

Научная статья

УДК 629.7

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=185653>

EDN: <https://www.elibrary.ru/AULPHV>

СПОСОБ СРАВНЕНИЯ СРЕДСТВ ВЫВЕДЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ МЕТОДОМ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ НА ПРИМЕРЕ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ «СОЮЗ-5» И «АМУР-СПГ»

Станислав Феликсович Стельмах^{1✉}, Евгений Николаевич Есипов²,

Владимир Алексеевич Михайлов³, Наталья Сергеевна Демидова⁴

^{1,2,3,4}Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского,

Санкт-Петербург, Россия

¹vka@mil.ru✉

Аннотация. В статье обоснована актуальность разработки способа сравнения ракет-носителей, исходя из широкого спектра их эксплуатационных характеристик и разнообразия решаемых целевых задач. Представлены основные методы сравнительного анализа объектов, процессов и явлений. Показано, что метод комплексной оценки обладает определенным перечнем преимуществ для решения задачи выбора наиболее предпочтительного средства выведения космических аппаратов. На основе метода комплексной оценки разработан способ сравнения средств выведения космических аппаратов, позволяющий сделать вывод о ракете-носителе, обладающей оптимальным набором стоимостных, технических и эксплуатационных характеристик для решения целевой задачи. На конкретном

примере ракет-носителей среднего класса на основе представленного способа произведены расчеты величин их комплексных оценок с целью принятия решения о выборе средства выведения.

Ключевые слова: ракета-носитель, сравнительный анализ, критерий, метод комплексной оценки, характеристика, экспертная оценка

Для цитирования: Стельмах С.Ф., Есипов Е.Н., Михайлов В.А., Демидова Н.С. Способ сравнения средств выведения космических аппаратов методом комплексной оценки на примере ракет-носителей «Союз-5» и «Амур-СПГ» // Труды МАИ. 2025. № 143.

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=185653>

Original article

APPLICATION OF THE INTEGRATED ASSESSMENT METHOD WHEN COMPARING «SOYUZ-5» AND «AMUR-LNG» LAUNCH VEHICLES

Stanislav F. Stelmakh^{1✉}, Evgeny N. Esipov², Vladimir A. Mikhailov³,
Natalia S. Demidova⁴

^{1,2,3,4}Military space Academy named after A.F. Mozhaisky,
Saint Petersburg, Russia

¹yka@mil.ru ✉

Abstract. Currently, the spacecraft launch vehicles comprise a wide range of different launch vehicles with various payload capacities. These vehicles have different technical specifications, cost characteristics, and operational parameters. In this context, the

development of a method for determining the most suitable launch vehicle is an important issue.

In the article, this task is implemented on the basis of one of the methods of comparative analysis, namely the method of integrated assessment. The integrated assessment method is based on calculating a generalized assessment of the compared objects, taking into account the evaluations according to all criteria.

The main advantage of the method is the minimal amount of information needed from an expert. The method also has the following advantages: it characterizes the level of physical properties required for the comparison object with a single number and ensures objectivity, comparability, and reproducibility in research results.

The integrated assessment method provides a comparative analysis of two medium-lift launch vehicles «Soyuz-5» and «Amur-LNG» to determine the best one for the target task at hand. The stages of solving the problem are described and a schematic representation of the algorithm for implementing the proposed comparison method is provided.

The analysis of the calculations conducted allows us to determine which launch vehicle should be prioritized based on expert assessment of criteria that determine the importance of numerical values for the main characteristics. This vehicle has an optimal set of technical, cost, and operational characteristics that are necessary to solve the given problem.

Keywords: launch vehicle, comparative analysis, criterion, comprehensive assessment method, feature, expert assessment

For citation: Stelmakh S.F., Esipov E.N., Mikhailov V.A., Demidova N.S. Application of the integrated assessment method when comparing «Soyuz-5» and «Amur-LNG» launch

vehicles. *Trudy MAI*. 2025. No. 143. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=185653>

В современных условиях нередко возникает задача оптимального выбора, т.е. выбора объекта с максимальной количественной оценкой его качества из некоторого имеющегося набора исследуемых объектов.

Как показано в [1–7], существующий парк средств выведения космических аппаратов (КА) характеризуется большой номенклатурой и разнообразием ракет-носителей (РН) различной грузоподъемности, имеющих различные технические, стоимостные характеристики и параметры функционирования. В связи с этим решение задачи разработки способа определения наиболее предпочтительного средства выведения КА является актуальным. Решение данной задачи может быть реализовано на основе одного из методов сравнительного анализа [8–13]:

- метода анализа иерархий;
- метода сравнения с использованием функций полезности;
- метода комплексной оценки (МКО).

В данной работе для решения задачи разработки способа и алгоритмической реализации выбора приоритетного средства выведения КА будем использовать МКО, основанный на вычислении обобщенной оценки сравниваемых объектов (с учетом оценок по всем критериям). Основное достоинство данного метода заключается в минимальном объеме информации, которую требуется получить от эксперта [14–16]. Кроме того, МКО имеет следующие преимущества перед другими методами сравнительного анализа:

– характеризует уровень требуемых физических свойств объекта сравнения одним числом;

– обладает объективностью, сопоставимостью и воспроизводимостью результатов исследований/

В данной работе рассмотрим реализацию МКО на следующем примере.

Задача: необходимо выполнить сравнительный анализ средств выведения КА, исходя из экспертных оценок критериев, основанных на определении важности числовых значений основных характеристик РН.

В данной работе способ сравнения указанных объектов методом комплексной оценки предлагается рассмотреть на примере РН среднего класса «Союз-5» и «Амур-СПГ» (рисунок 1).



Рисунок 1 – Облик РН «Союз-5» и «Амур-СПГ»

Основные характеристики РН «Союз-5» и «Амур-СПГ» представлены в таблице 1 [17–23]. В данной таблице используются следующие сокращения: ГО – головной обтекатель, ЖК – жидкий кислород, ЖМ – жидкий метан, НОО – низкая околоземная орбита, ССО – солнечно-синхронная орбита, ГПО – геопереходная орбита, ГСО – геостационарная орбита.

Таблица 1

Основные характеристики РН «Союз-5» и «Амур-СПГ»

Характеристики	Ракета-носитель	
	«Союз-5»	«Амур-СПГ»
Количество ступеней	2 + разгонный блок «ДМ-SLB»	2 + разгонный блок «Фрегат»
Длина РН с головной частью, м	61,87	48,8
Диаметр РН, м	4,1	4,1
Диаметр ГО, м	До 5,2	до 5,1
Стартовая масса, т	535	360
Сухая масса, т	57	40
Компоненты ракетного топлива	Керосин+ЖК	ЖМ+ЖК
Стоимость пуска, млн долларов	55	40,5 (одноразовый вариант) 31 (многократный вариант)
Масса полезного груза, выводимого на различные виды орбит, т		
Виды орбит	Космодром «Байконур»	Космодром «Восточный»
НОО	17,4	12 (одноразовый вариант) 10,5 т (многократный вариант)
ССО	9	4,7
ГПО	6	2,6
ГСО	2,5	1,2
Удельная стоимость выведения полезного груза на целевые орбиты, долл. за кг	НОО – 3161 ССО – 6111 ГПО – 9167 ГСО – 22000	НОО – 3375 (одноразовый вариант), 2953 (многократный вариант) ССО – 8617 ГПО – 15577 ГСО – 33750
Кратность применения	Не предусмотрена	Более 50 раз
Первая ступень		
Маршевый двигатель	РД-171МВ (тяга 806,2 тс) – 1 шт.	РД-0169А (тяга 100 тс) – 5 шт.
Топливо, т	Горючее (керосин) – 107,5 Окислитель (ЖК) – 290,5	Горючее (ЖМ) – 54,6 Окислитель (ЖК) – 187,2
Вторая ступень		
Маршевый двигатель	РД-0124МС (тяга 30 тс) – 1 шт.	РД-0169В-1 (тяга 95 тс) – 1 шт.
Топливо, т	Горючее (керосин) – 16,2 Окислитель (ЖК) – 43,8	Горючее (ЖМ) – 17,6 Окислитель (ЖК) – 61,2

Для решения сформулированной задачи в качестве основных параметров (критериев сравнения) рассмотрим следующие характеристики РН:

- топливная пара;
- максимальная масса полезного груза (ПГ), выводимого на НОО;
- диаметр ГО;
- стоимость пуска;
- удельная стоимость выведения ПГ на НОО;
- кратность применения.

В соответствии с [8] решение задачи сравнения РН с применением МКО состоит из следующих этапов.

Этап 1. Определение весов критериев, представляющих собой числовые оценки их важности, с помощью одного из методов экспертных оценок.

В данном случае имеются суждения трех экспертов о важности критериев. Следует воспользоваться одним из групповых методов экспертных оценок. В данной работе используем метод непосредственной оценки [8, 9]. После вычисления средних значений и выполнения нормализации получаем веса критериев (таблица 2).

Таблица 2

Матрица оценок критериев и их веса

Номера экспертов	Критерии оценки (характеристики) РН					
	Топливная пара	Максимальная масса ПГ, выводимого на НОО	Диаметр ГО	Стоимость пуска	Удельная стоимость выведения ПГ на НОО	Кратность применения
Эксперт 1	7	6	9	7	10	3
Эксперт 2	6	3	8	6	10	5
Эксперт 3	7	7	9	6	9	2
Веса критериев (V_i)	0,17	0,13	0,22	0,16	0,24	0,08

Этап 2. Приведение оценок значений характеристик РН по критериям к безразмерному виду. Это преобразование выполняется по-разному в зависимости от вида и направленности критерия [8]:

- для критериев, подлежащих максимизации, все оценки по данному критерию делятся на максимальную оценку;
- для критериев, подлежащих минимизации, из оценок по данному критерию выбирается минимальная, которая далее делится на все оценки по данному критерию;
- для содержательных (словесных) критериев выполняется переход к числовым оценкам.

Безразмерные оценки критериев приведены в таблице 3.

Таблица 3

Безразмерные оценки критериев

Характеристики РН	РН	
	«Союз-5»	«Амур-СПГ»
Топливная пара	0,8	1,0
Максимальная масса ПГ, выводимого на НОО	1,0	0,6
Диаметр ГО	1,0	0,98
Стоимость пуска	0,56	1,0
Удельная стоимость выведения ПГ на НОО	0,93	1,0
Кратность применения	0,02	1,0

Все безразмерные оценки имеют значения в пределах от 0 до 1. Чем больше значение безразмерной оценки, тем большей степенью предпочтительности будет обладать РН (по любому критерию).

Этап 3. Определение весов критериев, отражающих разброс оценок значений характеристик РН. Величины весов определяются в следующем порядке [8].

Вычисляются средние оценки по каждому критерию:

$$P_i = \frac{1}{N} \cdot \sum_{j=1}^N P_{ij}, \quad i=1 \dots M, \quad (1)$$

где M – количество критериев; N – количество РН; P_{ij} – безразмерные оценки.

Находятся величины разброса по каждому критерию:

$$R_i = \frac{1}{N \cdot P_i} \cdot \sum_{j=1}^N |R_{ij} - P_i|, \quad i=1 \dots M. \quad (2)$$

Вычисляется сумма величин разброса оценок значений характеристик РН:

$$R = \sum_{j=1}^M R_i, \quad i=1 \dots M. \quad (3)$$

Находятся веса критериев, отражающие разброс оценок значений характеристик РН:

$$Z_i = \frac{R_i}{R}. \quad (4)$$

Этап 4. Вычисление обобщенных весов критериев, учитывающих как мнение экспертов, так и разброс оценок значений характеристик РН по данному критерию:

$$W_i = \frac{V_i + Z_i}{2}. \quad (5)$$

Этап 5. Вычисление взвешенных оценок значений характеристик РН:

$$E_{ij} = P_{ij} \cdot W_i, \quad i = 1, \dots, M, \quad j = 1 \dots N. \quad (6)$$

Рассчитанные с помощью выражения (6) взвешенные оценки значений характеристик РН приведены в таблице 4.

Взвешенные оценки значений характеристик РН

Характеристики РН	РН	
	«Союз-5»	«Амур-СПГ»
Топливная пара	0,094	0,117
Максимальная масса ПГ, выводимого на НОО	0,142	0,085
Диаметр ГО	0,111	0,109
Стоимость пуска	0,092	0,165
Удельная стоимость выведения ПГ на НОО	0,123	0,132
Кратность применения	0,007	0,333

Этап 6. Вычисление величин комплексных оценок значений характеристик РН:

$$E_i = \sum_{j=1}^M E_{ij}, \quad i=1 \dots M. \quad (7)$$

Схема алгоритма реализации предлагаемого способа сравнения средств выведения КА с применением МКО представлена на рисунке 2.

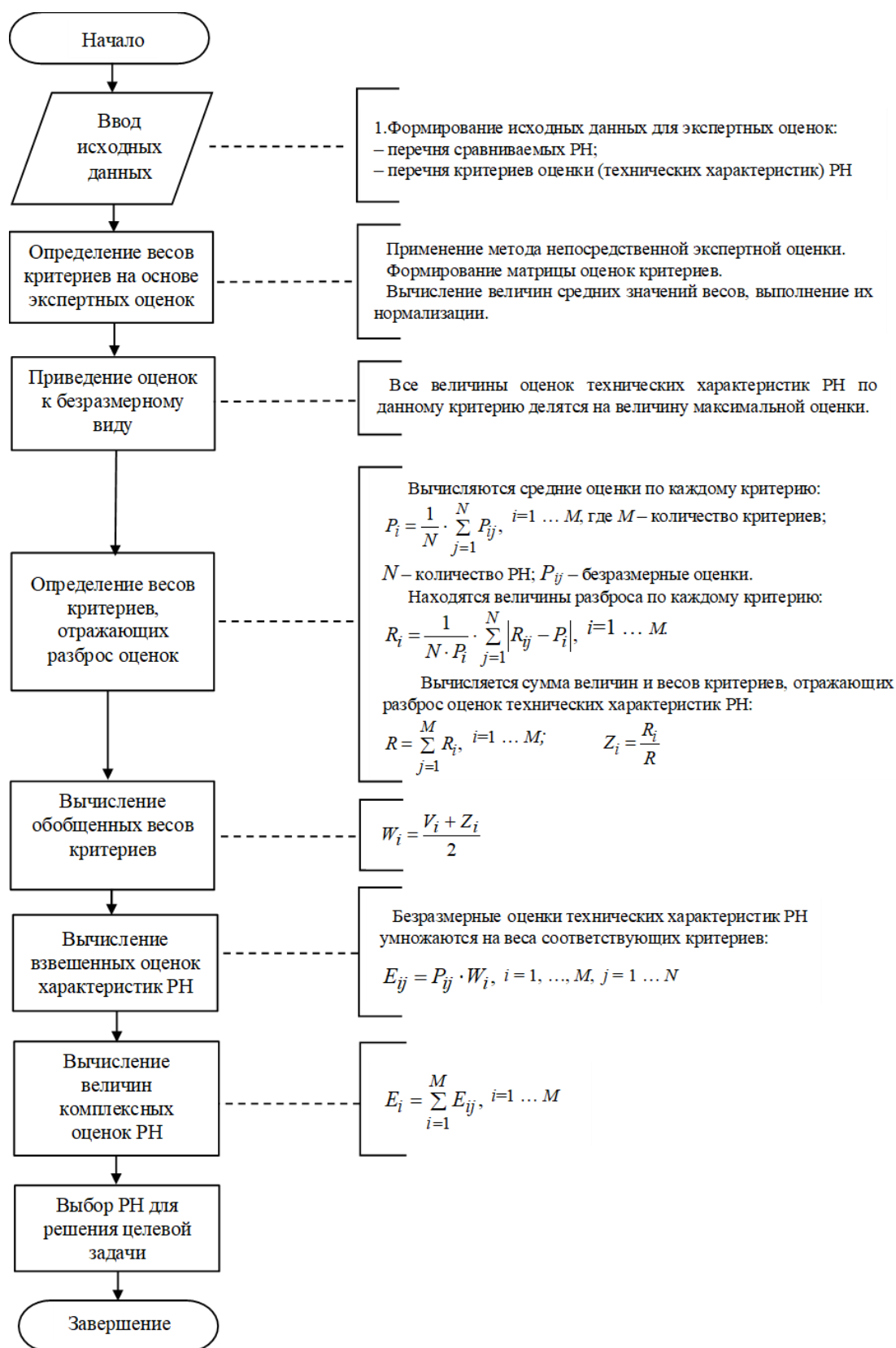


Рисунок 2 – Схема алгоритма реализации способа сравнения средств вывода КА с применением МКО

Величины комплексных оценок рассматриваемых РН, рассчитанные с помощью пакета прикладных программ MATLAB, приведены в таблице 5.

Таблица 5

Величины комплексных оценок РН

Величина комплексной оценки	РН	
	«Союз-5»	«Амур-СПГ»
	0,569	0,941

Анализ результатов позволяет сделать вывод о том, что более приоритетной по указанным в данном примере критериям является РН «Амур-СПГ».

Таким образом, предложенный в работе способ выбора средств выведения КА с применением МКО позволяет осуществить сравнительный анализ РН с целью определения наиболее предпочтительной для решения целевой задачи ракеты космического назначения.

Заключение. Выбор средства выведения КА влияет на оперативность решения целевой задачи, ограничения массогабаритных характеристик ПГ, а также удельную стоимость выведения полезной нагрузки на целевые орбиты.

В работе показана актуальность разработки способа определения наиболее предпочтительного средства выведения КА на основе одного из методов сравнительного анализа.

Установлено, что для решения рассматриваемой в работе задачи наиболее широким перечнем преимуществ из представленных методов многокритериального выбора альтернатив является метод комплексной оценки.

Проведенные расчеты, выполненные с применением представленного в статье способа сравнения средств выведения КА на основе МКО, позволили сделать заключение о РН, обладающей оптимальным набором технических, стоимостных и эксплуатационных характеристик для решения целевой задачи.

Таким образом, данный способ может быть использован для обоснования выбора наиболее предпочтительных для решения широкого спектра задач РН, а также при оценивании эффективности эксплуатации средств выведения КА.

Список источников

1. Медведев А.А. Инновационные подходы при создании ракетно-космической техники. – М.: Доброе слово и Ко, 2020. – 400 с.
2. Болдырев К.Б., Грибакин В.А., Карчин А.Ю., Пирогов С.Ю., Султанов А.Э. Ракеты-носители. – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2018. – 385 с.
3. Карчин А.Ю., Болдырев К.Б., Султанов А.Э., Прокопенко Е.А. Основы устройства ракет космического назначения. – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2019. – 180 с.
4. Хуснетдинов И.Р. Анализ тенденций развития отечественных и зарубежных ракет-носителей сверхтяжелого класса // Труды МАИ. 2014. № 73.
<https://trudymai.ru/published.php?ID=48480>
5. Ганиев Т.А., Карякин В.В. Космическая политика мировых и региональных держав. – М.: Архонт, 2020. – 175 с.
6. Пшеничников И.В., Смирнов Д.П., Дошанова Д.Р. Экономические аспекты перехода к многократным средствам выведения // Экономика космоса. 2022. № 1. С. 40–44.

7. Митрофанов Д.В., Легошин П.А. Исследование космоса в эпоху инноваций // Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Разработка и применение наукоемких технологий в эпоху глобальных трансформаций» (Тюмень, 28 ноября 2023): сборник трудов. – Уфа: Научно-издательский центр Аэтерна, 2023. С. 14–16.
8. Гудков П.А. Методы сравнительного анализа. – Пенза: Изд-во Пензенского государственного университета, 2008. – 81 с.
9. Саати Т., Керне К. Аналитическое планирование. Организация систем. – М.: Радио и связь, 1991. – 224 с.
10. Рыбак В.А., Шокар А. Аналитический обзор и сравнение существующих технологий поддержки принятия решений // Системный анализ и прикладная информатика. 2016. № 3. С. 12–18.
11. Лисецкий Ю.М. Алгоритм сравнения методов комплексной количественной оценки качества сложных систем // Программные продукты и системы. 2012. № 4. С. 153–156.
12. Шор Я.Б. Методы комплексной оценки качества продукции. – М.: Знание, 1971. – 54 с.
13. Бешелев С.Д., Гурвич Ф.Г. Математико-статистические методы экспертных оценок. – М.: Статистика, 1980. – 263 с.
14. Лисецкий Ю.М. Метод комплексной экспертной оценки для проектирования сложных технических систем // Математические машины и системы. 2006. № 2. С. 141–146.

15. Кини Р.Л., Райфа Х. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения. – М.: Радио и связь, 1981. – 560 с.
16. Смородинский С.С., Батин Н.В. Методы анализа и принятия управленческих решений. – Минск: Белорусский коммерческий университет управления, 2000. – 101 с.
17. Zhang M., Xu D., Yue S., Tao H. Design and dynamic analysis of landing gear system in vertical takeoff and vertical landing reusable launch vehicle // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Journal of Aerospace Engineering, October 2018, V. 233. DOI: [10.1177/0954410018804093](https://doi.org/10.1177/0954410018804093)
18. Стельмах С.Ф., Басов Г.Б. Анализ состояния разработки и перспектив применения ракеты-носителя «Союз-5» // Известия Института инженерной физики. 2021. № 2 (60). С. 10–15.
19. Тимофеев П.М. Сравнение методов возвращения первой ступени многоразовой ракеты // Труды МАИ. 2020. № 113. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=118079>. DOI: [10.34759/trd-2020-113-06](https://doi.org/10.34759/trd-2020-113-06)
20. Стельмах С.Ф., Астанков А.М., Щербуль К.С., Лашко Р.О. Перспективы создания и применения ракеты-носителя «Амур-СПГ» // Известия ТулГУ. Технические науки. 2024. № 9. С. 550–555.
21. Должанский Ю.М., Илингина А.В., Кузин А.И. Ракета-носитель "Союз-5": о производстве изделия в АО РКЦ «Прогресс» // Вестник НПО Техномаш. 2021. № 2. С. 18–21.
22. Лисейкин В.А., Мельников В.С., Тожокин И.А., Хачин А.И. Информационно-управляющие системы для огневых стендовых испытаний блоков первой и второй

ступеней ракеты-носителя «Союз-5» // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. 2022. № 1. С. 28–46.

23. Калугин К.С., Сухов А.В. Особенности использования метана в качестве горючего для жидкостных ракетных двигателей // Вестник Московского авиационного института. 2018. Т. 25, № 4. С. 120-132.

References

1. Medvedev A.A. *Innovatsionnye podkhody pri sozdanii raketno-kosmicheskoi tekhniki* (Innovative approaches in the creation of rocket and space technology). Moscow: Dobroe slovo i Ko Publ., 2020. 400 p.
2. Boldyrev K.B., Gribakin V.A., Karchin A.Yu., Pirogov S.Yu., Sultanov A.E. *Rakety-nositeli* (Launch vehicles). Saint Petersburg: VKA imeni A.F. Mozhaiskogo Publ., 2018. 385 p.
3. Karchin A.Yu., Boldyrev K.B., Sultanov A.E., Prokopenko E.A. *Osnovy ustroistva raket kosmicheskogo naznacheniya* (Basics of space rocket design). Saint Petersburg: VKA imeni A.F. Mozhaiskogo Publ., 2019. 180 p.
4. Khusnetdinov I.R. Trends analysis of domestic and foreign booster's super-heavy. *Trudy MAI*. 2014. No. 73. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=48480>
5. Ganiev T.A., Karyakin V.V. *Kosmicheskaya politika mirovykh i regional'nykh derzhav* (Space policy of world and regional powers). Moscow: Arkhont Publ., 2020. 175 p.
6. Pshenichnikov I.V, Smirnov D.P., Doshchanova D.R. Economic aspects of the transition to reusable launch vehicles. *Ekonomika kosmosa*. 2022. No. 1. P. 40–44. (In Russ.)

7. Mitrofanov D.V., Legoshin P.A. Space exploration in the era of innovation. *Vserossiiskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem «Razrabotka i primeneniye naukoemkikh tekhnologii v epokhu global'nykh transformatsii»*: sbornik trudov. Ufa: Nauchno-izdatel'skii tsentr Aeterna Publ., 2023. P. 14–16.
8. Gudkov P.A. *Metody sravnitel'nogo analiza* (Methods of comparative analysis). Penza: Izd-vo Penzenskogo gosudarstvennogo universiteta Publ., 2008. 81 p.
9. Saati T., Kerne K. *Analiticheskoe planirovanie. Organizatsiya sistem.* (Analytical planning. Organization of systems.). Moscow: Radio i svyaz' Publ., 1991. 224 p.
10. Rybak V.A., Shokr A. Analytical review and comparison of existing decision support technologies. *Sistemnyi analiz i prikladnaya informatika*. 2016. No. 3. P. 12–18. (In Russ.)
11. Lisetskii Yu.M. Algorithm for comparing methods of comprehensive quantitative assessment of the quality of complex systems. *Programmnye produkty i sistemy*. 2012. No. 4. P. 153–156. (In Russ.)
12. Shor Ya.B. *Metody kompleksnoi otsenki kachestva produktsii* (Methods of comprehensive product quality assessment). Moscow: Znanie Publ., 1971. 54 p.
13. Beshelev S.D., Gurvich F.G. *Matematiko-statisticheskie metody ekspertnykh otsenok* (Mathematical and statistical methods of expert assessments). Moscow: Statistika Publ., 1980. 263 p.
14. Lisetskii Yu.M. Method of complex expert assessment for designing complex technical systems. *Matematicheskie mashiny i sistemy*. 2006. No. 2. P. 141–146. (In Russ.)
15. Kini R.L., Raifa Kh. *Prinyatie reshenii pri mnogikh kriteriyakh: predpochteniya i zameshcheniya* (Decision-making under many criteria: preferences and substitutions). Moscow: Radio i svyaz' Publ., 1981. 560 p.

16. Smorodinskii S.C., Batin N.V. *Metody analiza i prinyatiya upravlencheskikh reshenii* (Methods of analysis and management decision-making). Minsk: Belorusskii kommercheskii universitet upravleniya Publ., 2000. 101 p.
17. Zhang M., Xu D., Yue S., Tao H. Design and dynamic analysis of landing gear system in vertical takeoff and vertical landing reusable launch vehicle. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Journal of Aerospace Engineering*, October 2018, V. 233. DOI: [10.1177/0954410018804093](https://doi.org/10.1177/0954410018804093)
18. Stel'makh S.F., Basov G.B. Analysis of the development status and application prospects of the Soyuz-5 launch vehicle. *Izvestiya Instituta inzhenernoi fiziki*. 2021. No. 2 (60). P. 10–15. (In Russ.)
19. Timofeev P.M. Methods comparison of returning the first stage of the reusable rocket. *Trudy MAI*. 2020. No. 113. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=118079>. DOI: [10.34759/trd-2020-113-06](https://doi.org/10.34759/trd-2020-113-06)
20. Stel'makh S.F., Astankov A.M., Shcherbul' K.S., Lashko R.O. Prospects for the creation and application of the Amur-SPG launch vehicle. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki*. 2024. No. 9. P. 550–555. (In Russ.)
21. Dolzhanskii YU.M., Ilingina A.V., Kuzin A.I. Soyuz-5 Launch Vehicle: On the Production of the Product at JSC RCC Progress. *Vestnik NPO Tekhnomash*. 2021. No. 2. P. 18–21. (In Russ.)
22. Liseikin V.A., Mel'nikov V.S., Tozhokin I.A., Khachin A.I. Information and Control Systems for Fire Bench Tests of the First and Second Stage Blocks of the Soyuz-5 Launch Vehicle. *Polet. Obshcherossiiskii nauchno-tekhnicheskii zhurnal*. 2022. No. 1. P. 28–46. (In Russ.)

23. Kalugin K.S., Sukhov A.V. Features of Using Methane as a Fuel for Liquid Rocket Engines. *Aerospace MAI Journal*. 2018. V. 25, No. 4. P. 120–132. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 10.02.2025

Одобрена после рецензирования 24.03.2025

Принята к публикации 25.08.2025

The article was submitted on 10.02.2025; approved after reviewing on 24.03.2025; accepted for publication on 25.08.2025