УДК 519.9

А.Н. Воронин

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОЦЕНКА КОСМИЧЕСКИХ ПРОЕКТОВ ЭКСПЕРТНЫМИ МЕТОДАМИ

Задача оценки эффективности космических проектов является важной проблемой, от успешного решения которой зависит достоверность выводов о научной значимости результатов, о социальной и экономической эффективности планируемых и выполненных работ в космической отрасли. Подходы, применяемые для решения проблемы оценивания, характеризуются значительной степенью субъективности и возможностью произвола в результатах оценки [1–3]. В настоящей работе ограничимся рассмотрением оценки *научных* космических проектов, хотя основные результаты исследования применимы для оценки эффективности проектов вообще. Специфика оценивания научных космических проектов в рамках одной предметной области показана ниже.

Системный подход. Современная наука с помощью системного подхода [1] исследует сложные объекты и процессы. В рамках этого подхода системный анализ космического научного проекта понимается как изучение, оценка и классификация сведений об исследуемой сложной системе, ее компонентах и условиях функционирования. Оценка может играть и самостоятельную роль. В других случаях цель системного анализа — подготовка предпосылок для создания или выбора системы с нужными нам свойствами (системный синтез). Ведущей операцией при этом выступает принятие решений, т.е. некоторый формализованный или неформализованный выбор, осуществляемый человеком или техническим устройством на основе данных системного анализа и сведений о требуемых качественных характеристиках создаваемой или выбираемой системы (оптимизация). Поскольку сложная система, как правило, характеризуется противоречивыми свойствами, то и оценка, и оптимизация (выбор) таких сложных систем, как космические научные проекты, выполняется как *многокритериальная* (векторная).

Постановка задачи. Дано s-мерный вектор критериев y и n-мерный вектор объектов оценки x. Требуется оценить объекты по совокупности критериев (анализ) и выбрать (в задаче синтеза) оптимальное решение x^*.

Векторная оценка альтернатив и определение n-мерных решений $x = \{x_i\}_{i=1}^{n}$ из области X при нескольких (s) критериях $y = \{y_k(x)\}_{k=1}^{s}$ относятся к числу трудноформализуемых задач принятия решений. В этом случае искомое решение x^* по своей природе *компромиссно*. Поскольку компромисс — прерогатива человека, то многокритериальное решение полностью зависит от предпочтений лица, принимающего решение (ЛПР).

Многокритериальная оценка. При формализации решения многокритериальных задач можно руководствоваться различными принципами. Концепция Чарнза–Купера [4] основана на принципе «поближе к идеальной (утопической) точке». Разновидностью этой концепции является метод приближения к идеальному решению (Technique for Preference by Similarity to the Ideal Solution — TOPSIS) [5]. Общим недостатком методов, основанных на данном принципе, представляется некоторая громоздкость и возможность нарушения ограничений. Этих недостатков лишен принцип «подальше от ограничений» [1].

Использование данного принципа предполагает такой класс объектов оценки, для критериев качества которых существуют естественные количественные ограничения. Для оценки иных объектов должны применяться другие методы [6].

В процессе исследования многокритериальных задач ЛПР руководствуется своим набором индивидуальных предпочтений, который формально отражается некоторой функцией полезности (ценности) $Y(y)$ в критериальном пространстве [7] или схемой компромиссов, скалярной сверткой векторного критерия [1]. Возможны различные аппроксимации функции полезности. Наиболее распространен метод простого аддитивного взвешивания (Simple Additive Weighting — SAW) [8]. Аппроксимирующая зависимость $Y[\alpha, y(x)]$ приобретает вид линейной скалярной свертки

$$Y[\alpha,\, y(x)] = \sum_{k=1}^{s} \alpha_k^{\circ}\, y_k(x),$$

где α_k° — коэффициент регрессии, имеющий смысл частной производной критериальной функции по k-му критерию, вычисленной в базовой рабочей точке. Пользуясь этим выражением, всегда нужно помнить, что это лишь линейное приближение критериальной функции и при ситуациях, отличающихся от базовой, оно может приводить к существенным искажениям, а самое главное, линеаризация критериальной функции не позволяет решить многокритериальную задачу формально, без непосредственного участия ЛПР.

Поставим задачу аппроксимации функции полезности ЛПР некоторой содержательной моделью *на всей* области определения в критериальном пространстве. Будем конструировать содержательную модель исходя из принципа «подальше от ограничений» [1]. В соответствии с этим принципом решение максимизирует векторную разность $A - y$, где $A = \{A_k\}_{k=1}^{s}$ — вектор ограничений, со штрафом за приближение к ограничениям.

Такой подход предполагает, что в рассмотрение вводятся только *количественные* (и сводимые к ним) критерии. Действительно, чисто качественные критерии, такие как красота женщины, ораторское мастерство, убедительность аргументации [6], естественных количественных ограничений не имеют, и, следовательно, к ним не применим принцип «подальше от ограничений».

Анализ показывает [1], что простой содержательной моделью функции полезности ЛПР при минимизируемых критериях в соответствии с концепцией нелинейной схемы компромиссов является выражение

$$Y(\alpha, y) = \sum_{k=1}^{s} \alpha_k [A_k - y_k(x)]^{-1}$$

или

$$Y(\alpha, y_0) = \sum_{k=1}^{s} \alpha_k [1 - y_{0k}(x)]^{-1},$$

если критерии нормированы по формуле $y_0 = y/A$. Областью определения коэффициентов $\alpha \in \Gamma_\alpha$ служит симплекс

$$\Gamma_\alpha = \left\{ \alpha \,\middle|\, \alpha_k \ge 0,\ \sum_{k=1}^{s} \alpha_k = 1 \right\}.$$

Здесь $\alpha_k = \text{const}$ — формальные параметры, имеющие двоякий физический смысл. С одной стороны, это коэффициенты, выражающие предпочтения ЛПР по отдельным критериям. С другой, это коэффициенты содержательной регрессионной модели, построенной на основе концепции нелинейной схемы компромиссов. Коэффициенты α можно определить, используя дуальный подход, описанный в [1].

Учитывая, что свертка по нелинейной схеме компромиссов представляется в аддитивной форме, предполагается, что парциальные критерии в достаточной степени независимы.

Экспертные оценки. Адекватными методами исследования сложных технических и эргатических систем являются методы экспертных оценок. Это объясняется как трудностями формализации многокритериальных задач, так и принципиальной невозможностью формального, без участия человека, решения задачи целеполагания, заключающейся в определении размерности и качественного состава вектора критериев.

Сущность метода экспертных оценок заключается в том, что для оценки некоторой количественной характеристики используются постулаты не одного, а *нескольких* лиц (экспертов), компетентных в данном вопросе. Предполагается, что «истинное» значение неизвестной нам количественной характеристики находится внутри диапазона оценок экспертов и «обобщенное» коллективное мнение более достоверно. Неизвестная количественная характеристика рассматривается как случайная величина, отражением закона распределения которой служит постулат эксперта. Для окончательной оценки высказывания всех экспертов изучаются в совокупности и обрабатываются как некий исходный статистический материал с привлечением концепций математической статистики.

Определение системы критериев. Отметим, что часто на практике совокупность частных критериев задана, особенно, если система создается и исследуется по заранее установленной методике, традиционной для систем данного класса. Ведомства обычно устанавливают строго регламентированный перечень требований, предъявляемых к управляемым процессам. Но это бывает не всегда. Чаще всего нельзя заранее определить, какие показатели системы следует непременно включить в перечень критериев качества, а какие несущественны для решаемой задачи. Это характерно для вновь разрабатываемых проектов. Возникает проблема разработки общих методов, позволяющих обоснованно составлять необходимую и достаточную совокупность частных критериев качества. При этом s критериев необходимо и достаточно в рамках конкретной многокритериальной системы, если:

— использование любых дополнительных критериев или их сочетаний не изменяет результатов решения задачи;

— отбрасывание хотя бы одного из выбранных s критериев изменяет результаты решения задачи.

В настоящее время для определения размерности и качественного состава вектора критериев обычно применяются эвристические методы. В их основе лежит индивидуальное мнение (постулат), высказываемое специалистом (экспертом) об оцениваемой величине, исходя из своего профессионального опыта. Основной недостаток постулирования — субъективность и возможность произвола. Процедура метода экспертных оценок позволяет уменьшить этот недостаток.

Разработка начинается с формирования группы организаторов экспертизы, в обязанности которых входит:

— подбор специалистов-экспертов;

— составление специальных опросных листов (анкет);

— опрос;

— анализ и обработка информации, полученной от экспертов;

— определение размерности и качественного состава вектора частных критериев;

— расчет аналитических оценок космических проектов.

В роли экспертов выступают высококвалифицированные специалисты данной области примерно равной квалификации. Их количество обычно обуславливается сложностью решаемой задачи. В нашей практике в экспертизе участвовало до 22-х экспертов. На основании анализа проектов организаторы экспертизы формулируют предварительный список требований, предъявляемых к космическим проектам по конкретному направлению. По предложению руководства управления космических программ и научных исследований НКАУ требования структурируются по группам критериев:

1) общие;
2) научно-технического развития;
3) финансово-экономические;
4) социальные;
5) обеспечения заданий обороны и безопасности.

После консультаций с экспертами организаторы экспертизы включают в каждую группу конкретные критерии. Первоначальный список частных критериев заведомо избыточен и выражает стремление не упустить существенных требований.

Для выявления действительно значимых частных критериев эксперты дают *ординальные* оценки критериев, представляющие собой целочисленные ранги, т.е. номера критериев в ряде ранжирования. Предлагается изучить список и выбрать из него наиболее важные, по мнению эксперта, частные критерии, проранжировав их в порядке важности. Для получения коллективного мнения о наиболее важных критериях организаторы подсчитывают сумму рангов экспертов, проголосовавших за каждый критерий из первоначального списка. Критерии, получившие наименьшую сумму рангов, выделяются в окончательный список. Количество выделенных критериев зависит от сложности задачи, но обычно их бывает от трех до восьми. Увеличение числа критериев снижает надежность суждений экспертов при оценке их относительной важности. Кроме того, необходимо, чтобы разница между количеством голосов, отданных наименее важному из выделенных критериев и наиболее важному из отсеченных, была возможно большей.

Более обоснованным (но и более сложным) представляется метод агрегирования индивидуальных ранжирований [2].

Выделенные показатели представляют собой исходную совокупность частных критериев, из которых формируется векторный критерий качества оцениваемого проекта. Осуществив ранжирование и обработав результаты, организаторы оставляют в списке s действительно значимых критериев. Определение их значений осуществляется в классе *кардинальных* экспертных оценок. В отличие от ординальных, они выражаются не целочисленными рангами, а действительными положительными числами.

Определение оценок по критериям. Некоторые из критериев $y(x)$, например финансово-экономические, выражаются в абсолютных величинах и могут вычисляться вообще без экспертов. Поскольку эти количественные критерии обычно взаимно отличаются как способом экстремизации (часть из них подлежат минимизации, а остальные — максимизации), так и физической природой (имеют разную размерность), то целесообразно нормировать их с помощью монотонного в смысле Гермейера преобразования

 ISSN 0572-2691

$$y_{0k}(x)=\begin{cases}\dfrac{y_k^{id}-y_k(x)}{y_k^{id}-y_{k\min}} & \forall k\in K_1,\\[2ex] \dfrac{y_k(x)-y_k^{id}}{y_{k\max}-y_k^{id}} & \forall k\in K_2.\end{cases}$$

Здесь K_1 и K_2 — соответственно множество максимизируемых и минимизируемых критериев; y_k^{id} — координаты идеальной (утопической) точки. Ясно, что $y_k^{id}=y_{\max}, k\in K_1$ и $y_k^{id}=y_{\min}, k\in K_2$. Такая нормализация хороша тем, что, независимо от способа экстремизации исходных критериев, все нормализованные критерии *минимизируются* и $y_{0k}(x)\in[0;1]$.

Качественные (но сводимые к количественным) критерии обычно определяются экспертами оценками по шкале баллов. Экспертам (каждому отдельно) предъявляется анкета. В рубриках по группам перечисляются частные критерии, выделенные на предыдущем этапе. Критериям сопоставляется непрерывная шкала, разделенная, например, на десять интервалов. Цифра 0 на шкале соответствует понятию «никакой ценности», цифра 10 — «максимальная ценность». Эксперта просят оценить относительное влияние каждого из частных критериев на общую оценку в заданных условиях и приписать ему соответствующую точку на шкале. Разрешается выбирать точки между числами или приписывать несколько критериев одной точке на шкале.

Анализ процессов принятия решений показал, что при оценке объектов по шкале баллов эксперты руководствуются так называемой фундаментальной шкалой (табл. 1). В терминах теории нечетких множеств [9–11] фундаментальная шкала представляет собой *функцию принадлежности*, с помощью которой осуществляется переход от лингвистической переменной (удовлетворительное качество, высокое качество и пр.) к количественным оценкам (5,5; 7,0) по шкале баллов, т.е. переход от нечетких качественных градаций к числам.

Таблица 1

Категория качества	Фундаментальная шкала f	Обращенная нормированная фундаментальная шкала y_0, Y_0, Φ_0
Неприемлемое	0–3	1,0–0,7
Низкое	3–5	0,7–0,5
Удовлетворительное	5–6	0,5–0,4
Хорошее	6–8	0,4–0,2
Высокое	8–10	0,2–0,0

Обработка данных. После заполнения все анкеты поступают к организаторам экспертизы и обрабатываются. Исходный массив данных представляет собой совокупность чисел f_{jk}. Это оценка, данная j-м экспертом k-му критерию по шкале анкеты, $j\in[1, m]$; m — количество экспертов. Полученные оценки можно просто усреднить по экспертам

$$f_k=\frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m} f_{jk},\quad k\in[1, s], \tag{1}$$

и считать задачу решенной. Так и поступают, если задача достаточно проста, количество экспертов достаточно велико и состав их достаточно однороден. В более сложных случаях вместо (1) следует применять методику обработки экспертных оценок с учетом коэффициентов достоверности [12].

Учет компетентности экспертов. При решении сложных задач необходимо учитывать, что количество экспертов обычно ограничено, а степень их компетентности в данном вопросе может быть различной. В противном случае достоверность и точность искомых оценок снижается. Любопытную аналогию приводит О. Хелмер: «Мы получаем информацию о происходящих событиях с помощью разных приборов, иногда неточных, причем не отказываемся от этой информации, учитывая лишь степень ее точности и достоверности. Специалистов-экспертов тоже можно рассматривать как своего рода «прибор», информирующий о вероятности тех или иных предстоящих событий или гипотез, объясняющих происходящие события. Отказываться от такой информации не следует. Нужно лишь постараться определить степень ее точности и достоверности, подобно тому, как это делается для других измерительных приборов» [13]. Продолжая эту аналогию, можно сказать, что задача обработки высказываний экспертов подобна задаче комплексирования приборов, имеющих различный класс точности.

Предположим, что точность и достоверность процедуры экспертных оценок существенно возрастут, если высказывания каждого эксперта будут восприниматься с коэффициентом (весом), зависящим от степени его компетентности по данному вопросу. Этот вес может устанавливаться либо на основе оценок предыдущей деятельности эксперта, либо по данным самооценки, либо с учетом квалификации, эрудиции, должности или академического звания. Более надежна процедура, при которой компетентность эксперта оценивается непосредственно в процессе решения конкретной задачи.

Рассмотрим один из способов учета неоднородности состава экспертов при оценке критериев качества. Для простоты проанализируем ситуацию, когда m экспертов оценивают единственный показатель, приписывая ему определенный балл по некоторой шкале оценок. В результате получим массив исходных данных экспертных оценок, который в нашем случае представляется в виде матрицы-столбца

$$F = \begin{Vmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \cdots \\ f_j \\ \cdots \\ f_m \end{Vmatrix}. \tag{2}$$

Задача формулируется следующим образом. Дано множество экспертных оценок f_j, $j \in [1, m]$, представленное в виде (2). Предполагается, что степень согласованности оценок достаточно высока. Требуется получить уточненную агрегированную оценку f с учетом коэффициентов k_j, $j \in [1, m]$, компетентности экспертов.

Поскольку пока не известно, кому из экспертов больше верить, то сначала считаем, что степень доверия к высказываниям всех экспертов одинакова и при осреднении их оценки принимаются с одним коэффициентом $k_j^{\mathrm{I}} = 1$, $j \in [1, m]$. Ясно, что

$$\sum_{j=1}^{m} k_j^{\mathrm{I}} = m. \tag{3}$$

 ISSN 0572-2691

В результате осреднения получим оценку

$$f^{\mathrm{I}} = \frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m} k_j^{\mathrm{I}} f_j = \frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m} f_j .$$

Назовем ее оценкой первой итерации. Операция осреднения в матричном виде представляет собой умножение матрицы экспертных оценок слева на единичную m-матрицу-строку (суммирующий вектор)

$$E = \| 1\ 1\ \ldots\ 1 \|$$

и деление произведения на количество экспертов:

$$f^{\mathrm{I}} = (1/m)\, EF.$$

Теперь мы имеем информацию о средней оценке f^{I}, с которой можно сравнивать оценки отдельных экспертов f_j из матрицы (2). Естественно, что разница между усредненной оценкой (мнение большинства) и оценкой эксперта может служить основанием для изменения весового коэффициента, с которым воспринимается высказывание данного эксперта. Тем экспертам, чья оценка на первой итерации ближе к средней, целесообразно повысить коэффициент k_j и, наоборот, экспертам, оценки которых далеки от средней, его следует понизить. В нашей процедуре опускаются те сравнительно редкие случаи, когда «истина» на стороне меньшинства.

Введем меру

$$\delta_j^{\mathrm{II}} = | f^{\mathrm{I}} - f_j |, \ j \in [1, m],$$

которая служит количественным выражением степени некомпетентности j-го эксперта на второй итерации. Целесообразно подобрать такие коэффициенты k_j^{II}, которые представляли бы собой функции, обратно пропорциональные δ_j^{II}:

$$k_j^{\mathrm{II}} = a / \delta_j^{\mathrm{II}}, \ a = \mathrm{const}, \qquad (4)$$

при таком же условии, как и (3):

$$\sum_{j=1}^{m} k_j^{\mathrm{II}} = m. \qquad (5)$$

Решая систему уравнений (4) и (5), получаем

$$k_j^{\mathrm{II}} = (m/\delta_j^{\mathrm{II}}) / \sum_{t=1}^{m} (1/\delta_t^{\mathrm{II}}).$$

После этого проводим осреднение на второй итерации уже с учетом компетентности экспертов по результатам первой итерации

$$f^{\mathrm{II}} = \frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m} k_j^{\mathrm{II}} f_j . \qquad (6)$$

Введя в рассмотрение матрицу-строку $K^{\mathrm{II}} = \| k_1^{\mathrm{II}}\ k_2^{\mathrm{II}}\ \ldots\ k_j^{\mathrm{II}}\ \ldots\ k_m^{\mathrm{II}} \|$, представим выражение (6) в матричном виде $f^{\mathrm{II}} = (1/m) K^{\mathrm{II}} F$.

Процесс третьей итерации начинается с установления меры $\delta^{\mathrm{III}} = | f^{\mathrm{II}} - f_j |$, $j \in [1, m]$, и т.д. Итерационная процедура $f^{(g)} = (1/m) K^{(g)} F$, $g \in [1, h]$, $K^{\mathrm{I}} = E$, продолжается до тех пор, пока не выполнится условие останова

$$| f^{(h)} - f^{(h-1)} | \le \varphi,$$

где φ — заданная малая величина. Результатом описанной итерационной процедуры является получение уточненной оценки $f = f^{(h)}$, определенной с учетом разнородности в составе экспертов.

Описанный способ учета компетентности экспертов — альтернатива для более громоздких способов согласования мнений экспертов в процедурах с обратной связью [3, 6]. В известных процедурах без обратной связи сильно отличающиеся оценки рекомендуется отбрасывать как аномальные, чтобы операция осреднения была корректной. Наш способ позволяет рассматривать и такие оценки, просто понижая коэффициент доверия к ним, но сохраняя возможность учета соответствующих тенденций.

Итерационные алгоритмы обработки экспертных оценок описаны с точки зрения удобства их практического применения. Заметим, что они являются следствием общего метода оценки параметров распределения случайной величины по ограниченной выборке. Более строгое их обоснование с позиций математической статистики (байесовский подход) приводится в [12].

При рассмотрении некоторых критериев часть экспертов затрудняются с их оценкой и в соответствующей графе ставят прочерк. Поэтому в формуле (1) и последующих вместо величины m мы использовали число m_k, $m_k \le m$, $k \in [1, s]$, т.е. реальное число экспертов, участвовавших в оценке критерия y_k.

Оценки f_k получены по десятибалльной шкале для *максимизируемых* критериев. Применяемая ниже методика многокритериальной оценки разработана для нормированных *минимизируемых* критериев, которые получаются из f_k по формуле

$$y_{0k} = 1 - 0{,}1 f_k, \quad y_{0k} \in [0; 1], \quad k \in [1, s], \tag{7}$$

если кратность шкалы равна 10, и $y_{0k} = 1 - (1/c) f_k$, $y_{0k} \in [0; 1]$, $k \in [1, s]$, $c > 2$, если, в общем случае, применяется c-кратная шкала.

Нормированным минимизируемым критериям сопоставляется обращенная нормированная фундаментальная шкала (табл. 1). Совокупность нормированных критериев y_{0k} исходна для аналитической многокритериальной оценки проекта в соответствии с концепцией нелинейной схемы компромиссов [1, 12].

Нелинейная схема компромиссов. Фундаментальным отличием свертки по нелинейной схеме от других известных скалярных сверток выступает органическая связь с ситуацией принятия многокритериального решения. По сути, предложенная свертка представляет собой нелинейную функцию регрессии (линейную по параметрам), выбранную по физическим соображениям и поэтому эффективную. Коэффициенты α имеют смысл параметров содержательной нелинейной функции регрессии, поэтому, будучи найденными, они *не изменяются* от ситуации к ситуации, как в случае линейной и других известных сверток, не адаптирующихся к ситуации.

Механизм индивидуальных предпочтений достаточно интенсивно применяется при решении многокритериальных задач [14–18]. Однако субъективность в их решении допустима и желательна лишь до тех пор, пока результат предназначается для конкретных ЛПР или небольших коллективов людей со сходными предпочтениями. Если же он предназначен для общего пользования, то обязан быть вполне объективным, унифицированным. В этих случаях механизм индивидуальных предпочтений из методики решения многокритериальных задач нужно исключить во избежание произвола и неоднозначности результатов решения.

Когда результат решения многокритериальной задачи предназначается для широкого пользования, то он унифицируется и индивидуальные предпочтения нивелируются по статистике; применим *принцип недостаточного основания Бернулли–Лапласа*: если априорные вероятности возможных гипотез неизвестны, то их следует положить равными, т.е. считать равновероятными [14]. В применении к многокритериальной задаче это означает, что все весовые коэффициенты α_k, $k \in [1, s]$, должны быть *равными*, если только нет никаких предварительных данных о разноценности критериев: $\alpha_k \equiv 1/s, \ \forall k \in [1, s]$. Тогда

$$Y(\alpha, y_0) = \frac{1}{s} \sum_{k=1}^{s} [1 - y_{0k}(x)]^{-1}.$$

Учитывая, что умножение на $1/s$ является монотонным преобразованием, которое, по теореме Гермейера, не изменяет результатов сравнения, переходим к унифицированному выражению для скалярной свертки критериев:

$$Y(y_0) = \sum_{k=1}^{s} [1 - y_{0k}(x)]^{-1}. \tag{8}$$

Если вернуться к задаче оценивания проектов, то здесь $Y(y_0)$ — аналитическая оценка x-го проекта из совокупности целочисленных индексов сравниваемых проектов: $x \in X = \{\text{I, II, III, IV}, \ldots\}$.

Скалярную свертку по нелинейной схеме компромиссов можно применить как для задач *анализа* (когда при известном решении x оцениваются критерии $y_0(x)$ и находится обобщенная аналитическая оценка $Y[y_0(x)]$ принятого решения), так и для задач *синтеза*, когда компромиссно-оптимальное решение (в данном случае выбор наилучшего из сравниваемых проектов) определяется в соответствии с моделью векторной оптимизации

$$x^* = \arg\min_{x \in X} Y[y_0(x)] = \arg\min_{x \in X} \sum_{k=1}^{s} [1 - y_{0k}(x)]^{-1}.$$

Оба случая предусматривают определение численных значений аналитической оценки $Y(y_0)$. Но если в задачах синтеза решение получается в результате *сопоставления* значений, то в задаче анализа абсолютная величина $Y(y_0)$ еще ничего не говорит о том, насколько хорош (или плох) данный проект.

Для ответа на этот вопрос решим задачу перехода от численной оценки $Y(y_0)$ к лингвистической категории «хорошо–плохо». Прежде всего нормируем аналитическую оценку так, чтобы при плохих проектах нормированная оценка $Y(y_0)$ приближалась к единице, а при хороших — к нулю:

$$Y_0(y_0) = \frac{Y(y_0)}{Y_{\max}}, \tag{9}$$

где $Y_{\max}$ — предельно плохая аналитическая оценка для данного проекта.

Для определения величины $Y_{\max}$ воспользуемся *принципом солидарной ответственности*. В применении к нашей задаче он состоит в следующем. В интервале неприемлемых оценок (0,7–1,0) обращенной нормированной фундаментальной шкалы выбираем некоторую величину $y_{0\max}$, которую реально может достичь любой из нормированных частных критериев. Отметим, что эту величину нужно подобрать так, чтобы правильно оценивались тестовые примеры (настройка решающего правила).

В соответствии с принципом солидарной ответственности, если какой-либо нормированный критерий достиг величины $y_{0\max}$, то и остальным нормированным критериям приписывается возможность достижения *такого же* значения. Если это так, то величину $Y_{\max}$ можно вычислить по формуле

$$Y_{\max} = s(1 - y_{0\max})^{-1}. \tag{10}$$

Нормированная аналитическая оценка проекта Y_0 тоже измеряется по обращенной нормированной фундаментальной шкале (см. табл. 1), которая в терминах теории нечетких множеств является функцией принадлежности. С ее помощью осуществляется переход от числа Y_0 к соответствующей качественной градации. Например, если $Y_0 = 0{,}48$, то соответствующий проект классифицируется как удовлетворительный.

Вложенные скалярные свертки. Скалярную свертку в виде (8) удобно использовать, если количество частных (парциальных) критериев s не слишком велико (в обычной практике $s \le 10$). Тогда каждый из критериев играет самостоятельную роль и все они одинакового ранга важности. Однако имеются такие сложные многокритериальные задачи, которые характеризуются большим числом (например, несколько десятков) частных критериев. В этих случаях отдельные критерии слабо влияют на конечный результат решения многокритериальной задачи. Целесообразно объединять их в группы (кластеры), которые рассматриваются как новые, более весомые частные критерии. Эти новые агрегированные критерии и сопоставляются между собой в процессе анализа или выбора проекта. В нашем случае такое группирование выполнено при структуризации системы критериев.

В результате кластеризации получается совокупность из нормированных критериев: $y_{0ij}(x)$ — j-й нормированный исходный частный критерий, входящий в i-ю группу. Вычисление новых критериев в виде отдельных скалярных сверток вектора y_0 осуществляется по нелинейной схеме компромиссов

$$\varphi_i(x) = \sum_{j=1}^{J_i} [1 - y_{0ij}(x)]^{-1}, \quad i \in [1, I], \tag{11}$$

где $\varphi_i(x)$ — новые, агрегированные частные критерии; I — количество групп (кластеров); J_i — количество исходных частных критериев в i-й группе.

Скалярная свертка вектора $\varphi(x) = \{\varphi_i(x)\}_{i=1}^{I}$ новых частных критериев как обобщенная оценка всей системы в целом выполняется и в этом случае по нелинейной схеме компромиссов (поэтому они *вложенные*) и вычисляется по формуле

$$\Phi(x) = \sum_{i=1}^{I} \frac{B_i}{B_i - \varphi_i(x)} \tag{12}$$

или

$$\Phi(x)=\sum_{i=1}^{I}\frac{1}{1-\varphi_{0i}(x)}, \qquad (13)$$

если новые критерии нормированы по формуле

$$\varphi_0(x)=\varphi/B. \qquad (14)$$

Здесь B_i — предельно допустимое значение агрегированного частного критерия $\varphi_i(x)$. Ограничения составляют вектор $B=\{B_i\}_{i=1}^{I}$.

Для вычисления компонентов вектора B снова воспользуемся принципом солидарной ответственности. Как и в предыдущем случае, в интервале неприемлемых оценок (0,7–1,0) обращенной нормированной фундаментальной шкалы выбираем величину $y_{0\max}$ и аналогично формуле (10) получаем выражение

$$B_i=J_i(1-y_{0m})^{-1},\ \ i\in[1, I]. \qquad (15)$$

Анализировать и сопоставлять проекты по нормированным агрегированным критериям $\varphi_0(x)$ существенно проще.

Полученная по (12) или (13) аналитическая оценка нормируется по формуле

$$\Phi_0=\frac{\Phi}{\Phi_{\max}}, \qquad (16)$$

где $\Phi_{\max}=I(1-y_{0\max})^{-1}$. Нормированная аналитическая оценка проекта по агрегированным критериям Φ_0 тоже измеряется по обращенной нормированной фундаментальной шкале (см. табл. 1). В этом случае получается более адекватная качественная оценка, так как отдельные частные критерии оказывают более весомое влияние на агрегированные критерии по группам, чем на всю аналитическую оценку в целом, как это имеет место в выражении (8).

В математике и смежных областях используется подход *замены переменных*. В теории электротехники от функций действительного переменного переходят к функции комплексного переменного и после преобразований — обратно к действительным числам. В теории управления из временной области переходят в частотную и после вычислений — обратно к функциям времени. В операционном исчислении (преобразования Хевисайда, Лапласа и др.) для решения дифференциальных уравнений осуществляется переход от оригиналов к изображениям, над которыми проводятся *алгебраические* действия и затем выполняется обратное преобразование — от изображений к оригиналам. Изложенное выше последовательное применение операций перехода от нечетких качественных градаций к числам, аналитические действия с числами и затем возврат к лингвистическим (качественным) категориям является одним из проявлений данного подхода.

Профиль проекта. Для визуализации векторной оценки научных космических проектов можно использовать совокупность нормированных критериев y_{0k}. На этой основе строится графический образ проекта («профиль проекта»), используется идея известного психофизиологического теста «Миннесота». Изучая реакции человека на внешние воздействия, психологи оценивают эти реакции по различным показателям, обозначают оценки точкой на шкале, соединяют их линиями и выстраивают так называемый «профиль личности». Для опытного специалиста такой графический образ позволяет создать целостное представление об основных свойствах личности тестируемого человека. На основе концепции профиля личности разработаны методики прогнозирования поведения человека в тех или иных условиях, методы оценки его профпригодности, рекомендации для профориентации и т.п. Аналогичным образом концепция профиля проекта позволяет создать *целостный* графический образ оцениваемого проекта, что может оказаться весьма полезным, например, при экспресс-оценках для руководителя программы.

Пример. Для иллюстрации приведем пример оценки эффективности приоритетного научного космического проекта «Биосорбент», который был включен в программу экспериментов на борту Международной космической станции. Для оценки его эффективности привлекались высококвалифицированные специалисты-эксперты из следующих организаций:

- Института ботаники им. Н.Г. Холодного НАН Украины;
- Института физиологии им. А.А. Богомольца НАН Украины;
- Национального ботанического сада им. Н.Н. Гришко НАН Украины.

В процессе консультаций с экспертами определены четыре группы (рубрики), включающие 28 критериев оценки данного научного космического проекта. Ведущие сотрудники указанных организаций заполнили анкету (табл. 2), числа справа — результат обработки данных экспертизы по изложенной выше методике. Нормированные критерии рассчитываются по формуле (7) и отражены на рисунке (профиль проекта). Профиль дает целостное представление об оцениваемом проекте по совокупности нормированных критериев качества. Специалист отметит, что значения минимизируемых критериев достаточно низкие, но наблюдается некоторый разброс в группах.

Для аналитической оценки воспользуемся формулой (8) и получим $Y(y_0) =$ $= 31{,}34$. В интервале (1,0–0,7) неприемлемых оценок по обращенной нормированной фундаментальной шкале (см. табл. 1) выберем величину $y_{0\max} = 0{,}75$. Тогда по формуле (10) получим $Y_{\max} = 112$ и по формуле (9) определим $Y_0 = 0{,}28$. Обратившись к табл. 1 как к функции принадлежности, обнаружим, что этому значению нормированной оценки соответствует градация «качество проекта хорошее».

По методике вложенных скалярных сверток определим агрегированные критерии. Согласно (11) они имеют значения

$$\varphi_1 = 4{,}64;\ \varphi_2 = 16{,}97;\ \varphi_3 = 6{,}43;\ \varphi_4 = 4{,}55.$$

Если $y_{0\max} = 0{,}75$, то компоненты вектора ограничений по формуле (15) следующие:

$$B_1 = 16;\ B_2 = 56;\ B_3 = 24;\ B_4 = 16.$$

Нормированные агрегированные критерии определим по формуле (14):

$$\varphi_{01} = 0{,}29;\ \varphi_{02} = 0{,}30;\ \varphi_{03} = 0{,}27;\ \varphi_{04} = 0{,}28.$$

Аналитическую оценку по вложенной скалярной свертке определим по (13): $\Phi = 5{,}6$. Анализ проекта по агрегированным критериям φ_0, входящим в оценку Φ, позволяет делать вывод о состоянии проекта *по группам*, что облегчает целостное впечатление о проекте, особенно при сопоставлении различных проектов данного класса. Если же речь идет о квалификации единственного проекта, то аналитическую оценку Φ следует нормировать по формуле (16) при $\Phi_{\max} = 16$: $\Phi_0 = 0{,}35$. Используя обращенную нормированную фундаментальную шкалу (см. табл. 1) как функцию принадлежности, квалифицируем данный проект как «хороший».

Таблица 2

№ п /п	Критерии оценки качества проекта	Число баллов по 10-балльной шкале
Общие критерии		
1	Соответствие проекта заданиям Космической программы Украины	10,00
2	Степень интеграции проекта в международные программы биологических исследований в космосе	9,00
3	Вероятность того, что предложенный подход приведет к желаемым результатам	7,50
4	Полнота физической реализуемости проекта в заданных условиях космического эксперимента	8,30
Критерии научного развития		
5	Мера соответствия структуры работы и методов исследования целям проекта	9,75
6	Мера развития знаний о влиянии факторов космического полета на фундаментальные физиологические процессы	8,25
7	Мера развития знаний о механизмах адаптации биологических объектов к условиям космического полета	8,25
8	Степень новизны выполняемых исследований	8,00
9	Мера оригинальности и степень новаторства поставленных целей	8,75
10	Влияние результатов исследований на научные концепции и методы в области космической биологии и медицины	9,75
11	Вероятность того, что результаты исследований позволят осуществлять новые прорывные проекты	8,50
12	Мера опровержения существующих парадигм	5,30
13	Доля тех исследований в проекте, которые выполняются на мировом уровне	9,75
14	Мера повышения международного престижа Украины	8,00
15	Степень поддержки проекта общественными организациями	9,70
16	Мера освещения исследований в научной литературе	9,70
17	Использование результатов работы в учебном процессе	7,70
18	Мера популяризации и распространения знаний	8,75
Экономические критерии		
19	Возможность передачи разработанных технологий для внедрения в экономику Украины	9,33
20	Мера обеспеченности коллектива достаточным количеством специалистов для доведения работ до практического внедрения	10,00
21	Способствование привлечению инвестиций	9,33
22	Уменьшение производственных затрат	9,33
23	Увеличение объема продажи продукции	8,67
24	Степень достаточности объема финансирования для выполнения запланированных работ	9,33
Социальные критерии		
25	Увеличение количества рабочих мест	10,00
26	Повышение уровня квалификации персонала	8,00
27	Способствование развитию малого и среднего бизнеса	7,67
28	Влияние на деятельность общественных и молодежных организаций	10,00

Критерий	Значение	Место на шкале 0–1									
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
y_{01}	0,00										
y_{02}	0,10										
y_{03}	0,25										
y_{04}	0,17										
y_{05}	0,02										
y_{06}	0,17										
y_{07}	0,17										
y_{08}	0,20										
y_{09}	0,12										
y_{010}	0,02										
y_{011}	0,15										
y_{012}	0,47										
y_{013}	0,20										
y_{014}	0,15										
y_{015}	0,03										
y_{016}	0,03										
y_{017}	0,23										
y_{018}	0,22										
y_{019}	0,07										
y_{020}	0,00										
y_{021}	0,07										
y_{022}	0,07										
y_{023}	0,13										
y_{024}	0,07										
y_{025}	0,00										
y_{026}	0,20										
y_{027}	0,23										
y_{028}	0,00										

Обратим внимание на то, что нормированная оценка проекта по методике вложенных скалярных сверток (0,35) несколько хуже, чем такая же оценка по классической методике нелинейной схемы компромиссов (0,28), хотя обе оценки не выходят из градации «качество проекта хорошее». Это объясняется тем, что методика вложенных скалярных сверток более строго отнеслась к выбросу критерия $y_{012} = 0{,}47$, в то время как классическая методика отреагировала на него слабее. Методика вложенных скалярных сверток контрастнее и часто адекватнее оценивает качество проектов, хотя и несколько сложнее в расчетах. При небольшом числе критериев оценки по обеим методикам сближаются, поэтому методику вложенных скалярных сверток рекомендуется применять только тогда, когда число критериев составляет несколько десятков.

А.М. Воронін

СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ТА БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНЕ ОЦІНЮВАННЯ КОСМІЧНИХ ПРОЕКТІВ ЕКСПЕРТНИМИ МЕТОДАМИ

Розглянуто задачу багатокритеріального оцінювання космічних проектів методом експертних оцінок. Використовується поняття вкладених скалярних згорток векторного критерію. Описано метод аналітичних та якісних оцінок. Наведено спосіб візуалізації («профіль проекту»).

A.N. Voronin

SYSTEM ANALYSIS AND MULTICRITERIA ESTIMATION OF THE SPACE PROJECTS BY EXPERT METHODS

A problem of the multicriteria estimation of the space projects is considered by expert estimates method. A notion of the nested scalar convolution is used. A method of analytical and qualitative estimates is given. A technique of visualization is considered («profile of a project»).

1. *Воронин А.Н., Зиатдинов Ю.К., Харченко А.В.* Сложные технические и эргатические системы: Методы исследования. — Харьков : Факт, 1997. — 240 с.
2. *Миркин Б.Г.* Проблема группового выбора. — М. : Наука, 1974. — 256 с.
3. *Ларичев О.И.* Проблемы принятия коллективных решений в малых группах // Нелинейная динамика и управление. — М. : Эдиториал УРСС. — 1999. — С. 91–103.
4. *Charnes A.,Cooper W.* Management models and industrial applications of linear programming. — New York : Wiley, 1961. — 240 p.
5. *Hwang C.L., Yoon K.L.* Multiple attribute decision making: Methods and aplications. — New York : Springer-Verlag, 1981. — 196 p.
6. *Тоценко В.Г.* Методы и системы поддержки принятия решений. — Киев : Наук. думка, 2002. — 382 с.
7. *Фишберн П.* Теория полезности для принятия решений. — М. : Наука, 1978. — 352 с.
8. *Saaty T.L.* Decision making for leaders. — Pittsburg : RWS Publications, 2000. — 240 p.
9. *Заде Л.* Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. — М. : Мир, 1976. — 165 с.
10. *Орловский С.А.* Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации. — М. : Наука, 1981. — 208 с.
11. *Обработка* нечеткой информации в системах принятия решений / Под ред. А.Н. Борисова. — М. : Радио и связь, 1989. — 304 с.
12. *Воронин А.Н., Зиатдинов Ю.К., Козлов А.И.* Векторная оптимизация динамических систем. — Киев : Техніка, 1999. — 284 с.
13. *Helmer O.* The systematic use of expert judgement on operation research // Proc. of the 3rd IFOS Conf. — Oslo, 1963. — P. 12–17.
14. *Жуковский В.И., Молоствов В.С.* Многокритериальное принятие решений в условиях неопределенности. — М. : МНИИПУ, 1988. — 132 с.
15. *Korhonen P., Laakso J.* A visual interactive method for solving the multiple criteria problem // European J. of Oper. Res. — 1986. — **42**. — P. 277–287.
16. *Koksalan M.M.* Identifying and ranking a most preferred subset of alternatives in the presence of multiple criteria // Naval Research Logistics. — 1989. — **36**. — P. 359–372.
17. *Larichev and Moshkovich*. ZAPROS: A method and system for ordering multiattribute alternatives on the base of a decision-maker's preferences. — M. : 1996. — 1 p. (Prep. All-Union Research Institute for Systems Studies).
18. *Gulyanitsky L.F., Sergienko I.V.* Refinement of the rules of choice in multiobjective decision-making problems using expert judgment // Systems Analysis, Modeling, Simulation. — 1994. — **15**. — P. 39–46.

Получено 01.07.2003
После доработки 17.11.2003