©Т.В. Гавриленко, сайт http://road-project.okis.ru

Хвойные бореальной зоны. – Т. XXX. - № 5-6. – Красноярск, 2012. – С.79-84.

УДК 625.7.095+519.248

Использование теории нечетких множеств при анализе экологического состояния придорожного пространства

Т.В. Гавриленко[1], О.В. Адмаев[2]

[1]Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
[2]Красноярский институт железнодорожного транспорта – филиал ИрГУПС, Красноярск, Россия

Состояние зеленой массы деревьев является показателем загрязнения воздуха вдоль автомобильной дороги. Выделяется шесть состояний зеленой массы. Степень принадлежности к этим состояниям описывается с позиций теории нечетких множеств. Функции принадлежности строятся методом экспертных оценок и подбирается аналитическая зависимость.
***Ключевые слова и фразы*:** загрязнение воздуха; состояния деревьев; процент повреждения зелёной массы; нечёткие множества; функции принадлежности; метод балльных оценок; коэффициент конкордации; экспертная система

The use of fuzzy set theory in the analysis of the ecological status of roadside space

T.V. Gavrilenko[1], O.V. Admaev[2]

1Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia
2 Krasnoyarsk Institute of Railway Engineering Branch of Irkutsk State Transport University, Krasnoyarsk, Russia

State of green mass of trees is an indicator of air pollution along the road. There are six states of green mass. Degree of membership to these states is described according to the theory of fuzzy sets. Membership functions are built by expert assessments and selected analytical dependence.
***Key words*:** air pollution, the state tree, damage to the green mass of trees, fuzzy set, membership function, coefficient of concordation, expert system

ВВЕДЕНИЕ

Автомобильные дороги относятся к объектам экологической опасности, так как они воздействуют на окружающую среду посредством шума, вибраций и выбросов различных веществ. Их экологически безопасное состояние характеризуется не только техническим состоянием самой дороги и дорожных сооружений, но и уровнем загрязнения природной среды на придорожной территории.

Одним из экологически значимых показателей безопасности автомобильной дороги является состояние деревьев в придорожной полосе (ОДН 218.5.016-2002). В районах устойчивого загрязнения атмосферного воздуха вредными выбросами наблюдается явление, называемое дефолиацией - осветление, изреживание крон деревьев вследствие потери листвы и хвои в зеленом состоянии. На основе визуального осмотра выделяют несколько стадий поврежденности древостоев, описываемых как качественными, так и количественными характеристиками. Одной из таких характеристик является процент повреждения зеленой массы растений (Кобельков, Чуканов, Хотин, 2000; Методика, 1998). В соответствии с санитарными правилами в лесах Российской Федерации (Санитарные правила в лесах Российской Федерации, 2005) выделяют шесть состояний зеленой массы деревьев: без признаков ослабления (здоровые), ослабленные, сильно ослабленные, усыхающие, сухостой

текущего года (свежий сухостой) и сухостой прошлых лет (старый сухостой). Этим состояниям зеленой массы деревьев в придорожной полосе можно поставить в соответствие состояния воздуха в придорожном пространстве: «Незагрязненное», «Слабое загрязнение», «Умеренное загрязнение», «Сильное загрязнение», «Очень сильное загрязнение» и «Катастрофическое загрязнение».

Данный показатель имеет нечеткую природу по следующим причинам:

- визуальная оценка степени повреждения зеленой массы является субъективной;
- эксперты могут пользоваться различными методиками экологического мониторинга;
- в придорожной полосе могут присутствовать деревья различных пород, которые в неодинаковой степени восприимчивы к загрязнению придорожной территории.

Следовательно, для оценки экологической безопасности придорожного пространства по состоянию зеленой массы деревьев может быть применена теория нечетких множеств (Семенова, 2006).

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Введем основные понятия теории нечетких множеств, применительно к задаче оценки состояния зеленой массы деревьев в придорожном пространстве на некотором расстоянии s от кромки проезжей части. Пусть X – универсальное множество всевозможных состояний деревьев, характеризуемых процентом повреждения зеленой массы. Элементом $x \in X$ будем называть состояние деревьев, в котором процент повреждения зеленой массы принимает некоторое конкретное значение, например, $x = x^*$. Введем лингвистическую переменную «*Состояние деревьев в придорожном пространстве*». Она может принимать какое-либо значение l_m (терм) из базового терм-множества $L=\{l_0,l_1,\ldots,l_M\}$. В соответствии с методиками введем термы: l_0 = «*Здоровые деревья*», l_1 = «*Ослабленные деревья*», l_2 = «*Сильно ослабленные деревья*», l_3 = «*Усыхающие деревья*», l_4 = «*Свежий сухостой*», l_5 = «*Старый сухостой*» (Кобельков, Чуканов, Хотин, 2000; Методика, 1998).

Таким образом, в рассматриваемой постановке задачи выделены шесть видов состояний деревьев, представляющих собой шесть нечетких множеств $A_m \subset X$, m=0,…,5. Нечеткое множество A_m – это множество упорядоченных пар $(x \mid \mu_{Am}(x))$, $\forall x \in X$, где $\mu_{Am}(x)$ – функция принадлежности, принимающая любое значение в интервале [0,1]. Значение функции принадлежности при $x=x^*$ называется степенью принадлежности этого элемента нечеткому множеству A_m.

Одна из трудностей в использовании теории нечетких множеств заключается в подборе функций принадлежности. При их построении обычно используют методы экспертных оценок и статистические данные. В случае дефицита информации относительно особенностей функции принадлежности применяют наиболее простые ее формы – кусочно-линейные треугольные или трапециевидные функции (Семенова, 2006). В данной работе применяется алгоритм построения функций принадлежности на основе метода балльных оценок, который базируется на заполнении опросных листов экспертами. В опросном листе диапазон возможных значений элемента x разбивается на N интервалов и эксперт должен указать свое мнение о наличии у элемента x, принимающего значения из n-го интервала, признаков нечеткого подмножества A_m (Беляев, Юшков, Кычкин, Рукавишникова, 2005).

Пусть K – количество экспертов; x_n – значение элемента x из n-го интервала; $\alpha_{n,m}^k$ – мнение k-го эксперта о соответствии x_n признакам нечеткого подмножества A_m; где k = 1, 2, …, K; n = 1, 2, …, N. Экспертные оценки $\alpha_{n,m}^k \in [0,1]$. Значение 0 проставляется экспертом, если он считает, что x_n не соответствует признакам, 1 – если соответствует. В том случае, когда x_n может быть отнесено к нескольким подмножествам A_m, оценки $\alpha_{n,m}^k$ принимают дробное значение с соблюдением условия

$$\sum_{m=0}^{5} \alpha_{n,m}^{k} = 1.$$

По результатам опроса степени принадлежности нечеткому множеству A_m рассчитываются по формуле

$$\mu_{Am}(x_n) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^{K} \alpha_{n,m}^{k} . \qquad (1)$$

Один из недостатков метода экспертных оценок заключается в том, что в ответах специалистов в значительной мере присутствует субъективный фактор, обусловленный уровнем их квалификации, принадлежностью к той или иной научной школе, опытом работы и т.п. Его влияние может быть снижено путем формализации знаний, т.е. при заполнении опросных листов ответы формулируются не отдельными специалистами, а строятся в соответствии с показателями, изложенными в различных методиках экологического мониторинга. В этом случае количество опросных листов зависит от количества используемых методик и способов оценки состояний зеленой массы деревьев.

Ответы экспертов строятся на основании методик (Кобельков, Чуканов, Хотин, 2000; Методика, 1998). Согласно этим документам к здоровым деревьям относятся растения без видимых признаков ослабления, со степенью дефолиации, не превышающей 5 %. К старому сухостою – деревья с полностью осыпавшейся листвой или хвоей, то есть у которых дефолиация составляет 100 %. Согласно методике экологического мониторинга (Методика, 1998) ослабленными считаются деревья, с площадью повреждений хвои или листвы, не превышающей 30-40 %; сильно ослабленными – с повреждением и усыханием до 60-70 %; усыхающими – более 70-80 %; свежим сухостоем – деревья с желтой и бурой хвоей или без нее. При этом порода дерева не уточняется. Во второй методике классификация состояний дается по отдельным породам деревьев: сосне обыкновенной, ели обыкновенной, березе повислой и осине (Кобельков, Чуканов, Хотин, 2000).

Ответы первого эксперта будут строиться по методике экологического мониторинга (Методика, 1998), а ответы второго, третьего, четвертого и пятого экспертов – по второй методике для разных пород деревьев (Кобельков, Чуканов, Хотин, 2000).

Ответы второго эксперта базируются на классификации состояний, проведенной по сосне обыкновенной. Ослабленными считаются деревья со степенью дефолиации 11-20 %; сильно ослабленными – 21-40 %; усыхающими – 50-70 %; свежим сухостоем – 80-100 %.

Ответы третьего эксперта формулируются в соответствии с классификацией состояний, проведенной по ели обыкновенной. Ослабленными считаются деревья со степенью дефолиации 11-20 %; сильно ослабленными – 30-50 %; усыхающими – 60-75 %; свежим сухостоем – 80-100 %.

Ответы четвертого эксперта строятся на классификации состояний, проведенной по березе повислой. Ослабленными считаются деревья со степенью дефолиации 10-20 %; сильно ослабленными – 30-60 %; усыхающими – 0-85 %; свежим сухостоем –100 %.

Ответы пятого эксперта соответствуют классификации состояний, проведенной по осине. Ослабленными считаются деревья со степенью дефолиации 10-30 %; сильно ослабленными – 30-40 %; усыхающими – 60-80 %; свежим сухостоем – 80-100 %.

В табл. 1 приведены опросные листы. Диапазон возможных значений процента повреждения зеленой массы разбит на интервалы: I_1=[0,10); I_2=[10,20); I_3=[20,30); I_4=[30,40); I_5=[40,50); I_6=[50,60); I_7=[60,70); I_8=[70,80); I_9=[80,90); I_{10}=[90,100]. Круглые и квадратные скобки означают открытость и замкнутость интервалов на своих границах соответственно. Для состояния, описываемого термом l_0 = «*Здоровые деревья*», ответы всех 5 экспертов совпадают.

Таблица 1 – Опросные листы

Эксперт	Терм	Процент поражения зеленой массы, x									
		I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6	I_7	I_8	I_9	I_{10}
1-5	l_0	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	l_1	0,5	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	l_2	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0
	l_3	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0,33
	l_4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,33
	l_5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,33
2	l_1	0,5	1	0,5	0	0	0	0	0	0	0
	l_2	0	0	0,5	1	1	0	0	0	0	0
	l_3	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0
	l_4	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0,5
	l_5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,5
3	l_1	0,5	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	l_2	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0
	l_3	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
	l_4	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0,5
	l_5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,5
4	l_1	0,5	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	l_2	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0
	l_3	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
	l_4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,5
	l_5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,5
5	l_1	0,5	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	l_2	0	0	0	0	1	1	0,5	0	0	0
	l_3	0	0	0	0	0	0	0,5	1	0,5	0
	l_4	0	0	0	0	0	0	0	0	0,5	0,5
	l_5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,5

В табл. 2. представлены результаты обработки ответов. Верхний ряд чисел – это сумма баллов, проставленных за принадлежность нечеткому множеству A_m элемента $x \in X$ при соответствующем значении x_n. Нижний ряд чисел – степени принадлежности, рассчитанные по формуле (1).

Таблица 2 – Результаты обработки ответов

Терм	Положи-тельные ответы	Процент поражения зеленой массы, x									
		I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6	I_7	I_8	I_9	I_{10}
l_0	Сумма баллов	2,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Степень принадлежности	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
l_1	Сумма баллов	2,5	5	4,5	2	0	0	0	0	0	0
	Степень принадлежности	0,5	1	0,9	0,4	0	0	0	0	0	0
l_2	Сумма баллов	0	0	0,5	3	5	4	2,5	0	0	0
	Степень принадлежности	0	0	0,1	0,6	1	0,8	0,5	0	0	0
l_3	Сумма баллов	0	0	0	0	0	1	2,5	5	2,5	0,33

	Степень принадлежности	0	0	0	0	0	0,2	0,5	1	0,5	0,06
l_4	Сумма баллов	0	0	0	0	0	0	0	0	2,5	2,33
	Степень принадлежности	0	0	0	0	0	0	0	0	0,5	0,47
l_5	Сумма баллов	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,33
	Степень принадлежности	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,47

Определим степень согласованности вариантов ответов, данных разными экспертами, с помощью коэффициента конкордации (Добров, Ершов, Левитин, Смирнов, 1974; Адмаев, Гавриленко, 2005).

$$W = \frac{12\sum_{n=1}^{N}(S_n - \bar{S})^2}{K^2 \cdot (N^3 - N) - K\sum_{k=1}^{K} T_k}, \qquad (2)$$

где S_n – сумма рангов, присвоенных n-му фактору всеми экспертами, N – число оцениваемых факторов, K – общее число экспертов.

Параметры S_n, T_k вычисляются по формулам

$$S_n = \sum_{k=1}^{K} R_{nk}, \qquad \bar{S} = \frac{\sum_{n=1}^{N} S_n}{N}, \qquad T_k = \sum_{j=1}^{J_k}\left(t_{kj}^3 - t_{kj}\right),$$

где R_{nk} – ранг, присвоенный n-му фактору k-м экспертом, J_k – число групп одинаковых рангов в ранжированном ряду, представленных k-м экспертом, j – порядковый номер группы с совпавшими (равными) рангами, t_{kj} – число равных рангов в ответах k-го эксперта в группе с номером j. Значения коэффициента конкордации находятся в пределах от 0 до 1.

Чтобы воспользоваться данным методом, необходимо провести ранжирование вариантов ответов по убыванию. При этом интервалы I_n (n = 1,…,10) выступают в качестве оцениваемых факторов. В каждом ранжированном ряду имеется четыре группы одинаковых рангов – 1; 0,5; 0,33 и 0. Следовательно, J_k = 4; k = 1, 2, …, 5. Значения рангов, принадлежащих j-й группе в ранжировке k-го эксперта, равны среднему арифметическому порядковых номеров членов ранжированного ряда ответов эксперта. Например, в варианте ответа первого эксперта, данного по ослабленному состоянию деревьев, интервалы I_2, I_3, I_4, получившие 1 балл, относятся к первой группе и имеют ранг (1+2+3)/3=2. Интервал I_1 получил 0,5 балла. Он относится ко второй группе и имеет ранг 4. Интервалов, имеющих 0,33 балла нет, следовательно, третья группа отсутствует. Интервалы с I_5 по I_{10} получили 0 баллов, следовательно, они относятся к четвертой группе и имеют ранг (5+6+7+8+9+10)/6=7,5.

Расчеты, выполненные по формуле (2), показали, что коэффициент конкордации для ослабленного состояния древостоев составил 0,88; сильно ослабленного – 0,62; усыхающего – 0,63; свежего сухостоя – 0,81. Коэффициенты конкордации для состояний «*Здоровые деревья*» и «*Старый сухостой*» равны 1. В целом, степень согласованности ответов экспертов, построенным по методикам (Кобельков, Чуканов, Хотин, 2000; Методика, 1998), можно считать хорошей.

Достоверность совпадения мнений оценивается по критерию χ^2. Рассчитываемый по формуле

$$\chi^2 = W \cdot (N-1) \cdot K. \qquad (3)$$

параметр сравнивается с табличным значением (Горелова, Кацко, 2005). При уровне значимости 0,05 и числе степеней свободы (N-1) = (10-1) = 9 табличное значение критерия составляет 16,9. Вычисленные по формуле (3) значения критерия составляют $\chi_0^2 = 45$; $\chi_1^2 = 39{,}5$

; $\chi_2^2 = 28{,}1$; $\chi_3^2 = 28{,}3$; $\chi_4^2 = 36{,}4$; $\chi_5^2 = 45$. Нижний индекс означает номер состояния деревьев. Так как вычисленные по формуле (3) значения существенно превосходят табличное, то с вероятностью 0,95 можно считать, что совпадение мнений экспертов не является случайным.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис 1. приведены графики функций принадлежности, построенные по данным табл. 2.

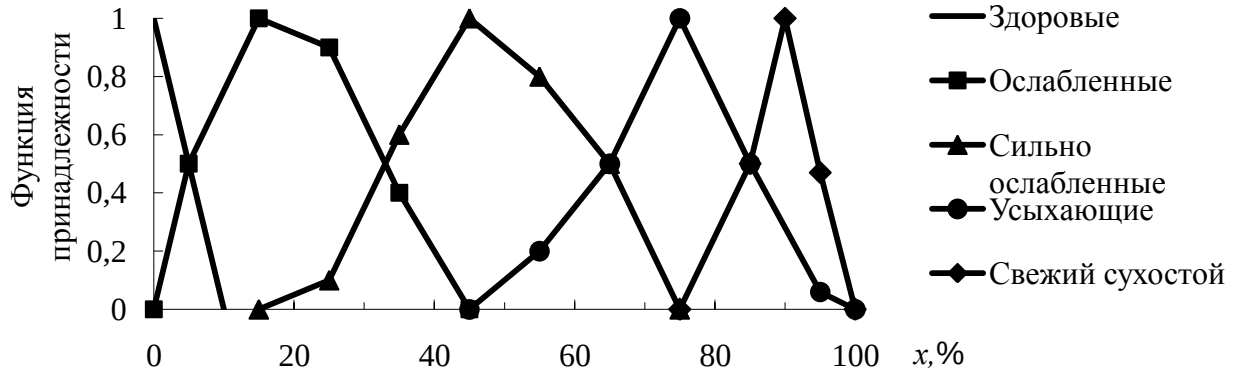

Рисунок 1 - Функции принадлежности к нечетким множествам состояний древостоев

Данные функции принадлежности можно аппроксимировать аналитической зависимостью

$$f(x,a,b,c) = c \cdot e^{\frac{(x-a)^2}{b}} \qquad (4)$$

с соответствующими коэффициентами *a*, *b* и *c* (Семенова, 2006). Коэффициенты находятся по методу наименьших квадратов, в котором сумма квадратов отклонений экспериментальных точек (ответы эксперта) от сглаживающей кривой обращается в минимум:

$$\sum_{n=1}^{N} \left[y(x_n) - f(x_n, a, b, c) \right]^2 \to \min .$$

Сначала определяются грубые значения искомых параметров a_0, b_0, c_0, а затем производится их уточнение, то есть находятся поправки Δa, Δb, Δc (Демидович, Марон, Шувалова, 1967). Тогда

$$\begin{cases} a = a_0 + \Delta a, \\ b = b_0 + \Delta b, \\ c = c_0 + \Delta c. \end{cases}$$

Поправки считаются малыми. Параметры функции (4) уточняются до тех пор, пока относительная среднеквадратическая погрешность, определяемая по зависимости

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{N} \left[\frac{y(x_n) - f(x_n, a, b, c)}{y_{\max}} \right]^2}{N}} ,$$

не становится минимальной.

Вычисленные параметры функций и величина погрешности приведены в табл. 3.

Таблица 3 – Параметры аппроксимирующей функции и погрешность аппроксимации

Состояние	Параметры аппроксимирующей функции			Погрешность аппроксимации, %
	a	*b*	*c*	
Ослабленное	19,6	-210	1,05	6,5
Сильно ослабленное	48,5	-319	1,002	5,2
Усыхающее	74,7	-164	0,975	3,6
Свежий сухостой	89,9	-33,3	1,007	1,4

На рис. 2-5 приведены аппроксимирующие функции для четырех состояний деревьев

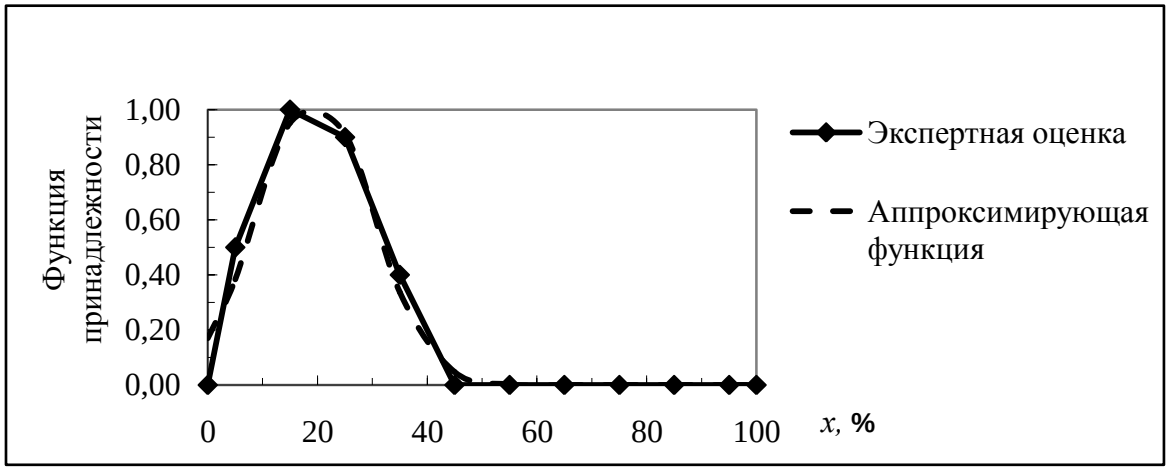

Рисунок 2 – Функции принадлежности к множеству «Ослабленные деревья»

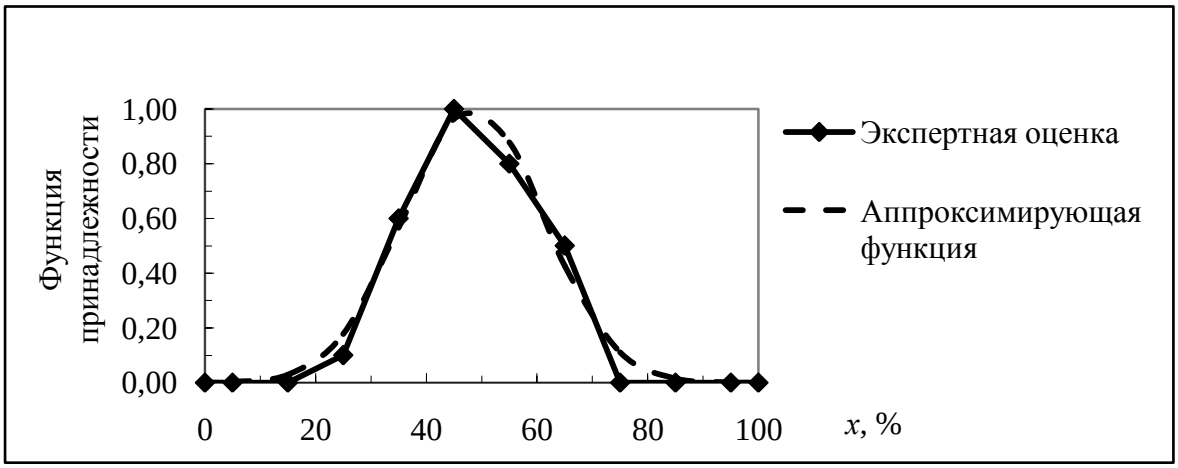

Рисунок 3 – Функции принадлежности к множеству «Сильно ослабленные деревья»

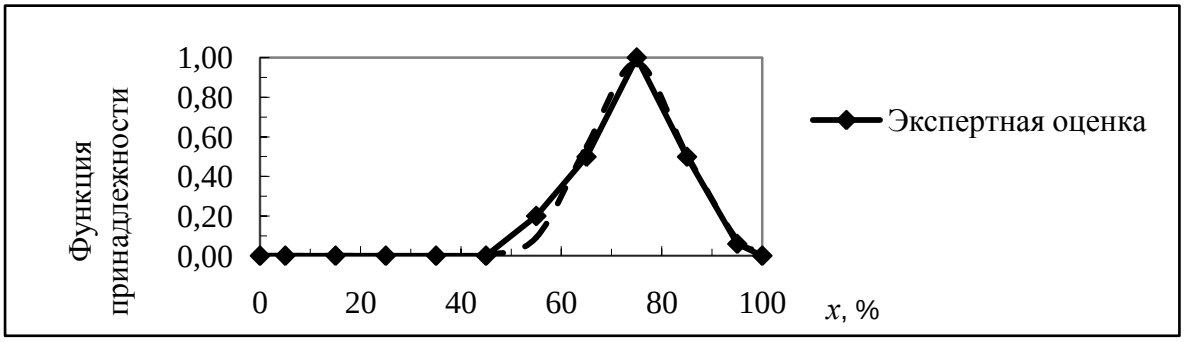

Рисунок 4 – Функции принадлежности к множеству «Усыхающие деревья»

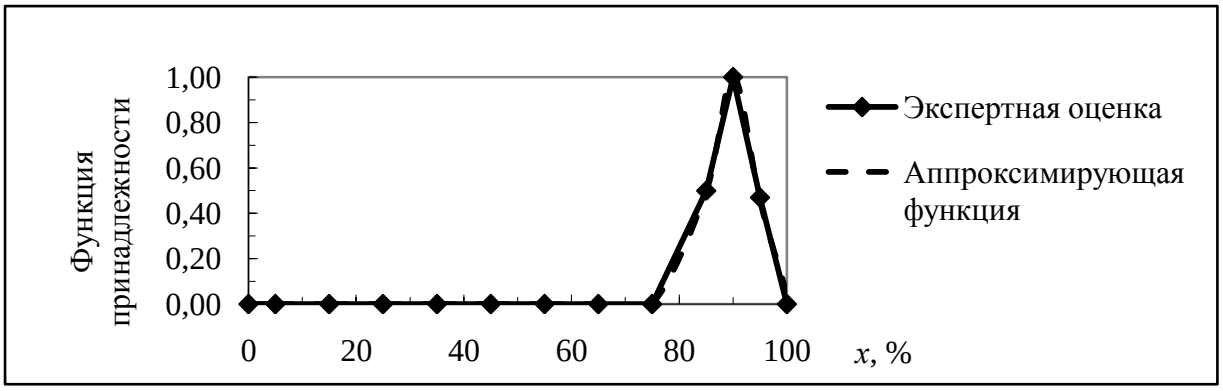

Рисунок 5 – Функции принадлежности к множеству «Свежий сухостой»

Из рис. 2-5 и табл. 3 видно, что аппроксимирующие функции вида (4) хорошо описывают функции принадлежности к рассматриваемым нечетким множествам состояний деревьев. Погрешность аппроксимации не превышает 7 %.

Данные функции могут быть использованы при построении экспертной системы, оценивающей экологическое состояние придорожного пространства автомобильной дороги или городской улицы (Адмаев, Гавриленко, 2009).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Показатели и нормы экологической безопасности автомобильной дороги. ОДН 218.5.016-2002 /Министерство транспорта РФ. – М., 2003. – 46 с.

Кобельков, М.Е. Категории состояния основных лесообразующих пород Московской области / М.Е. Кобельков, М.А. Чуканов, Д.В. Хотин – М., 2000. – 40 с.

Кобельков, М.Е. Проект ФОРЕСТ. Фото галерея / М.Е. Кобельков, М.А. Чуканов, Д.В. Хотин – http: //forest.akadem.ru/projects/c2/r-gallery/ks/e101.html

Методика экологический мониторинг. Хлорозы и некрозы деревьев: экологические тесты для общественного экологического мониторинга. – Пущино: ОНТИ ПНЦ РАН, 1998.

Санитарные правила в лесах Российской Федерации: [утв. приказом Министерства природных ресурсов России от 27.12.2005 № 350]. – М., 2005.

Семенова, Д.В. Нечеткие множества: теория и практика: учеб. пособие / Д.В. Семенова. – Красноярск: Красноярский гос. ун-т, 2006. – 245 с.

Беляев, Д.С. Разработка и апробация метода оценки технического состояния грунтов земляного полотна транспортных сооружений / Д.С. Беляев, Б.С. Юшков, В.И. Кычкин, Н.Е. Рукавишникова // Дороги России XXI века. – 2005. – № 3. – С. 76-80.

Экспертные оценки в научно-техническом прогнозировании / Г.М. Добров, Ю.В. Ершов, Е.И. Левитин, Л.П. Смирнов. – Киев: Наукова думка, 1974. – 160 с.

Адмаев, О.В. Применение метода конкордации для оценки изменений качественного состояния экологических систем / О.В. Адмаев, Т.В. Гавриленко // Лесной журнал. – 2005. – № 1-2. – С. 33-37. – (Изв. высш. учеб. заведений).

Горелова, Г.В. Теория вероятностей и математическая статистика в примерах и задачах с применением Excel: учеб. пособие для вузов / Г.В. Горелова, И.А. Кацко. – Ростов н/Д: Феникс, 2005. – 480 с.

Демидович, Б.П. Численные методы анализа / Б.П. Демидович, И.А. Марон, Э.З. Шувалова. – М.: Наука, 1967. – 368 с.

Адмаев, О.В. Экспертная система оценки загрязнения атмосферы как инструмент экологического контроля и техническое средство наблюдения и мониторинга окружающей среды / О.В. Адмаев, Т.В. Гавриленко // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2009. Отдельн. вып. 18. – С. 210-214.