

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ,  
ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И СИСТЕМЫ ТЕЛЕМЕТРИИ.  
ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ

УДК 629.7.01, 004.02 DOI 10.30894/issn2409-0239.2021.8.4.16.22

**Формирование расширенной критериальной базы  
в управлении эффективностью важнейших элементов  
перспективных космических систем мониторинга  
гравитационного поля Земли**

**Л. Г. Азаренко**, *д. э. н., доцент, azarenkol66@mail.ru*  
*НИИ КС имени А. А. Максимова — филиал АО «ГКНПЦ им. М. В. Хруничева»,*  
*г. Королев, Московская область, Российская Федерация*

**Аннотация.** В статье рассматриваются подходы к формированию критериальной базы оценки эффективности при проектировании перспективных космических систем на примере космических систем мониторинга гравитационного поля Земли. Сформулированы основные требования к созданию критериальной базы. Дано определение критерия и обобщенного критерия эффективности применительно к элементам перспективных космических систем. Рассмотрены общие и частные критерии эффективности перспективных космических систем в зависимости от назначения конкретной системы (оборонного применения, гражданские, многоцелевые).

**Ключевые слова:** проектирование перспективных космических систем, мониторинг гравитационного поля Земли, частные критерии эффективности, обобщенный критерий эффективности, обработка данных

**Formation of an Expanded Criteria Base  
to Manage the Effectiveness of the Most Important Elements  
of Advanced Space Systems  
for Monitoring the Earth's Gravitational Field**

**L. G. Azarenko**, *Dr. Sci. (Econ.), Assoc. Prof., azarenkol66@mail.ru*  
*Maksimov Research and Development Institute of Space Systems (NII KS) —*  
*a branch of Khrunichiev State Research and Production Space Center, Korolev, Moscow region, Russian Federation*

**Abstract.** The article considers approaches to the formation of a criteria base to evaluate the effectiveness of the design of advanced space systems on the example of space systems for monitoring the Earth's gravitational field. The main requirements for creating a criteria base are formulated. The definition of the criterion and generalized criterion of efficiency in relation to the elements of advanced space systems is given. General and specific criteria for the effectiveness of advanced space systems are considered depending on the purpose of a particular system (defense, civil, and multi-purpose).

**Keywords:** design of advanced space systems, monitoring the Earth's gravitational field, partial efficiency criteria, generalized efficiency criterion, data processing

## Введение

В числе основных задач, возникающих на стадии принятия решения о разработке той или иной перспективной космической системы, следует назвать прежде всего формирование расширенной базы критериев для оценки эффективности разрабатываемой космической системы (и отдельных ее элементов). Выбираемые критерии должны четко соответствовать определенным требованиям. Особое внимание следует сфокусировать на обоснованности проводимых оценок с позиций взаимовлияния и взаимозависимости избранных критериев. Степень рассматриваемых взаимозависимостей определяется либо так называемым коэффициентом обоснованности, либо уровнем корреляции между различными критериями (показателями). В случае, когда корреляция приближается к единице, избранные критерии (показатели) могут рассматриваться в качестве хорошо соотносимых. Приближение корреляции к нулю демонстрирует, что соотношение между критериями не достигло требуемого уровня. Еще один важный метод оценки обоснованности избранных критериев — это анализ конструктивной обоснованности. Анализ конструктивной обоснованности предполагает установление четких связей между критериями (показателями), характеризующими элементы данной космической системы, и критериями (показателями) изделий-аналогов космической техники, способных решать те же целевые задачи.

## Результаты исследования

Одна из самых главных характеристик при избрании критерия — это его надежность. Особое значение названная характеристика приобретает в случае применения эвристических подходов и методов в технико-экономическом обосновании разработки перспективных космических систем, поскольку очевидны проблемы в оценке меры субъективности в суждениях экспертов. Но также важно и еще одно требование при избрании критериев оценки эффективности перспективных космических систем. Это — восприимчивость к изменениям. Для обеспечения надежности и точности используемых данных критерии должны быть ориентированы на актуальную ситуацию в отношении

космической системы в целом и ее основных составляемых. Следует подчеркнуть, что при создании критериальной базы нежелательно завышать планируемые показатели. Они должны быть максимально реалистичны и, соответственно, достижимы.

Опираясь на вышеизложенное, можно изложить общие требования к формированию критериальной базы оценки эффективности важнейших элементов перспективных космических систем:

- адекватность: критерий должен явным образом отмечать прогрессивные изменения в решении целевых задач или достижении заданных показателей, характеризуя все значимые аспекты этих прогрессивных изменений;

- точность: различного рода ошибки (погрешности) в определении значения критерия (показателя) не должны вызывать неадекватное представление о результатах (продуктах) эксплуатации космической системы (или отдельных ее элементов);

- объективность: нецелесообразно использовать критерии, которые способны демонстрировать улучшение своих значений на фоне ухудшения реальной картины; применяемым критериям следует в минимальной степени формировать стимулы для искажения результатов функционирования космической системы;

- достоверность: приемы и методы получения, а также обработки входящей информации должны изначально ориентироваться на внешний аудит точности;

- однозначность: все участники процесса (исполнители-специалисты, потребители) должны иметь единое понимание существа избираемого критерия, в связи с чем целесообразно отказаться от слишком сложных критериев, для которых в настоящий момент не существует единого определения;

- экономичность: процесс получения данных о функционировании космической системы должен быть ориентирован на минимизацию затрат, избираемые критерии должны максимально основываться на традиционных процедурах сбора информации;

- сопоставимость: отбор критериев должен ориентироваться на процесс непрерывного накопления информации, принимая во внимание требование сопоставимости (за определенные периоды времени) с критериями, которые применяются в оценках прогрессивных изменений в практике выполнения ана-

логичных (по целевым задачам) проектов (эксплуатации космических систем), а также с критериями, традиционными для мировой практики;

– своевременность и регулярность в вычислении критериев: считается, что отчетная информация должна поступать с четкой периодичностью и с минимальным временным лагом между моментом получения данных и началом использования.

Принимая во внимание, что в современной обстановке увеличивается количество организаций и предприятий, которые заинтересованы в использовании продуктов эксплуатации космических систем мониторинга гравитационного поля Земли, расширенная критериальная база оценки эффективности важнейших элементов перспективных космических систем должна отвечать предъявляемым информационным требованиям со стороны организаций-потребителей. То есть создаваемая база критериев должна быть нацелена на проведение перманентного мониторинга эффективности космической системы и соответствия продуктов ее эксплуатации (результатов космической деятельности) запросам организаций-потребителей и оценку конкурентоспособности этих космических продуктов на международном рынке космических товаров и услуг. Критерий эффективности сложной технической системы (каковыми и являются перспективные космические системы гравитационного поля Земли) может рассматриваться как своего рода правило, дающее возможность сравнивать стратегии достижения целевых задач и производить векторный отбор стратегий из подмножества допустимых. Под обобщенным критерием эффективности космической системы следует понимать набор функционалов (различных показателей качества), которые вычислены для определенных условий эксплуатации космической системы. С этих методических позиций космическая система должна обладать требуемыми свойствами только тогда, когда избранные критерии находятся в заданных границах. Рассматриваемый подход предполагает двухэтапную оценку целевой эффективности применения космической системы мониторинга гравитационного поля Земли. На первом этапе формируется перечень критериев эффективности и определяются области допустимых значений. Второй этап предполагает уже непосредственное определение показателей эффектив-

ности эксплуатации космической системы (и отдельных ее составляющих). Рассматривая эффективность как комплексную характеристику целенаправленного процесса эксплуатации космической системы, можно выстроить «дерево критериев эффективности», представляющее собой некую иерархическую лестницу, где для каждого уровня (система в целом, отдельные сегменты, отдельные модули) существуют соответствующие критерии эффективности.

Если проводится анализ эксплуатации космической системы в целом, то, как правило, обобщающим критерием эффективности выступает экономическая эффективность, естественно при выставленных ограничениях на показатели детальности, точности, производительности, оперативности и т.п. Тогда показатель эффективности космической системы рассчитывается как разница между общими доходами от реализации результатов эксплуатации космической системы и общими затратами на проектирование, разработку, изготовление, развертывание составляющих космической системы и последующую ее эксплуатацию. Если речь идет, например, о проектировании, разработке и эксплуатации составляющих космической системы (космических аппаратов), то как основной критерий эффективности может приниматься минимизация стоимости проектирования, разработки, производства и вывода на заданную орбиту космического аппарата при соответствии показателям-ограничениям (детальности, производительности, оперативности и др.).

Конкурентоспособность космической системы характеризуется определенным количеством ее функциональных свойств, часть которых являются общими для всех спутниковых группировок. Характеристики этих общих свойств и выступают сопоставимыми критериями эффективности для космических систем (в том числе и для разноцелевых). Примеры названных характеристик — срок активного существования входящих в группировку космических аппаратов, способность к коллокации с другими спутниками и др. Существуют и общие, определяемые классом платформ характеристики, которые могут использоваться в проводимой оценке эффективности. Например, габариты и количество бортового оборудования; схема выве-

дения спутников (поочередное, кластерное); стартовая масса космических аппаратов; доступность совместимых средств выведения и др. Оценка и сопоставление названных общих и групповых критериев дает возможность определить уровень эффективности и конкурентоспособности важнейших элементов перспективных космических систем.

По своей сути избираемые показатели должны объективно и в количественной форме иллюстрировать решение космической системой целевых задач. Если речь идет о многоцелевых системах (например, системах мониторинга гравитационного поля Земли), то здесь целесообразным представляется обращение к интегрированным показателям. Таким образом, эффективность перспективной космической системы мониторинга гравитационного поля Земли может оцениваться исходя из полноты выполнения ею целевых задач:

$$\mathcal{E}_c = \frac{1}{N_z} \sum_{j=1}^{N_z} P_i, \quad (1)$$

где  $N_z$  — количество целевых задач, решаемых космической системой мониторинга гравитационного поля Земли в интересах профильных пользователей;

$i$  — решаемая задача;

$P_i$  — вероятность решения задачи.

Вышеприведенная формула (1) используется, если все решаемые системой задачи признаются равными по приоритетности. В противном случае применяется другой вариант:

$$\mathcal{E}_c = \sum_{i=1}^{N_z} k_i P_i, \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^{N_z} k_i = 1, \quad (3)$$

где  $k_i$  — приоритетность задачи.

Вероятность решения конкретной задачи оценивается на основании информации о полноте удовлетворения потребностей пользователя как произведение количества требований, предъявляемых потребителем и показателем выполнения каждого требования для каждой конкретной задачи.

При проектировании и разработке составляющих элементов перспективных космических систем

по анализируемым критериям часто возникают трудности, связанные с созданием моделей себестоимости элементов системы проектных характеристик. В ряде случаев зафиксировать функциональную связь между основными показателями эффективности и проектными характеристиками элементов космической системы довольно затруднительно. Решение вопроса возможно через применение удачно подобранных частных критериев эффективности. Например, как критерий оценки эффективности составляющего (КА) системы мониторинга гравитационного поля Земли можно использовать критерий пригодности (качества).

Качество любой технической системы, в том числе и космической системы, проявляется в процессе ее целевого использования. Под эффективностью целенаправленного функционирования системы понимается не просто способность решать целевые задачи, производя определенный космический продукт (или услугу), а именно результативность этой способности (т.е. стоимость полученного космического продукта соотносится с осуществляемыми затратами). Следовательно, при создании критериальной базы верхний уровень формируют показатели результативности, а показатели ресурсоемкости и оперативности выступают как производные показатели, определяющие результативность. Обобщая вышеизложенное, можно сказать, что результативность функционирования космического аппарата определяется целевыми эффектами и может быть охарактеризована такими показателями, как ресурсоемкость и оперативность (временные параметры решения целевых задач). Тогда условия успешного решения космическим аппаратом целевых задач в формализованном виде будут выглядеть так:

$$F = \begin{cases} X_n^C(t) \in \{X_n^C(t)\}^\vartheta, \\ t \leq t^\vartheta, \end{cases} \quad (4)$$

где  $X_n^C(t)$  — вектор показателей функционирования космической системы;

$\{X_n^C(t)\}^\vartheta$  — подмножество допустимых значений показателей функционирования космической системы.

Основываясь на функциональных требованиях, можно привести несколько частных критериев для спутников: результативность систем унифицированной космической платформы (УКП); вероятность

обеспечения текущего (мгновенного) баланса электрической энергии на борту; вероятность обеспечения заданных температур объектов регулирования системы обеспечения температурного режима и др.

Но, помимо частных показателей, важно выделить обобщенный показатель качества процесса функционирования космического аппарата. При разработке космических систем как интегральные показатели могут рассматриваться: масса  $m_{КА}$ , стоимость  $C_{КА}$  и срок активного существования  $t_{САС}$  космических аппаратов.

В отношении характеристики оптимальности могут использоваться следующие частные критерии оптимальности:

- по вероятности решения целевой задачи

$$P_{КА} \geq P_{КА}^{\min} \begin{cases} m_{КА} \leq m_{КА}^{\max}, \\ t_{САС} \geq t_{САС}^{\max}, \\ C_{КА} \leq C_{КА}^{\max}, \end{cases} \quad (5)$$

$$P_{КА} = \max\{P_{КА}\} \begin{cases} m_{КА} \leq m_{КА}^{\max}, \\ t_{САС} \geq t_{САС}^{\max}, \\ C_{КА} \leq C_{КА}^{\max}, \end{cases} \quad (6)$$

- по массе (минимум массы)

$$m_{КА} = \min\{m_{КА}\} \begin{cases} P_{КА} \geq P_{КА}^{\min}, \\ t_{САС} \geq t_{САС}^{\max}, \\ C_{КА} \leq C_{КА}^{\max}, \end{cases} \quad (7)$$

- по стоимости (минимум стоимости)

$$C_{КА} = \min\{C_{КА}\} \begin{cases} P_{КА} \geq P_{КА}^{\min}, \\ t_{САС} \geq t_{САС}^{\max}, \\ m_{КА} \leq m_{КА}^{\max}. \end{cases} \quad (8)$$

В выражениях(7)–(10)  $m_{КА}^{\max}$ ,  $C_{КА}^{\max}$ ,  $t_{САС}^{\max}$ ,  $P_{КА}^{\min}$  — это ограничения, накладываемые на основные показатели качества космического аппарата, связанные с предельно допустимыми значениями.

Использование частных критериев как замены основных целесообразно, например, когда известно, что с возрастанием (или убыванием) частного показателя также монотонно возрастает (или убывает) основной. Обычно с уменьшением массы космического аппарата уменьшается его себестоимость. Поэтому вместо критерия минимизации

стоимости космического аппарата можно использовать критерий минимизации массы. С уменьшением массы и моментов инерции космического аппарата можно также повысить скорость его поворота при отработке программы полета (улучшить динамические свойства), что может привести к росту производительности космического аппарата. Относительные массы и конструкции бортовых систем могут также выступать в качестве частных критериев эффективности, поскольку с их уменьшением масса космического аппарата в целом и моменты инерции также уменьшаются. Использование частных критериев дает возможность определения локальных экстремумов эффективности проектируемой космической системы с минимальными затратами временных и трудовых ресурсов.

Поскольку одним из показателей эффективности выступает степень удовлетворенности пользователей, в качестве критерия экономической эффективности для перспективных космических систем мониторинга гравитационного поля Земли может использоваться индикатор полноты наблюдения гравитационного поля Земли. Полнота гидрометеорологических данных характеризуется потребным набором бортовой аппаратуры, поэтому данный индикатор может рассчитываться как [3, с. 7]:

$$I = \frac{n}{N}И(1 - A), \quad (9)$$

где  $N$  — планируемое количество целевых КА в КС (минимум);

$n$  — количество работающих КА;

$И$  — объем заказа космических услуг со стороны госструктур;

$A$  — объем информации, которую невозможно получить из-за недокомплекта бортовой аппаратуры или дефектов самого КА.

На сегодняшний день приоритетной характеристикой космической системы является ее конкурентоспособность, поэтому эффективность системы может определяться исходя из соответствия ее составляющих уровню международного рынка космических товаров и услуг. Анализируя эту проблему, следует подчеркнуть, что в Федеральной космической программе вообще не предусмотрено единого критерия, по которому космический аппарат (и, следовательно, целевая космическая система) признаются соответствующими мировому уровню.

Вполне ожидаемо, что для потребителя не является существенным вопросом непосредственная технология проектирования используемого космического аппарата, а также размещаемая бортовая аппаратура. Потребителю важен только конечный результат — получение информации, в которой он заинтересован (данные по измерениям гравитационного поля Земли). Так что в качестве критерия конкурентоспособности может использоваться доленое соотношение объема целевой информации, получаемой с КА данной российской космической системы, к объему информации с зарубежных КА [3, с. 8]:

$$I = \frac{V_1}{V_2} I_o, \quad (10)$$

где  $V_1$  — объем целевой информации с отечественных КА;

$V_2$  — объем информации с зарубежных КА.

Приведенное соотношение явно иллюстрирует зависимость вычисляемого критерия от доступности информации по мониторингу гравитационного поля Земли. Сегодня на территории Российской Федерации действуют государственные операторы космических услуг (ФГУП «Космическая связь», АО «Газпром космические системы»), коммерческие операторы (Группа компаний АльтегроСкай, Красноярская компания «КБ “Искра”», Компания «РуСат», Компания «РТКомм. Ру», ПАО «Ростелеком» и др.) и представители зарубежных компаний. Деятельность операторов формирует спрос на космические услуги. Результативность работы оператора выражается следующим показателем [3, с. 8]:

$$I_o = \frac{D_1}{D} \left( 1 - \frac{Z_1}{3} \right), \quad (11)$$

где  $\frac{D_1}{D}$  — доля российского рынка, занятая оператором;

$\frac{Z_1}{3}$  — объем невыполненных заявок по мониторингу гравитационного поля Земли.

Как критерий целевой эффективности спутников, входящих в группировку мониторинга гравитационного поля Земли, целесообразно выделить производительность наблюдений. Производительность космических аппаратов выражается в площади, охваченной наблюдениями за срок активного существования космического аппарата. Еще один

критерий эффективности — это периодичность наблюдения, измеряемая промежутком времени между съемками. Частные показатели являются числовыми выражениями функции распределения периодичности (например, дисперсия и др.).

## Выводы

Таким образом, с целью повышения конкурентоспособности отечественного информационного продукта (результатов космической деятельности) можно сформулировать следующие предложения по формированию и расширению критериальной базы оценки эффективности перспективных космических систем (их важнейших элементов):

- оптимальная (или близкая к оптимальной) критериальная база для технико-экономического обоснования проектирования перспективных космических систем должна создаваться на базе анализа действующих критериев (показателей) эффективности с акцентом на специфику разрабатываемого проекта и наличия (отсутствия) требований к двойному применению создаваемой системы;

- избираемые критерии должны соответствовать таким характеристикам, как адекватность, точность, объективность, достоверность, однозначность, экономичность, сопоставимость, своевременность и регулярность определения;

- основу формируемой критериальной базы могут создавать такие показатели, как, например, коэффициент выгод–затрат (обычно используется для космических систем оборонной направленности) или индекс доходности для космических систем гражданского назначения. Для многоцелевых систем обычно используются интегрированные показатели. Комплексный критерий эффективности проектов создания перспективных космических систем может позиционироваться как [1, с. 6]:

$$\mathcal{E}_k = (W, Z, T, R), \quad (12)$$

где  $W = W_1, W_2$  — эффективность;

$Z$  — общие затраты на создание космической системы;

$T$  — продолжительность формирования космической системы;

$R = R_1, R_2$  — степень риска при проектировании и создании космической системы;

$R_1$  — степень риска увеличения затрат на создание космической системы;

$R_2$  — степень риска снижения полезного эффекта;

$W_1 = \frac{ПЕ}{Z}$  — соотношение величины ожидаемого полезного эффекта к величине затрат (экономическая эффективность для космических проектов по созданию систем гражданского назначения);

$W_2 = k_{TE}$  — техническая эффективность, уровень конкурентоспособности и уровень инновационности космической системы;

ПЕ — полезный эффект.

## Список литературы

1. Алпатов А.П., Марченко В.Т., Сазина Н.П., Хорольский П.П. Методология проведения технико-экономического обоснования проектов создания новых образцов космической техники // Техн. механика. 2015. №3. С. 6–7.
2. Зуева В.В. Учет фактора сопряженности требований потребителей и возможностей космических комплексов при оценке их эффективности // Исследование Земли из космоса, М: Наука, 2012. №5. С. 85.
3. Ильина И.Ю. О введение индикаторов эффективности космической деятельности на примере метеорологических систем. Электронный журнал «Труды МАИ». Выпуск №51. [www.mai.ru/science/trudy](http://www.mai.ru/science/trudy) (Дата обращения 01.04.2021).
4. Косенко В.Е. Комплексные исследования по обоснованию путей создания, принципов построения, определению проектного облика космической системы глобального геодезического мониторинга // Альманах современной метрологии. ФГУП «ВНИИФТРИ». 2015. №3. С. 9–20.