достижимости для всех пар концептов НКМ $N = \left\| \gamma_{ij} \right\|_n$, где $\gamma_{ij} = \gamma(x_i, x_j)$, $x_i, x_j \in X$.

Как известно моделирование на КМ проводится шагами, которые называют импульсами или элементарными возмущениями. Суть этого процесса заключается в следующем: одной из вершин задается возмущение, которое влечет за собой изменение показателей на всех остальных вершинах по цепочке, причем усиливаясь или затухая. Значения в вершинах будут меняться через каждый шаг имитации t . Подробно этот подход с иллюстративным примером изложен в [10]. Развитие импульсного процесса описывается выражением:

$$V(t) = V(исх.) + (I + R + R^2 + R^3 + R^4 \dots + R^t)^T P(0), \text{ где } I - \text{единичная матрица;} \\ R - \text{матрица смежности оргафа.}$$

Для построения НКМ необходимо определить вес дуги, это возможно сделать экспертным путем. Однако, при построении моделей именно в СЭС, чаще всего имеется достаточный банк статистической информации. С этой целью для нашей модели был собран большой статистический материал по открытым данным Росстата (<https://rosstat.gov.ru/>), проведен корреляционный анализ, который позволил определить вес дуги как коэффициент корреляции, и наша модель теперь выглядит так, рис. 2



Рис. 2. – Нечеткая когнитивная модель СЭС Ростовской области
 Модель была проанализирована на устойчивость согласно [11], выявлено наличие 25 отрицательных циклов и 4 положительных. Система устойчива, т.к. в ней нечетное число отрицательных контуров.

Определена матрица смежности R и матрица достижимости N :

$$R = \begin{pmatrix} 1 & 0,2 & 0 & 0 & -0,9 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0,7 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,1 & 1 & 0 & -0,6 & 0 & 0 \\ 0,3 & 0 & 0,4 & 1 & -0,9 & 0,3 & 0,4 \\ 0,8 & 0 & 0,8 & 0,6 & 1 & 0,7 & 0,6 \\ 0 & 0,1 & 0 & 0 & -0,8 & 1 & 0 \\ 0 & 0,8 & 0 & 0 & -0,3 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad N = \begin{pmatrix} 1 & 0,2 & 0,2 & 0,2 & 0 & 0,2 & 0,2 \\ 0,3 & 1 & 0,4 & 0,7 & 0 & 0,3 & 0,4 \\ 0,1 & 0,1 & 1 & 0,1 & 0 & 0,1 & 0,1 \\ 0,3 & 0,4 & 0,4 & 1 & 0 & 0,3 & 0,4 \\ 0,8 & 0,6 & 0,8 & 0,6 & 1 & 0,7 & 0,6 \\ 0,1 & 0,1 & 0,1 & 0,1 & 0 & 1 & 0,1 \\ 0,3 & 0,8 & 0,4 & 0,7 & 0 & 0,3 & 1 \end{pmatrix}$$

Рассчитано нечеткое множество баз и степень сильной связности.

Базы: $v_1(V_1V_2V_3V_4V_5V_6V_7)$ $v_{0.6}(V_4V_5)$ $v_{0.2}(V_1V_5)$ $v_{0.8}(V_4V_5V_6V_7)$

$v_{0.4}(V_2V_5) v_{0.1}(V_3V_5) v_{0.4}(V_4V_5) v_{0.6}(V_5) v_{0.7}(V_4V_5V_7) v_{0.7}(V_5V_7)$.

Сильная связность: $0.1(V_1V_5) v_{0.2}(V_1V_3V_5V_6) v_{0.4}(V_1V_2V_3V_5V_6)$

$v_1(V_1V_2V_3V_4V_5V_6V_7) v_{0.4}(V_1V_3V_4V_5V_6) v_{0.4}(V_1V_3V_5V_6V_7) v_{0.1}(V_2V_5)$

$v_{0.2}(V_2V_3V_5V_6) v_{0.1}(V_3V_5) v_{0.2}(V_3V_4V_5V_6) v_{0.1}(V_4V_5) v_{0.1}(V_5V_6)$

$v_{0.2}(V_3V_5V_6V_7) v_{0.1}(V_5V_7)$.

Анализируемая НКМ имеет следующие нечеткие базы:

$B_1 = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6, v_7\}$; $B_{0,8} = \{v_4, v_5, v_6, v_7\}$; $B^I_{0,7} = \{v_4, v_5, v_7\}$, $B^{II}_{0,7} = \{v_5, v_7\}$;

$B^I_{0,6} = \{v_4, v_5\}$, $B^{II}_{0,6} = \{v_5\}$; $B^I_{0,4} = \{v_4, v_5\}$, $B^{II}_{0,4} = \{v_2, v_5\}$; $B_{0,2} = \{v_1, v_5\}$; $B_{0,1} = \{v_3, v_5\}$.

Тогда множество всех активизирующих вершин для импульсного моделирования: $\tilde{B}_X = \{<1/7>, <0,8/4>, <0,7/2>, <0,6/1>\}$.

Сформируем комплексы вершин для разработки пространства сценариев развития. Например, определив пару концептов $\{v_5, v_7\}$ или $\{v_3, v_5\}$, активизировав которую, вся структура будет развиваться со степенью 0,7 или 0,1 в зависимости от выбора. Имеет смысл обратить особое внимание на концепт $\{v_5\}$, встречающийся во всех комплексах. Также проведено исследование структурной устойчивости, которое показывает, что хоть и с минимальным уровнем, но в модели всегда найдется путь между любыми двумя концептами с прочностью не менее 0,1.

С учетом найденных множеств активизирующих вершин и экспертного оценивания реальной ситуации в Ростовской области был сформирован план вычислительного эксперимента, фрагмент которого представлен в таблице 1. Следует отметить, что сила импульса нормирована, приведена к условной 1.

Таблица № 1

Фрагмент плана вычислительного эксперимента

Сценарий	Импульс	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7
1	$q_{4,5,6,7}=+1$				0,5	0,2	0,1	0,2
2	$q_{5,7}=+1$					0,5		0,5
3	$q_{4,5}=+1$				0,7	0,3		
4	$q_{2,5}=+1$		0,5			0,5		
5	$q_{1,5}=+1$	0,5				0,5		
6	$q_{3,5}=+1$			0,2		0,8		
7	$q_7=+1$							1,0
8	$q_4=+1$				1,0			
9	$q_5=+1$					1,0		
10	$q_{4,5,6,7}=-1$				-0,5	-0,2	-0,1	-0,2
11	$q_{1,2}=+1$	0,8		0,2				
12	$q_{1,2,3}=+1$	0,7	0,2	0,1				
13	$q_1=-1$	-1,0						
14	$q_7=-1$							-1,0

Для проведения когнитивного моделирования использовалась программа CogniMod [12], рис. 1, 2 и последующие 3-5, а также данные в таблице 2 получены с помощью CogniMod.

На рисунках 3-5 приведены графики динамики показателей в результате импульсного моделирования по некоторым сценариям.

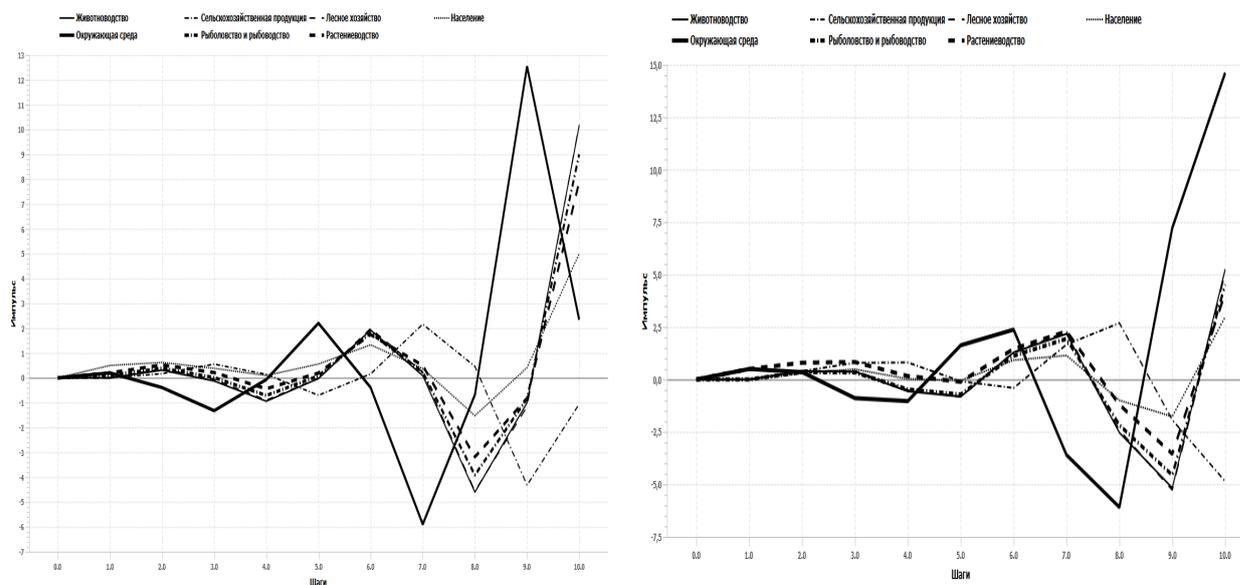


Рис. 3. – Сценарий 1 (слева) и Сценарий 2 (справа)

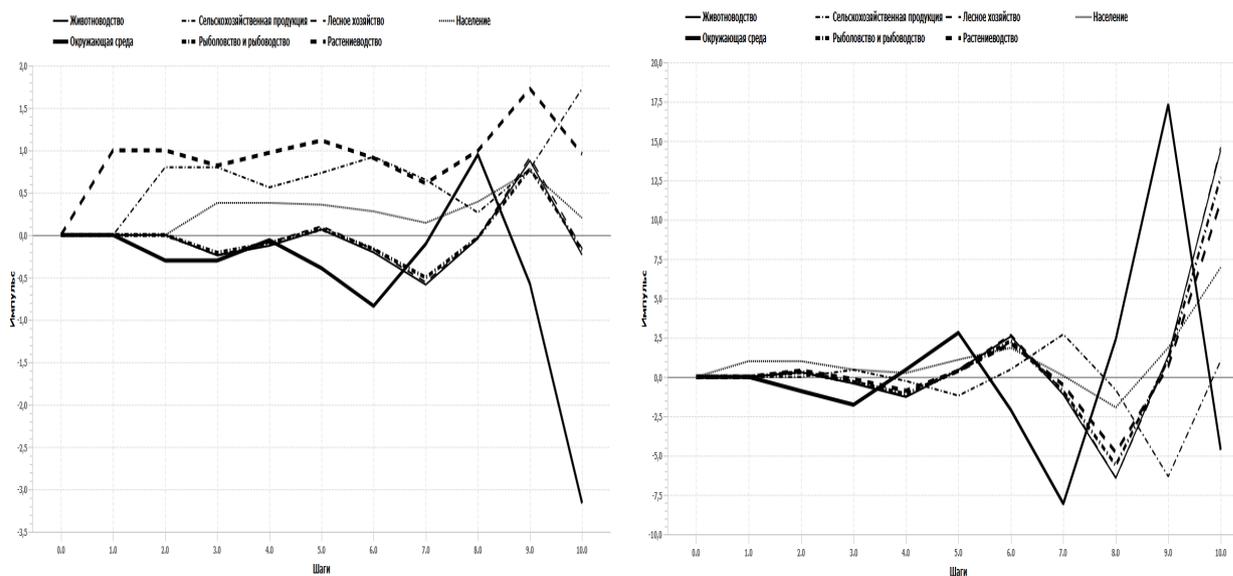
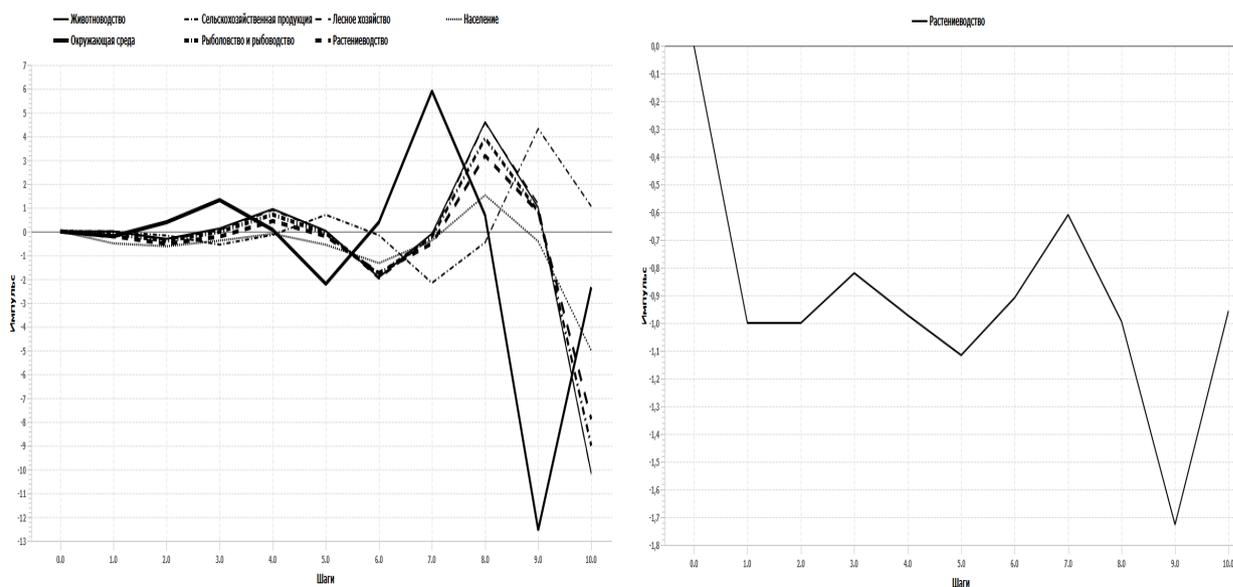


Рис. 4. – Сценарий 7 (слева) и Сценарий 8 (справа)



Сценарий 10

Сценарий 14

Рис. 5. – Сценарий 10 (слева) и Сценарий 14 (справа)

Сопоставим данные 14 сценариев развития процессов в системе на 5 шаге, таблица 2.

Таблица № 2

Результат на пятом шаге импульсного моделирования

Сценарий Концепты	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
V1	1,93	1,29	2,64	1,55	2,57	2,41	-0,21	2,57	2,78	-1,93	2,30	1,80	-2,35	0,21
V2	0,16	-0,41	-0,19	-0,78	-0,38	-1,26	0,92	0,48	-1,73	-0,16	1,00	0,78	-0,97	-0,92
V3	1,99	1,28	2,69	1,53	2,06	2,58	-0,17	2,68	2,74	-1,99	1,64	1,23	-1,38	0,17
V4	1,33	0,92	1,76	1,16	1,01	1,31	0,28	1,85	1,56	-1,33	0,46	0,50	-0,45	-0,28
V5	-0,39	2,38	0,21	3,78	1,18	4,04	-0,84	-2,10	5,59	0,39	-3,33	-2,08	3,22	0,84
V6	1,81	1,13	2,33	1,35	1,81	2,10	-0,17	2,29	2,42	-1,81	1,24	0,98	-1,19	0,17
V7	1,75	1,46	2,09	1,14	1,54	1,75	0,91	2,12	2,01	-1,75	1,19	0,88	-1,08	-0,91

Выводы

Анализируя графики и данные таблицы можно сформировать некоторые управленческие рекомендации для лица, принимающего решение. Сценарии 7, 10, 13 и 14 можно квалифицировать как пессимистические, ухудшается состояние большинства элементов структуры, что в совокупности может привести к дезорганизации, следует предусмотреть решения, которые бы исключили наступление этих сценариев. Для среднесрочной перспективы в три-пять лет достаточно оптимистическими (небольшое ухудшение проявляется только по одному элементу СЭС) являются сценарии 1-6 и 9, которые были разработаны по результатам применения инструментария описания и анализа НКМ, в основу которого положены базовые понятия теории нечетких графов.

Литература

1. Тютюнник В.М., Альгузо М.М.С. Моделирование процесса принятия решений в условиях неопределенности // Современные наукоемкие технологии. 2024. № 12. С. 107-112.
2. Ямашкин А.А., Ямашкин С.А., Шабайкина С.А., Зарубин О.А., Кирюшин А.В. Геоинформационное моделирование метагеосистем города

для принятия управленческих решений в сфере экологии // Успехи современного естествознания. 2023. № 8. С. 76-85.

3. Ямашкин С.А. Управление в организационных системах на основе пространственных данных: Геопортальный подход // Современные наукоемкие технологии. 2023. № 3. С. 57-61.

4. Розин М.Д., Свечкарев М.Д., Ходорич И.А., Юсов И.А. Когнитивный анализ и структурное управление самодетерминацией систем // Инженерный вестник Дона, 2019, № 7. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N7y2019/6199

5. Новиков Д.А. Теория управления организационными системами. М.: МПСИ, 2005. 584 с.

6. Pedroso E., Gomes C.F. Discerning interrelationships among management accounting systems, organizational variables, and managerial performance // SN Business & Economics. 2024. №4. DOI 10.1007/s43546-024-00702-w

7. Weber M.M., Pedell B. & Rötzel, P.G. Resilience-oriented management control systems: a systematic review of the relationships between organizational resilience and management control systems. // Journal of Management Control. 2024. №4. DOI 10.1007/s00187-024-00385-2

8. Берштейн Л.С., Боженюк А.В. Введение в теорию нечетких графов. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1999. 212 с.

9. Гинис Л.А. Развитие инструментария когнитивного моделирования для исследования сложных систем // Инженерный вестник Дона, 2013, № 3. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2013/1806.

10. Горелова Г.В., Рябцев В.Н. Когнитивный подход к исследованию геополитических процессов в мировых регионах и когнитивное моделирование их развития (на примере Черноморско-Каспийского региона) // Инженерный вестник Дона, 2012, № 4-2. URL ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1407



11. Робертс Ф.С. Дискретные математические модели с приложением к социальным, биологическим и экологическим задачам. М.: Наука, 1986. 496 с.
12. Горелова Г.В., Калиниченко А.И., Кузьминов А.Н. Программа для когнитивного моделирования и анализа социально-экономических систем регионального уровня. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018661506 от 07.09.2018.

References

1. Tyutyunnik V.M., Al'guzo M.M.S. Sovremennye naukoemkie tekhnologii. 2024. № 12. pp. 107-112.
 2. Yamashkin A.A., Yamashkin S.A., Shabaykina S.A., Zarubin O.A., Kiryushin A.V. Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya. 2023. № 8. pp. 76-85.
 3. Yamashkin S.A. Sovremennye naukoemkie tekhnologii. 2023. № 3. pp. 57-61.
 4. Rozin M.D., Svechkarev M.D., Khodorich I.A., Yusov I.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2019, № 7. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N7y2019/6199
 5. Novikov D.A. Teoriya upravleniya organizatsionnymi sistemami [Theory of organizational systems management]. M.: MPSI. 2005. 584 p.
 6. Pedroso E., SN Business & Economics. 2024. №4. DOI 10.1007/s43546-024-00702-w.
 7. Weber M.M., Pedell B. & Rötzel, P.G. Journal of Management Control. 2024. №4. DOI 10.1007/s00187-024-00385-2.
 8. Bershteyn L.S., Bozhenyuk A.V. Vvedenie v teoriyu nechetkikh grafov. Taganrog: Izd-vo TRTU, 1999. 212 p.
 9. Ginis L.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013, № 3. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2013/1806.
 10. Gorelova G.V., Ryabtsev V.N. Inzhenernyj vestnik Dona, 2012, № 4-2. URL ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1407
-



11. Roberts F.S. Diskretnye matematicheskie modeli s prilozheniem k sotsial'ny'm, biologicheskim i ekologicheskim zadacham [Discrete mathematical models with application to social, biological and environmental problems]. М.: Nauka, 1986. 496 p .

12. Gorelova G.V., Kalinichenko A.I., Kuz'minov A.N. Programma dlya kognitivnogo modelirovaniya i analiza sotsial'no-ekonomicheskikh sistem regional'nogo urovnya [Program for cognitive modeling and analysis of regional-level socioeconomic systems]. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM №2018661506 ot 07.09.2018.

Дата поступления: 3.01.2025

Дата публикации: 25.02.2025