ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕОРИИ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

В. А. Рыбак,
ведущий научный сотрудник ГУ «БелИСА», канд. техн. наук, доцент

С возрастанием антропогенного воздействия на окружающую среду повышается актуальность разработки адекватных систем природоохранных мероприятий. В процессе оптимизации качества окружающей среды возникает проблема оценки эколого-экономической эффективности природоохранных мероприятий. При этом последние оправданно рассматривать с позиций инвестиционных проектов (ИП) и, соответственно, применять к ним имеющиеся подходы и аналитические методы.

В условиях рынка любая экономическая организация в своей деятельности, в том числе и инвестиционной, неизбежно сталкивается с неопределенностью. Фирма (компания) не обладает достаточными (полными) данными о своем настоящем и будущем, она не в состоянии предугадать все изменения, которые могут произойти во внешней среде. Планирование, как одно из составляющих контроллинга бизнес-процессов, служит способом прояснения внутренних условий деятельности, уменьшения неопределенности и риска. Однако любой, даже самой крупной фирме, не по силам полностью устранить неопределенность и, следовательно, целиком спланировать свою деятельность.

Достижение положительных результатов при работе в условиях неопределенности можно осуществить на основе комплексных решений, например, используя такие методы регулирования рыночных отношений, как вертикальная интеграция, контроль над спросом, контрактные отношения, создание предпринимательских сетей и т. д. Их можно отнести к организационным решениям, а также, используя аналитические модели, к планируемым бизнес-процессам в целом, которые позволяют принимать эффективные решения в условиях неопределенности. Следует отметить, что организационные решения хотя и способствуют снижению уровня неопределенности, в то же время придают оставшейся нераскрытой ее части специфические особенности. Поэтому выбор той или иной организационной схемы лишь повлияет на выбор аналитической модели принятия решений в условиях неопределенности, но не исключит ее применение.

Раскрытие неопределенности в стабильной обстановке может осуществляться классическими вероятностно-статистическими методами, но при этом получаются усредненные оценки, имеющие фиктивный характер. В нестабильной ситуации применение статистических методов некорректно, и тогда решения должны приниматься по правилам, соответствующим принципиальным установкам лица, принимающего решения (ЛПР), в отношении феномена неопределенности.

Процесс принятия инвестиционного решения в значительной мере основывается на предположениях о будущих значениях параметров, используемых в анализе, и ожидаемых последствиях от реализации принятого решения. Положение об уникальности и нетиражируемости инвестиционных проектов делает некорректным расчет на использование ретроспективных данных. В условиях рыночной экономики имеет место невоспроизводимость условий хозяйствования, что также делает некорректным генетический перенос решений, вытекающих из прошлого опыта, на будущее.

В подобных ситуациях принятие решений в значительной степени приходится основывать на экспертных оценках, при этом предполагается, что «рациональный эксперт» способен дать точную оценку. Однако необходимо отметить, что любое экспертное заключение, даже сделанное по точным объективным данным, гораздо более неопределенно, чем сложная многомерная совокупность данных, которую получить в исчерпывающем виде крайне трудно (а иногда и невозможно). Таким образом, хотя экспертное заключение может содержать обобщения и прогнозы, значимые для практики, оно не снижает уровень неопределенности.

Следует отметить, что еще одним источником неопределенности может быть и лицо, принимающее решение [1]. Одна из проблем, связанных с ЛПР, — это нечеткость в понятиях, суждениях и предпочтениях, неопределенность временного промежутка, на котором сохраняется монотонность предпочтений и суждений ЛПР.

Конкуренция — обязательный атрибут рыночной экономики — вынуждает предпринимателя принимать решения в условиях неопределенности, так как в этой экономической системе ни один из хозяйствующих субъектов заранее не знает, какое решение примут остальные. Существует и ряд других внутренних и внешних факторов, которые мешают намеченной цели, более того, неопределенность может возникнуть даже при явно однозначном выборе в том случае, если решение принимается, когда состояние внешней среды непредсказуемо или быстро меняется.

Обязательный фактор, сопровождающий инвестиционную деятельность, — фактор риска. Известны разнообразные классификации риска [2]. Наиболее общим является деление на риски динамические и статические, при этом для инвестиционных решений речь надо вести о динамическом риске, обновленном возможными изменениями стоимости основного капитала в результате принятия управленческих решений или неожиданных изменений рыночных обстоятельств. Наличие риска всегда обусловлено наличием неопределенности. Поняв эти неопределенности, тем больше возможностей для снижения рисков.

В традиционных схемах допускается весьма сильная идеализация реальных условий. В частности, предполагается, что все объекты инвестиций находятся в одинаковых условиях и уровни издержек и прибыли по ним точно известны. На практике объекты, расположенные даже в одном регионе, но на территории различных административных районов, будут находиться в различных социально-экономических условиях, не говоря уже о различиях ситуаций в регионах. Сами объекты могут относиться к различным областям деятельности с различным уровнем предыстории.

В этих условиях говорить об одинаковой точности оценок и предполагать, что оценки сами по себе строго определены, видимо, не совсем корректно. Надо отметить, что ряд оценок может иметь субъективный характер.

В основу динамического анализа положено соотношение:

$$NPV = \sum_{k=1}^{n} \frac{C_k}{(1+r)^k} - \sum_{j=1}^{m} \frac{IC_j}{(1+i)^j},$$

где NPV — чистый приведенный доход; C_k — доходы в k-й период времени; IC_j — инвестиции в j-й момент времени; r — ставка дисконтирования; i — прогнозируемый средний уровень инфляции.

Вычисления различных показателей: дисконтированного дохода, индекса рентабельности, внутренней нормы рентабельности, срока окупаемости — так или иначе основаны на приведенном соотношении.

Все переменные, входящие в него, имеют прогнозный характер, так как относятся к будущим периодам жизненного цикла инвестиционного проекта. Естественно, говорить о точных значениях этих переменных некорректно. Очевидно, что неопределенность оценок возрастает с увеличением номеров соответствующих периодов времени.

Общим недостатком различных модификаций формул вычисления показателей экономической эффективности ИП (*NPV, PI, DPP, IRR, MIRR*) в зависимости от исходных условий является требование определенности входных данных, которая достигается путем применения средневзвешенных значений входных параметров ИП, что может привести к получению значительно смещенных точечных оценок показателей эффективности и риска ИП. Также очевидно, что требование детерминированности входных данных является неоправданным упрощением реальности, так как любой ИП характеризуется множеством факторов неопределенности: неопределенность исходных данных, неопределенность внешней среды, неопределенность, связанная с характером, вариантами и моделью реализации проекта, неопределенность требований, предъявляемых к эффективности ИП. Именно факторы неопределенности определяют риск проекта, то есть существует опасность потери ресурсов, недополучения доходов или появления дополнительных расходов. При анализе долгосрочных ИП, в том числе на основе вышеперечисленных показателей, необходимо прогнозировать во времени будущее состояние большого числа неопределенных параметров рыночной среды, поэтому абсолютно точный прогноз получить практически невозможно. При прогнозировании экономической эффективности и оценки рисков реализации ИП ключевым является проявление неопределенности числовых параметров планируемого ИП. Неустранимая неопределенность порождает столь же неустранимый риск принятия инвестиционных решений [3, 4]. Следовательно, при проведении прогнозов необходимо учитывать факторы неопределенности, обуславливающие риск по определенному показателю эффективности, из-за чего неминуемо возникает проблема формального представления неопределенных прогнозных параметров, определяющих ИП, и проведение с ними соответствующих расчетов. Таким образом, наличие различных видов неопределенностей приводит к необходимости адаптации вышеописанных показателей оценки экономической эффективности ИП на основе применения математических методов, позволяющих формализовать и одновременно обрабатывать различные виды неопределенности.

Проведенный анализ традиционных методов оценки эффективности ИП в условиях риска и неопределенности [5] свидетельствует об их теоретической значимости, но ограниченной практической применимости для анализа эффективности и риска ИП из-за большого числа упрощающих модельных предпосылок, искажающих реальную среду проекта.

Ограничения и недостатки применения «классических» формальных методов при решении слабоструктурированных задач являются следствием сформулированного основоположником теории нечетких множеств Л. А. Заде принципа несовместимости: «...чем ближе мы подходим к решению проблем реального мира, тем очевиднее, что при увеличении сложности системы наша способность делать точные и уверенные заключения о ее поведении уменьшаются до определенного порога, за которым точность и уверенность становятся почти взаимоисключающими понятиями» [6].

Поэтому некоторыми зарубежными и отечественными исследователями разрабатываются методы оценки эффективности и риска ИП на основе аппарата теории нечетких множеств (ТНМ) [1, 3–5]. В данных методах вместо распределения вероятности применяется распределение возможности, описываемое функцией принадлежности нечеткого числа.

Методы, базирующиеся на теории нечетких множеств, относятся к методам оценки и принятия решений в условиях неопределенности. Их использование предполагает формализацию исходных параметров и целевых показателей эффективности ИП (в основном *NPV*) в виде вектора интервальных значений (нечеткого интервала), попадание в каждый интервал которого характеризуется некоторой степенью неопределенности. Осуществляя арифметические и другие операции с такими нечеткими интервалами по правилам нечеткой математики, эксперты и ЛПР получают результирующий нечеткий интервал для целевого показателя. На основе исходной информации, опыта и интуиции эксперты часто могут достаточно уверенно количественно охарактеризовать границы (интервалы) возможных (допустимых) значений параметров и области их наиболее возможных (предпочтительных) значений [3].

Остановимся для примера на оценке безальтернативного природоохранного проекта. Моделирование неопределенности, имеющее место при инвестиционном анализе, осуществляется, во-первых, за счет использования нечетких чисел и, во-вторых, за счет выбора того или иного вида функций принадлежности. Этот выбор может характеризовать субъективные оценки эксперта. Рассмотрим пример расчета *NPV* с использованием специализированных электронных таблиц *FuziCalc*, для которого ожидаемые величины предотвращенного ущерба представлены нечеткими числами $\widetilde{6800}$, $\widetilde{7400}$, $\widetilde{8200}$, $\widetilde{5000}$ тыс. денежных единиц, ожидаемые значения коэффициента дисконтирования соответственно $\widetilde{19}$, $\widetilde{20}$, $\widetilde{21}$, $\widetilde{22}$, $\widetilde{23}$ %.

Каждая из функций принадлежности представляет различный уровень определенности в оценках значений C_k, $\tilde{r}$.

Наименьший уровень неопределенности представляется пикообразной функцией принадлежности, так как предпочтения эксперта концентрируются ближе к центральному уровню, но, тем не менее, неопределенность существует и учитывается.

Следующий уровень неопределенности представляется функцией принадлежности треугольного типа. Эта функция отражает мнение эксперта, что возможность реализации того или иного значения в сторону пессимистического или оптимистического развития ситуации изменяется с постоянной скоростью. Функция принадлежности типа «тент» получена из пикообразной функции с помощью операции размытия, то есть возведения в некоторую степень при $a < 1$: $\mu_T(x) = \mu_\Pi^{\alpha}(x)$, где $\mu_T(x)$ — функция принадлежности типа «тент»; $\mu_\Pi^{\alpha}(x)$ — пикообразная функция принадлежности.

Соответственно, функция принадлежности типа «тент» характеризует более высокий уровень неопределенности. Если «тент» получается с помощью операции размытия, то справедливо обратное утверждение, что «пик» получается из «тента» с помощью операции концентрации $\mu_\Pi^{\alpha}(x) = \mu_T^{b}(x)$, при $b > 1$.

Очевидно, что при $\alpha \to \infty$ мы получаем прямоугольную функцию принадлежности, то есть ситуацию наибольшей неопределенности, когда ожидаемая возможность реализации всех оценок одинакова. При $b \to \infty$ получим ситуацию полной определенности.

И, наконец, трапецеидальная функция принадлежности — это свидетельство того, что по некоторому множеству значений (вершина трапеций) эксперт затрудняется провести дифференциацию.

Естественно, что в процессе расчетов желательно, кроме нечеткого числа, представляющего соответствующий параметр, в рассматриваемом случае — *NPV*, получить и какую-то оценку, характеризующую уровень неопределенности реализации результата расчетов. Чисто визуально это можно сделать, анализируя форму функции принадлежности результата. Например, полученные результаты расчета (*NPV* = 11 418,5) указывают на то, что ситуация достаточно определенная, так как есть явно предпочтительная по ожидаемой возможности область значений *NPV* (рис. 1).

Однако далеко не всегда получаются такие результаты и, кроме того, при сравнении альтернативных проектов визуальный анализ может оказаться недостаточным. Поэтому требуются объективные оценки. Возможно использование ширины базового множества. Однако эта характеристика не учитывает тип функции принадлежности. Более предпочтительным считается использование в качестве параметра оценки неопределенности величины площади под кривой функции принадлежности.

Очевидно, что ситуации с большой неопределенностью представлены функциями принадлежности с большими значениями площади под кривой функции принадлежности. Однако непосредственное использование значения площади неудобно, так как значения анализируемых параметров могут быть достаточно большими, соответственно большими числами будут представляться и размеры площадей. Например, для одного из вариантов расчета *NPV* = 11 424,8, а площадь под кривой функции принадлежности S = 49 067,1. Хотя это значение и характеризует уровень неопределенности, но для его восприятия необходимо провести дополнительный анализ. Более удобно использовать обобщенный критерий $\gamma = NPV/S$ или $\gamma = NPV^*/S$, где NPV^* —

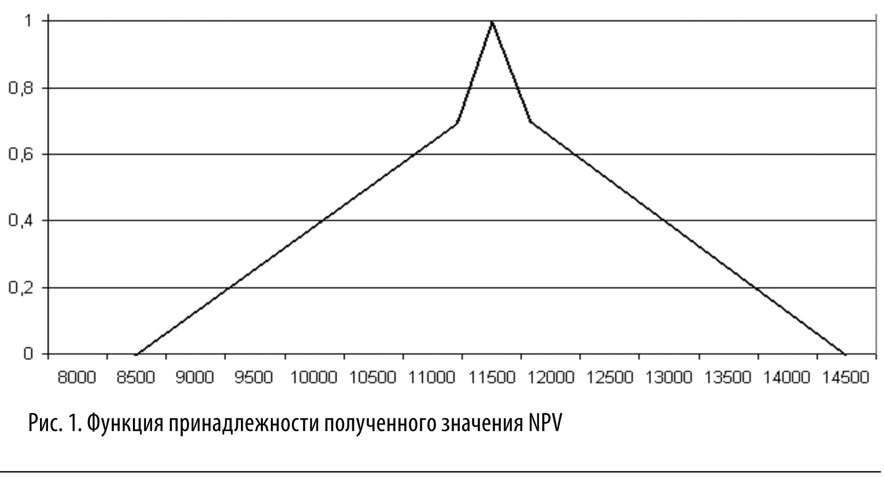

Рис. 1. Функция принадлежности полученного значения NPV

наилучшее значение *NPV*, которое определяется либо по максимуму функции принадлежности, либо по центру площади или по центру тяжести. Очевидно, что более определенные ситуации характеризуются большим значением γ. Однако и этот коэффициент не совсем удобен. Во-первых, значения его могут быть самыми различными, что затрудняет анализ, во-вторых, значение γ для различных анализируемых параметров может сильно отличаться, что очень неудобно при получении интегральной оценки, особенно когда приходится сравнивать альтернативные проекты.

Наиболее удобной является оценка, характеризующая насколько анализируемая ситуация, представляемая функцией принадлежности $\mu(x)$, полученной в результате расчетов, отличается от ситуации полной неопределенности, которая может быть представлена прямоугольной функцией принадлежности.

Тогда $\gamma = 1 - \frac{S_o - S}{S_o}$ или $\gamma = \frac{S}{S_o}$, $\gamma \in [0,\ 1]$, где S_0 — площадь под прямоугольной функцией принадлежности, равная ширине; S — площадь под кривой функции принадлежности, полученной в результате расчетов.

Очевидно, что чем определеннее ситуация, тем меньше значение γ. Поскольку риск и неопределенность — взаимосвязанные понятия, то значение γ можно рассматривать как оценку риска или оценку ненадежности проекта.

Можно ввести коэффициент надежности проекта $\psi = 1 - S/S_0 = 1 - \gamma$, который будет тем больше, чем выше надежность проекта.

Для рассматриваемого примера $\psi = 0{,}598$, $\gamma = 0{,}402$, поэтому можно считать, что анализируемый проект достаточно надежен для инвестирования, однако возникает вопрос о влиянии вида функций принадлежности на результат расчетов. Решение было получено в результате моделирования с помощью различных функций принадлежности: «пик», «треугольник», «тент», «трапеция» — с постоянной шириной базового множества. При использовании метода центра тяжести для расчета конечного параметра разброс значений *NPV* во всех случаях составил менее 1 % [1].

В качестве второго примера принятия решений в нечетких условиях риска и неопределенности приведено сравнение четырех природоохранных проектов (P_1 — перенос производства за черту города; P_2 — установка нового технологического оборудования, позволяющего снизить объем выбросов; P_3 — закупка и использование новейшего безотходного сырья; P_4 — установка очистных фильтров) с целью выбора и реализации наиболее оптимального. Для оценки проектов используются следующие критерии: G_1 — уровень научной проработки проекта; G_2 — ожидаемый эколого-экономический эффект; G_3 — риски; G_4 — скорость реализации проекта; G_5 — перспективы дальнейшего развития проекта; G_6 — стоимость проекта.

Экспертные сравнения проектов по критериям G_1 – G_6 приведены в таблице. По каждому критерию сравнивались шесть пар проектов.

Экспертным высказываниям соответствуют следующие матрицы парных сравнений (при

Парные сравнения проектов по шкале Саати

Критерий	Экспертные парные сравнения	
G_1	Отсутствует превосходство P_1 над P_2 Слабое превосходство P_1 над P_3 Существенное превосходство P_1 над P_4	Слабое превосходство P_2 над P_3 Существенное превосходство P_2 над P_4 Слабое превосходство P_3 над P_4
G_2	Слабое превосходство P_1 над P_2 Существенное превосходство P_1 над P_3 Явное превосходство P_1 над P_4	Почти слабое превосходство P_2 над P_3 Слабое превосходство P_2 над P_4 Почти слабое превосходство P_3 над P_4
G_3	Существенное превосходство P_1 над P_2 Отсутствует превосходство P_1 над P_3 Явное превосходство P_1 над P_4	Слабое превосходство P_2 над P_4 Существенное превосходство P_3 над P_2 Явное превосходствоP_3 над P_4
G_4	Слабое превосходство P_2 над P_1 Отсутствует превосходство P_2 над P_4 Слабое превосходство P_4 над P_1	Существенное превосходство P_3 над P_1 Почти слабое превосходство P_3 над P_2 Слабое превосходство P_3 над P_4
G_5	Слабое превосходство P_2 над P_1 Отсутствует превосходство P_2 над P_3 Слабое превосходство P_3 над P_1	Существенное превосходство P_4 над P_1 Слабое превосходствоP_4 над P_2 Почти слабое превосходствоP_4 над P_3
G_6	Явное превосходство P_2 над P_1 Слабое превосходство P_2 над P_3 Отсутствует превосходство P_2 над P_4	Слабое превосходствоP_3 над P_1 Явное превосходство P_4 над P_1 Слабое превосходство P_4 над P_3

этом $A_{ji} = 1/A_{ij}$; отсутствию преимущества соответствует 1, слабому преимуществу — 3, существенному — 5, явному — 7):

$$A(G_1)=\begin{bmatrix}1&1&3&5\\1&1&3&5\\1/3&1/3&1&3\\1/5&1/5&1/3&1\end{bmatrix};\ A(G_2)=\begin{bmatrix}1&3&5&7\\1/3&1&2&3\\1/5&1/2&1&2\\1/7&1/3&1/2&1\end{bmatrix};$$

$$A(G_3)=\begin{bmatrix}1&5&1&7\\1/5&1&1/5&3\\1&5&1&7\\1/7&1/3&1/7&1\end{bmatrix};\ A(G_4)=\begin{bmatrix}1&1/3&1/5&1/3\\3&1&1/2&1\\5&2&1&3\\3&1&1/3&1\end{bmatrix};$$

$$A(G_5)=\begin{bmatrix}1&1/3&1/3&1/5\\3&1&1&1/3\\3&1&1&1/2\\5&3&2&1\end{bmatrix};\ A(G_6)=\begin{bmatrix}1&1/7&1/3&1/7\\7&1&3&1\\3&1/3&1&1/3\\7&1&3&1\end{bmatrix}.$$

В каждой матрице шесть элементов соответствуют парным сравнениям из таблицы. Остальные элементы найдены с учетом того, что матрица парных сравнений является диагональной и обратносимметричной.

С учетом того, что степени принадлежности, как правило, принимают равными соответствующим координатам собственного вектора матрицы парных сравнений, которые могут быть вычислены как сумма элементов каждой строки, деленная на сумму всех элементов матрицы, получаем следующие нечеткие множества:

$$\tilde{G}_1=\left\{\frac{0{,}39}{P_1},\frac{0{,}39}{P_2},\frac{0{,}15}{P_3},\frac{0{,}07}{P_4}\right\};\ \tilde{G}_2=\left\{\frac{0{,}59}{P_1},\frac{0{,}22}{P_2},\frac{0{,}12}{P_3},\frac{0{,}07}{P_4}\right\};$$

$$\tilde{G}_3=\left\{\frac{0{,}42}{P_1},\frac{0{,}11}{P_2},\frac{0{,}42}{P_3},\frac{0{,}05}{P_4}\right\};\ \tilde{G}_4=\left\{\frac{0{,}08}{P_1},\frac{0{,}23}{P_2},\frac{0{,}48}{P_3},\frac{0{,}21}{P_4}\right\};$$

$$\tilde{G}_5=\left\{\frac{0{,}08}{P_1},\frac{0{,}23}{P_2},\frac{0{,}48}{P_3},\frac{0{,}21}{P_4}\right\};\ \tilde{G}_6=\left\{\frac{0{,}06}{P_1},\frac{0{,}40}{P_2},\frac{0{,}14}{P_3},\frac{0{,}40}{P_4}\right\}.$$

Из приведенных нечетких множеств следует, что проект P_1 является лучшим по критериям G_1, G_2 и G_3, проект P_2 — по критериям G_1 и G_6, проект P_3 — по критериям G_3 и G_4, а проект P_4 — по критериям G_5 и G_6. Поэтому выбор проекта будет зависеть от важности критериев.

Для расчета коэффициентов относительной важности критериев используется экспертный метод парных сравнений. Условно известны следующие лингвистические парные сравнения важности критериев:

– почти существенное преимущество G_1 над G_4;
– отсутствует преимущество G_1 над G_5;
– слабое преимущество G_1 над G_6;
– слабое преимущество G_2 над G_1;
– почти слабое преимущество G_2 над G_3;
– почти сильное преимущество G_2 над G_4;
– слабое преимущество G_2 над G_5;
– существенное преимущество G_2 над G_6;
– почти слабое преимущество G_3 над G_1;
– существенное преимущество G_3 над G_4;
– почти слабое преимущество G_3 над G_5;
– слабое преимущество G_3 над G_6;
– слабое преимущество G_5 над G_4;
– почти слабое преимущество G_5 над G_6;
– почти слабое преимущество G_6 над G_4.

Экспертным высказываниям соответствует следующая матрица парных сравнений:

$$A=\begin{bmatrix}1&1/3&1/2&4&1&3\\3&1&2&6&3&5\\2&1/2&1&5&2&3\\1/4&1/6&1/5&1&1/3&1/2\\1&1/3&1/2&3&1&2\\1/3&1/5&1/3&2&1/2&1\end{bmatrix}$$

Применяя те же походы, что и при нахождении вышеуказанных нечетких множеств, находим коэффициенты относительной важности критериев G_1 – G_6.

$\alpha_1 = 0{,}15$; $\alpha_2 = 0{,}34$; $\alpha_3 = 0{,}26$; $\alpha_4 = 0{,}05$; $\alpha_5 = 0{,}13$; $\alpha_6 = 0{,}07$, что означает наибольшую важность при принятии решения ожидаемого эколого-экономического эффекта (G_2) и рисков (G_3).

С учетом того, что при неравновесных критериях степени принадлежности нечеткого множества D находят как: $\mu_D(P_j) = \min\limits_{i=\overline{1,n}}(\mu_{Gi}(P_j))^{\alpha_i}$, $j = \overline{1,k}$, где α_i — коэффициент относительной важности критерия G_i, $\alpha_1 + \alpha_2 + \ldots + \alpha_n = 1$, получаем такие нечеткие множества:

$$\tilde{G}_1^{\alpha_1}=\left\{\frac{0{,}39^{0{,}15}}{P_1},\frac{0{,}39^{0{,}15}}{P_2},\frac{0{,}15^{0{,}15}}{P_3},\frac{0{,}07^{0{,}15}}{P_4}\right\}=\left\{\frac{0{,}868}{P_1},\frac{0{,}868}{P_2},\frac{0{,}752}{P_3},\frac{0{,}671}{P_4}\right\};$$

$$\tilde{G}_2^{\alpha_2}=\left\{\frac{0{,}59^{0{,}34}}{P_1},\frac{0{,}22^{0{,}34}}{P_2},\frac{0{,}12^{0{,}34}}{P_3},\frac{0{,}07^{0{,}34}}{P_4}\right\}=\left\{\frac{0{,}836}{P_1},\frac{0{,}598}{P_2},\frac{0{,}486}{P_3},\frac{0{,}405}{P_4}\right\};$$

$$\tilde{G}_3^{\alpha_3}=\left\{\frac{0{,}42^{0{,}26}}{P_1},\frac{0{,}11^{0{,}26}}{P_2},\frac{0{,}42^{0{,}26}}{P_3},\frac{0{,}05^{0{,}26}}{P_4}\right\}=\left\{\frac{0{,}798}{P_1},\frac{0{,}563}{P_2},\frac{0{,}798}{P_3},\frac{0{,}459}{P_4}\right\};$$

$$\tilde{G}_4^{\alpha_4} = \left\{ \frac{0{,}08^{0{,}05}}{P_1}, \frac{0{,}23^{0{,}05}}{P_2}, \frac{0{,}48^{0{,}05}}{P_3}, \frac{0{,}21^{0{,}05}}{P_4} \right\} = \left\{ \frac{0{,}881}{P_1}, \frac{0{,}929}{P_2}, \frac{0{,}964}{P_3}, \frac{0{,}925}{P_4} \right\};$$

$$\tilde{G}_5^{\alpha_5} = \left\{ \frac{0{,}08^{0{,}13}}{P_1}, \frac{0{,}23^{0{,}13}}{P_2}, \frac{0{,}48^{0{,}13}}{P_3}, \frac{0{,}21^{0{,}13}}{P_4} \right\} = \left\{ \frac{0{,}720}{P_1}, \frac{0{,}826}{P_2}, \frac{0{,}909}{P_3}, \frac{0{,}816}{P_4} \right\};$$

$$\tilde{G}_6^{\alpha_6} = \left\{ \frac{0{,}06^{0{,}07}}{P_1}, \frac{0{,}40^{0{,}07}}{P_2}, \frac{0{,}14^{0{,}07}}{P_3}, \frac{0{,}40^{0{,}07}}{P_4} \right\} = \left\{ \frac{0{,}821}{P_1}, \frac{0{,}938}{P_2}, \frac{0{,}871}{P_3}, \frac{0{,}938}{P_4} \right\}.$$

Пересечение этих нечетких множеств дает такие степени принадлежности нечеткого решения $\tilde{D}$:

$\mu_D(P_1)$ = min(0,868, 0,836, 0,798, 0,881, 0,720, 0,821) = 0,720;

$\mu_D(P_2)$ = min(0,868, 0,598, 0,563, 0,929, 0,826, 0,938) = 0,563;

$\mu_D(P_3)$ = min(0,752, 0,486, 0,798, 0,964, 0,909, 0,871) = 0,486;

$\mu_D(P_4)$ = min(0,671, 0,405, 0,459, 0,925, 0,816, 0,938) = 0,405.

В результате получается нечеткое множество: $\tilde{D} = \{ \frac{0{,}720}{P_1}, \frac{0{,}563}{P_2}, \frac{0{,}486}{P_3}, \frac{0{,}405}{P_4} \}$, которое свидетельствует о преимуществе проекта P_1 над остальными. Таким образом, проект P_1 лучше других одновременно удовлетворяет всем критериям с учетом их важности. Нечеткие множества, показывающие, насколько полно проекты $P_1 - P_4$ удовлетворяют критериям $G_1 - G_6$, представлены:

$$\tilde{P}_1 = \left\{ \frac{0{,}868}{G_1}, \frac{0{,}836}{G_2}, \frac{0{,}798}{G_3}, \frac{0{,}881}{G_4}, \frac{0{,}720}{G_5}, \frac{0{,}821}{G_6} \right\};$$

$$\tilde{P}_2 = \left\{ \frac{0{,}868}{G_1}, \frac{0{,}598}{G_2}, \frac{0{,}563}{G_3}, \frac{0{,}929}{G_4}, \frac{0{,}826}{G_5}, \frac{0{,}938}{G_6} \right\};$$

$$\tilde{P}_3 = \left\{ \frac{0{,}752}{G_1}, \frac{0{,}486}{G_2}, \frac{0{,}798}{G_3}, \frac{0{,}964}{G_4}, \frac{0{,}909}{G_5}, \frac{0{,}871}{G_6} \right\};$$

$$\tilde{P}_4 = \left\{ \frac{0{,}671}{G_1}, \frac{0{,}405}{G_2}, \frac{0{,}459}{G_3}, \frac{0{,}925}{G_4}, \frac{0{,}816}{G_5}, \frac{0{,}938}{G_6} \right\}.$$

При многокритериальном анализе часто возникает вопрос: «Что необходимо изменить в некоторой альтернативе, чтобы она стала наилучшей?» Для ответа на него надо знать, насколько чувствительно принятое решение к экспертным парным сравнениям. Далее применяется методика анализа чувствительности, предложенная в [7]. Идея методики состоит в определении, какое будет решение, если изменить одно из парных сравнений.

При изменении одного из парных сравнений вариантов необходимо обеспечить непротиворечивость остальных. Например, изменяется a_{ij} — уровень преимущества варианта P_i над вариантом P_j. Тогда в матрице парных сравнений необходимо изменить и элемент a_{ji}, так как они связаны зависимостью $a_{ji} = 1/a_{ij}$. Кроме того, возможны изменения значений в уровнях преимущества P_i над другими вариантами, которым соответствуют элементы a_{ir} и $a_{ri} = 1/a_{ir}$ ($r = \overline{1, k}$, $r \neq i$, $r \neq j$) матрицы парных сравнений. Ниже рассматриваются четыре ситуации, когда новое значение элемента требует корректирования элемента a_{ij} матрицы парных сравнений.

1. Пусть преимущество варианта P_i над P_j сильнее, чем над P_r, то есть $a_{ji} > a_{jr}$. Тогда в непосредственном парном сравнении вариант P_i не должен превосходить вариант P_r, следовательно $a_{ir} \leq 1$. Математически записывается это следующим образом:

если $a_{ji} > a_{jr}$, тогда $a_{ir} = \min(1, a_{ir})$.

2. Пусть преимущество варианта P_i над P_j сильнее, чем преимущество варианта P_r над P_j, то есть $a_{ij} > a_{rj}$. Тогда в непосредственном парном сравнении вариант P_r не должен превосходить P_i, следовательно $a_{ir} \geq 1$. Математически выглядит так:

если $a_{ij} > a_{jr}$, тогда $a_{ir} = \max(1, a_{ir})$.

3. Пусть вариант P_i лучше P_j ($a_{ij} > 1$), а вариант P_j лучше P_r ($a_{jr} > 1$). Тогда вариант P_i не будет лучше, чем P_r, следовательно, $a_{ir} > 1$. При этом a_{ir} — уровень преимущества P_i над P_r должен быть не меньше, чем a_{ij} и a_{jr}. Формула принимает следующий вид:

если $a_{ij} > 1$ и $a_{jr} > 1$, тогда $a_{ir} = \max(a_{ij}, a_{jr}, a_{ir})$.

4. Пусть вариант P_i хуже P_j ($a_{ij} < 1$), а вариант P_j хуже P_r ($a_{jr} < 1$). Тогда вариант P_i должен быть хуже, чем P_r, следовательно, $a_{ir} < 1$. При этом a_{ri} — уровень преимущества P_r над P_i должен быть не меньше, чем $a_{ji} = 1/a_{ij}$ и $a_{rj} = 1/a_{jr}$. Записывается это следующим образом:

если $a_{ij} < 1$ и $a_{jr} < 1$, тогда $a_{ir} = \min(a_{ij}, a_{jr}, a_{ir})$.

Ниже приводится пошаговая методика анализа вариантов «Что — Если», использующая приведенные четыре правила.

Шаг 1. Обозначить анализируемый вариант через P_i.

Шаг 2. Выявить критерий, по которому можно улучшить вариант P_i, и обозначить этот критерий через G_u.

Шаг 3. Определить вариант, с которым удобно сравнивать вариант P_i по критерию G_u. Обозначить этот вариант-аналог через P_j.

Шаг 4. Изменить по шкале Саати значение элемента a_{ij} в матрице парных сравнений $A(G_u)$.

Шаг 5. Рассчитать значение элемента a_{ij} в матрице парных сравнений $A(G_u)$ по формуле $a_{ji} = 1/a_{ij}$.

Шаг 6. Пересчитать значение элементов a_{ir} и a_{rj} ($r = \overline{1, k}$, $r \neq i$, $r \neq j$) по указанным четырем правилам.

Шаг 7. Обеспечить обратную симметричность матрицы $A(G_u)$.

Шаг 8. Рассчитать новые степени принадлежности нечеткого множества $\widetilde{G}_u$.

Шаг 9. Провести многокритериальный анализ вариантов и зафиксировать принятое решение.

Шаг 10. Повторить шаги 4–9 для всех возможных парных сравнений вариантов P_i и P_j по критерию G_u.

Возвращаясь к примеру выбора одного из четырех природоохранных проектов, необходимо установить каким должен быть проект P_3, чтобы он стал наилучшим.

Проект P_3 имеет третий ранг; проекты P_1 и P_2 лучше его. Предположим, что можно улучшить проект P_3 по критерию G_2. Посмотрим как повлияет на принятие решения изменение уровня преимущества проекта P_3 над P_1 с текущего значения «существенное преимущество P_1 над P_3» до оценки «слабое преимущество P_3 над P_1». Для этого следует поменять значение элемента a_{31} матрицы парных сравнений $A(G_2)$ с 1/5 на 1/4, 1/3, 1, 2 и 3, и провести расчеты по описанной выше методике. Результаты расчетов отражены на рис. 2.

На диаграмме (см. рис. 2) видно, что проект P_3 станет вторым по рангу, когда по критерию G_2 преимущество P_1 над P_3 будет меньше слабого ($a_{31} > 1/3$). Проект P_3 станет наилучшим, когда он будет хоть немного превосходить проект P_1 по критерию G_2 ($a_{31} > 1$).

Всесторонний учет неопределенности необходим при создании адекватных математических моделей, методов и эффективного программного обеспечения для стратегического управления реальными инвестициями, в том числе в области охраны окружающей среды. К основным недостаткам и ограничениям применения существующих экономико-математических моделей и методов оценки эффективности и риска ИП, моделей формирования оптимального портфеля инвестиционных проектов в условиях неопределенности относятся: недостаточность статистической информации для обоснованного применения вероятностных методов, высокая доля субъективизма при экспертном назначении оценок вероятностей, отсутствие полноты системы классификации неопределенности [3, 5]. Для преодоления вышеперечисленных недостатков и ограничений традиционных методов обосновано применение аппарата теории нечетких множеств для разработки моделей и методов стратегического управления инвестиционной деятельностью.

Предложенные в данной работе методы дают возможность широко использовать ТНМ в практике управления эколого-экономической эффективностью природоохранных мероприятий.

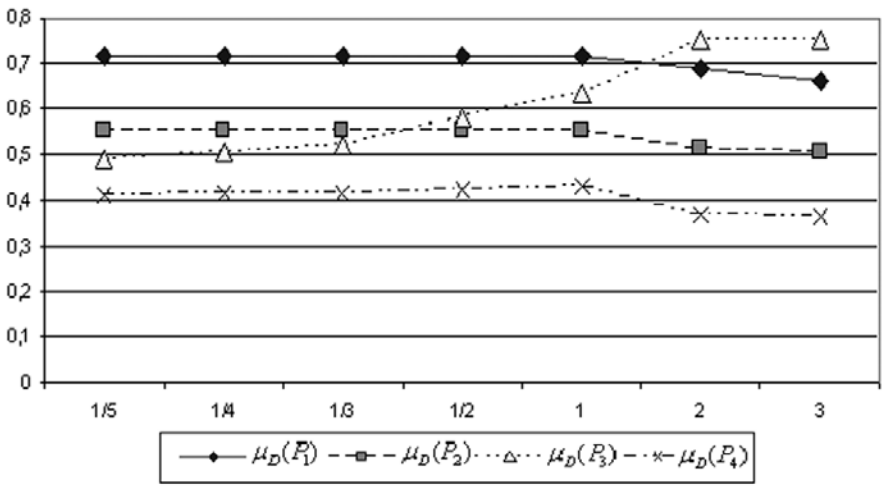

Рис. 2. Результаты анализа проектов по методике «Что — Если»

Литература:

1. Чернов, В. Г. Модели поддержки принятия решений в инвестиционной деятельности на основе аппарата нечетких множеств / В. Г. Чернов. — М.: Горячая линия — Телеком, 2007. — 312 с.

2. Риск — анализ инвестиционного проекта / Под. ред. М. В. Грачевой. — М.: ЮНИТИ, 2000. — 344 с.

3. Деревянко, М. П. Модели и методы принятия стратегических решений по распределению реальных инвестиций предприятия с при-

менением теории нечетких множеств: дис. … канд. экон. наук / М. П. Деревянко. — СПб., 2006. — 224 с.

4. Недосекин, А. О. Нечетко-множественный анализ риска фондовых инвестиций / А. О. Недосекин. — СПб.: Типография «Сезам», 2002. — 181 с.

5. Рыбак, В. А. Методологические основы принятия решений для управления природоохранной деятельностью: монография / В. А. Рыбак. — Мн.: РИВШ, 2009. — 274 с.

6. Заде, Л. А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений: пер. с англ. / Л. А. Заде. — М.: Мир, 1976. — 165 с.

7. Штовба, С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB / С. Д. Штовба. — М.: Горячая линия — Телеком, 2007. — 288 с.

Summary

V. Rybak

USING OF FUZZY-SET THEORY FOR ESTIMATION OF ECOLOGY-ECONOMIC EFFECTIVENESS OF NATURE-CONSERVATIVE MEASURES

In the article the problem of calculation of vagueness at estimation of ecology-economic effectiveness of nature-conservative measures is considered. The using of fuzzy-set theory for developing of expert support system is proposed.