



УДК 681.3: 625.77: 581.5

О.М. Полещук, В.А. Фролова

Фролова Вера Алексеевна родилась в 1975г., окончила в 1997 г. Московский государственный университет леса, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры садово-паркового строительства и ландшафтной архитектуры МГУЛ. Имеет 16 печатных работ в области исследований экологии и состояния городских зеленых насаждений.



РЕЙТИНГОВЫЕ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ГОРОДСКИХ НАСАЖДЕНИЙ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ТЕОРИИ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ

На основе аппарата теории нечетких множеств предложена методика определения рейтинговых оценок и рейтинга состояния различных видов растений, произрастающих на бульварах Москвы в различных экологических условиях.

Ключевые слова: лингвистическая шкала, оценка состояния насаждений, параметры функций принадлежности, рейтинг.

Визуальная оценка состояния насаждений широко применяется при решении многих задач. Это мониторинг состояния насаждений; выявление видов насаждений, наиболее адаптированных к произрастанию в сложных экологических условиях; оценка долговечности древесных растений в городских условиях; контроль приживаемости растений на объектах озеленения и т. д.

Процесс визуального обследования насаждений заключается в отнесении отдельных экземпляров растений к той или иной категории состояния в рамках подходящей лингвистической шкалы. В настоящей работе была использована шкала с семью категориями состояния: старый сухостой, свежий сухостой, усыхающее, сильно ослабленное, среднеослабленное, умеренно ослабленное, здоровое без признаков ослабления [4, 6]. Использование лингвистической шкалы вполне естественно и удобно для лица, производящего оценку (ЛПО), поскольку она воспроизводит мыслительные категории человека, для которого гораздо проще словесно описать интенсивность проявления изучаемого признака, чем напрямую дать количест-

венную оценку. Однако вместе с удобством применения лингвистическая шкала вносит заложенную в ней нечеткость в процесс оценки и дальнейшей обработки полученных результатов. Нечеткость возникает всегда, когда при описании объекта используются слова естественного языка [1]. Даже высококвалифицированный специалист не всегда может с полной уверенностью отнести оцениваемое растение только к одной из семи категорий состояния. ЛПО, как правило, имеет достаточный опыт, поэтому не может отнести растение к двум не соседним категориям состояния или к трем и более категориям одновременно. Специфика оценки на основе лингвистической шкалы не позволяет применить к полученным результатам методы традиционного математического аппарата. Необходимо разработать новые методы на основе аппарата теории нечетких множеств [8], базовым понятием которой является лингвистическая переменная [1].

Для формализации понятия «состояние насаждений» построим лингвистические переменные с терм-множествами $a_i, i = \overline{1, 7}$: $a_1 = \{\text{старый сухой}\}$, $a_2 = \{\text{свежий сухой}\}$, $a_3 = \{\text{усыхающее}\}$, $a_4 = \{\text{сильно ослабленное}\}$, $a_5 = \{\text{среднеослабленное}\}$, $a_6 = \{\text{умеренно ослабленное}\}$, $a_7 = \{\text{здоровое}\}$. Для того чтобы построить лингвистическую переменную, необходимо определить функции принадлежности ее терм-множеств, т. е. степень оттеночной уверенности ЛПО в принадлежности оцениваемого объекта к конкретному терм-множеству. Эти функции будем строить на универсальном множестве лингвистической переменной – отрезке $[0, 1]$ и накладывать на них логичные требования:

у всех терм-множеств существуют типичные представители, для которых функция принадлежности тождественно равна единице (степень оттеночной уверенности ЛПО в их принадлежности данному терм-множеству равна единице);

каждый объект может быть отнесен хотя бы к одному терм-множеству с ненулевым значением функции принадлежности (ненулевой степенью уверенности ЛПО);

сумма значений функций принадлежности всех терм-множеств объекта равна единице (сумма оттеночных уверенностей ЛПО равна единице);

слева от типичного для терм-множества отрезка функция принадлежности возрастает, а справа убывает (требование плавности границ между соседними терм-множествами).

Представление изучаемых признаков в виде лингвистических переменных позволяет оперировать с едиными для этих признаков понятиями – функциями принадлежности их терм-множеств. В этом состоит преимущество методов теории нечетких множеств по сравнению, например, с классическими методами многомерного шкалирования, в соответствии с которыми исследователи пытаются строить сомнительного рода свертки несовместимых по своей внутренней сути и несоизмеримых в одной шкале показателей. Кроме того, лингвистическая шкала имеет ряд преимуществ перед порядковой, в которой обычно измеряются качественные признаки. В поряд-

ковой шкале некорректны все арифметические операции [3], и применение их на практике приводит к неустойчивости полученных выводов (например при нахождении рейтинговых оценок). В лингвистической шкале обобщенные операции над ее нечеткими элементами определены на другой категорической основе (обычная арифметика заменена в частном случае минимаксными операциями, а в общем случае операциями на основе t -норм и t -конорм [1]). Подобный подход позволяет получать для ряда задач устойчивые выводы, адекватные реальности.

В настоящей работе рассматриваются данные, полученные в 1997–2001 гг. при обследовании насаждений г. Москвы в рамках общегородского мониторинга состояния зеленых насаждений [2, 7]. Для анализа были отобраны данные о состоянии наиболее широко представленных 17 видов древесных и кустарниковых растений в насаждениях Бульварного кольца Москвы (обследовано 4084 растения) и таких же видов на бульварах, удаленных от центра города (5022 растения).

В настоящей статье на основе методов теории нечетких множеств разработана методика анализа полученной в ходе обследования информации и определения в ее рамках рейтинговых оценок и рейтинга состояния 17 видов древесных и кустарниковых растений, произрастающих в различных по сложности экологических условиях на Бульварном кольце и других бульварах Москвы. Разработана также методика определения общей рейтинговой оценки и общего рейтинга состояния видов растений для всех обследованных насаждений на объектах озеленения данного типа – бульварах. Обозначим: $k_{ij}^1, i = \overline{1, 17}, j = \overline{1, 7}$ – относительное содержание растений i -го вида в насаждениях Бульварного кольца, отнесенных к j -му состоянию; $k_{ij}^2, i = \overline{1, 17}, j = \overline{1, 7}$ – то же в насаждениях других бульваров; $k_j^1, j = \overline{1, 7}$ – относительное содержание растений 17 видов в насаждениях Бульварного кольца, отнесенных к j -му состоянию; $k_j^2, j = \overline{1, 7}$ – то же в насаждениях других бульваров.

Для Бульварного кольца $k_1^1 = 0,009$; $k_2^1 = 0,010$; $k_3^1 = 0,030$; $k_4^1 = 0,130$; $k_5^1 = 0,289$; $k_6^1 = 0,437$; $k_7^1 = 0,095$; для других бульваров $k_1^2 = 0,004$; $k_2^2 = 0,049$; $k_3^2 = 0,058$; $k_4^2 = 0,269$; $k_5^2 = 0,430$; $k_6^2 = 0,149$; $k_7^2 = 0,042$. Значения k_{ij}^1 и k_{ij}^2 приведены в табл. 1.

По относительному содержанию растений i -го вида построим лингвистические переменные $X_1 =$ «состояние насаждений на Бульварном кольце» и $X_2 =$ «состояние насаждений на других бульварах» [5] на универсальном множестве – отрезке $[0, 1]$. Точка $x = 0$ соответствует наихудшему состоянию насаждений и является типичной (функция принадлежности равна единице) для терм-множества a_1 , точка $x = 1$ соответствует наилучшему состоянию насаждений и является типичной (функция принадлежности равна единице) для терм-множества a_7 . Поставим в соответствие терм-множествам

Таблица 1

Вид растения	Бульварное кольцо							Другие бульвары						
	k_{i1}^1	k_{i2}^1	k_{i3}^1	k_{i4}^1	k_{i5}^1	k_{i6}^1	k_{i7}^1	k_{i1}^2	k_{i2}^2	k_{i3}^2	k_{i4}^2	k_{i5}^2	k_{i6}^2	k_{i7}^2
1. Береза бородавчатая	0,090	0,180	0,000	0,180	0,180	0,370	0,000	0,009	0,032	0,060	0,100	0,660	0,070	0,069
2. Боярышник полумягкий	0,000	0,000	0,040	0,149	0,400	0,260	0,151	0,000	0,009	0,180	0,290	0,450	0,030	0,041
3. Вяз гладкий	0,000	0,005	0,014	0,057	0,220	0,650	0,054	0,000	0,020	0,048	0,510	0,296	0,060	0,066
4. « шершавый	0,023	0,000	0,018	0,123	0,220	0,474	0,142	0,022	0,000	0,043	0,365	0,365	0,182	0,023
5. Боярышник однопестичный	0,000	0,000	0,000	0,040	0,240	0,680	0,040	0,000	0,054	0,055	0,363	0,253	0,154	0,121
6. Кизильник блестящий	0,000	0,000	0,000	0,083	0,125	0,670	0,122	0,000	0,000	0,050	0,230	0,670	0,050	0,000
7. Клен остролистный	0,023	0,008	0,031	0,160	0,183	0,400	0,195	0,006	0,054	0,030	0,087	0,468	0,235	0,120
8. « татарский	0,000	0,052	0,069	0,069	0,276	0,413	0,121	0,000	0,000	0,000	0,139	0,805	0,028	0,028
9. « ясенелистный	0,000	0,000	0,014	0,220	0,324	0,408	0,034	0,000	0,026	0,068	0,273	0,462	0,120	0,051
10. Липа крупнолистная	0,002	0,009	0,022	0,087	0,274	0,426	0,180	0,000	0,008	0,061	0,220	0,365	0,262	0,084
11. « мелколистная	0,005	0,008	0,050	0,140	0,336	0,392	0,069	0,000	0,027	0,073	0,304	0,419	0,145	0,032
12. Сирень венгерская	0,020	0,010	0,040	0,131	0,354	0,374	0,071	0,014	0,021	0,021	0,119	0,594	0,203	0,028
13. « обыкновенная	0,000	0,005	0,018	0,074	0,310	0,490	0,103	0,010	0,019	0,060	0,235	0,413	0,255	0,008
14. Тополь душистый	0,023	0,058	0,058	0,058	0,151	0,477	0,175	0,000	0,019	0,029	0,466	0,310	0,049	0,127
15. « бальзамический	0,039	0,031	0,035	0,117	0,190	0,432	0,156	0,001	0,160	0,037	0,303	0,417	0,070	0,012
16. Ясень обыкновенный	0,000	0,000	0,077	0,000	0,307	0,462	0,154	0,000	0,079	0,048	0,190	0,365	0,270	0,048
17. « пенсильванский	0,003	0,002	0,012	0,161	0,326	0,447	0,049	0,003	0,062	0,074	0,356	0,411	0,067	0,027

$a_i, i = \overline{1, 7}$ лингвистических переменных X_1, X_2 нечеткие множества с трапециoidalными функциями принадлежности, которые однозначно определяются четырьмя параметрами – абсциссами точек излома их графиков [5]. Параметры функций принадлежности $\mu_j^1, j = \overline{1, 7}$ терм-множеств лингвистической переменной X_1 и функций принадлежности $\mu_j^2, j = \overline{1, 7}$ терм-множеств лингвистической переменной X_2 приведены в табл. 2.

Функции принадлежности нечетких рейтинговых множеств, описывающих состояние 17 представленных в табл. 1 видов растений в насаждениях Бульварного кольца, определим формулой

$$\lambda_i^1 = k_{i1}^1 \otimes \mu_1^1 \oplus k_{i2}^1 \otimes \mu_2^1 \oplus \dots \oplus k_{i7}^1 \otimes \mu_7^1,$$

в насаждениях других бульваров – формулой

$$\lambda_i^2 = k_{i1}^2 \otimes \mu_1^2 \oplus k_{i2}^2 \otimes \mu_2^2 \oplus \dots \oplus k_{i7}^2 \otimes \mu_7^2,$$

в общем в насаждениях бульваров Москвы – формулой

$$\lambda_i = \lambda_i^1 \oplus \lambda_i^2,$$

где \otimes, \oplus – соответственно обобщенные операции умножения и сложения.

Таблица 2

Параметр	Значение параметров [5]			
	Бульварное кольцо			
μ_1^1	0,000	0,000	0,004	0,013
μ_2^1	0,004	0,013	0,013	0,023
μ_3^1	0,013	0,023	0,034	0,065
μ_4^1	0,034	0,065	0,114	0,244
μ_5^1	0,114	0,244	0,324	0,613
μ_6^1	0,324	0,613	0,858	0,953
μ_7^1	0,858	0,953	1,000	1,000
	Другие бульвары			
μ_1^2	0,000	0,000	0,002	0,006
μ_2^2	0,002	0,006	0,028	0,077
μ_3^2	0,028	0,077	0,082	0,140
μ_4^2	0,082	0,140	0,245	0,514
μ_5^2	0,245	0,514	0,735	0,884
μ_6^2	0,735	0,884	0,937	0,979
μ_7^2	0,937	0,979	1,000	1,000

Поскольку мы работаем с функциями принадлежности трапециевидального вида, то параметры функций принадлежности λ_i^1, λ_i^2 в результате этих операций находятся покомпонентным умножением на числа $k_j^1, j = \overline{1, 7}$ и $k_j^2, j = \overline{1, 7}$ параметров функций принадлежности соответственно $\mu_j^1, j = \overline{1, 7}$ и $\mu_j^2, j = \overline{1, 7}$ с последующим их сложением. Параметры функций принадлежности λ_i находятся покомпонентным сложением параметров функций принадлежности λ_i^1 и λ_i^2 . Общая рейтинговая оценка и общий рейтинг видов растений в насаждениях бульваров Москвы строится с учетом промежуточных рейтинговых оценок видов растений в насаждениях Бульварного кольца и других бульваров. Конечно, это не единственный способ построения общей рейтинговой оценки. Она может быть сделана без детализации промежуточных рейтингов, но на практике часто ставится задача максимального учета именно промежуточной информации, что и демонстрирует предложенная методика. Поскольку применяемые операции построены на основе минимаксных операторов, они не являются традиционными арифметическими операциями между числами. Рейтинговые оценки для всех 17 видов растений в насаждениях Бульварного кольца найдем по формуле

$$c_i^1 = \frac{\int_0^1 x \lambda_i^1 dx}{\int_0^1 \lambda_i^1 dx}, \quad i = \overline{1, 17};$$

в насаждениях других бульваров – по формуле

$$c_i^2 = \frac{\int_0^1 x \lambda_i^2 dx}{\int_0^1 \lambda_i^2 dx}, \quad i = \overline{1, 17}$$

и в насаждениях бульваров Москвы по формуле

$$c_i = \frac{\int_0^1 x \lambda_i dx}{\int_0^1 \lambda_i dx}, \quad i = \overline{1, 17}.$$

Исходя из полученных рейтинговых оценок, присвоим каждому виду растений рейтинг по возрастанию его рейтинговой оценки (табл. 3).

Таблица 3

№ вида растения	Бульварное кольцо						Другие бульвары					В общем бульвары						
	λ_i^1				c_i^1	Рейтинг	λ_i^2				c_i^2	Рейтинг	λ_i				c_i	Рейтинг
1	0,147	0,285	0,399	0,512	0,335	17	0,288	0,488	0,650	0,783	0,550	6	0,218	0,386	0,525	0,648	0,442	17
2	0,265	0,412	0,522	0,683	0,471	13	0,200	0,353	0,486	0,643	0,421	16	0,232	0,382	0,504	0,663	0,446	16
3	0,284	0,508	0,690	0,823	0,573	3	0,222	0,345	0,470	0,657	0,426	11	0,253	0,427	0,580	0,740	0,499	11
4	0,305	0,488	0,635	0,760	0,545	7	0,276	0,426	0,555	0,718	0,494	12	0,291	0,457	0,595	0,739	0,519	9
5	0,283	0,516	0,706	0,845	0,584	2	0,320	0,440	0,546	0,694	0,502	10	0,302	0,478	0,626	0,769	0,542	5
6	0,339	0,563	0,747	0,857	0,622	1	0,221	0,425	0,600	0,766	0,502	9	0,280	0,494	0,673	0,812	0,562	3
7	0,324	0,487	0,617	0,730	0,537	9	0,408	0,581	0,710	0,817	0,626	1	0,366	0,534	0,663	0,773	0,582	1
8	0,273	0,443	0,576	0,706	0,498	11	0,256	0,486	0,680	0,838	0,562	4	0,264	0,464	0,628	0,772	0,530	7
9	0,206	0,376	0,515	0,676	0,443	16	0,274	0,437	0,576	0,729	0,504	8	0,240	0,407	0,546	0,702	0,473	13
10	0,327	0,506	0,645	0,777	0,562	5	0,381	0,537	0,657	0,785	0,589	2	0,354	0,522	0,651	0,781	0,575	2
11	0,230	0,399	0,532	0,686	0,461	14	0,266	0,423	0,557	0,713	0,490	13	0,248	0,411	0,545	0,700	0,476	12
12	0,228	0,393	0,523	0,680	0,455	15	0,332	0,531	0,687	0,818	0,589	3	0,280	0,462	0,605	0,749	0,522	8
13	0,285	0,480	0,633	0,779	0,542	8	0,317	0,483	0,614	0,754	0,541	7	0,301	0,482	0,623	0,766	0,542	6
14	0,325	0,502	0,643	0,742	0,550	6	0,270	0,395	0,518	0,694	0,472	14	0,298	0,448	0,580	0,718	0,511	10
15	0,300	0,469	0,603	0,716	0,520	10	0,191	0,334	0,466	0,623	0,404	17	0,246	0,402	0,535	0,669	0,462	14
16	0,318	0,507	0,653	0,788	0,564	4	0,350	0,504	0,622	0,746	0,554	5	0,334	0,506	0,637	0,767	0,559	4
17	0,230	0,411	0,557	0,715	0,477	12	0,207	0,353	0,487	0,654	0,426	15	0,218	0,382	0,522	0,685	0,452	15

Выводы

На основе аппарата теории нечетких множеств предложена новая методика анализа информации о состоянии городских насаждений и определения рейтинговых оценок и рейтинга отдельных видов древесных и кустарниковых растений. Эта методика позволяет достоверно оценить устойчивость отдельных видов древесных и кустарниковых растений в условиях интенсивного антропогенного воздействия и перспективность их дальнейшего использования для озеленения города. Являясь составной частью комплексной системы оценки состояния насаждений и прогноза их развития, методика может с успехом применяться для анализа различной информации, полученной в процессе экспертного оценивания на базе лингвистических шкал.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аверкин А.Н.* и др. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / А.Н. Аверкин, И.З. Батыршин, А.Ф. Блишун и др. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – 312 с.
2. *Авсиевич Н.А.* и др. Состояние зеленых насаждений и городских лесов в Москве (по данным мониторинга за 1999 г.): Аналитический доклад / Н.А. Авсиевич, В.А. Агальцова, Л.А. Атрошенко и др. – М.: Прима-пресс-М, 2000. – 277 с.
3. *Джини К.* Средние величины. – М.: Статистика, 1970. – 556 с.
4. *Мозолевская Е.Г.* Мониторинг состояния зеленых насаждений и городских лесов Москвы. Методы оценки состояния деревьев и насаждений // Экология большого города. – М.: Прима-пресс, 1997. – Вып. 2. – С. 16–59.
5. *Полещук О.М.* О применении нечетких множеств в задачах построения уровней градаций // Лесн. вестн. – 2000. – № 4 (13). – С. 142–146.
6. Санитарные правила в лесах России. – 1993.
7. *Фролова В.А.* О состоянии зеленых насаждений на территории бульваров юго-запада Москвы (по результатам мониторинга 1998 года) // Проблемы управления качеством окружающей среды: Сб. докл. Междунар. конф. – М.: Прима-пресс-М, 1999. – С. 202–204.
8. *Zadeh L. A.* Fuzzy sets // Inform. and Control. – 1965. – N 8. – P. 338–352.

Московский государственный
университет леса

Поступила 13.06.02

O.M. Poleshchuk, V.A. Frolova

State Rating Values of Urban Stands Based on Fuzzy Multitude Theory Methods

Technique of determining the rating values and state rating of different types of plants growing in the parkways of Moscow in different environmental conditions has been suggested based on the theory of fuzzy multitudes.