УДК 519.9

Л.И. Самойленко, Л.Н. Колос

РАЗРАБОТКА МЕТОДОЛОГИИ ОЦЕНИВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОСМИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Введение

Масштабы космической деятельности и объемы финансовых ресурсов, необходимых для ее реализации, требуют новых форм организации, разработки и отбора космических проектов и программ с использованием методологии современного системного анализа. В Украине на высоком уровне могут проводиться фундаментальные и прикладные космические исследования и разработки, по каждому тематическому направлению есть реальные проекты, но их одновременное выполнение в полном объеме невозможно вследствие ресурсных ограничений. Реализации подлежат лучшие, наиболее востребованные и эффективные по комплексу критериев (научно-технических, социально-экономических, технологических, мировоззренческих, просветительских и др.) проекты. Поэтому необходимо проводить анализ и отбор альтернативных проектов, программ, сценариев космической деятельности. В теории системного анализа объекты такого класса относят к категории «сложных» или «больших» систем. Целью исследований является разработка и усовершенствование методического обеспечения для оценивания космической деятельности и поддержки управленческих решений с использованием системно-аналитической методологии теории принятия решений [1–7].

В соответствии с принятой в теории системного анализа классификацией [8] космическую деятельность можно рассматривать как слабоструктурированный слабоформализуемый объект исследований с нечетко определяемой структурой и невозможностью построения строгой математической модели, отражающей его основные свойства. Определяющими особенностями объекта являются его многомерность, многосвязность, многокритериальность. Информация о характеристиках имеет как количественное, так и качественное представление, что требует применения экспертных методов. Вариации факторов внешней и внутренней среды влияния обусловливают многовариантность характеристик состояния объекта. В целом принципиальная неформализуемость, нечеткость и неполнота информации и большая размерность делают задачу оценивания космической деятельности достаточно сложной и трудоемкой. Несмотря на имеющиеся результаты, методические подходы к решению задач рассматриваемого класса развиты недостаточно.

Данная статья является продолжением цикла работ, выполненных в Институте космических исследований НАНУ и ГКАУ в соответствии с заданием ГКАУ по оцениванию результатов и эффективности выполнения проектов 3-й Общегосударственной космической программы Украины (ОКПУ). В рамках этого задания для формирования целостного представления о космической деятельности построена ее структурная целевая модель [9]. Использовалась методология теории систем как основа для описания исследуемого объекта и его проблем в терминах структурной взаимосвязанной иерархии. Структура трактуется как множество элементов, взаимодействующих в специфическом для рассматриваемой предметной области порядке. Модель строилась с выделением и упорядочением доминирующих элементов в контексте системы, рассматриваемой как целое. С использованием агрегативно-декомпозиционного подхода решены следующие задачи:

— на базе общегосударственных приоритетов сформулирована главная цель космической деятельности (верхний доминирующий элемент — вершина иерархии) и далее методом последовательной декомпозиции построена система целей нижеследующих уровней иерархии, вплоть до отдельных заданий и проектов ОКПУ;

— установлены связи и взаимозависимости между элементами иерархии (целевой модели), выявлены факторы, характеризующие дальнюю и ближнюю среду влияния на моделируемую ситуацию;

— разработано формализованное описание построенной системы целей путем определения для всех целей и подцелей наиболее информативных количественных и качественных параметров, показателей и факторов влияния.

Такой подход к построению модели позволил систематизировать и упорядочить информацию об объекте моделирования, учесть всю совокупность его свойств, визуализировать предметную область, сформировать проблемное поле в терминах выявленных индикаторов (параметров и показателей), отразить всю многоплановость и многосвязность космической деятельности Украины. В целом верифицированная целевая модель является базой исходных данных для анализа различных управленческих решений и ситуаций, выявления влияния различных факторов на достижение целей.

Для анализа результатов выполнения заданий и проектов ОКПУ разработаны системы критериев и многокритериальные методики оценивания эффективности [10, 11], адаптированные к различным тематическим направлениям космической программы. Оценивание эффективности проектов по применению спутниковых данных в задачах природопользования осуществлялось в соответствии с методикой, реализующей классическую расчетную схему линейной свертки оценок по комплексу критериев (актуальность, научно-технический эффект, практическая ценность) с использованием априорно заданных коэффициентов их значимости и разработанных информационно-аналитических таблиц балльных оценок. Для анализа качества проектов в области научных космических исследований разработана методика, реализующая многокритериальный экспертный метод, с построением функции полезности по нелинейной схеме компромиссов. Методика обеспечивает получение нормированных количественных оценок эффективности объектов, сопоставление которых с фундаментальной шкалой дает качественные (лингвистические) оценки. Использование оригинального авторского подхода вложенных скалярных сверток [12] позволяет рассчитывать агрегированные (по группам критериев) оценки в рамках отдельных проектов, групп проектов, направлений космической деятельности в целом. Свертка оценок по нелинейной схеме компромиссов делает целесообразным использование этой методики в задачах с возможными ограничениями на оценки по критериям при риске их приближения к предельно допустимым значениям.

В качестве базовой рассматривалась методика [10], разработанная на основе адаптации к задачам космической деятельности известного в теории принятия решений метода анализа иерархий (МАИ) [2], позволяющего осуществлять иерархическое моделирование, многокритериальную оценку и ранжирование оцениваемых объектов. Особенностями МАИ являются его простота и наглядность, возможность сопоставления оцениваемых объектов как по количественным, так и по качественным характеристикам, удобная сочетаемость с методами экспертного оценивания. Метод получил широкое распространение на практике (особенно в США), на его основе разработаны системы поддержки принятия решений в задачах анализа объектов различного характера — экономических, технических, политических, военных. Имеются примеры использования МАИ для оценивания объектов космической деятельности [13–15]. Метод в его классической интерпретации имеет ряд недостатков, среди которых — характерная для экспертных методов проблема согласованности экспертных суждений, возможное нарушение транзитивности сравнительных оценок при использовании заданной «шкалы относительной важности», возможное несохранение порядка ранжирования объектов при исключении одного из них, существенное увеличение объема вычислений с ростом размерности задачи.

Методика оценивания проектов ОКПУ [10] была разработана в свое время на основе стандартного классического МАИ (аналогичный подход применялся и в работах [13–15]). Опыт применения методики, а также наработки последних лет [3, 5, 6] позволяют ввести ряд усовершенствований и улучшить характеристики методики в контексте ее упрощения, повышения надежности оценок, уменьшения объема необходимых вычислений. Ниже приведены основные положения разработанной ранее методики оценивания космических проектов на основе стандартного МАИ, анализ и обоснование принятых изменений, расчетная схема результирующего варианта усовершенствованной методики и пример ее использования для оценки объектов космической деятельности.

1. Основные положения методики оценивания космических проектов на основе стандартного МАИ

Многокритериальное сравнительное оценивание и определение рейтинга рассматриваемых проектов проводятся путем выполнения следующих этапов.

Этап 1. Детальный анализ задачи и ее структурирование в виде доминантной иерархической структуры с несколькими уровнями. На уровне 1 (верхнем) иерархии находится один объект (рис. 1), например главная цель работ. На уровне 2 может находиться множество объектов, например критерии $2.1, 2.2, \ldots, 2.k$ (k — число критериев), по которым оцениваются проекты. Уровень 3 (нижний) представляет собой перечень проектов — $3.1,\ 3.2, \ldots,\ 3.p$ (p — число проектов). Устанавливаются связи между элементами иерархии, определяющие их взаимное влияние.

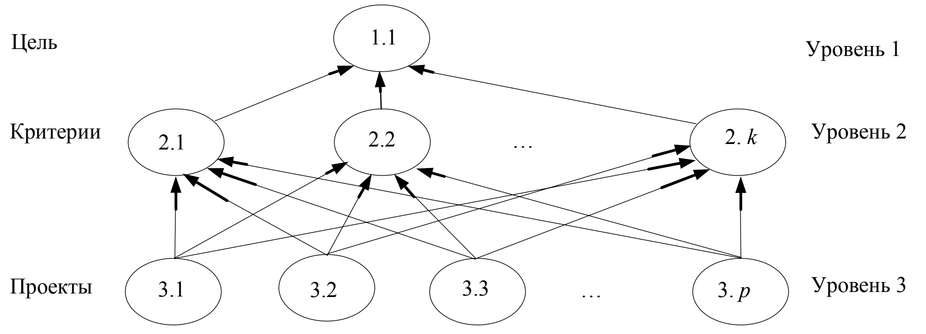

Рис. 1

Этап 2. Проведение попарных сравнений объектов каждого уровня, построение матриц попарных сравнений. Каждые два объекта одного уровня сопоставляются друг с другом с точки зрения их значимости по отношению к примыкающему сверху (по стрелкам, рис. 1) объекту верхнего уровня. Если сопоставляемые показатели имеют числовую меру, то в матрицу сравнения заносится их отношение, если сравниваются качественные показатели, то оценка доминирования одного объекта над другим проводится экспертами на основе шкалы Саати — специальной «шкалы относительной важности» (табл. 1). Эксперт выражает свое мнение об относительной значимости объектов сравнения, используя одну из вербальных оценок (табл. 1), при этом в матрицу заносится соответствующее число.

Таблица 1

Оценка	Степень преимущества одного объекта над другим
1	равная важность
3	умеренное преимущество
5	существенное преимущество
7	сильное преимущество
9	несравнимое преимущество
2, 4, 6, 8	промежуточные значения

Матрица попарных сравнений $A=[a_{ij}]$ квадратная, $i, j = 1, \dots, n, n$ — порядок матрицы

$$A=[a_{ij}]=\begin{array}{c} \\ O_1 \\ O_2 \\ O_3 \\ \dots \\ O_n \end{array}\!\!\begin{array}{c} \begin{array}{ccccc} O_1 & O_2 & O_3 & \dots & O_n \end{array} \\ \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & a_{23} & \dots & a_{2n} \\ a_{31} & a_{32} & 1 & \dots & a_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \dots & 1 \end{bmatrix} \end{array} = \begin{bmatrix} 1 & \omega_1/\omega_2 & \omega_1/\omega_3 & \dots & \omega_1/\omega_n \\ \omega_2/\omega_1 & 1 & \omega_2/\omega_3 & \dots & \omega_2/\omega_n \\ \omega_3/\omega_1 & \omega_3/\omega_2 & 1 & \dots & \omega_3/\omega_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \omega_n/\omega_1 & \omega_n/\omega_2 & \omega_n/\omega_3 & \dots & 1 \end{bmatrix}. \qquad (1)$$

Здесь $O_1, ..., O_n$ — объекты иерархии, образующие уровень; элементы матрицы a_{ij} — коэффициенты относительной важности, определяющие, насколько i-й объект важнее j-го объекта по отношению к верхнему примыкающему элементу иерархии (например, насколько i-й критерий важнее j-го критерия по отношению к цели); $\omega = (\omega_1, \omega_2, ..., \omega_n)$ — вектор весов объектов.

Порядок матриц попарных сравнений определяется количеством элементов уровня. Для оценки сравнительной важности критериев (элементы $2.1, 2.2, \dots, 2k$ уровня 2) по отношению к цели (элемент 1.1 уровня 1) строится одна матрица k-го порядка, для сравнения проектов $3.1, 3.2, \dots, 3.p$ по каждому критерию $2.1, 2.2, \dots, 2.k$ отдельно следует построить k матриц p-го порядка. Матрицы имеют единичную главную диагональ $a_{ii} = 1$ (объект сравнивается сам с собой) и обратно симметричны

$$a_{ij} = 1/a_{ji}. \qquad (2)$$

Если оценка a_{ij} получена, то элемент a_{ji} вычисляется по формуле (2). Количество элементарных операций попарных сравнений, которые необходимо выполнить для построения матрицы n-го порядка, равно

$$N_n = n(n-1)/2. \qquad (3)$$

Всего для иерархии на рис. 1 надо построить $1+k$ матриц и провести

$$N = \frac{k(k-1)}{2} + k\frac{p(p-1)}{2} \tag{4}$$

попарных сравнений.

Этап 3. Вычисление относительных весов (коэффициентов важности) для объектов каждого уровня. Относительные веса объектов иерархии определяются путем нахождения для каждой построенной матрицы собственных векторов $x = (x_1, x_2, ..., x_n)$ с помощью решения уравнения

$$Ax = I_{\max} x, \tag{5}$$

где A — матрица (1), $I_{\max}$ — максимальное собственное значение матрицы.

Компоненты собственного вектора можно определить как среднее геометрическое для коэффициентов каждой строки матрицы

$$x_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^{n} a_{ij}}, \; i = 1, \ldots, n. \tag{6}$$

Нормированные оценки вычисляются следующим образом:

$$c_i = \frac{x_i}{\sum_{r=1}^{n} x_r}, \; \sum_{i=1}^{n} c_i = 1, \; i = 1, \ldots, n. \tag{7}$$

Полученные веса позволяют количественно оценить относительную важность каждого из объектов иерархии и провести линейное упорядочение объектов одного уровня по степени важности по отношению к примыкающему объекту верхнего уровня (ранжировку). Отображение значимости объектов в составе иерархии показывает также возможное направление оптимизации рассматриваемой задачи.

Параллельно с расчетом весовых коэффициентов (6), (7) проводится оценка совместности матриц попарных сравнений путем расчета индекса и отношения совместности

$$\text{ИС} = \frac{I_{\max} - n}{n-1}, \; \text{ОС} = \text{ИС}/I_n, \tag{8}$$

I_n — индекс совместности для обратносимметричной матрицы порядка n случайных оценок. Для приемлемой совместности необходимо выполнение условия $\text{ОС} < 0{,}2.$ Если это условие не выполняется, необходимо вернуться к этапу 2 и улучшить согласованность экспертных суждений в соответствии с табл. 1.

Этап 4. Определение интегральных оценок эффективности проектов. Обобщенные оценки проектов определяются путем синтеза рассчитанных на этапе 3 коэффициентов важности, целевая функция строится в виде линейной свертки

$$Y_S = \sum_{q=1}^{k} x_q y_{sq}, \quad Y_s < 1, \; \sum_{s=1}^{p} Y_s = 1, \tag{9}$$

где Y_s — показатель качества s-го проекта, $s = 1, \ldots, p$, p — количество проектов; x_q — вес q-го критерия по отношению к цели, $q = 1, \ldots, к$ ($к$ — количество критериев; y_{sq} — важность s-го проекта по q-му критерию. Сопоставляя полученные количественные оценки, можно проранжировать проекты и определить рейтинг каждого из них. Наиболее эффективным является проект с индексом s, для которого $Y_s = \max$.

2. Анализ возможных путей усовершенствования методики [10]

2.1. Использование транзитивной шкалы относительной важности объектов сравнения. Первичной процедурой МАИ является построение матриц попарных сравнений (1) с коэффициентами относительной важности a_{ij}, показывающими, во сколько раз вес объекта O_i больше веса объекта O_j. Значения a_{ij} определяются экспертами с использованием фиксированной балльной шкалы Саати (табл. 1), включающей вербальные определения уровня преимуществ с последующим переводом вербальных оценок в числа 1, 3, 5, 7, 9. Как показала практика и отмечается в литературе, предлагаемые градации этой шкалы в определенной степени могут способствовать несогласованности и противоречивости экспертных суждений из-за нарушения свойств транзитивности (для любой тройки векторов $a, b, c,$ удовлетворяющих соотношениям $a > b$ и $b > c,$ должно выполняться соотношение $a > c$). Если объект O_1 имеет сильное преимущество по отношению к объекту O_2 (согласно шкале $a_{12} = 7$), а объект O_2 — сильное преимущество по отношению к объекту O_3 (коэффициент a_{23} также равен 7), неясно, какую величину коэффициента a_{13} выберет эксперт — 7 или 49 (это число в шкале отсутствует). Для исключения таких ситуаций используются транзитивные шкалы [5].

Использование транзитивной шкалы (табл. 2) исключает возможность следующего типа экспертных суждений, возможных на основе шкалы Саати (табл. 1): если объект O_1 имеет умеренное преимущество по отношению к объекту O_2 $(a_{12} = 3)$, а объект O_2 — умеренное преимущество по отношению к объекту O_3 $(a_{23} = 3)$, то объект O_1 обладает несравнимым преимуществом по отношению к объекту O_3 $(a_{13} = 9)$. Градации транзитивной шкалы имеют понятную смысловую интерпретацию: сочетание двух слабых превосходств дает сильное превосходство, сочетание сильных превосходств — абсолютное превосходство и т.д. В качестве базы шкалы a можно выбрать значения $a = 1{,}5$ или $a = 2$, соответствующие шкалы приведены в табл. 3.

Таблица 2

Оценка	Степень превосходства одного объекта над другим
a	слабое превосходство
$a\ a$	сильное превосходство
$a\ a\ a$	очень сильное превосходство
$a\ a\ a\ a$ и более	абсолютное превосходство

Таблица 3

Степень превосходства одного объекта над другим	$a = 1{,}5$	$a = 2$
слабое превосходство	1,5	2
сильное превосходство	2,25	4
очень сильное превосходство	3,38	8
абсолютное превосходство	5,06 и более	16 и более

2.2. Построение треугольных матриц попарных сравнений [16]. Стандартный МАИ используется на практике для решения многокритериальных задач с относительно малым числом критериев и альтернатив из-за существенного роста трудоемкости диалога с экспертами (количества попарных сравнений) и объема вычислений с увеличением размерности задачи. Уменьшить громоздкость вычислений можно путем построения не полностью заполненных, а треугольных матриц попарных сравнений (метод Коггера и Ю), где элементы по диагонали матриц и выше остаются без изменений, а элементы ниже диагонали заполняются нулями

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} \\ 0 & 1 & a_{23} & \dots & a_{2n} \\ 0 & 0 & 1 & \dots & a_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}. \tag{10}$$

При этом в качестве вектора весовых коэффициентов берется не решение уравнения (5), а решение уравнения

$$T\tilde{A}x = x, \tag{11}$$

где T — диагональная матрица вида

$$T = \begin{bmatrix} 1/n & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1/(n-1) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1/(n-2) & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Как и в МАИ, общее число попарных сравнений, которые необходимо выполнить экспертам для задачи, моделируемой иерархической структурой, представленной на рис. 1, равно N (соотношение (4)). Однако поскольку матрица (10) треугольная, а нахождение весовых коэффициентов из уравнения (11) легко поддается алгоритмизации, вычислительные процедуры по нахождению весов упрощаются.

2.3. Обеспечение совместности матриц попарных сравнений, определение весовых коэффициентов на основе простого алгоритма [3, 5]. В МАИ вектор коэффициентов значимости сравниваемых объектов вычисляется как собственный вектор матрицы попарных сравнений, соответствующий ее максимальному собственному числу $I_{\max} = n,$ что справедливо для совместной матрицы. Однако в реальности матрица $[a_{ij}]$ (1), как правило, является несовместной из-за нарушения экспертами при ее построении свойств транзитивности. Возможная противоречивость ответов экспертов приводит к нарушению очевидных равенств типа

$$a_{ij} = a_{ik} a_{kj} = \frac{\omega_i}{\omega_k} \frac{\omega_k}{\omega_j}. \tag{12}$$

Поскольку матрица задана неточно (не является совместной), ее собственный вектор (набор весов объектов) в той или иной степени близок к собственному вектору совместной матрицы, т.е. определяется с некоторой ошибкой. Для построения матрицы $[a_{ij}]$ размерностью $n \times n$ и определения на ее основе n-мерного весового вектора эксперты должны выполнить $n(n-1)/2$ (соотношение (3)) попар-

ISSN 0572-2691

ных сравнений, при этом избыточная информация используется для контроля индекса совместности (8). Если полученные результаты не превышают заданного порогового значения, найденный вектор рекомендуется рассматривать в качестве вектора весов.

Для обеспечения совместности матрицы $[a_{ij}]$ (1) может использоваться простой алгоритм ее построения [3], согласно которому эксперту достаточно выполнить всего $n-1$ попарных сравнений, определяющих набор базисных (достаточных для формирования совместной матрицы) элементов. Таким набором базисных элементов могут являться элементы первой строки матрицы (1)

$$a_{12},\ a_{13},\ ...,a_{1n}. \tag{13}$$

Эксперт оценивает значимость первого объекта по сравнению со вторым, первого объекта — по сравнению с третьим и т.д. (схема сравнения с образцом), диагональный элемент $a_{11}=1$. Остальные элементы матрицы попарных сравнений могут быть определены из условий совместности на основе равенств

$$a_{ij}=a_{i1}a_{1j}=\frac{a_{1j}}{a_{1i}},\ i=2,\ ...,n,\ \ j=1,2,\ ...,n, \tag{14}$$

и свойства (2) обратносимметричности $a_{ij}=1/a_{ji}$.

Компоненты весового вектора $\omega=(\omega_1,\omega_2,...,\omega_n)$ рассчитываются по формуле

$$\omega_i=\frac{a_{1n}}{a_{1i}},\ \ i=1,2,...,n. \tag{15}$$

Нормированные значения компонент (15) определяются путем деления ω_i на сумму всех компонент $\omega_1+\omega_2+...+\omega_{n-1}+1$ (компонента ω_n вектора равна единице).

В качестве базисного набора может использоваться также набор, состоящий из элементов матрицы (1) $a_{12},a_{23},...,a_{n-1,\,n}$, когда первый объект сравнивается со вторым, второй — с третьим и т.д. (схема последовательного сравнения). В этом случае остальные элементы матрицы, находящиеся выше главной диагонали, имеют вид

$$a_{ij}=a_{i,\,j-1}a_{j-1,\,j},\ i=1,...,n-2,\ (i<j-1),$$

а ненормированные компоненты весового вектора рассчитываются по формуле

$$\omega_k=a_{k,\,k+1}a_{k+1,\,k+2}a_{n-1,\,n},\ k=1,2,...,n-1,\ \omega_n=1.$$

Выбор набора базисных элементов может проводиться из соображений получения экспертом наиболее надежных результатов попарных сравнений.

3. Расчетная схема методики многокритериального оценивания объектов космической деятельности

Проведенный анализ позволил выявить пути усовершенствования методики [10] оценивания космических проектов, разработанной на основе стандартного МАИ. Использование подходов, изложенных в разд. 2, позволяет сократить диалог с экспертом, исключить возможную противоречивость информации в смысле нарушения равенств (12) и соответствующую необходимость контроля индексов (8), упрощает формирование матриц попарных сравнений и последующие вычислительные процедуры.

Изложим расчетную схему методики многокритериального оценивания объектов космической деятельности на модельном примере ранжирования альтернатив в рамках решения проблемы (достижения цели) «Получение новых знаний об объектах космического пространства», который использовался в [10] для иллюстрации приведенной там методики, разработанной на основе стандартного МАИ.

Рассматривается три возможных альтернативных проекта: 1. «Исследованияе Марса», 2. «Изучение Луны», 3. «Наблюдение и изучение астероидов». Необходимо оценить возможный вклад каждого из них в достижение цели.

Анализ информации по рассматриваемой проблеме, структурирование и иерархическое представление задачи позволили построить ее модель в виде 4-х уровневой иерархии (рис. 2).

На первом (верхнем) уровне размещается цель работ, второй уровень отражает направления исследований рассматриваемых объектов космоса, на третьем уровне представлены критерии, наиболее существенные для оценки альтернативных проектов с точки зрения достижения цели, на нижнем уровне находятся альтернативные проекты.

Для расчета степени важности каждого объекта в составе иерархии используем упрощенный алгоритм формирования матриц попарных сравнений по элементам первой строки (на основе информации (13)) и транзитивную шкалу с базой $a = 2$ (табл. 3).

Определим вектор весов научных направлений (уровень 2) по отношению к цели. Поскольку количество объектов этого уровня $n = 4,$ матрица попарных сравнений имеет 4-й порядок и на основе (13) в качестве первого набора экспертных данных потребуется информация о ее $n-1=3$ базисных элементах a_{12}^1, a_{13}^1, a_{14}^1. Пусть от эксперта получены следующие данные $a_{12}^1 = 2$, $a_{13}^1 = 1/2$, $a_{14}^1 = 1$: научное направление 2.1 (рис. 2) в два раза превосходит по важности научное направление 2.2, в два раза уступает научному направлению 2.3 и эквивалентно по значимости научному направлению 2.4. Остальные элементы матрицы можно найти из соотношения (14), в результате матрица попарных сравнений (треугольная) имеет следующий вид:

$$\widehat{A} = \left\{ \begin{array}{lllll} & 2.1 & 2.2 & 2.3 & 2.4 \\ 2.1 & 1 & 2 & 1/2 & 1 \\ 2.2 & 0 & 1 & 1/4 & 1/2 \\ 2.3 & 0 & 0 & 1 & 2 \\ 2.4 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right. .$$

Весовой вектор определяется из (15)

$$\omega_1 = 1,\ \omega_2 = 1/2,\ \omega_3 = 2,\ \omega_4 = 1.$$

Как видно, компонентами вектора весов являются элементы последнего столбца матрицы попарных сравнений, следовательно, нет необходимости строить всю матрицу, следует по соотношению (14) рассчитать только элементы a_{24} и a_{34}, поскольку a_{14}^1 задан экспертом, $a_{44} = 1$ — диагональный элемент (в общем случае для произвольного n необходимо из (14) определить

 ISSN 0572-2691

элементы $a_{2n}, ..., a_{(n-1)n}$). После нормировки получаем коэффициенты значимости научных направлений 2.1–2.4 ($2.i,\ i = 1, ..., 4$) по отношению к цели (элемент 1 иерархии)

$$\omega^1_{2.1} = 0{,}222,\ \omega^1_{2.2} = 0{,}111,\ \omega^1_{2.3} = 0{,}444,\ \omega^1_{2.4} = 0{,}222;\ \sum_{i=1}^{4} \omega^1_{2.i} = 1,$$

наибольший вклад в достижение цели обеспечивает научное направление 2.3 «Познание законов формирования и эволюции Солнечной системы».

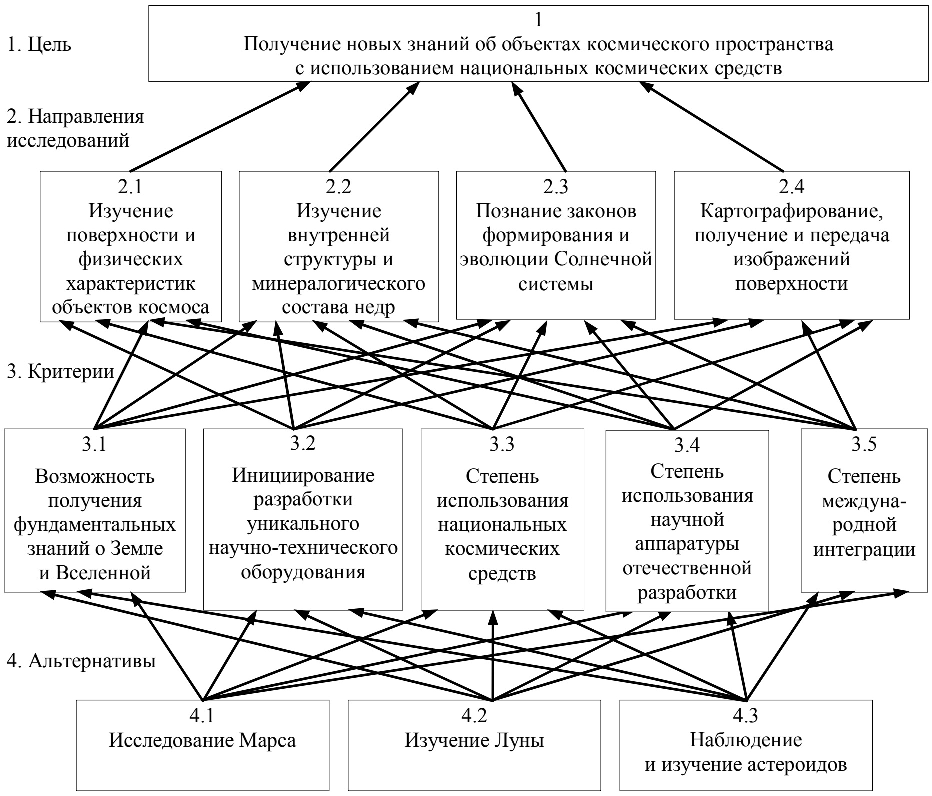

Рис. 2

Аналогичным образом необходимо определить значимость критериев 3.1–3.5 ($3.j,\ j = 1, ..., 5$) (уровень 3) для каждого научного направления. Рассмотрим процедуру оценивания весов критериев для научного направления 2.1 «Изучение поверхности и физических характеристик объектов космоса». Поскольку 3-й уровень включает 5 объектов ($n = 5$), от эксперта в качестве второго набора данных потребуется информация о $n - 1 = 4$ базисных элементах: $a^2_{12},\ a^2_{13},\ a^2_{14},\ a^2_{15}$. Будем считать, что получены следующие экспертные данные: $a^2_{12} = 2$, $a^2_{13} = 4$, $a^2_{14} = 4$, $a^2_{15} = 1$. В результате на основе (14), (15) и процедуры нормировки определяются веса критериев 3.1–3.5 для научного направления 2.1: $f^{2.1}_{3.1} = 0{,}333$, $f^{2.1}_{3.2} = 0{,}167$, $f^{2.1}_{3.3} = 0{,}083$, $f^{2.1}_{3.4} = 0{,}083$, $f^{2.1}_{3.5} = 0{,}333$.

Аналогично по наборам базисных элементов определяется значимость критериев 3.1–3.5 для научных направлений 2.2, 2.3, 2.4 соответственно:

$$a_{12}^3 = 1/4,\ a_{13}^3 = 4,\ a_{14}^3 = 4,\ a_{15}^3 = 1;\ f_{3.1}^{2.2} = 0{,}154,\ f_{3.2}^{2.2} = 0{,}615,$$

$$f_{3.3}^{2.2} = 0{,}038,\ f_{3.4}^{2.2} = 0{,}038,\ f_{3.5}^{2.2} = 0{,}154;$$

$$a_{12}^4 = 4,\ a_{13}^4 = 4,\ a_{14}^4 = 4,\ a_{15}^4 = 1;\ f_{3.1}^{2.3} = 0{,}364,\ f_{3.2}^{2.3} = 0{,}091,$$

$$f_{3.3}^{2.3} = 0{,}091,\ f_{3.4}^{2.3} = 0{,}091,\ f_{3.5}^{2.3} = 0{,}364;$$

$$a_{12}^5 = 2,\ a_{13}^5 = 4,\ a_{14}^5 = 4,\ a_{15}^5 = 2;\ f_{3.1}^{2.4} = 0{,}400,\ f_{3.2}^{2.4} = 0{,}200,$$

$$f_{3.3}^{2.4} = 0{,}100,\ f_{3.4}^{2.4} = 0{,}100,\ f_{3.5}^{2.4} = 0{,}200.$$

Далее необходимо проранжировать альтернативные проекты 4.1, 4.2, 4.3 ($4.k,\ \ k = 1, 2, 3$) по каждому из критериев. Поскольку число объектов 4-го уровня $n = 3$, необходима информация о двух базисных элементах матрицы попарных сравнений. Применяя указанную схему расчета, определим оценки проектов по критерию 3.1 «Возможность получения фундаментальных знаний о Земле и Вселенной»:

$$a_{12}^6 = 1,\ a_{13}^6 = 1/2;\ \varphi_{4.1}^{3.1} = 0{,}250,\ \varphi_{4.2}^{3.1} = 0{,}250,\ \varphi_{4.3}^{3.1} = 0{,}500.$$

Аналогично найдем оценки проектов по критериям 3.2–3.5:

$$a_{12}^7 = 1,\ a_{13}^7 = 1;\ \varphi_{4.1}^{3.2} = 0{,}333,\ \varphi_{4.2}^{3.2} = 0{,}333,\ \varphi_{4.3}^{3.2} = 0{,}333;$$

$$a_{12}^8 = 1,\ a_{13}^8 = 1;\ \varphi_{4.1}^{3.3} = 0{,}333,\ \varphi_{4.2}^{3.3} = 0{,}333,\ \varphi_{4.3}^{3.3} = 0{,}333;$$

$$a_{12}^9 = 1/2,\ a_{13}^9 = 1;\ \varphi_{4.1}^{3.4} = 0{,}250,\ \varphi_{4.2}^{3.4} = 0{,}500,\ \varphi_{4.3}^{3.4} = 0{,}250;$$

$$a_{12}^{10} = 1,\ a_{13}^{10} = 2;\ \varphi_{4.1}^{3.5} = 0{,}400,\ \varphi_{4.2}^{3.5} = 0{,}400,\ \varphi_{4.3}^{3.5} = 0{,}200.$$

Интегральные оценки рассматриваемых проектов можно получить по аналогии с (9) методом линейной свертки по формуле, которая для четырехуровневой иерархии рис. 2 может быть записана следующим образом:

$$Y_{4.k} = \sum_{k,i,j} \varphi_{4.k}^{3.j} f_{3.j}^{2.i} \omega_{2.i}^{1},\ k = 1, 2, 3;\ i = 1, ..., 4;\ j = 1, ..., 5.$$

Подстановка в эту формулу найденных выше значений весовых коэффициентов элементов иерархии позволяет получить следующие оценки проектов:

$$Y_{4.1} = 0{,}318;\ Y_{4.2} = 0{,}339;\ Y_{4.3} = 0{,}344.$$

Следовательно, наиболее эффективным является проект с оценкой $Y_{4.3}$ «Наблюдение и изучение астероидов».

Как видно, применение упрощенного варианта метода анализа иерархий позволяет существенно облегчить решение рассмотренной многокритериальной задачи, прежде всего, за счет уменьшения числа попарных сравнений. В [10] расчет весовых коэффициентов проводился на основе стандартных процедур построения полнозаполненных матриц $[a_{ij}]$: одной — 4-го порядка, четырех — 5-го порядка и пяти — 3-го порядка. Для этого, в соответствии с (3), понадобились результаты $N_1 = 61$ попарных сравнений. Использование упрощенного варианта дает воз-

 ISSN 0572-2691

можность определять весовые коэффициенты на основе всего лишь $n-1$ базисных элементов матрицы попарных сравнений, при этом общее число сравнений для иерархии на рис. 1 уменьшается до $N_2 = 29$. Исключается необходимость нахождения собственных чисел матриц из (6) путем извлечения корней высоких степеней либо путем решения систем уравнений (5), веса рассчитываются на основе простых равенств (14) и (15). Использование транзитивной шкалы и обеспечение совместности матриц (условие (12)) способствуют уменьшению несогласованности экспертных данных, повышению достоверности решения задачи.

Заключение

Для оценивания социально-экономической эффективности космических проектов в проблеме планирования космической деятельности предложено использовать модифицированный вариант известного и распространенного на практике метода анализа иерархий. Показано, что применение модифицированного МАИ в задаче многокритериального анализа альтернатив обеспечивает более простой, точный и надежный способ нахождения весового вектора критериев оценивания за счет исключения присущей стандартному МАИ «модельной» ошибки, связанной с возможной противоречивостью экспертных оценок. Дополнительно для уменьшения несогласованности экспертных суждений в процедуре сопоставления свойств объектов по качественным критериям предложено использовать транзитивные шкалы оценивания. Преимущества предложенных подходов проиллюстрированы на конкретном примере анализа тематических проектов по исследованию объектов космоса.

Л.І. Самойленко, Л.М. Колос

РОЗРОБКА МЕТОДОЛОГІЇ ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КОСМІЧНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ

Вирішується задача моделювання та аналізу ефективності космічної діяльності. Космічна діяльність розглядається як складний слабоструктурований слабоформалізований об'єкт дослідження, що має властивості багатовимірності, багатозв’язності, багатокритеріальності. Для отримання оцінок за сукупністю критеріїв запропоновано використовувати модифікований (спрощений) варіант методу аналізу ієрархій. Ефективність такого підходу проілюстровано на прикладі аналізу та ранжування проектів з дослідження об'єктів космічного простору.

L.I. Samoilenko, L.N. Kolos

DEVELOPMENT OF THE METHODOLOGY OF ESTIMATING OF THE EFFECTIVENESS IN THE SPACE ACTIVITY

The problem of modeling and analysis of the effectiveness of space activity is solved. Space activity as a complex semistructured and weak formalizable object of study, which has the properties of multidimensionality and multiply connected, multicriteria system is considered. The modified (simplified) version of the analytic hierarchy process to obtain estimates of the set of criteria is proposed. By the example of the analysis and ranking of projects on the investigations of objects of outer space the effectiveness of this approach is illustrated.

1. *Кини Р., Райфа Х.* Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения. — М. : Радио и связь, 1981. — 560 с.
2. *Саати Т., Кернс К.* Аналитическое планирование. Организация систем. — М. : Радио и связь, 1991. — 224 с.
3. *Ногин В. Д.* Упрощенный вариант метода анализа иерархий на основе нелинейной свертки критериев // Журн. вычисл. математики и мат. физики. — 2004. — **44**, № 7. — С. 1259–1268.
4. *Ларичев О. И.* Теория и методы принятия решений, а также хроника событий в волшебных странах решений — М. : Логос, 2002. — 296 с.
5. *Черноруцкий И. Г.* Методы принятия решений. — СПб.: БХВ-Петербург, 2005. — 416 с.
6. *Лотов А. В.,* Поспелова И. И. Многокритериальные задачи принятия решений. — М.: МАК Пресс, 2008. — 197 с.
7. *Федоров О. П., Колос Л. Н.* Космическая деятельность Украины: подходы к созданию стратегии // Космічна наука і технологія. — 2011. — **17**, № 1. — С. 3–11.
8. *Саймон Г.* Науки об искусственном. — М. : Мир, 1972. — 148 с.
9. *Губарев В. Ф., Самойленко Л. И., Ильенко Т. В., Подгородецкая Л. В., Колос Л. Н., Кирносова М. А.* Структурная целевая модель космической деятельности в Украине // Космічна наука і технологія. — 2005. — **11**, №3–4. — С. 103–111.
10. *Самойленко Л. И., Яковлева Л. М., Ильенко Т. В., Подгородецкая Л. В., Колос Л. Н.* Разработка методологии оценки сценариев в задачах планирования космической деятельности. Часть 1 // Проблемы управления и информатики. — 2005. — № 5. — С. 145–156.
11. *Колос Л. Н., Воронин А. Н.* Технология многокритериальной оценки иерархических структур для оценивания сценариев развития космической отрасли Украины // Проблемы управления и информатики. — 2009. — № 6. — С. 104–113.
12. *Воронин А. Н.* Вложенные скалярные свертки векторного критерия // Проблемы управления и информатики. — 2003. — № 5. — С. 10–21.
13. *Федоровский А. Д., Якимчук В. Г., Бондар Е. Н., Козлов З. В.* Оценка эффективности космических систем ДЗЗ на основе метода анализа иерархий // Космічна наука і технологія. — 2005. — **11**, № 3/4. — С. 75—80.
14. *Гусынин В. П., Гольдштейн Ю. М., Дорошкевич В. К. , Кузнецов В. И., Кучугурный Ю. П.* Многокритериальный сравнительный анализ объектов ракетно-космической техники // Космічна наука і технологія. — 2005. — Т. 11, № 1/2. — С. 3–9.
15. *Молдабеков М. М., Ибраев А. Т., Еремин Д. И., Алиева Б. К.* Методика проведения экспертных опросов для определения количественной оценки приоритетности направлений космической деятельности в Республике Казахстан // Вестник Казахского национального технического университета им. К.И. Сатпаева. — 2010. — №3. — С. 5–11.
16. *Cogger K.O., Yu P.L.* Eigenweight vector and least"distance approximation // J. Optimiz. Theory and Appl, 1985, V. 46, № 4, p. 483—491.

Получено 17.09.2015