

## **ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ ПРИ ОЦЕНКЕ СЛОЖНЫХ ИНВЕСТИЦИОННЫХ ПРОЕКТОВ**

**А.И. Шипилина, И.А. Беспалов**

*Сибирский государственный университет путей сообщения*

### **Аннотация**

Рассматриваются вопросы оценки ожидаемой эффективности крупномасштабных инвестиционных проектов, реализуемых в условиях неопределенности и риска. Предлагается подход к выбору предпочтительной альтернативы из числа конкурирующих при принятии инвестиционного решения. Данный подход базируется на принципах системного анализа, теории нечетких множеств и экспертных технологиях. Особое внимание уделено анализу затрат по проекту, находящемуся на стадии предпроектного замысла, и их колебанию в зависимости от степени риска. Все расчеты демонстрируются на условном примере «проект развития транспортной сети Крайнего Севера России и Дальнего Востока».

**Ключевые слова:** инвестиционный проект, эффективность, неопределенность, эксперт, затраты, альтернативы, теория нечетких множеств, терм-множество

### **Abstract**

The paper considers the issues of how to assess the efficiency of the large-scale investment projects. We offer an approach to choosing a preferred project among competitive ones when making a decision on the selection of an investment project. The approach is grounded upon both the principals of system analysis applied in the fuzzy sets theory and expert technologies. Our special focus is on how to assess the investment costs and their fluctuations depending on investment risks while the preproject analysis is being carried out. To make

our calculation, we use a simulated case-study on «Transportation Network Project for Russian Far North and Far East».

**Keywords:** investment project, efficiency, uncertainty, expert, costs, alternative, fuzzy sets theory, term set

## ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Существующие методики оценки эффективности инвестиционных проектов, как правило, основаны на количественных оценках и учитывают только экономическую выгоду от реализации проекта. Но при стратегическом планировании, когда проект как инвестиционная операция находится на уровне проектного замысла, нельзя опираться только на баланс денежных потоков (затраты-доходы), генерируемых тем или иным проектом из числа конкурирующих. Во-первых, объем имеющейся на этом этапе информации ограничен и носит прогнозный, т.е. вероятностный, характер, а во-вторых, крупномасштабные инвестиционные проекты кроме реализации поставленной экономической цели чаще всего порождают и внешние эффекты (экстерналии) – социальные, военно-стратегические, политические, экологические, которые не могут быть измерены количественно (по крайней мере в денежном выражении). В результате при использовании методов определения только экономической эффективности возникает риск выбора общественно малоэффективного проекта или проект, признанный полезным для общества, оказывается убыточным, поскольку достигнутые в ходе инвестиционного и эксплуатационного процессов значения его параметров отклоняются от предполагаемых либо некоторые факторы вообще не учитываются при оценке [1, 2].

Кроме того, большинство рекомендаций по экономической оценке инвестиционных проектов основываются на допущении, что проект будет реализован в запланированный срок и полученный результат окажется полезным в той же степени, в какой это предполагалось по первоначальному замыслу, что государственная политика в отношении проекта в течение всего его жизненного цикла будет благоприятной, рыночная конъюнктура – «дружественной» и т.д. Для крупномасштабных инвестиционных проектов выполнение всех этих условий на практике маловероятно, так как в силу своей сложности и долговременности реализации они в большей степени зависят от измен-

чивых факторов внешней среды, и предсказать на стадии предварительных оценок, как повлияют эти факторы на проект и его эффективность при осуществлении, затруднительно.

Изменчивость и нестабильность внешней среды проекта порождают неопределенность, которая увеличивает риск при принятии инвестиционных решений. Устранить неопределенность полностью невозможно, но можно снизить ее уровень. Как это сделать практически, не ясно, так как в действующих методических рекомендациях проблемы учета фактора неопределенности при оценке ожидаемой эффективности проекта лишь обозначены, но конструктивные пути решения не указаны.

В связи с вышесказанным в последние годы актуализировалась проблематика оценки эффективности крупномасштабных инвестиционных проектов. Стало очевидным, что использование существующих методик оценки проектов этого класса приводит к риску принятия ошибочного инвестиционного решения. Поэтому в данной статье представлен один из путей решения проблемы принятия обоснованного инвестиционного решения с помощью комплексной методики, базирующейся на принципах системного анализа, теории нечетких множеств и экспертных технологиях. Основные идеи предлагаемой методики оценки ожидаемой эффективности далее будут проиллюстрированы на конкретном примере с условным названием «проект развития транспортной сети Крайнего Севера России и Дальнего Востока».

### **КОНКРЕТИЗАЦИЯ ПРОБЛЕМЫ И ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЕЕ РЕШЕНИЯ**

Будем рассматривать три альтернативных варианта развития транспортной сети Крайнего Севера России и Дальнего Востока на трассе Салехард – Берингов пролив<sup>1</sup>:

---

<sup>1</sup> Данный пример отражает одну из многочисленных проблемных ситуаций, возникающих при транспортном освоении Сибири и Дальнего Востока, и выбран для иллюстрации излагаемого в статье подхода ввиду четко обозначившейся в по-

- морскую альтернативу – реконструкцию Северного морского пути ( $A_1$ );
- железнодорожную традиционную – строительство традиционной железнодорожной магистрали ( $A_2$ );
- железнодорожную прогрессивную – сооружение струнной железной дороги Юницкого ( $A_3$ ).

Для выбора предпочтительной альтернативы будем сравнивать их по четырем критериям: 1) уровень затрат<sup>2</sup> ( $K_1$ ); 2) объем перевозок ( $K_2$ ); 3) близость к источникам сырья ( $K_3$ ); 4) близость к населенным пунктам ( $K_4$ ).

Применительно к рассматриваемому проекту выделим лингвистические переменные  $X_{ij}$ , где  $i$  – номер альтернативы;  $j$  – номер критерия [3]. Определим диапазон для всех лингвистических переменных как  $U_i = [0, 1]$  при  $i = 1, \dots, 3$ ;  $j = 1, \dots, 4$ .

Множества значений лингвистических переменных (терм-множества) по каждому из критериев сформулируем следующим образом:

$$T(X_{i1}) = \text{существенные (примерно 2500 млрд руб.)} + \\ + \text{высокие (примерно 2000 млрд руб.)} + \\ + \text{средние (примерно 1500 млрд руб.)} + \\ + \text{низкие (примерно 1000 млрд руб.)} + \\ + \text{незначительные (примерно 500 млрд руб.);}$$

$$T(X_{i2}) = \text{незначительные} + \text{низкие} + \\ + \text{средние} + \text{высокие} + \text{существенные};$$

$$T(X_{i3}) = \text{далеко} + \text{сильно удаленно} + \\ + \text{средне удаленно} + \text{недалеко} + \text{близко};$$

$$T(X_{i4}) = \text{далеко} + \text{сильно удаленно} + \\ + \text{средне удаленно} + \text{недалеко} + \text{близко}.$$

Нечеткие переменные каждого терм-множества будем использовать как качественные оценки альтернатив по одному из критериев.

следнее время ориентации экономики страны на «восточный вектор» и освоение российской части шельфа Северного Ледовитого океана.

<sup>2</sup> Под затратами здесь и в дальнейшем будут пониматься расходы по всему жизненному циклу проекта, т.е. капитальные плюс эксплуатационные.

Таблица 1

Экспертные оценки альтернатив по критериям

Критерий	Альтернатива	Эксперты, №											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$K_1$	$A_1$	1	2	2	3	2	1	3	3	3	2	3	2
	$A_2$	3	2	3	3	3	3	4	3	3	3	3	3
	$A_3$	4	4	4	4	4	4	4	4	4	5	4	5
$K_2$	$A_1$	5	4	3	4	5	3	3	4	5	2	4	5
	$A_2$	4	5	3	4	3	4	4	5	5	3	4	4
	$A_3$	3	3	2	1	2	3	4	2	3	4	1	1
$K_3$	$A_1$	5	3	2	5	5	4	2	1	3	4	5	4
	$A_2$	4	3	4	5	4	3	4	4	5	3	3	2
	$A_3$	3	5	5	5	4	3	3	5	1	3	3	2
$K_4$	$A_1$	2	2	2	2	1	1	2	3	1	2	1	1
	$A_2$	4	4	5	3	5	3	4	5	2	4	4	3
	$A_3$	4	5	4	4	4	5	3	4	2	3	5	3

Для получения оценок рассматриваемых альтернатив применим метод экспертных оценок [4] и проведем опрос экспертной группы в составе 12 специалистов<sup>3</sup>. С целью упрощения работы экспертов введем следующие ранговые оценки нечетких переменных: существенные = 5; высокие = 4; средние = 3; низкие = 2; незначительные = 1; далеко = 1; сильно удаленно = 2; средне удаленно = 3; недалеко = 4; близко = 5. Согласованность экспертов проверялась стандартными методами. Результаты экспертного опроса представлены в табл. 1.

Функции совместимости лингвистических переменных «существенные», «высокие», «средние», «низкие», «незначительные» представляют собой нечеткие подмножества множества  $U_i = [0, 1]$  следующего вида [5]:

<sup>3</sup> Состав экспертной группы не имеет существенного значения для настоящего примера, поэтому останавливаться подробно на данном моменте не будем.

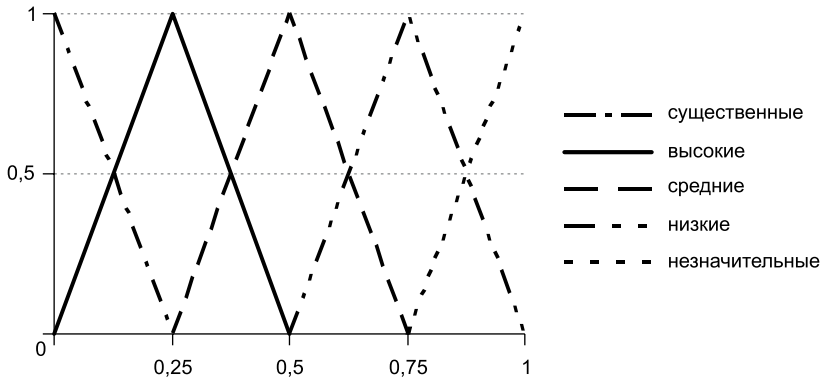


Рис. 1. Области совместимости переменных

$$M(\text{существенные}) = \int_0^{0,25} (1 - 4u)/u; \quad (1)$$

$$M(\text{высокие}) = \int_0^{0,25} (4u)/u + \int_{0,25}^{0,5} (-4u + 2)/u; \quad (2)$$

$$M(\text{средние}) = \int_{0,25}^{0,5} (4u - 1)/u + \int_{0,5}^{0,75} (-4u + 3)/u; \quad (3)$$

$$M(\text{низкие}) = \int_{0,5}^{0,75} (4u - 2)/u + \int_{0,75}^1 (-4u + 4)/u; \quad (4)$$

$$M(\text{незначительные}) = \int_{0,75}^1 (4u - 3)/u. \quad (5)$$

Области совместимости переменных представлены на рис. 1.

Обратное выражение нечетких переменных через совместимость [5] определим как

$$U(\text{существенные}) = \int_0^1 \frac{1 - m}{4} / m; \quad (6)$$

$$U(\text{высокие}) = \int_0^1 \frac{m}{4} / m + \int_0^1 \frac{2-m}{4} / m; \quad (7)$$

$$U(\text{средние}) = \int_0^1 \frac{m+1}{4} / m + \int_0^1 \frac{3-m}{4} / m; \quad (8)$$

$$U(\text{низкие}) = \int_0^1 \frac{m+2}{4} / m + \int_0^1 \frac{4-m}{4} / m; \quad (9)$$

$$U(\text{незначительные}) = \int_0^1 \frac{m+3}{4} / m. \quad (10)$$

Для лингвистических переменных из терм-множеств  $T(X_{i2})$ ,  $T(X_{i3})$ ,  $T(X_{i4})$  функции совместимости рассчитываются аналогичным образом (формулы (1)–(5)) и поэтому здесь рассматриваться не будут.

### **ЧИСЛОВЫЕ РАСЧЕТЫ И ВЫЯВЛЕНИЕ ПРЕДПОЧТИТЕЛЬНОЙ АЛЬТЕРНАТИВЫ**

На основании формул (6)–(10) найдем числовые значения нечетких переменных, отражающих экспертные оценки (табл. 2), предполагая, что уровень совместимости  $m = 1$ .

Используя усредненные оценки альтернатив по каждому из критериев, сформируем матрицу средних оценок (оценочную матрицу) [6] (табл. 3).

Ввиду того, что критерии имеют различную важность относительно достижения целей проекта, определим их коэффициенты относительной важности с помощью метода попарного сравнения [7] (табл. 4).

Вычислим собственные элементы матрицы [8] (см. табл. 4), которые будут равны  $\{0,57; 0,24; 0,13; 0,06\}$ . Тогда коэффициенты относительной важности критериев

$$a_1 = 0,57 \cdot 4 = 2,28; a_2 = 0,24 \cdot 4 = 0,96;$$

$$a_3 = 0,13 \cdot 4 = 0,52; a_4 = 0,06 \cdot 4 = 0,24.$$

Таблица 2

**Числовые значения экспертных оценок по критериям**

Критерий	Альтернатива	Эксперты, №												Среднее
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
$K_1$	$A_1$	1	0,75	0,75	0,5	0,75	1	0,5	0,5	0,5	0,75	0,5	0,75	0,69
	$A_2$	0,5	0,75	0,5	0,5	0,5	0,5	0,25	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
	$A_3$	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0	0,25	0	0,25
$K_2$	$A_1$	1	0,75	0,5	0,75	1	0,5	0,5	0,75	1	0,25	0,75	1	0,73
	$A_2$	0,75	1	0,5	0,75	0,5	0,75	0,75	1	1	0,5	0,75	0,75	0,75
	$A_3$	0,5	0,5	0,25	0	0,25	0,5	0,75	0,25	0,5	0,75	0	0	0,35
$K_3$	$A_1$	1	0,5	0,25	1	1	0,75	0,25	0	0,5	0,75	1	0,75	0,65
	$A_2$	0,75	0,5	0,75	1	0,75	0,5	0,75	0,75	1	0,5	0,5	0,25	0,67
	$A_3$	0,5	1	1	1	0,75	0,5	0,5	1	0	0,5	0,5	0,25	0,63
$K_4$	$A_1$	0,25	0,25	0,25	0,25	0	0	0,25	0,5	0	0,25	0	0	0,17
	$A_2$	0,75	0,75	1	0,5	1	0,5	0,75	1	0,25	0,75	0,75	0,5	0,71
	$A_3$	0,75	1	0,75	0,75	0,75	1	0,5	0,75	0,25	0,5	1	0,5	0,71

Таблица 3

**Матрица средних оценок**

Альтернатива	Критерии			
	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$
$A_1$	0,69	0,73	0,65	0,17
$A_2$	0,5	0,75	0,67	0,71
$A_3$	0,2	0,35	0,63	0,71

Таблица 4

**Матрица попарных сравнений критериев**

Критерий	Критерии			
	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$
$K_1$	1	7	5	3
$K_2$	1/7	1	5	5
$K_3$	1/5	1/5	1	7
$K_4$	1/3	1/5	1/7	1



## Модификация нечеткого множества оценок экспертов

Критерий	Альтернативы		
	$A_1$	$A_2$	$A_3$
$K_1^{2,28}$	0,429	0,206	0,025
$K_2^{0,96}$	0,488	0,519	0,091
$K_3^{0,52}$	0,374	0,401	0,349
$K_4^{0,24}$	0,018	0,458	0,458

Произведем модификацию нечеткого множества оценок критериев, данных экспертами, посредством возведения в степень, соответствующую коэффициенту относительной важности критерия (табл. 5).

Вычислим необходимое для выбора предпочтительной альтернативы множество  $D$  исходя из следующей формулы:

$$D = K_1 \cap K_2 \cap K_3 \cap K_4 = \{0,018; 0,206; 0,025\}. \quad (11)$$

Таким образом, из формулы (11) видно, что максимальное значение принадлежности имеет альтернатива  $A_2$  – строительство традиционной железнодорожной магистрали, поэтому ей следует отдать предпочтение в качестве возможного варианта развития транспортной сети Крайнего Севера России и Дальнего Востока.

## УТОЧНЕНИЕ УРОВНЯ ЗАТРАТ ПО ПРОЕКТУ

Для проведения углубленного анализа затрат будем опираться на имеющуюся исходную информацию и получаемые в ходе экспертного опроса оценки<sup>4</sup>. Для того чтобы отображение шкалы нечеткого множества на количественную шкалу цен было математически точ-

<sup>4</sup> Числовые оценки затрат по альтернативам носят ориентировочный характер. Они исчислялись исходя из протяженности соответствующих маршрутов и линий и усредненной стоимости 1 км трассы (по отечественным первоисточникам).

ным, необходимо выполнить правило равных интервалов. С этой целью определим коэффициент отношения ценового интервала к интервалу терм-множества по следующей формуле, в которой вершины отображаются в лингвистических вариантах оценок, представленных экспертами, с одной стороны, и функциях совместимости – с другой:

$$k_{i,i+1} = \frac{p_i - p_{i+1}}{r_{i+1} - r_i}, i = 1, \dots, n-1, \quad (12)$$

где  $k_i$  – коэффициент отношения ценового интервала к интервалу терм-множества  $[i, \dots, i+1]$ ;  $p_i$  – вершина интервала терм-множества;  $r_i$  – вершина интервала нечеткого ценового подмножества;  $n$  – количество вершин ценовых интервалов.

При этом должно соблюдаться следующее равенство:

$$k_{1,2} = k_{2,3} = \dots = k_{n-1,n}. \quad (13)$$

Таким образом, в нашем примере получаем:

$$\begin{aligned} k_{1,2} &= \frac{2500 - 2000}{0,25 - 0} = \frac{500}{0,25}; \\ k_{2,3} &= \frac{2000 - 1500}{0,5 - 0,25} = \frac{500}{0,25}; \\ k_{3,4} &= \frac{1500 - 1000}{0,75 - 0,5} = \frac{500}{0,25}; \\ k_{4,5} &= \frac{1000 - 500}{1 - 0,75} = \frac{500}{0,25}. \end{aligned} \quad (14)$$

Как видно из (14), равенство (13) соблюдается, т.е. предложенные шкалы возможно использовать для взаимобратного отображения.

Исходя из того, что критерий затрат находится в обратной зависимости от привлекательности проекта (чем выше привлекательность, тем ниже затраты), анализ ожидаемых затрат по проекту возможно провести с помощью формулы

$$P = \min(p) + \Delta p \cdot (1 - r), \quad (15)$$

где  $P$  – ожидаемые затраты по альтернативе;  $\min(p)$  – минимальное значение шкалы затрат;  $\Delta p$  – разность между максимальным ( $\max(p)$ ) и минимальным ( $\min(p)$ ) значениями шкалы затрат ( $\Delta p = \max(p) - \min(p)$ );  $r$  – усредненная экспертная оценка альтернативы по критерию  $K_1$  (затраты).

Данная формула позволяет определить точки на шкале затрат в диапазоне от 500 до 2500 млрд руб. (исходя из введенных терм-множеств), используя ранее полученные усредненные экспертные оценки (см. табл. 3).

Так как диапазон шкалы затрат составляет 500–2500 млрд руб., множество интервалов  $p$  в данном случае примет вид

$$p = \{2500; 2000; 1500; 1000; 500\}. \quad (16)$$

Из формулы (16) следует, что  $\min(p) = 500$ ,  $\Delta p = 2000$ .

Опираясь на формулу (15), рассчитаем ожидаемые затраты по альтернативе  $A_1$ :

$$P = 500 + 2000 (1 - 0,69) = 1120 \text{ млрд руб.}$$

Аналогично произведем расчет по остальным альтернативам. Результаты будут следующие:  $A_2 = 1500$  млрд руб.,  $A_3 = 2100$  млрд руб.

В приведенной методике используется экспертная информация, получаемая, предположительно, для наиболее вероятного сценария развития внешней среды анализируемых проектов. Однако в действительности сценарии развития факторов внешней среды точно предсказать практически невозможно, но можно сформулировать гипотезу их колебания от худших для проекта условий (пессимистический сценарий) до лучших (оптимистический сценарий).

Опираясь на аппарат теории нечетких множеств, далее можно сформировать прогноз примерных границ колебания затрат по проектам и рассчитать ориентировочные коэффициенты отражения качественных оценок экспертов на количественную шкалу затрат. Если предположить, что указанные коэффициенты являются вершинами

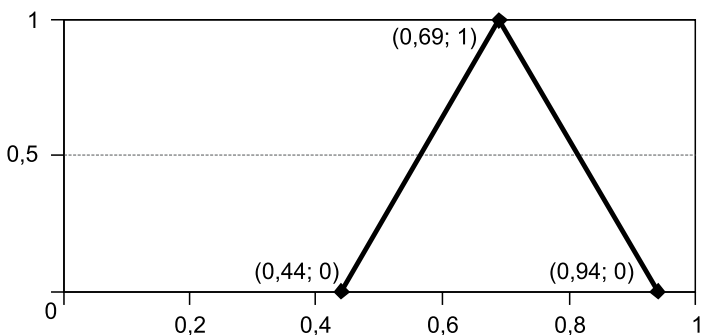


Рис. 2. Графическое представление функции совместимости альтернативы  $A_1$

треугольников некоторой функции совместимости, представленной на рис. 1, то затраты, соответствующие значению 1 по оси ординат, будут иметь место в наиболее вероятном сценарии (рис. 2), а диапазон колебаний примем равным наибольшему интервалу рассматриваемого подмножества. В нашем примере наибольший интервал равняется 0,5, следовательно, для альтернативы  $A_1$ , наиболее вероятное значение которой находится в точке 0,69, крайние значения составят 0,44 ( $0,69 - 0,25$ ) и 0,94 ( $0,69 + 0,25$ ). Произведя расчет по формуле (15), мы получаем, что такая функция пересекает ось абсцисс в точках 1620 млрд руб. (0,44) и 620 млрд руб. (0,94) (см. рис. 2).

Допустим, для альтернативы  $A_1$  была дана оценка<sup>5</sup> ожидаемых затрат в размере 900 млрд руб. при оптимистическом развитии факторов внешней среды. Тогда возможно построить проекцию на полученную функцию, как показано на рис. 3, т.е. мы выявляем нижнюю границу возможных колебаний при заданном прогнозе. Верхнюю границу можно представить как отражение нижней границы на пессимистическую часть функции (где затраты превышают значение в наиболее вероятном сценарии). Таким образом, при заданном прогнозе и песси-

<sup>5</sup> Получена в результате экспертизы либо является просто предположением.

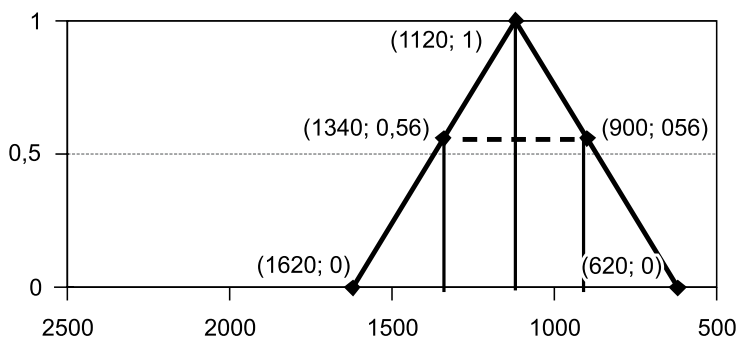


Рис. 3. Графическое представление колебаний альтернативы  $A_1$

мистическом развитии внешней среды мы получаем значение 1340 млрд руб.

Анализируя представленные графики, можно сделать вывод, что чем более предсказуемо поведение внешней среды проекта, тем точнее будет прогноз экспертов, следовательно, тем ближе к значению 1 по оси ординат будет лежать линия колебаний затрат (на рис. 3 – прерывистая).

В нашем примере альтернатива  $A_1$  получила значение 1120 млрд руб. при наиболее вероятном (комбинированном) сценарии развития, 1620 млрд руб. – при пессимистическом и 620 млрд руб. – при оптимистическом [9]. Эти значения могут использоваться для сравнения с другими альтернативами при разной степени неопределенности и риска (значения по оси ординат), а также для сравнения полученных предложенным способом результатов с другими результатами, полученными с помощью иных методик.

Направленное изменение границы колебаний затрат позволяет получать различные результаты с целью анализа проектов при фиксированном уровне неопределенности и риска. Так, при значении по оси абсцисс 1 результаты проекта легко прогнозируемы; при значении 0 результаты сложно спрогнозировать, проект находится в условиях высокой неопределенности.

\* \* \*

Представляется, что предлагаемый подход будет уместен на стадии структуризации инвестиционных намерений и предпроектного анализа, когда на основе слабоструктурированных данных и гипотез принимаются сложные инвестиционные решения, чреватые в случае ошибки в оценке ожидаемой эффективности проекта катастрофическими последствиями для инвестора.

### Литература

1. **Кибалов Е.Б., Кин А.А.** Проблема учета фактора неопределенности при оценке крупномасштабных инвестиционных проектов // Регион: экономика и социология. – 2007. – № 3. – С. 67–91.
2. **Кибалов Е.Б., Горяченко В.И., Хуторецкий А.Б.** Системный анализ ожидаемой эффективности крупномасштабных проектов. – Новосибирск: Изд-во ИЭОПП СО РАН, 2008. – 164 с.
3. **Заде Л.** Понятие лингвистической переменной и ее применение к принятию приближенных решений. – М.: Мир, 1976. – 165 с.
4. **Бурков В.Н., Панкова Л.А., Шнейдерман М.В.** Получение и анализ экспертной информации. – М.: Ин-т проблем управления, 1981. – 50 с.
5. **Минин С.В.** Использование теории расплывчатых множеств для оценки крупномасштабных инвестиционных регионально-транспортных проектов // Регион: экономика и социология. – 2004. – № 4. – С. 144–156.
6. **Кибалов Е.Б., Пахомова Г.Ф.** Стратегический менеджмент: Учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2004. – 160 с.
7. **Саати Т.** Принятие решений: Метод анализа иерархий: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1993. – 320 с.
8. **Козлов В.Н.** Системный анализ, оптимизация и принятие решений: Учеб. пособие. – М.: Проспект, 2010. – 173 с.
9. **Шипилина А.И.** Приполярная железнодорожная магистраль: анализ внутренних и внешних эффектов // Регион: экономика и социология. – 2008. – № 3. – С. 200–206.

Шипилина А.И., Беспалов И.А., 2010