

## КОМПЛЕКСНАЯ МЕТОДИКА МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ НАУЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ПРОЕКТОВ

Институт космических исследований

*Рассмотрена задача многокритериальной оценки эффективности научных космических проектов методом экспертных оценок. Используется понятие вложенных скалярных сверток векторного критерия. Описан метод получения аналитических и качественных оценок. Приводится способ визуализации («профиль проекта»).*

**Введение.** В Институте космических исследований НАНУ и НКАУ разработана комплексная методика оценки эффективности космических проектов. Методика предназначена для проведения системного анализа и получения многосторонней характеристики проектов, повышения достоверности выводов о научной значимости результатов, о социальной и экономической эффективности планируемых и выполненных работ в космической отрасли. В настоящей работе мы ограничиваемся рассмотрением оценки научных космических проектов, хотя основные результаты исследования применимы для оценки эффективности проектов вообще.

Оценка эффективности проектов осуществляется в трех случаях: 1) при отборе проектов, когда работа над ними еще не начиналась; 2) в процессе выполнения проектов с целью оптимизации менеджмента; 3) после выполнения проектов, когда исследования завершены и можно проследить результаты внедрения этих исследований. Разработанную методику при некоторой модификации можно применить во всех упомянутых случаях, но в данной работе мы сосредоточили внимание на оценке эффективности выполненных проектов.

Задачи оценки сложных (таких, как проекты Национальных космических программ) объектов и процессов предусматривают сопоставление множества различ-

ных, обычно противоречивых свойств, что дает основание для отнесения этих задач к классу многокритериальных. Известно, что решение многокритериальных задач затруднительно вследствие практически полного отсутствия формализованных методов. Для уменьшения влияния субъективности предложен формализованный аппарат скалярной свертки критериев на основе концепции нелинейной схемы компромиссов [1]. Адекватные методы исследования многокритериальных задач используют привлечение в том или ином виде специалистов (экспертов), компетентных в данной предметной области. В данной работе экспертные методы используются только для определения размерности и качественного состава вектора критериев (ординальные оценки), а также для количественной оценки значений частных критериев (кардинальные оценки). Сам аппарат многокритериального оценивания непосредственное участие человека не предусматривает.

**Общая характеристика методики.** Задача оценки эффективности научных 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. С помощью описываемой методики решаются следующие задачи:

- формирование системы критериев и показателей эффективности космической деятельности (применительно к оценке научных космических проектов);

- формализованная аналитическая и качественная оценка научных космических проектов по совокупности критериев качества;

- визуализированное представление оценки проекта (построение профиля проекта).

Для анализа эффективности научных космических проектов были разработаны специальные формы представления комплексной информации организациями-исполнителями. Кроме того, по желанию экспертов в их распоряжение предоставляются технические задания, сметы, календарные планы, отчеты и другие необходимые материалы по оцениваемому проекту. Для проведения процедуры экспертизы проектов в области научных космических исследований и получения ответов экспертов разработана типовая форма-анкета. Формы и анкеты являются рамочными документами, в каждом конкретном случае показатели могут модифицироваться, исключаться или добавляться.

Возможности разработанной методики позволяют осуществлять комплексную оценку эффективности проектов при количестве показателей качества от единиц до нескольких десятков. Методика неприменима в тех случаях, когда качественные показатели принципиально не сводятся к количественным (числовым) величинам и не могут быть измерены по шкалам. Методику нельзя использовать без дополнительной модификации, если имеются такие критерии, которые могут принимать только дискретные (целочисленные) значения.

**Краткое содержание методики.** Поставленные задачи решаются многокритериальным методом с получением исходных данных путем экспертных оценок. Экспертная информация для формирования системы критериев и для оценки частных критериев эффективности космических проектов формируется путем

анкетных опросов по оценочным шкалам. Массив данных используется как исходный материал для расчета аналитических оценок качества, а также для построения графического образа эффективности проекта («профиль проекта») и получения качественных характеристик. Многокритериальная оценка осуществляется как по классической нелинейной схеме компромиссов [1], так и методом вложенных скалярных сверток векторного критерия [2]. В последнем случае проекты анализируются и оцениваются по агрегированным критериям, что делает анализ выпуклым и контрастным.

**Формирование системы критериев.** Оценка эффективности проекта начинается с формирования группы организаторов экспертизы, в чьи обязанности входит:

- выбор специалистов-экспертов;
- разработка (и при необходимости согласование с экспертами) перечня критериев и показателей эффективности;
- составление опросных листов (форм-анкет);
- проведение опроса экспертов;
- анализ и обработка информации, полученной от экспертов;
- получение и визуализация оценок проекта по отдельным (частным) критериям, группам критериев (агрегированные оценки) и полной совокупности критериев (обобщенная аналитическая оценка);
- получение качественных характеристик проекта.

В качестве экспертов привлекаются высококвалифицированные специалисты в рассматриваемой области космической деятельности. Количество экспертов обуславливается сложностью решаемой задачи.

Организаторы экспертизы составляют предварительный список критериев, которые позволяют оценить качество научных космических проектов. Критерии структурируются по группам:

Общие критерии.

Критерии научно-технического развития.

Финансово-экономические критерии.

Социальные критерии.

Критерии обеспечения заданий обороны и безопасности.

Экологические критерии.

После консультаций с экспертами организаторы экспертизы включают в каждую группу конкретные критерии. Если все эксперты с полученным списком согласны и не вносят дополнений, то на этом данный этап заканчивается. Если же эксперты вносят в первоначальный список дополнительные критерии или подвергают сомнению уже внесенные, то производится этап ранжирования критериев.

Чтобы выявить действительно значимые частные критерии, организаторы предъявляют экспертам (каждому в отдельности) составленный ими первоначальный список. Им предлагается изучить список и выбрать из него наиболее важные, по мнению эксперта, частные критерии, проранжировав их в порядке важности. Критерии, получившие наименьшую сумму рангов, выделяются в окончательный список. Количество выделенных критериев зависит от многоаспектности проекта (как правило, их бывает от двух до семи в каждой группе). Необходимо, чтобы разница между количеством голосов, отданных наименее важному из выделенных критериев и наиболее важному из отсеченных, была, возможно, большей.

Выделенные показатели во всех группах представляют собой исходную систему частных критериев, из которых формируется обобщенный критерий качества оцениваемого научного проекта.

*Проведение экспертизы проекта и обработка результатов.* Экспертам (каждому отдельно) предоставляется разработанная форма-анкета. В ней в составе рубрик по группам критериев перечисляются частные критерии, выделенные на предыдущем этапе. Критериям сопоставляется непрерывная шкала, разделенная на десять интервалов. Цифра 0 на шкале соответствует понятию «никакой ценности», цифра 10 – «максимальная ценность». Эксперта просят оценить относи-

тельное влияние каждого из частных критериев на эффективность проекта и приписать каждому критерию соответствующую точку на шкале  $f$ .

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 фундаментальная шкала представляет собой *функцию принадлежности*, с помощью которой осуществляется переход от лингвистической переменной (удовлетворительное качество, высокое качество и пр.) к количественным оценкам (соответственно 5,5; 7,0) по шкале баллов, т.е. переход от нечетких качественных градаций к числам и обратно.

После заполнения экспертами анкеты возвращаются к организаторам экспертизы и обрабатываются. Массив полученных от экспертов 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,  $k \in [1, s]$ ,  $s$  – количество критериев. Рассчитываются оценки, усредненные по числу экспертов

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

Здесь  $f_k$  – усредненная оценка, данная коллективом экспертов по каждому критерию. Оценка  $f_k$  достаточно объективна, если количество экспертов велико и состав их достаточно однороден (в более сложных случаях применяют методику обработки экспертных оценок с учетом коэффициентов компетентности экспертов [1]).

При рассмотрении экспертами некоторых критериев возможен случай, когда они затрудняются с оценкой и в соответствующей графе ставят прочерк. Тогда при расчете оценки по формуле (1) вместо величины  $m$  используется число  $m_k$ ,  $m_k \leq m$ , равное реальному числу экспертов, участвовавших в оценке критерия. Нормированные оценки по минимизируемым частным критериям получаются из (1) по формуле:

$$y_{0k} = 1 - 0,1 f_k, y_{0k} \in [0;1], k \in [1,s]. \quad (2)$$

Символом «0» в (2) и ниже отмечается нормированная оценка. Нормированным минимизируемым критериям сопоставляется обращенная нормированная фундаментальная шкала (табл. 1). Совокупность нормированных критериев  $y_{0k}$  является исходной для аналитической многокритериальной оценки проекта в соответствии с концепцией нелинейной схемы компромиссов [1].

Обобщенная аналитическая оценка проекта. Для разносторонней характеристики оцениваемых проектов используются два вида методов многокритериальной оценки: классический и агрегированный.

Обобщенная аналитическая оценка научных проектов классическим методом с использованием скалярной свертки по нелинейной схеме компромиссов [1] осуществляется по формуле

$$Y(y_0) = \sum_{k=1}^s [1 - y_{0k}]^{-1}. \quad (3)$$

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  $Y_0(y_0)$  приближалась к единице, а при хороших – к нулю:

$$Y_0(y_0) = \frac{Y(y_0)}{Y_{\max}}, \quad (4)$$

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

Для определения величины  $Y_{\max}$  воспользуемся *принципом солидарной ответственности* (в просторечии – «круговая порука»). В применении к нашей задаче он состоит в следующем. В интервале неприемлемых оценок  $(0,7-1,0)$  обращенной нормированной фундаментальной шкалы выбираем некоторую величину  $y_{0\max}$ , которой реально может достичь

любой из нормированных частных критериев при неприемлемо плохом качестве по данному критерию. 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

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

Нормированная аналитическая оценка проекта  $Y_0$  тоже измеряется по обращенной нормированной фундаментальной шкале (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».

**Агрегированный метод.** Информативность оценок проекта может быть повышена за счет объединения частных критериев в группы и формирования агрегированных критериев по методу вложенных скалярных свертков [2].

Вычисление оценок по агрегированным критериям осуществляется по формуле

$$\varphi_i = \sum_{j=1}^{J_i} [1 - y_{0j}]^{-1}, \quad i \in [1, I], \quad (5)$$

где  $\varphi_i$  – оценки по агрегированным критериям;  $I$  – количество групп;  $J_i$  – количество исходных частных критериев в  $i$ -й группе.

Обобщенная нормированная оценка по агрегированным критериям вычисляется по формуле

$$\Phi = \sum_{i=1}^I \frac{1}{1 - \varphi_{0i}}, \quad (6)$$

если агрегированные оценки нормированы по формуле  $\varphi_{0i} = \varphi_i / B_i$ ,  $i \in [1, I]$ . Здесь  $B_i = J_i(1 - \varphi_{0\max})^{-1}$  – неприемлемо плохая оценка агрегированного критерия  $\varphi_{0i}$  в каждой группе. Будем считать, что  $\varphi_{0\max} = y_{0\max}$ .

Полученная аналитическая оценка нормируется по формуле

$$\Phi_0 = \frac{\Phi}{\Phi_{\max}}, \quad (7)$$

где  $\Phi_{\max} = I(1 - y_{0\max})^{-1}$  – неприемлемо плохая величина оценки  $\Phi_0$ .

Нормированная аналитическая оценка проекта по агрегированным критериям  $\Phi_0$  также измеряется по обращенной нормированной фундаментальной шкале (табл. 1) и на основании этого измерения получается качественная характеристика проекта. Обычно оценки  $\Phi_0$  и  $Y_0$  близки друг к другу, но при наличии резких «выбросов» нормированных частных критериев оценка  $\Phi_0$  больше.

**Визуализация оценок эффективности проекта.** Визуализация оценки по вектору критериев качества осуществляется в виде графического образа («профиля проекта»). Исходной информацией для его построения является совокупность нормированных критериев  $y_{0k}$ . Профиль позволяет создать целостный образ оцениваемого проекта, что может оказаться весьма полезным, например, при экспресс-оценках.

**Программная реализация методики.** Программное обеспечение выполнено в среде *Delphi*. Программа состоит из блоков:

1. Информационные данные о проекте;
2. Организация процедуры экспертизы;
3. Обработка результатов экспертизы;
4. Вывод и визуализация результатов.

Управление программой выполняется с помощью клавиатуры или мыши и состоит во введении данных и команд на выполнение расчетных процедур в соответствующие информационные поля.

Блок «Информационные данные о проекте» содержит:

- поля для введения названия проекта, наименования организации-исполнителя, данных о сроках выполнения проекта, объеме финансирования;
- типовую форму представления информации, заполненную исполнителями проекта;
- техническое задание, отчет, другие сведения о проекте.

Блок «Организация процедуры экспертизы» включает

- список специалистов-экспертов и сведения о них;
- форму-анкету для проведения экспертизы;
- характеристики системы критериев.

Блок «Обработка результатов экспертизы» осуществляет накопление ответов экспертов, формирует массив данных для последующей обработки, а также осуществляет на основе формул расчет различных категорий оценок эффективности проекта.

Блок «Вывод и визуализация результатов» осуществляет выдачу результатов расчета различных категорий оценок эффективности проекта, а также строит «профиль проекта».

**Иллюстрация методики на примере.** С помощью предложенной методики проведен системный анализ и получена многокритериальная оценка десяти научных космических проектов по следующим направлениям:

- науки о жизни (проект «Клітина»),
- физика микрогравитации («Технологія» и «Космоматеріал»),
- астрофизика и астрономия («Спектр-УФ», «Интерферометр» и «Коронас-Ф»),
- исследования околоземного пространства («Интербол», «Ионосфера-Вариант», «Ионосфера-2», «Попередження»).

Для иллюстрации методики в данной работе был выбран научный проект «Клітина» как комплексный космический

проект, имеющий приоритет для включения в программу экспериментов на борту МКС. Для оценки его эффективности привлечены высококвалифицированные специалисты-эксперты из организаций, имеющих опыт работы в данной области космической деятельности. В соответствии с изложенной методикой проведена экспертиза научного космического проекта «Клітина». В процессе консультаций с экспертами определены 4 группы ( $I=4$ ), включающие 20 критериев ( $s=20$ ) оценки данного научного космического проекта – общие, научного развития, экономические и социальные. Четыре ведущих сотрудника упомянутых организаций ( $m=4$ ) заполнили Анкету (табл. 2).

Ответы экспертов сведены в табл. 3. Левый столбец таблицы соответствует номеру эксперта, порядковый номер критерия соответствует тому номеру, который данный критерий имеет в Анкете. Нормированные значения частных критериев получены по формулам (1) и (2). Обобщенная аналитическая оценка проекта классическим методом вычислена по формулам (3) и (4). Расчет эффективности проекта по агрегированным критериям выполнен по формулам (5-7).

- Получено четыре вида результатов:
1. Аналитическая нормированная оценка проекта классическим методом.
  2. Качественная оценка проекта классическим методом по обращенной нормированной фундаментальной шкале.
  3. Аналитическая нормированная оценка проекта агрегированным методом.
  4. Качественная оценка проекта агрегированным методом по обращенной нормированной фундаментальной шкале.

Результаты расчета эффективности проекта «Клітина» классическим методом представлены таблицей 4, а агрегированным – таблицей 5. Визуализация результатов отображается «профилем проекта» (рис. 1). По оси абсцисс отложены номера частных критериев в соответствии с левым столбцом Анкеты.

#### Список литературы

1. Воронин А. Н. Многокритериальный синтез динамических систем. – К.: Наукова думка, 1992. – 160 с.
2. Воронин А. Н. Вложенные скалярные свертки векторного критерия // Проблемы управления и информатики. – № 5. – 2003. – С. 10-21.

Таблица 1. Фундаментальная шкала

Категория качества	Фундаментальная шкала $f$	Обращенная нормированная фундаментальная шкала $y_0, Y_0, \Phi_0$
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

Таблица 2. Анкета

№ п/п	№	Критерии оценки качества проекта	Количество баллов по 10-бальной шкале
I. Общие критерии			
1	1.1	Ясность и четкость формулировки целей проекта	
2	1.2	Соответствие проекта поставленным целям	
3	1.3	Степень полноты реализованности проекта	
4	1.4	Степень интеграции проекта в международные программы научных космических исследований	
5	1.5	Степень содействия повышению международного престижа Украины	
II. Критерии научного развития			
6	2.1	Степень новизны выполненных исследований	
7	2.2	Степень оригинальности и новаторства поставленных целей и полученных результатов	
8	2.3	Степень содействия развитию наших представлений о влиянии факторов космоса на фундаментальные научные концепции в области наук о жизни	
9	2.4	Степень содействия результатов проекта появлению новых прорывных технологий	
10	2.5	Доля исследований в проекте, выполненных на мировом уровне	
11	2.6	Степень содействия развитию знаний о механизмах адаптации биологических объектов к условиям космического полета	
12	2.7	Влияние разработок на перспективное научно-техническое развитие космической области	
13	2.8	Степень освещения результатов работ в научной литературе	
14	2.9	Использование результатов работ в учебном процессе	
15	2.10	Степень популяризации и распространения знаний	
III. Экономические критерии			
16	3.1	Возможность внедрения результатов разработки в практику	
17	3.2	Возможность передачи разработанных технологий для внедрения в социально-экономическую сферу Украины	
18	3.3	Содействие привлечению инвестиций	
IV. Социальные критерии			
19	4.1	Влияние результатов разработки на качество жизни граждан Украины	
20	4.2	Развитие образования	

Таблица 3. Ответы экспертов

№	Критерии																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	9	9	6	-	8	7	7	9	7	-	10	8	7	9	8	8	8	9	8	9
2	10	10	8	7	10	10	10	8	9	9	8	10	8	6	7	8	7	9	7	8
3	10	10	9	6	9	10	9	9	10	8	8	9	7	8	8	9	6	10	8	7
4	10	10	10	9	9	9	9	10	9	9	10	9	8	8	8	7	5	4	-	4

Таблица 4. Результаты расчета эффективности классическим методом

№ критерия	Значения $y_0$ нормированных оценок по частным критериям
1	0.025
2	0.025
3	0.175
4	0.267
5	0.100
6	0.100
7	0.125
8	0.100
9	0.125
10	0.133
11	0.100
12	0.100
13	0.250
14	0.225
15	0.225
16	0.200
17	0.350
18	0.200
19	0.233
20	0.300

Оценка проекта по классическому методу:  $Y_0=0.304$ .

Качественная характеристика проекта: качество хорошее.

Таблица 5. Результаты расчета эффективности агрегированным методом

№ оценки	Значения $\phi_0$ нормированных агрегированных оценок
1	0.287
2	0.295
3	0.337
4	0.342

Оценка проекта по агрегированным критериям  $\Phi_0=0.365$ .

Качественная характеристика проекта: качество хорошее.

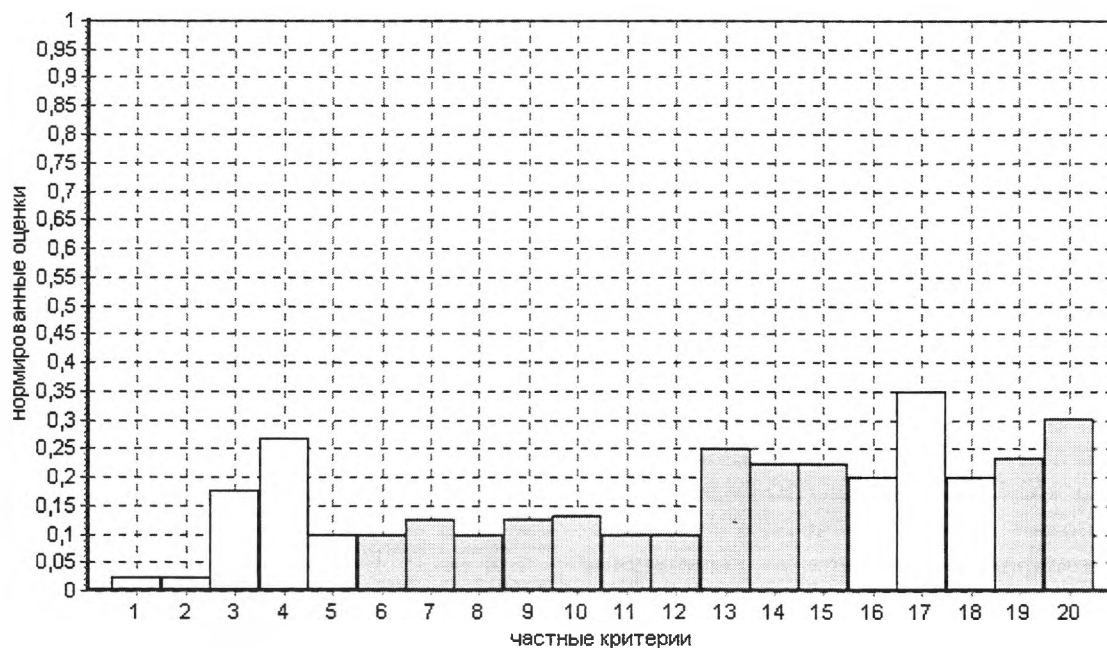


Рис. 1. Профиль проекта «Клітина»