



Math-Net.Ru

All Russian mathematical portal

A. A. Sorokin, N. S. Maltseva, D. V. Kutuzov, A. V. Osovsky, Information processing for the decision support system for fire monitoring of forest areas, *Izv. Saratov Univ. Math. Mech. Inform.*, 2023, Volume 23, Issue 1, 126–138

DOI: 10.18500/1816-9791-2023-23-1-126-138

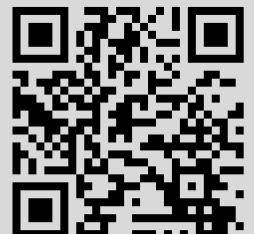
Use of the all-Russian mathematical portal Math-Net.Ru implies that you have read and agreed to these terms of use

<http://www.mathnet.ru/eng/agreement>

Download details:

IP: 18.97.9.168

February 17, 2025, 19:41:35





Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика. 2023. Т. 23, вып. 1. С. 126–138
Izvestiya of Saratov University. Mathematics. Mechanics. Informatics, 2023, vol. 23, iss. 1, pp. 126–138
mmi.sgu.ru <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2023-23-1-126-138>, EDN: PCOXKQ

Научная статья

УДК 005

Обработка информации для системы поддержки принятия решений при противопожарном мониторинге лесных массивов

А. А. Сорокин[✉], Н. С. Мальцева, Д. В. Кутузов, А. В. Осовский

Астраханский государственный технический университет, Россия, 414056, г. Астрахань, ул. Татищева, д. 16

Сорокин Александр Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры связи, alsorokin.astu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5085-8417>, AuthorID: 499675

Мальцева Наталия Сергеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры связи, maltsevans@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9731-4281>, AuthorID: 525018

Кутузов Денис Валерьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры связи, d_kutuzovs@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7963-1259>, AuthorID: 159988

Осовский Алексей Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры связи, a_osovskiy@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3174-9765>, AuthorID: 159989

Аннотация. Целью настоящего исследования стало формирование положений для получения интегральной оценки, характеризующей рейтинг участков лесного массива по уровню пожароопасности. Получение подобной оценки производится на основании агрегирования множества параметров, характеризующих климатические условия, и факторов, учитывающих антропогенное влияние на заданном участке лесного массива. Учитывая разнородность подобных параметров, для их агрегирования использованы методы нечеткого логического вывода и теории нечетких множеств. Сам комплекс для определения оценки лесного массива реализован в виде иерархической системы нечеткого вывода. Исследование процесса функционирования сформированного комплекса показало, что его выходная закономерность имеет преимущественно ступенчатый характер. Подобный результат позволяет проводить классификацию анализируемых участков лесного массива на группы состояния. Дальнейшее исследование сформированных классов состояний методами кластерного анализа позволяет выявлять участки с близкими характеристиками. Использование результатов классификации позволяет провести ранжирование участков лесного массива по очередности оказания управляющих воздействий в виде профилактических или подготовительных мероприятий по снижению пожароопасности или увеличению оперативности реагирования на возгорание. Полученные результаты ориентированы на их использование в системах поддержки принятия решений по управлению лесными массивами и другими видами прилегающих к ним территорий и социально-экономических образований.

Ключевые слова: системный анализ, нечеткие множества, пожароопасность, лесное хозяйство

Для цитирования: Сорокин А. А., Мальцева Н. С., Кутузов Д. В., Осовский А. В. Обработка информации для системы поддержки принятия решений при противопожарном мониторинге лесных массивов // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика.



Механика. Информатика. 2023. Т. 23, вып. 1. С. 126–138. <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2023-23-1-126-138>, EDN: PCOXKQ

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

Information processing for the decision support system for fire monitoring of forest areas

A. A. Sorokin[✉], N. S. Maltseva, D. V. Kutuzov, A. V. Osovsky

Astrakhan State Technical University, 16 Tatishcheva St., Astrakhan 414056, Russia

Alexander A. Sorokin, alsorokin.astu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5085-8417>, AuthorID: 499675

Nataliya S. Maltseva, maltsevans@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9731-4281>, AuthorID: 525018

Denis V. Kutuzov, d_kutuzovs@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7963-1259>, AuthorID: 159988

Alexey V. Osovsky, a_osovskiy@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3174-9765>, AuthorID: 159989

Abstract. The purpose of our study was to formulate provisions for obtaining an integral assessment characterizing the rating of forest areas in terms of fire hazard. We obtained this estimate based on the aggregation of many parameters characterizing climatic conditions and factors that take into account anthropogenic influence in a given area of the forest. Considering the heterogeneity of such parameters, we used the methods of fuzzy inference and the theory of fuzzy sets to aggregate them. The complex for determining the assessment of the forest area is implemented in the form of a hierarchical fuzzy inference system. We investigated the process of functioning of the formed complex and found that its output pattern is predominantly stepwise. This result makes it possible to classify the analyzed forest areas into states groups. Further studies of the classes of states formed by us by the methods of cluster analysis make it possible to identify areas with similar characteristics. The use of the classification results makes it possible to rank forest areas according to the order of preventive or preparatory measures to reduce fire hazard or increase responsiveness in case of a fire. The results obtained by us are aimed at using in decision support systems for the management of forests and other types of adjacent territories.

Keywords: systems analysis, fuzzy sets, fire hazard, forestry

For citation: Sorokin A. A., Maltseva N. S., Kutuzov D. V., Osovsky A. V. Information processing for the decision support system for fire monitoring of forest areas. *Izvestiya of Saratov University. Mathematics. Mechanics. Informatics*, 2023, vol. 23, iss. 1, pp. 126–138 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2023-23-1-126-138>, EDN: PCOXKQ

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

Введение

Как описывается в постановлении Правительства РФ от 18.10.2021 № 1769 «О внесении изменений в государственную программу Российской Федерации “Развитие лесного хозяйства”», к числу проблем, сдерживающих развитие лесного комплекса России, относится «недостаточная эффективность систем охраны и защиты лесов,



разобщенность лесопожарных сил»¹. Лесные пожары ежегодно наносят ущерб экосистемам и экономикам различных регионов. Процесс горения лесных массивов сопровождается выделением в окружающую среду большого количества разных вредных веществ, включая углекислый газ. Подобное негативно влияет на глобальные процессы, включая парниковый эффект, сокращение и исчезновение редких представителей флоры и фауны [1,2]. Предупреждение о пожаре осуществляется при помощи систем сбора и обработки информации. Достаточно широкое распространение получили системы видеомониторинга [3]. Ограничение подобных систем связано с тем, что регистрация возгорания осуществляется после его возникновения. Таким образом, формируется задержка на оказание мер, направленных на устранение возгорания.

Кроме использования описанных систем мониторинга проводятся мероприятия по профилактике возгораний и повышению готовности и эффективности противопожарных сил. Планирование подобных мероприятий основано на оценивании пожароопасности контролируемой территории. Оценка пожароопасности проводится с использованием методов, позволяющих агрегировать значения параметров, влияющих на возникновение и распространение возгорания. Примеры оценок: комплексный показатель пожарной опасности (КППО) В. Г. Нестерова; индекс лесной пожароопасности FFDI (Forest Fire Danger Index); индекс природной пожароопасности FWI (Fire Weather Index) и другие методы определения аналогичных оценок [4]. Особенность методов вычисления этих оценок — трудности агрегирования параметров измеряемых величин на различных метрических шкалах и учет их неравномерного влияния на итоговый результат. Устранение ограничений у используемых методов для определения индексов лесной пожароопасности (ИЛП) обуславливает необходимость усовершенствования положений по обработке информации о состоянии лесных массивов.

1. Обзор литературных источников и постановка задачи исследования

Анализ [4–7] показал, что развитие методов по определению ИЛП сопровождается увеличением количества учитываемых параметров. Учитываемые параметры можно разделить на группы: (г1) климатического характера (температура, влажность воздуха, скорость ветра и т. д.); (г2) состояния горючих материалов (вид растительности, лесной подстилки, глубина залегания торфа и т. д.); (г3) антропогенного воздействия на окружающую среду (близость промышленных объектов, населенных пунктов, других мест пребывания людей). Агрегирование параметров проводится с использованием операторов обработки информации (ООИ). В качестве ООИ используются различные математические операции.

Анализ параметров (г1)–(г3) показал, что они могут оцениваться на разных метрических шкалах, иметь различный уровень влияния на итоговый результат, а сам уровень влияния может зависеть от местности. Повышение количества учитываемых факторов при определении ИЛП позволяет более полно описывать объект наблюдения и лучшим образом формировать управляющие воздействия (УВ). Реализация УВ позволяет проводить мероприятия по устранению причин возгорания или формировать резервы для ликвидации последствий возгорания. Увеличение количества учитываемых

¹О внесении изменений в государственную программу Российской Федерации «Развитие лесного хозяйства»: постановление Правительства РФ от 18.10.2021 № 1769. URL: <http://government.ru/docs/all/133785> (дата обращения: 20.03.2022).



мых параметров привело к возрастанию количества и усложнению математических операций, формирующих ОИИ для определения ИЛП.

Анализ методов определения ИЛП [4–7] позволил выявить противоречие между необходимостью увеличения количества агрегируемых параметров и усложнением ОИИ, используемых для агрегирования этих параметров. Для устранения противоречия целесообразна разработка положений по определению ИЛП участков лесных массивов с учетом различных факторов природного и антропогенного характера.

Целью работы является предложение положений по агрегированию различных разнородных параметров для определения индекса лесной пожароопасности.

2. Положения для определения индекса пожароопасности

2.1. Анализ методов обработки информации на основе положений теории нечетких множеств и нечеткого логического вывода

Анализ [8–11] показывает, что для агрегирования параметров, измеряемых на различных метрических шкалах и имеющих разнообразные уровни влияния на итоговый результат, получили распространение методы, основанные на использовании нейронных сетей [8], и методы, основанные на положениях теории нечетких множеств (ТНМ) [9, 10, 12]. Особенностью методов, основанных на применении нейронных сетей, является необходимость формирования репрезентативной обучающей выборки. Задача формирования подобной выборки является достаточно сложной, поскольку в ней в «нужном» количестве должны находиться все обучающие примеры, с которыми на практике может столкнуться аналитическая система. Отдельного внимания заслуживают вопросы формирования структуры нейронных сетей. Кроме этого, нейронная сеть фактически является «черным ящиком», что затрудняет для исследователя понимание процесса формирования полученной оценки. Альтернативой подобным системам выступают системы обработки информации, основанные на положениях ТНМ. ТНМ стала одной из основ формализации экспертных систем (ЭС). ЭС получили распространение в различных предметных областях и позволяют агрегировать информацию в условиях неопределенности значения параметров, например, когда информация о части анализируемых параметров представлена в вербальной форме или когда присутствует неопределенность в формировании ОИИ по причине невозможности получения обучающей выборки.

Сущность использования положений ТНМ заключается в разделении диапазона значений входных и выходных переменных $x \in [x_{\min}, x_{\max}]$ на множество перекрывающихся интервалов $\{i_j\}$, где j — номер интервала. Количество интервалов i определяется экспертной группой. Возможность интервалов перекрывать друг друга и обуславливает «нечеткость», поскольку часто переход значения контролируемого параметра из «одной» качественной области значений в «другую» имеет плавный характер, а не ступенчатый (как это предусматривается в «четкой» логике). Каждому интервалу $i \subset \{i_j\}$ соответствует определенное семантическое значение t , называемое термом. Каждый терм вербально описывает состояние переменной на заданном интервале. Общее количество термов соответствует количеству интервалов i , на которые был разделен диапазон значений переменной x . Общее количество термов t , описывающих состояние переменной x , называется термножеством $\{t_j\}$. Каждому терму $t \subset \{t_j\}$ ставится в соответствие функция принадлежности (ФП) $\mu_{t_j}(x)$. Область определения ФП соответствует диапазону значений переменной x на интервале i . Область значения ФП изменяется в диапазоне от 0 до 1.



При $\mu_{t_j}(x) = 1$ значение переменной x полностью соответствует семантическому значению заданного термина t , описывающего состояние переменной на этом интервале. При $\mu_{t_j}(x) = 0$ значение переменной полностью не соответствует семантическому значению заданного термина t .

Реализация оператора агрегирования нескольких значений входных переменных и последующие их преобразования в выходную переменную выполняются при помощи продукционных правил (ПП). ПП формируются экспертом соответствующей области знаний и показывают, какое семантическое значение получает выходная переменная при определенной комбинации семантических значений входных переменных. При условии, что система нечеткого вывода (СНВ) имеет несколько входных переменных и одно выходное, ПП можно представить в виде

$$p : if (x_1 = t_{x_1}) \wedge \dots \wedge (x_k = t_{x_k}) \Rightarrow (y_p = t_y), \zeta, \quad (1)$$

где p — номер правила; x_1, \dots, x_k — набор переменных; $t_{x_1} \dots t_{x_k}$ — термы, которые описывают состояние соответствующих переменных; y_p — выходная переменная; t_y — один из термов термножества, описывающего состояние переменной y ; ζ — коэффициент доверия (КД) к правилу. Кроме операции логического И (\wedge) для агрегирования переменных используются логические операции ИЛИ (\vee) и отрицание (\neg). Совокупность ПП, которые описывают все необходимые для воспроизведения объекта моделирования состояния входных переменных, образует базу знаний (БЗ). Если БЗ сформирована с использованием правил вида (1), ее можно представить в виде

$$\bigcup_{p=1}^{p_{\max}} \left[\bigcap_{k=1}^{k_{\max}} (x_k = t_{x_k}) \Rightarrow (y_p = t_y), \zeta \right] = y, \quad (2)$$

где y — значение выходной переменной. Если правила в БЗ имеют вид (1), то СНВ имеет структуру MISO (Multiple Input Single Output). Далее рассматриваются СНВ с этой структурой. Методы обработки информации в СНВ реализуются при помощи различных алгоритмов. С учетом [9, 10] широкое распространение получили алгоритмы Мамдани и Такаги – Сугено. Алгоритмы включают в себя следующие операции: 1) фаззификация — представление четкой информации в нечетком виде, выполняется при помощи ФП; 2) агрегирование переменных — выполняется при помощи правил вида (1); 3) активация правил — определяет значение выходной переменной, полученной при помощи правила с учетом КД; 4) аккумуляирование результатов правил — проводится объединение выходных значений; 5) дефаззификация — преобразование нечеткого выходного значения в численную оценку. В зависимости от вида алгоритма отдельные операции могут объединяться. В алгоритме Такаги – Сугено объединены операции 4) и 5). Далее рассматриваются СНВ, основанные на алгоритме Такаги – Сугено. Одной из трудностей использования СНВ является «проклятие размерности». Ограничение связано с увеличением количества правил в БЗ при увеличении количества агрегируемых переменных и количества термов, при помощи которых описывается состояние переменной. Устранение «проклятия размерности» возможно при помощи использования иерархических СНВ (ИСНВ). Сущность ИСНВ заключается: 1) в разделении множества входных переменных на подмножества; 2) в построении для каждого подмножества отдельной СНВ, в результате их функционирования формируется множество промежуточных переменных; 3) использовании для агрегирования промежуточных выходных переменных СНВ последующих уровней иерархии. Формирование СНВ последующих уровней иерархии продолжается до тех пор, пока не будет получено множество целевых выходных переменных [12].



2.2. Формирование положений для анализа состояния участков лесного массива

Особенностью анализируемого объекта исследования — лесного массива, для которого рассчитывается ИЛП, является наличие разнообразных параметров, от которых зависит возможность возгорания. Часть параметров имеет количественное значение групп (г1) и (г2), а часть параметров из группы (г3) — качественное значение. В зависимости от места нахождения участка лесного массива количество параметров и степень их важности может изменяться. Кроме этого, основная задача при определении рейтинга лесных массивов по уровню пожарной опасности — установление приоритетности проведения профилактических мероприятий по предотвращению возгорания или ликвидационных мер по устранению пожара.

В качестве исходных данных для разрабатываемой модели предлагается агрегировать параметры из групп (г1)–(г3). С учетом [4–7] для формирования ИЛП контролируемого участка предлагается использовать параметры, перечень которых, диапазон значений и семантические обозначения соответствующих термов приведены в табл. 1.

Таблица 1 / Table 1

Перечень параметров для формирования ИЛП
The list of parameters for the formation of FFDI (Forest Fire Danger Index)

Наименование параметра	Ед. изм.	Диапазон значений				
		Плохое	Скорее плохое	Среднее	Скорее хорошее	Хорошее
Климатические условия						
Влажность воздуха, x_1	%	0 ÷ 10	10 ÷ 30	30 ÷ 60	60 ÷ 90	90 ÷ 100
Температура воздуха, x_2	°С	+35 ÷ +50	+25 ÷ +35	+20 ÷ +25	+10 ÷ +20	–50 ÷ +10
Скорость ветра, x_3	м/с	20 ÷ 15	15 ÷ 10	10 ÷ 5	5 ÷ 2.5	2.5 ÷ 0
Количество осадков за предыдущий день, x_4	мм	0 ÷ 1	1 ÷ 2	2 ÷ 6	6 ÷ 20	20 ÷ 30
Количество осадков в течение текущего дня, x_5	мм	0 ÷ 1	1 ÷ 2	2 ÷ 6	6 ÷ 20	20 ÷ 30
Оценка захламленности леса сухостоем (балл)						
Доля сухих деревьев, x_6	%	50 ÷ 100	20 ÷ 50	10 ÷ 20	5 ÷ 10	0 ÷ 5
Доля частично засохших деревьев, x_7	%	70 ÷ 100	50 ÷ 70	40 ÷ 50	10 ÷ 40	0 ÷ 10
Оценка состояния $k_{ЛГМ1}$						
Влажность ЛГМ ₁ , x_8	%	0 ÷ 6	6 ÷ 12	12 ÷ 18	18 ÷ 22	22 ÷ 100
Температура ЛГМ ₁ , x_9	°С	+35 ÷ +50	+25 ÷ +35	+20 ÷ +25	+10 ÷ +20	–50 ÷ +10
Оценка состояния $k_{ЛГМ2}$						
Влажность ЛГМ ₂ , x_{10}	%	0 ÷ 9	9 ÷ 15	15 ÷ 20	20 ÷ 25	25 ÷ 100
Температура ЛГМ ₂ , x_{11}	°С	+35 ÷ +50	+25 ÷ +35	+20 ÷ +25	+10 ÷ +20	–50 ÷ +10
Оценка состояния $k_{ЛГМ3}$						
Влажность ЛГМ ₃ , x_{12}	%	0 ÷ 11	11 ÷ 18	18 ÷ 25	25 ÷ 33	33 ÷ 100
Температура ЛГМ ₃ , x_{13}	°С	+35 ÷ +50	+25 ÷ +35	+20 ÷ +25	+10 ÷ +20	–50 ÷ +10
Оценка состояния залежей торфа с глубиной залегания более 18 см						
Влажность торфа, x_{14}	%	0 ÷ 11	11 ÷ 18	18 ÷ 25	25 ÷ 33	33 ÷ 100
Температура торфа, x_{15}	°С	+65 ÷ +100	+40 ÷ +65	+25 ÷ +40	+10 ÷ +25	0 ÷ +10
Толщина слоя торфа, x_{16}	м	0.5 ÷ 1	1 ÷ 2	2 ÷ 3	3 ÷ 4	4 ÷ 5
Оценка антропогенной опасности						
Оценка пожароопасности производственных объектов, x_{17}	балл	80 ÷ 100	60 ÷ 80	40 ÷ 60	20 ÷ 40	0 ÷ 20
Оценка пожароопасности продуктопроводов, x_{18}	балл	80 ÷ 100	60 ÷ 80	40 ÷ 60	20 ÷ 40	0 ÷ 20
Оценка пожароопасности транспортных магистралей, x_{19}	балл	80 ÷ 100	60 ÷ 80	40 ÷ 60	20 ÷ 40	0 ÷ 20
Оценка пожароопасности социальных объектов (населенные пункты, домовладения), x_{20}	балл	80 ÷ 100	60 ÷ 80	40 ÷ 60	20 ÷ 40	0 ÷ 20
Оценка пожароопасности туристических объектов, x_{21}	балл	80 ÷ 100	60 ÷ 80	40 ÷ 60	20 ÷ 40	0 ÷ 20



В случае необходимости диапазоны значений переменных могут корректироваться в зависимости от вида участка лесного массива. Вычислительные комплексы на основе ИСНВ позволяют добавлять или исключать переменные, которые описывают необходимый набор параметров. ИСНВ, используемая для определения ИЛП, показана на рис. 1.

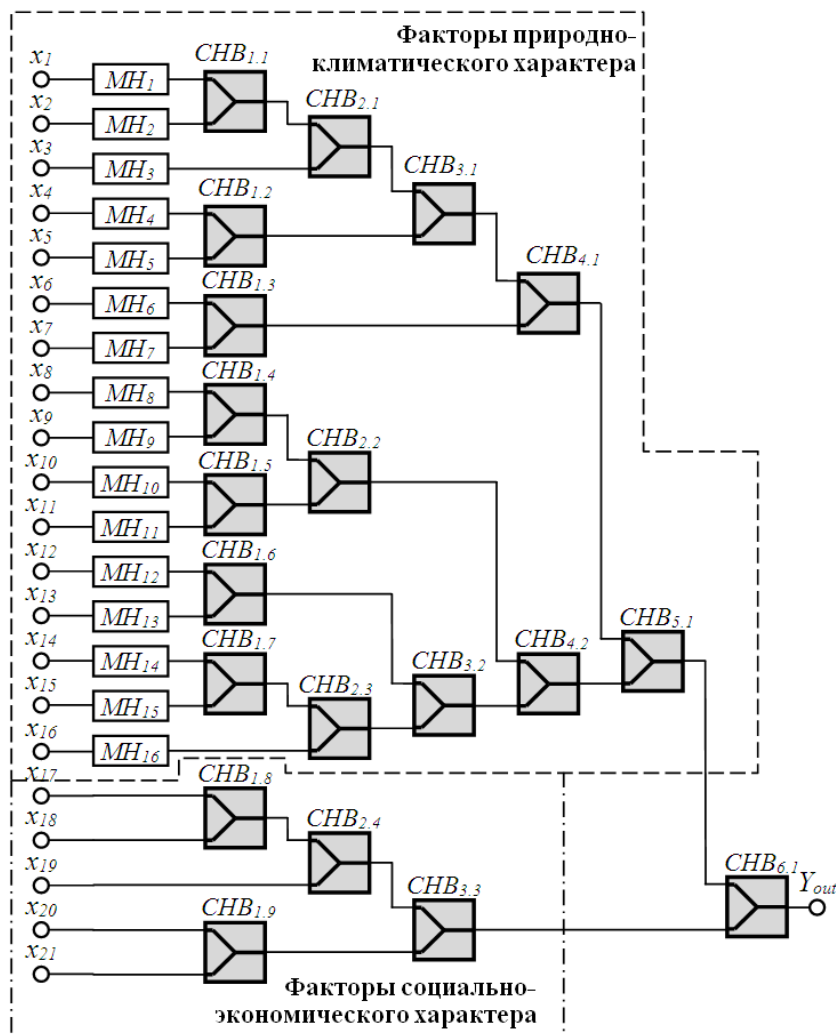


Рис. 1. Структура иерархической системы нечеткого вывода для определения индекса лесной пожароопасности

Fig. 1. The structure of the hierarchical fuzzy inference system for determining the rating of forest areas by the level of fire hazard

Особенностью рассматриваемой ИСНВ является наличие: а) блоков нормализации ($БН_1 \div БН_{16}$), которые используются для предварительной обработки параметров, информация о которых представлена на различных метрических шкалах; б) блока сепарации (сепарирующие СНВ), используемого для придания выходной закономерности $Y_{out.1}$ ступенчатого характера $Y_{out.2}$. Свойство ИСНВ формировать «ступенчатую» закономерность показано в [12]. Наличие подобного свойства позволяет на базе ИСНВ реализовать вычислительную систему, которая будет обеспечивать распределение объектов анализа по классам состояния.

Использование $БН_1 \div БН_{16}$ необходимо для приведения значений входных параметров к единой метрической шкале. С учетом [9, 11, 12] подобная операция выполняется



для упрощения формирования СНВ. В рамках исследований значения входных переменных приведены к диапазону от 0 до 100 баллов, где 0 — это наихудшее значение, а 100 — наилучшее. Применительно к рассматриваемой задаче нормализации подвергнуты переменные $x_1 \div x_{16}$. Ниже представлены операторы для переменных $x_1 \div x_3$:

$$\begin{array}{l}
 \text{для } x_1 : \\
 y = \begin{cases} 0; x \geq 50; \\ -\frac{1}{3}x + \frac{50}{3}; x \in [35; 50); \\ -3x + 110; x \in [30; 35); \\ -2x + 80; x \in [26; 30); \\ -3.4x + 116.4; x \in [21; 26); \\ -5x + 150; x \in [19; 21); \\ -3.4x + 119.6; x \in [14; 10); \\ -2x + 100; x \in [10; 5); \\ -2.4 + 104; x \in [5; 10); \\ -\frac{8}{55}x + \frac{1020}{11}; x \in [-50; 5); \\ 100; x > -50, \end{cases} \\
 \text{для } x_2 : \\
 x_n = \begin{cases} 0.5x_a; x_a \in [0; 10); \\ 3x_a - 25; x_a \in [10; 15); \\ 0.8x_a + 8; x_a \in [15; 25); \\ 3.4x_a - 57; x_a \in [25; 30); \\ 0.5x_a + 30; x_a \in [30; 50); \\ 1.7x_a - 30; x_a \in [50; 60); \\ \frac{8}{15}x_a + 40; x_a \in [60; 75); \\ 0.8x_a + 20; x_a \in [75; 100); \\ 100; x_a = 100, \end{cases} \\
 \text{для } x_3 : \\
 y = \begin{cases} 100; x = 0; \\ -4x + 100; x \in (0; 2); \\ -6x + 104; x \in (2; 4); \\ -8x + 112; x \in (4; 5); \\ -8.5x + 114; x \in (5; 7); \\ -\frac{10}{3}x + \frac{235}{3}; x \in (7; 10); \\ -8.5x + 130; x \in (10; 12); \\ -4x + 76; x \in (12; 14); \\ -7.5x + 125; x \in (14; 16); \\ -1.25x + 25; x \in (16; 20); \\ 0; x > 20. \end{cases}
 \end{array}$$

Принцип формирования операторов нормализации для переменных $x_4 \div x_{16}$ аналогичный. Вид ФП переменных, использованных для формирования СНВ, показан на рис. 2.

Термы, используемые для описания значений переменной, имеют следующие значение: NB — плохое; NM — скорее плохое; Z — среднее; PM — скорее хорошее; PB — хорошее влияние на значение выходной переменной.

Для описания выходных переменных используется аналогичный набор термов. Семантические значения термов следующие: NB — плохое; NM — скорее плохое; Z — среднее; PM — скорее хорошее; PB — хорошее. В качестве ФП для описания термов выходных переменных используются константы. Терму NB соответствует 0, терму NM — 25, терму Z — 50, терму PM — 75, а терму PB — значение 100 баллов. После проведения классификации участки, получившие 0 баллов, имеют наивысшую пожароопасность; 25 — повышенную; 50 — среднюю; 75 — низкую; 100 — наименьшую пожароопасность.

Выходная закономерность СНВ, реализуемая при помощи ПП вида (1) и алгоритма Такаги – Сугено, описывается при помощи поверхности, отображающей значения выходной переменной при заданных парах значений входных переменных. Поверхности СНВ показаны на рис. 3.

Работоспособность комплекса проверялась при помощи численного моделирования.

3. Проверка работоспособности предлагаемых теоретических положений

Для проверки предлагаемых положений было сформировано тестовое множество, состоящее из 173 векторов значений. Предполагается, что каждый вектор описывает участок леса, находящегося под наблюдением. В качестве допущения принимается,

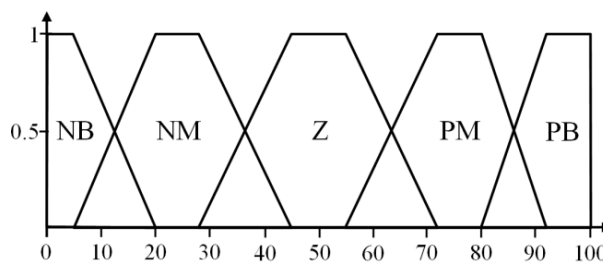
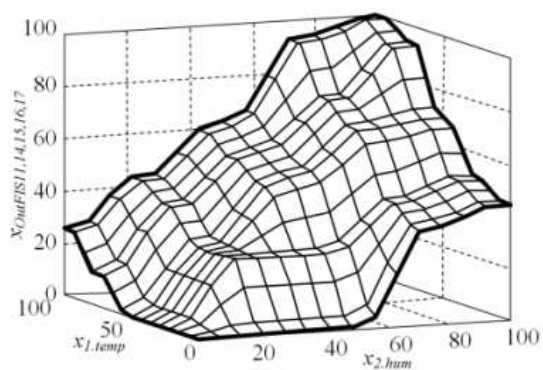
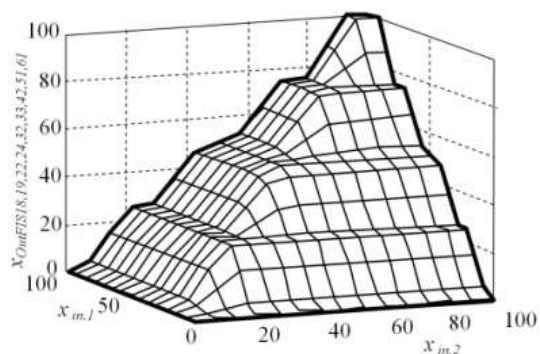


Рис. 2. Внешний вид функции принадлежности входных переменных

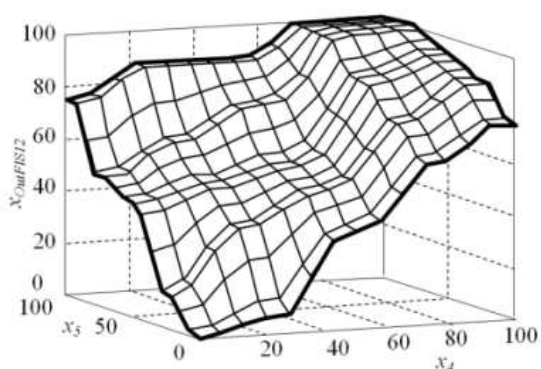
Fig. 2. Appearance of membership functions of input variables



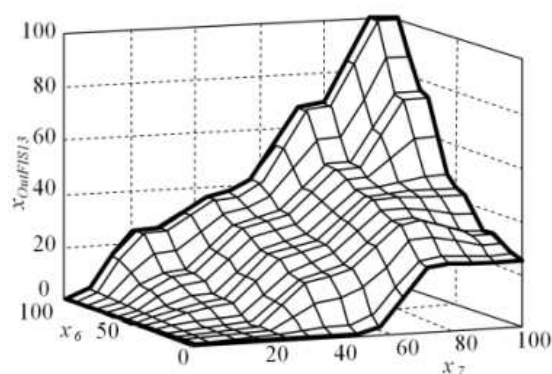
a / a



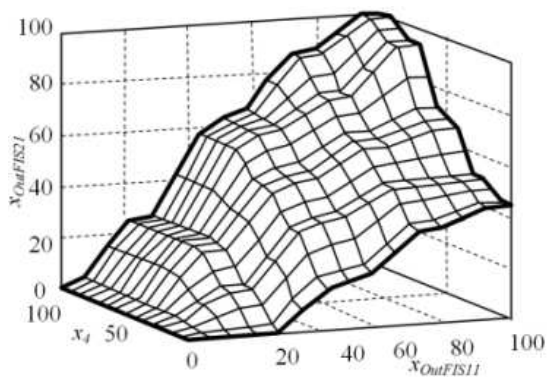
б / b



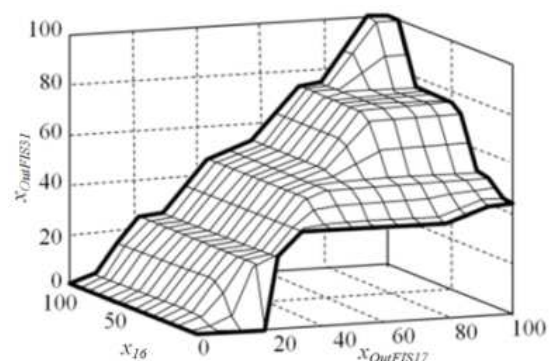
в / c



з / d



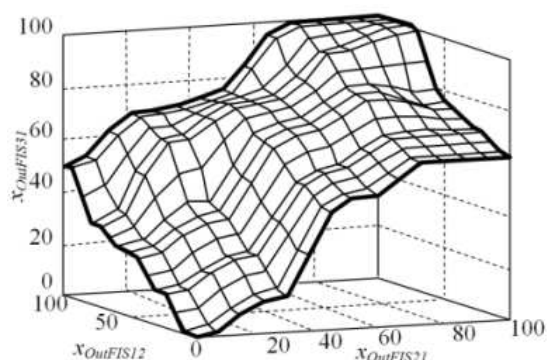
д / f



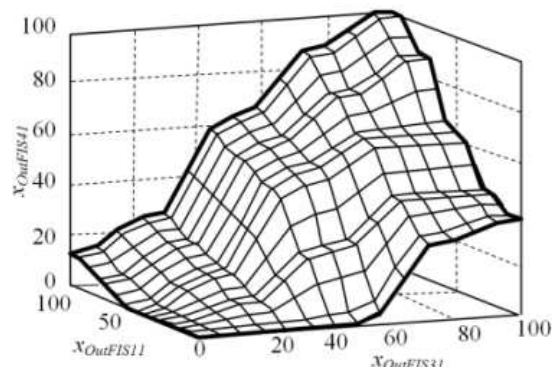
е / g

Рис. 3. Поверхности ЧНВ вычислительного комплекса по определению рейтинга лесных массивов по уровню пожарной опасности: *a* – ЧНВ₁₁, ЧНВ₁₄, ЧНВ₁₅, ЧНВ₁₆, ЧНВ₁₇; *б* – ЧНВ₁₈, ЧНВ₁₉, ЧНВ₂₂, ЧНВ₂₄, ЧНВ₃₂, ЧНВ₃₃, ЧНВ₄₂, ЧНВ₅₁, ЧНВ₆₁; *в* – ЧНВ₁₂; *з* – ЧНВ₁₃; *д* – ЧНВ₂₁; *е* – ЧНВ₂₃

Fig. 3. Surfaces of the fuzzy inference system (FIS) of the computer complex for determining the rating of forest tracts by the level of fire danger: *a* is FIZ₁₁, FIZ₁₄, FIZ₁₅, FIZ₁₆, FIZ₁₇; *b* is FIZ₁₈, FIZ₁₉, FIZ₂₂, FIZ₂₄, FIZ₃₂, FIZ₃₃, FIZ₄₂, FIZ₅₁, FIZ₆₁; *c* is FIZ₁₂; *d* is FIZ₁₃; *f* is FIZ₂₁; *g* is FIZ₂₃



$ж / h$



$з / i$

Окончание рис. 3. $ж$ – СНВ₃₁; $з$ – СНВ₄₁ / End of Fig. 3. h is FIZ₃₁; i is FIZ₄₁

что переменные независимы и прошли предварительную обработку, связанную с исключением аномальных данных. Диапазон значений переменных и другие статистические характеристики анализируемой выборки приведены в табл. 2.

Таблица 2 / Table 2

Характеристики анализируемой выборки значений
Characteristics of the analyzed sample of values

Наименование параметра	Минимум	Максимум	Среднее (медианное)	Ср. квадратич. отклонение
Влажность воздуха, x_1 , %	2.0	100.0	68.0	25.0
Температура воздуха, x_2 , °С	-10	50	11	14
Скорость ветра, x_3 , м/с	0.0	19.0	5.5	4.7
Количество осадков за предыдущий день, x_4 , мм	0.0	30.0	15.0	9.6
Количество осадков в течение текущего дня, x_5 , мм	0.0	30.0	18.0	9.7
Доля сухих деревьев, x_6 , %	0	91	17	21
Доля частично засохших деревьев, x_7 , %	0	50	19	16
Влажность ЛГМ ₁ , x_8 , %	0.0	50.0	25.0	9.4
Температура ЛГМ ₁ , x_9 , °С	-10	50	11	15
Влажность ЛГМ ₂ , x_{10} , %	0.0	49.0	25.0	9.4
Температура ЛГМ ₂ , x_{11} , °С	-10	48	13	15
Влажность ЛГМ ₃ , x_{12} , %	2.0	50.0	26.0	9.6
Температура ЛГМ ₃ , x_{13} , °С	-10	50	13	16
Влажность торфа, x_{14} , %	0.0	50.0	25.0	9.2
Температура торфа, x_{15} , °С	0	78	25	20
Толщина слоя торфа, x_{16} , м	0	4.6	1.4	1
Оценка пожарной безопасности производственных объектов, x_{17} , балл	3	99	80	21
Оценка пожароопасности продуктопроводов, x_{18} , балл	18	99	82	21
Оценка пожарной безопасности транспортных магистралей, x_{19} , балл	7	99	80	22
Оценка пожарной безопасности социальных объектов (населенные пункты, домовладения), x_{20} , балл	11	99	79	22
Оценка пожарной безопасности туристических объектов, x_{21} , балл	11	99	76	23

Задача моделирования — показать, каким образом вычислительная система ран-

жирует анализируемые объекты. После моделирования результаты упорядочены по возрастанию. Закономерность, сформированная на выходе $Y_{out.1}$ ИСНВ, показана на рис. 4, а. Закономерность, сформированная на выходе $Y_{out.2}$ после сепарирующих СНВ, показана на рис. 4, б.

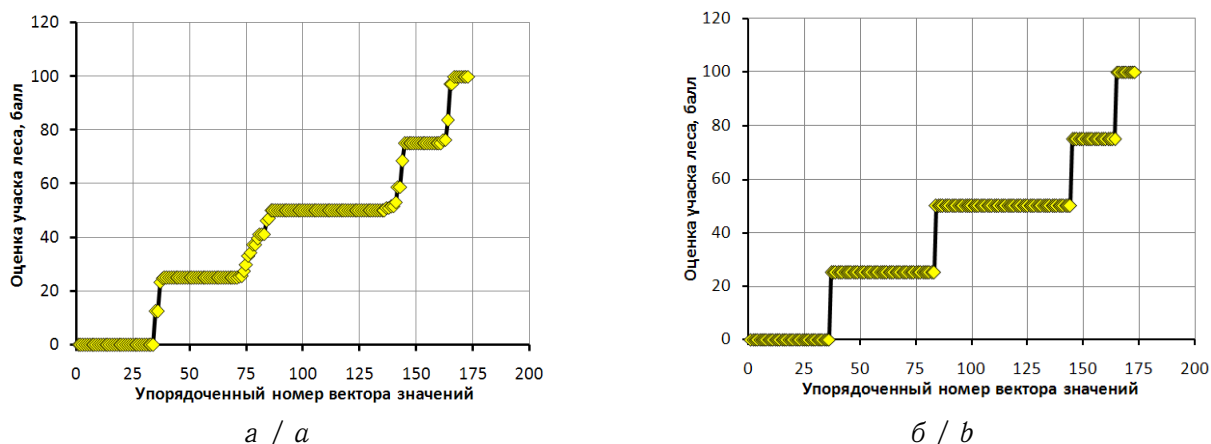


Рис. 4. Входная (а) и выходная (б) закономерности исследуемой модели (цвет онлайн)

Fig. 4. Input (a) and Output (b) regularity of the investigated model (color online)

Как видно из данных рис. 4, после использования сепарирующих СНВ закономерность приобрела ступенчатый характер, в результате чего каждый анализируемый участок лесного массива оказался сопоставлен определенному классу состояния.

4. Обсуждение результатов исследований

Предложенная система анализа состояния участков лесного массива позволяет агрегировать различную информацию, на основании которой оценивается пожароопасность. В результате происходит классификация наблюдаемых участков лесного массива по степени пожароопасности. Подобное позволяет определить очередность проведения профилактических или подготовительных мероприятий при управлении лесным массивом. Особенностью предложенных положений являются следующие возможности: 1) обобщение опыта экспертных групп при определении пожароопасности с учетом факторов климатического (природного) и социально-экономического (антропогенного) характера; 2) корректировки диапазонов значений оцениваемых параметров в зависимости от специфики лесного массива. Обобщение экспертных мнений за счет использования методов формирования баз знаний позволяет привлекать к построению оператора обработки информации специалистов из различных областей знаний. Следовательно, имеется возможность адаптации системы к специфике определенного региона, а также изменения количества и видов переменных, учитываемых при расчете индекса пожароопасности участка.

Дальнейшее использование методов кластерного анализа позволяет выявить в сформированных классах состояния объекты с близкими значениями оцениваемых параметров, что будет говорить о схожести ситуаций, возникших на участках. Реализация подобной задачи возможна при помощи совместного использования алгоритма горной кластеризации [13] для выявления центров кластеров и совместного использования метрик Минковского и Хаусдорфа [14] для нахождения объектов, которые наиболее близки к найденным центрам кластеров.



Заключение

В ходе исследований предложен вычислительный комплекс для оценивания состояния участков лесных массивов по степени пожароопасности. Основой комплекса являются методы теории нечетких множеств и нечеткого логического вывода. Предложенные положения позволяют агрегировать параметры, значения которых представлены на разных метрических шкалах и имеют различный уровень влияния на итоговый результат. Реализация вычислительного комплекса для определения рейтинга лесного массива проведена при помощи формирования иерархической системы нечеткого вывода. Как показало исследование, выходная закономерность сформированной вычислительной системы имеет преимущественно ступенчатый характер, что позволило решить задачу распределения элементов анализируемой выборки на классы состояния. Подобная классификация совместно с известными методами кластерного анализа позволяет использовать результаты анализа для планирования работ по профилактическим или подготовительным мерам по ликвидации лесных пожаров. Развитие предложенных положений открывает возможности формирования систем поддержки принятия решений, предназначенных для организации хозяйственных процессов по управлению лесными массивами и другими, прилегающими к ним социально-экономическими и организационно-техническими системами.

Список литературы

1. Кухар И. В., Бердникова Л. Н., Орловский С. Н., Мартыновская С. Н., Коршун В. Н., Карнаухов А. И. Влияние вредных и опасных факторов лесных пожаров на окружающую среду // Хвойные бореальной зоны. 2019. Т. 37, № 5. С. 307–312. EDN: [VKCKGD](#)
2. Соколов М. М. Стратегии России по введению трансграничного углеродного регулирования в ЕС // Геоэкономика энергетики. 2021. Т. 15, № 3. С. 84–97. https://doi.org/10.48137/2687-0703_2021_15_3_84
3. Минаков Е. И., Калистратов Д. С., Мирчук С. Г. Модель информационно-измерительной системы видеомониторинга лесных пожаров // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. № 11–2. С. 194–200. EDN: [YSJJAQ](#)
4. Губенко И. М., Рубинштейн К. Г. Сравнительный анализ методов расчета индексов пожарной опасности // Труды гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2012. Вып. 347. С. 207–222. EDN: [PTTLPP](#)
5. Wotton M. B. Interpreting and using outputs from the Canadian Forest Fire Danger Rating System in research applications // Environmental and Ecological Statistics. 2009. Vol. 16, iss. 2. P. 107–131. <https://doi.org/10.1007/s10651-007-0084-2>
6. Sharples J. J., McRae R. H. D., Weber R. O., Gill A. M. A simple index for assessing fire danger rating // Environmental Modelling & Software. 2009. Vol. 24, iss. 6. P. 764–774. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2008.11.004>
7. Van Wagner C. E. Development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System. Ottawa : Canadian Forestry Service, Headquarters, 1987. 35 p. (Forestry Technical Report, vol. 35). URL: <https://cfs.nrcan.gc.ca/publications?id=19927> (дата обращения: 20.03.2022).
8. Галушкин А. И. Нейронные сети: основы теории. Москва : Горячая Линия-Телеком, 2010. 496 с.
9. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление. Москва : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2017. 800 с.
10. Штовба С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. Москва : Горячая Линия-Телеком, 2007. 288 с.
11. Lee K. H. First Course on Fuzzy Theory and Applications. Berlin ; Heidelberg : Springer, 2005. 335 p. <https://doi.org/10.1007/3-540-32366-X>
12. Сорокин А. А. Усовершенствование информационно-аналитических комплексов на



основе иерархических систем нечеткого логического вывода // Управление большими системами. 2020. Вып. 88. С. 99–123. <https://doi.org/10.25728/ubs.2020.88.5>

13. Yager R. R., Filev D. P. Approximate clustering via the mountain method // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 1994. Vol. 24, iss. 8. P. 1279–1284. <https://doi.org/10.1109/21.299710>
14. Леонтьев В. К. О мерах сходства и расстояниях между объектами // *Журнал вычислительной математики и математической физики*. 2009. Т. 49, № 11. С. 2041–2058.

References

1. Kukhar I. V., Berdnikova L. N., Orlovskii S. N., Martynovskaia S. N., Korshun V. N., Karnaukhov A. I. The impact of harmful and dangerous factors of forest fires on the environment. *Conifers of the Boreal Area*, 2019, vol. 37, iss. 5, pp. 307–312 (in Russian). EDN: VKCKGD
2. Sokolov M. M. Russia's strategies for the introduction of cross-border carbon regulation in the EU. *Geoeconomics of Energy*, 2021, vol. 15, iss. 3, pp. 84–97 (in Russian). https://doi.org/10.48137/2687-0703_2021_15_3_84
3. Minakov E. I., Kalistratov D. S., Mirchuk S. G. The model of information-measuring system of forest fires videomonitoring. *Izvestiya Tula State University. Technical Science*, 2017, iss. 11–2, pp. 194–200 (in Russian). EDN: YSJJAO
4. Gubenko I. M., Rubinshtein K. G. Comparative analysis of methods of fire danger indexes evaluation. *Proceedings of the Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation*, 2012, iss. 347, pp. 207–222 (in Russian). EDN: PTTLPP
5. Wotton M. B. Interpreting and using outputs from the Canadian Forest Fire Danger Rating System in research applications. *Environmental and Ecological Statistics*, 2009, vol. 16, iss. 2, pp. 107–131. <https://doi.org/10.1007/s10651-007-0084-2>
6. Sharples J. J., McRae R. H. D., Weber R. O., Gill A. M. A simple index for assessing fire danger rating. *Environmental Modelling & Software*, 2009, vol. 24, iss. 6, pp. 764–774. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2008.11.004>
7. Van Wagner C. E. *Development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System*. Forestry Technical Report, vol. 35. Ottawa, Canadian Forestry Service, Headquarters, 1987. 35 p. Available at: <https://cfs.nrcan.gc.ca/publications?id=19927> (accessed 20 March 2022).
8. Galushkin A. I. *Neironnye seti: osnovy teorii* [Neural Networks: Fundamentals of Theory]. Moscow, Goryachaya Liniya-Telekom, 2010. 496 p. (in Russian).
9. Pegat A. *Nechetkoe modelirovanie i upravlenie* [Fuzzy Modeling and Control]. Moscow, BINOM. Laboratoriya znaniy, 2017. 800 p. (in Russian).
10. Shtovba S. D. *Proektirovanie nechetkikh sistem sredstvami MATLAB* [Designing fuzzy systems by means of MATLAB]. Moscow, Goryachaya Liniya-Telekom, 2007. 288 p. (in Russian).
11. Lee K. H. *First Course on Fuzzy Theory and Applications*. Berlin, Heidelberg, Springer, 2005. 335 p. <https://doi.org/10.1007/3-540-32366-X>
12. Sorokin A. A. Improvement of information-analytical complexes based on hierarchical systems of fuzzy output. *Large-Scale Systems Control*, 2020, iss. 88, pp. 99–123 (in Russian). <https://doi.org/10.25728/ubs.2020.88.5>
13. Yager R. R., Filev D. P. Approximate clustering via the mountain method. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1994, vol. 24, iss. 8, pp. 1279–1284. <https://doi.org/10.1109/21.299710>
14. Leont'ev V. K. On measures of similarity and distances between objects. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 2009, vol. 49, iss. 11, pp. 1949–1965. <https://doi.org/10.1134/S0965542509110116>

Поступила в редакцию / Received 23.03.2022

Принята к публикации / Accepted 01.06.2022

Опубликована / Published 01.03.2023