



DOI 10.22363/2312-8143-2021-22-3-261-269  
УДК 629.783

Научная статья / Research article

## Методология использования методов многокритериального анализа на примере выбора оптимальной архитектуры космического сегмента ГЛОНАСС

С.Ю. Шмигирилов

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия  
✉ [sovietserega@gmail.com](mailto:sovietserega@gmail.com)

### История статьи

Поступила в редакцию: 10 сентября 2021 г.  
Доработана: 13 ноября 2021 г.  
Принята к публикации: 15 ноября 2021 г.

### Ключевые слова:

метод уверенных суждений, многокритериальная оптимизация, критерии, свертка критериев, весовые коэффициенты, навигационные услуги

**Аннотация.** Представлена методология выбора оптимальной архитектуры на примере глобальной навигационной спутниковой системы, а именно ее космического сегмента. В качестве примера для отработки методики взяты несколько потенциальных архитектур системы ГЛОНАСС. Применение традиционных методов многокритериального анализа в данном случае затруднительно по причинам наличия большого числа частных навигационных задач, которые выдвигают зачастую противоречивые и неопределенные требования к их разрешению. Также наличие большого количества частных критериев, необходимость привлечения большого числа лиц, принимающих решения, и, как следствие, конфликт интересов, трудность в настройке весовых коэффициентов, определении предпочтений существенно сужают выбор методов для решения задачи. Для реализации поставленной цели использован метод уверенных суждений. Произведена структуризация системы частных критериев, учитывая требования конкретных узких сегментов, и сформированы их предпочтения. После чего для каждой структуры построены таблицы по необходимому числу критериев и по трем разным частным задачам, а также выполнена нормировка и свертка критериев по каждой задаче в один критерий. Далее сформировано множество Парето-рациональных решений и рейтинг альтернатив. Конечный облик системы удовлетворил требованиям, предъявляемым со стороны потребительского сегмента.

### Для цитирования

Шмигирилов С.Ю. Методология использования методов многокритериального анализа на примере выбора оптимальной архитектуры космического сегмента ГЛОНАСС // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2021. Т. 22. № 3. С. 261–269. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2021-22-3-261-269>

© Шмигирилов С.Ю., 2021



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License  
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

## The methodology of using multicriteria analysis methods choosing the optimal architecture of the GLONASS space segment

Sergei Yu. Shmigirilov 

*Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia*

✉ [sovietserga@gmail.com](mailto:sovietserga@gmail.com)

### Article history

Received: September 10, 2021

Revised: November 13, 2021

Accepted: November 15, 2021

### Keywords:

confident judgments method, multi-criteria optimization, criteria, criteria convolution, weighting factors, navigation services

**Abstract.** The project presents a methodology for choosing the optimal architecture using, as an example, global navigation satellite system, namely its space segment. Several architectures of the GLONASS system were taken as an example for testing the methodology. The usage of traditional methods of multi-criteria analysis in this case is too way difficult due to the presence of a large number of particular navigation tasks, that often put forward contradictory and uncertain requirements for their resolution, the presence of a large number of private criteria, the need to involve a large number of decision makers (DM), and as a consequence, a conflict of interests, difficulty in setting weights, determining preferences, etc. The confident judgment method was used to implement the task. The system of private criteria was structured, taking into account the requirements of specific narrow segments, and their preferences were formed. After that, tables were built for each structure, according to the required number of criteria and for three different particular tasks, as well as to normalize and collapse the criteria for each task into one criterion. Then a set of Pareto-rational solutions and a rating of alternatives were formed. The final appearance of the system satisfied the requirements imposed by the consumer segment.

### For citation

Shmigirilov SYu. The methodology of using multicriteria analysis methods choosing the optimal architecture of the GLONASS space segment. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2021;22(3):261–269. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2021-22-3-261-269>

### Введение

В работе рассматривались лишь те характеристики, которые непосредственно влияют на качество сигнала конечного потребителя, а именно точность навигационных услуг, доступность, непрерывность. Однако ввиду большого потребительского сегмента, его категорий, требования, выдвигаемые со стороны сегмента, зачастую несут противоречивый и неопределенный характер. По этой причине встает проблема выбора оптимальной архитектуры космического сегмента ГЛОНАСС [1]. Главной спецификой возникающей задачи является большое число частных критериев, которые вдобавок необходимо систематизировать. Наличие большого числа частных критериев при решении задачи многокритериальной оптимизации возлагает на эксперта или лицо, принимающее решение (ЛПР), большие знания прикладной области, так как ему необходимо производить настройку весовых коэффициентов, определять предпочтения и т. п. В конкретном случае подбор таких коэффициентов или

предпочтений становится практически невозможным, ввиду большого числа аспектов, отражающих функционирование глобальной спутниковой навигационной системы (ГНСС)<sup>1</sup> [2; 3].

Для решения возникшей задачи использован метод уверенных суждений (МУС), поскольку такой подход позволит более четко определить в каждом критерии используемые весовые коэффициенты и неопределенности, а также ввести понятие «важности». Таким образом, использование МУС для решения задачи многокритериальной оптимизации предлагается применить на новом множестве критериев.

### 1. Формирование системы частных критериев

При формировании системы частных критериев учитывались:

<sup>1</sup> Российский радионавигационный план. Утвержден приказом Минпромторга России от 02.09.2008 г. № 118. URL: <https://geostart.ru/doc/read/4441> (дата обращения: 22.03.2021).

– перечень стандартных задач, которые могут быть решены с использованием ГНСС (позиционирование, синхронизация шкал времени, специальные задачи и др.);

– исторически сложившаяся отраслевая сегментация потребителей (воздушная, морская или транспортная навигация, геодезия и др.);

– конкретные частные задачи (заход и посадка по требованиям ICAO, управление специальной техникой и т. п.) [4].

Таким образом, удалось сформировать систему частных критериев посредством вычленения определяющих критериев по каждому условному сегменту

потребителей. Ниже приведена структурная схема каждого из показателей качества навигационной задачи, исходя из назначений потребительских нужд, путем их максимальной адаптации и разделения [5].

Поскольку для точности определяющим фактором является уровень ошибки навигационных определений, этот критерий был разделен так, как представлено на рис. 1.

Для конечного числа стандартных навигационных услуг доступность, так же как и оценка точности, может являться обобщенной системной оценкой качества ГНСС и разделяться на несколько подкатегорий (рис. 2).

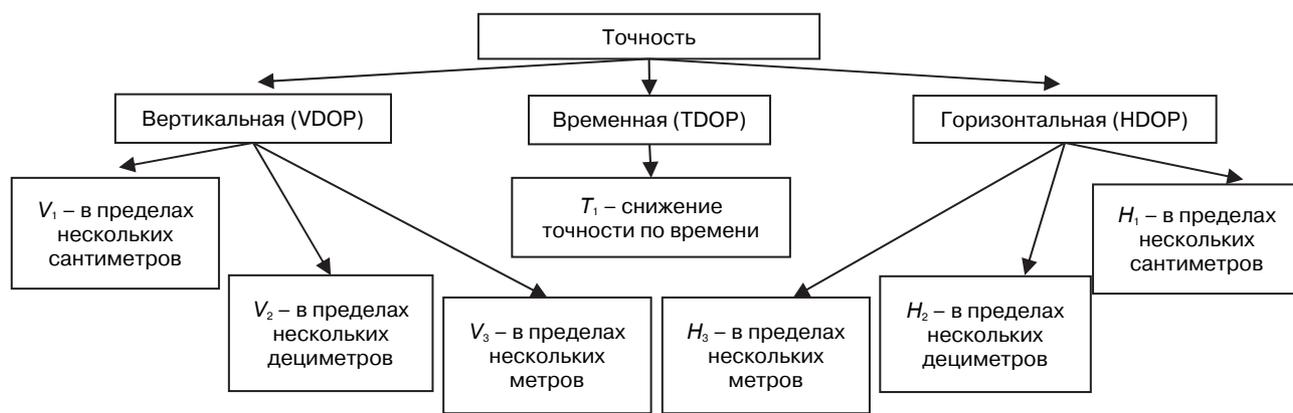


Рис. 1. Структурная схема показателя точности навигационных услуг

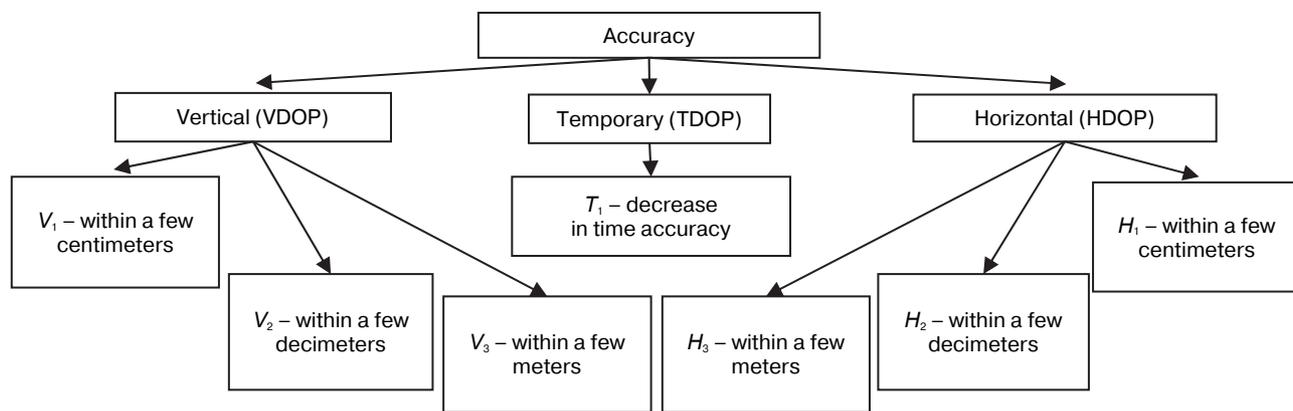


Figure 1. Accuracy indicator of the navigation services block diagram

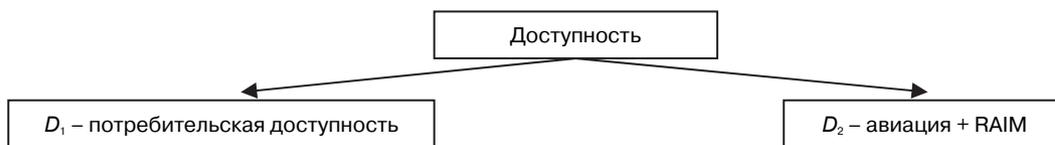


Рис. 2. Структурная схема показателя доступности навигационных услуг

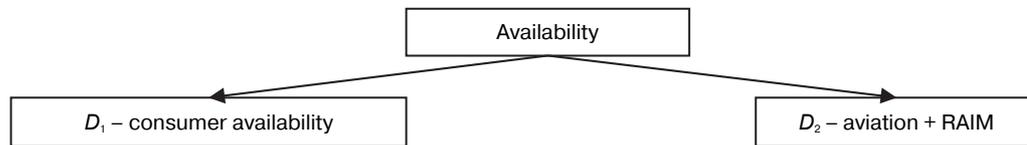


Figure 2. Availability indicator of the navigation services block diagram

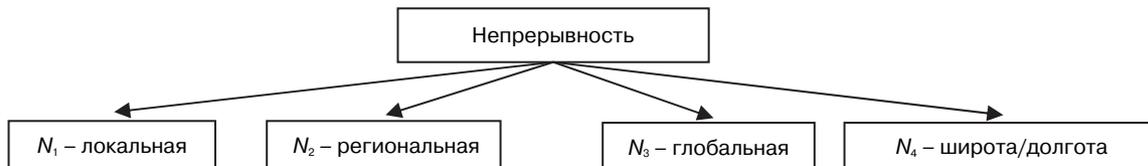


Рис. 3. Структурная схема показателя непрерывности навигационных услуг

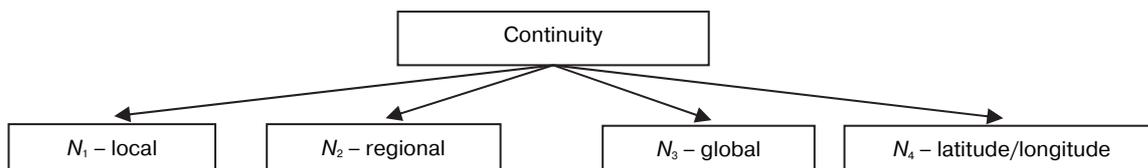


Figure 3. Continuity indicator of the navigation services block diagram

Непрерывность в зависимости от области осреднения также можно различать (рис. 3).

Полученная в результате новая система частных критериев обладает следующими преимуществами:

- отражает как существующие, так и перспективные потребности потребителей;
- позволяет формировать важность задач по отношению друг к другу (например, задача захода самолета на посадку важнее задачи движения по маршруту);
- может быть легко расширена<sup>2</sup>.

## 2. Сужение множества частных критериев

На этапе оптимизации возникла проблема, связанная с большим числом критериев. Таким образом, возникла необходимость в сужении множества частных критериев.

Существует несколько классических методов, относящихся к многокритериальной оптимизации. В работе использован метод взвешенных функций (method of objective weighting).

Обобщенный критерий записывается в следующем виде:

$$f(X) = \sum_{i=1}^m \lambda_i F_i(X), \quad (1)$$

где  $\lambda_i \geq 0$  являются весовыми коэффициентами, которые задают предпочтение  $i$ -го критерия по сравнению с другими критериями.

Величина  $\lambda_i$  определяет важность  $i$ -го частного критерия. При этом более важному критерию приписывается больший вес, а общая важность всех критериев принимается равной 1, то есть

$$\min_{X \in D} f(X) = \min_{X \in D} \sum_{i=1}^m \lambda_i F_i(X). \quad (2)$$

Основным недостатком свертывания является сложность назначения весовых коэффициентов. В силу этого был взят достаточно узкий сегмент для свертывания, что позволило повысить качество свертки.

С другой стороны, использование свертки позволит существенно уменьшить количество критериев при решении задачи многокритериальной оптимизации [5–9].

<sup>2</sup> Федеральный радионавигационный план США. Редакция 2008 г. URL: <http://www.gisa.ru/file/file1716.pdf> (дата обращения: 22.03.2021).

### 3. Формирование предпочтений

На основании описанных показателей качества навигационных услуг, а также идеи о свертке показателей системы частных критериев, сфор-

мирована таблица предпочтений (табл. 1), которая отражает приоритеты, расставленные по сегментам потребителей каждого из частных критериев.

Таблица 1

Таблица предпочтений

Сегмент потребителей	Показатели качества навигационных услуг										Критерий
	Точность				Доступность		Непрерывность				
	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$L_4$	$L_5$	$L_6$	$L_7$	$L_8$	$L_9$	$L_{10}$	
$Z_1$											$J_1$
$Z_2$											$J_2$
...											...
$Z_N$											$J_N$

Примечание:  $L_i$  – частные критерии;  $Z_j$  – сегмент потребителей;  $J_j$  – совокупность частных критериев.

Table 1

Preference table

Consumer segment	Navigation services quality indicators										Criteria
	Accuracy				Availability		Continuity				
	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$L_4$	$L_5$	$L_6$	$L_7$	$L_8$	$L_9$	$L_{10}$	
$Z_1$											$J_1$
$Z_2$											$J_2$
...											...
$Z_N$											$J_N$

Note:  $L_i$  – private criteria;  $Z_j$  – consumer segment;  $J_j$  – convolutions of private criteria.

С учетом данной таблицы решение состоит из нескольких этапов:

- 1) формирование системы частных критериев;
- 2) выбор сегментов пользователей и проведение декомпозиции каждого из сегментов с целью выявления отдельных подзадач;
- 3) формирование предпочтений для каждого сегмента с использованием системы частных критериев;
- 4) свертывание критериев;
- 5) сортировка различных критериев по группам «важности» и решение задачи многокритериальной оптимизации методом уверенных суждений [4; 10–12].

### 4. Отработка результатов

Решение задачи многокритериальной оптимизации относительно новой системы критериев проводилось следующим образом:

- формирование множества Парето-равноценных решений;
- сужение множества неопределенностей за счет учета в нем уверенных суждений;

– оставшиеся неопределенности устраняются путем введения рейтинга решений: наилучшим принимается решение с максимальным жестким рейтингом, а при прочих равных условиях – с наилучшим мягким.

В качестве примера были выбраны восемь альтернатив: А – Структура 30\3, С – Структура 30\5, Е – Структура 24\6, Н – Структура 30\6, В – Структура 32\8, D – Структура 32\4, F – Структура 28\7, G – Структура 30\3Н, где первое значение – это общее количество спутников, второе – количество плоскостей. Далее было сформировано множество частных критериев (табл. 2)<sup>3</sup>.

Затем составлена таблица предпочтений (табл. 3).

Произведен расчет предпочтений по каждой альтернативе (рис. 4) [3; 13].

<sup>3</sup> Авиационная электросвязь. Т. I. Радионавигационные средства. Приложение 10 к Конвенции о международной гражданской авиации. URL: <http://airspot.ru/library/book/ikao-prilozhenie-10-k-konventsii-o-mezhdunarodnoy-grazhdanskoy-aviatsii-aviatsionnaya-elektrosvyaz-tom-1> (дата обращения: 22.03.2021).

Таблица 2  
Множество частных критериев

PDOP (локальный)	PDOP (район)	PDOP (глобальный)	Доступность	
			≥4	≥6

Table 2  
Particular criteria variety

PDOP (local)	PDOP (area)	PDOP (global)	Availability	
			≥4	≥6

Таблица предпочтений

Таблица 3

№ задачи	Критерии					Свертка
	PDOP (локальный)	PDOP (район)	PDOP (глобальный)	Доступность ≥4	Доступность ≥6	
						J
1	+	-	-	-	+	J1
2	-	-	+	+	-	J2
3	-	+	-	+	-	J3

Preference table

Table 3

Task number	Criteria					Convolution
	PDOP (local)	PDOP (area)	PDOP (global)	Availability ≥4	Availability ≥6	
						J
1	+	-	-	-	+	J1
2	-	-	+	+	-	J2
3	-	+	-	+	-	J3

№ задачи / Task number	Критерии / Criteria					Свертка / Convolution
	PDOP (локальный / local)	PDOP (район / area)	PDOP (глобальный / global)	Доступность / Availability ≥ 4	Доступность / Availability ≥ 6	
1	1.586	-	-	-	0.804	1.53
2	-	-	1.674	0.973	-	0.79
3	-	1.586	-	0.967	-	1.02

Рис. 4. Расчет всех предпочтений  
Figure 4. Calculation of all preferences

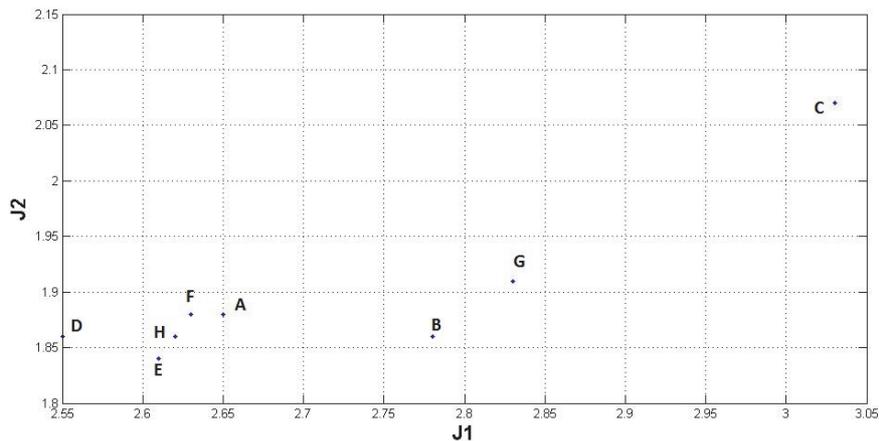
Таблица 4 / Table 4

Рассчитанные частные свертки критериев для выбранных альтернатив /  
Calculated partial convolutions of criteria for selected alternatives

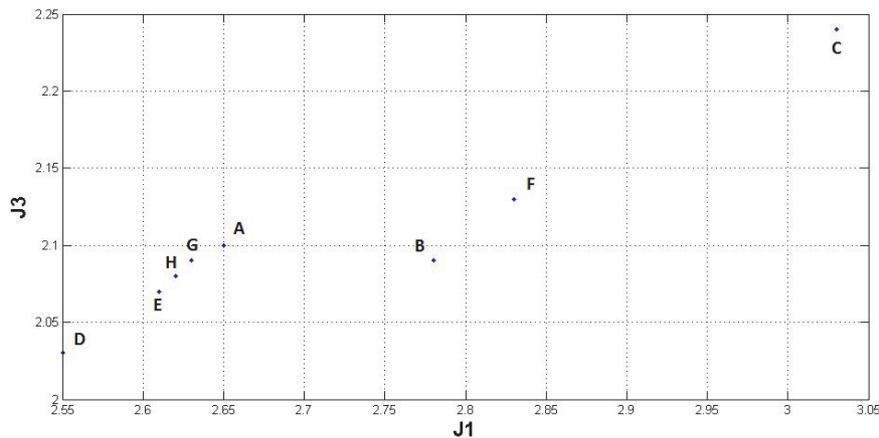
	A 30/3	B 32/8	C 24/6	D 30/5	E 32/4	F 28/7	G 30/3H	H 30/6
J1	2.65	2.78	3.03	2.55	2.61	2.83	2.63	2.62
J2	1.88	1.86	2.07	1.86	1.84	1.91	1.88	1.86
J3	2.1	2.09	2.24	2.03	2.07	2.13	2.09	2.08

Рассчитанные частные критерии для принятых альтернатив построения орбитального сегмента ГЛОНАСС представлены в табл. 4.

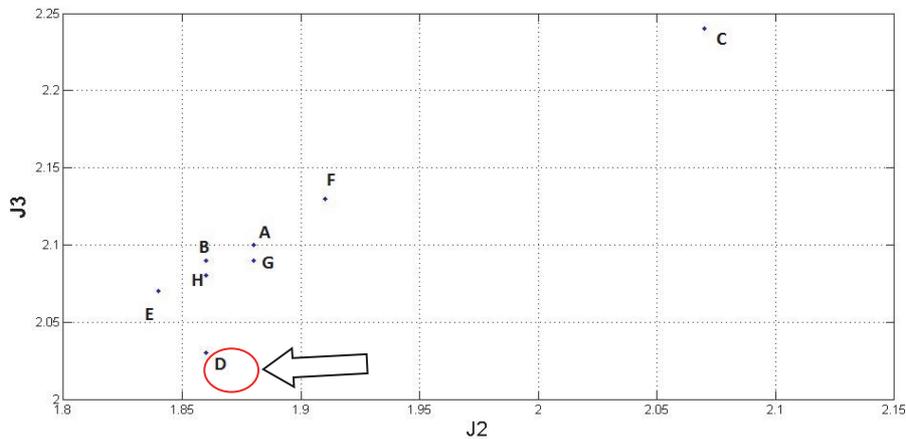
В соответствии с рассчитанным множеством альтернатив вид множества Парето представлен на рис. 5–7.



**Рис. 5.** График сверток  $J1$  и  $J2$   
**Figure 5.**  $J1$  and  $J2$  convolutions graph



**Рис. 6.** График сверток  $J1$  и  $J3$   
**Figure 6.**  $J1$  and  $J3$  convolutions graph



**Рис. 7.** График сверток  $J2$  и  $J3$   
**Figure 7.**  $J2$  and  $J3$  convolutions graph

Рейтинг альтернативы – вероятность того, что альтернатива окажется наилучшей с учетом всевозможных способов учета неопределенностей, которые допустимы в конкретной задаче принятия решения (табл. 5) [3; 14].

Таблица 5

Рейтинг альтернатив		
Структура	30/5	32/4
Рейтинг	0,9997	0,0003

Table 5

Rating of alternatives		
Structure	30/5	32/4
Rating	0.9997	0.0003

Анализ рис. 5–7 позволяет сразу определить решение – это альтернатива D (30/5). Тем не менее в соответствии с предложенной методологией выполнены все остальные этапы. Результаты совпали. Отличительной особенностью предлагаемого подхода является отказ от явного назначения весовых коэффициентов при решении задачи многокритериальной оптимизации для новой системы частных критериев [4]. Это достигается за счет использования метода уверенных суждений, согласно которому сужение множества альтернатив и выбор окончательного решения осуществляются путем расчета и сравнения их рейтингов<sup>4</sup> [15].

## Заключение

Методология на основе использования таблицы предпочтений и метода уверенных суждений позволяет достаточно обоснованно производить сравнительную оценку структур, характеризующихся набором количественных и качественных критериев в условиях неопределенности исходных данных, а также дает возможность не только классической многокритериальной оптимизации, но и учета важности сегментов по отношению друг к другу.

## Список литературы

1. Пиявский С.А., Брусов В.С., Хвилон Е.А. Оптимизация параметров многоцелевых летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1974. 168 с.

<sup>4</sup> ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ (редакция 5.1). 2008 г. URL: [https://russianspacesystems.ru/wp-content/uploads/2016/08/ICD\\_GLONASS\\_rus\\_v5.1.pdf](https://russianspacesystems.ru/wp-content/uploads/2016/08/ICD_GLONASS_rus_v5.1.pdf) (дата обращения: 22.03.2021).

2. Malyshev V.V., Piyavsky S.A. The confident judgment method in the selection of multiple criteria solutions // *J. Comput. Syst. Sci. Int.* 2015. Vol. 54. No. 5. Pp. 754–764. <https://doi.org/10.1134/S1064230715050093>

3. Groves P.D. Principles of GNSS, inertial, and multi-sensor integrated navigation systems. 2nd ed. Artech House, 2013. 762 p.

4. Пиявский С.А. Методы оптимизации и оптимального управления. Самара: СГАСУ, 2005. 184 с.

5. Малышев В.В. Методы оптимизации сложных систем: учебное пособие. М.: МАИ, 1981. 76 с.

6. Brusov V.S., Korchagin P.O., Malyshev V.V., Piyavsky S.A. Advanced “confident judgments” method when choosing multicriteria solutions in a multipurpose approach // *J. Comput. Syst. Sci. Int.* 2020. Vol. 59. No 1. Pp. 83–94. <https://doi.org/10.31857/S0002338820010047>

7. Raiffa H. Decision analysis: introductory readings on choices under uncertainty. McGraw Hill, 1997.

8. Gill P.E., Murray W., Wright M.H. Practical optimization. Philadelphia, 2019. 401 p. <https://doi.org/10.1137/1.9781611975604>

9. Лутвак Б.Г. Экспертные оценки и принятие решений. М.: Патент, 1996. 271 с.

10. Пиявский С.А., Бараховский Б.С. Блок обоснования решений в программном обеспечении МикроЭВМ // Калинин: Центр программ и систем, 1986. С. 7–10.

11. Malyshev V.V., Piyavsky B.S., Piyavsky S.A. A decision making method under conditions of diversity of means of reducing uncertainty // *J. Comput. Syst. Sci. Int.* 2010. Vol. 49. No 1. Pp. 44–58. <https://doi.org/10.1134/S10642307100100656>

12. Сенаторов М.Ю., Сятковский Р.Б. Сравнительный анализ характеристик методов контроля целостности глобальных спутниковых навигационных систем // Безопасность информационных технологий. 2011. Т. 18. № 4. С. 106–108.

13. Odu G.O. Weighting methods for multi-criteria decision making technique // *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*. 2019. Vol. 23. No. 8. Pp. 1449–1457. <https://doi.org/10.4314/jasem.v23i8.7>

14. Смирнов О.Л., Падалко С.А., Пиявский С.А. САПР: формирование и функционирование проектных модулей. М.: Машиностроение, 1987. 272 с.

15. Brusov V.S., Piyavskii S.A. Multi-criteria analysis of high-altitude UAV concepts // *Russ. Aeronaut.* 2016. Vol. 59. Pp. 447–451. <https://doi.org/10.3103/S1068799816040024>

## References

1. Piyavsky SA, Brusov VS, Khvilon EA. *Multipurpose aircraft parameters optimization*. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 1974. (In Russ.)

2. Malyshev VV, Piyavsky SA. The confident judgment method in the selection of multiple criteria solu-

tions. *J. Comput. Syst. Sci. Int.* 2015;54(5):754–764. <https://doi.org/10.1134/S1064230715050093>

3. Groves PD. *Principles of GNSS, inertial, and multisensor integrated navigation systems*. 2nd ed. Artech House; 2013.

4. Piyavsky SA. *Optimization and optimal control methods*. Samara: SSASU Publ.; 2005. (In Russ.)

5. Malyshev VV. *Optimization of complex systems methods*. Moscow: MAI Publ.; 1981. (In Russ.)

6. Brusov VS, Korchagin PO, Malyshev VV, Piyavsky SA. Advanced “confident judgments” method when choosing multicriteria solutions in a multipurpose approach. *J. Comput. Syst. Sci. Int.* 2020;59(1):83–94. <https://doi.org/10.31857/S0002338820010047>

7. Raiffa H. *Decision analysis: introductory readings on choices under uncertainty*. McGraw Hill; 1997.

8. Gill PE, Murray W, Wright MH. *Practical optimization*. Philadelphia; 2019. <https://doi.org/10.1137/1.9781611975604>

9. Litvak BG. *Expert assessments and decision-making*. Moscow: Patent Publ.; 1996. (In Russ.)

10. Piyavsky SA, Barakhovsky BS. *The block of substantiation solutions in microcomputer software*. Kalinin: Tsentr Programm i Sistem Publ.; 1986. p. 7–10. (In Russ.)

11. Malyshev VV, Piyavsky BS, Piyavsky SA. A decision making method under conditions of diversity of means of reducing uncertainty. *J. Comput. Syst. Sci. Int.* 2010;49(1):44–58.

12. Senatorov MYu, Syatkovsky RB. The comparative analysis of methods characteristics of a monitoring of integrity of global navigation satellite systems. *IT Security*. 2011;18(4):106–108. (In Russ.)

13. Odu GO. Weighting methods for multi-criteria decision making technique. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*. September 2019;23(8): 1449–1457. <https://doi.org/10.4314/jasem.v23i8.7>

14. Smirnov OL, Padalko SA, Piyavsky SA. *CAD: design modules formation and functioning*. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 1987. (In Russ.)

15. Brusov VS, Piyavskii SA. Multi-criteria analysis of high-altitude UAV concepts. *Russ. Aeronaut.* 2016;59: 447–451. <https://doi.org/10.3103/S1068799816040024>

#### Сведения об авторе

Сергей Юрьевич Шмигирилов, старший преподаватель, кафедра 604, аэрокосмический факультет, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Российская Федерация, 125993, Москва, Волоколамское шоссе, д. 4; ORCID: 0000-0001-8439-6142, eLIBRARY SPIN-код: 7128-1602. E-mail: [sovietserega@gmail.com](mailto:sovietserega@gmail.com)

#### About the author

Sergei Y. Shmigirilov, senior lecturer, Department 604, Aerospace Faculty, Moscow Aviation Institute (National Research University), 4 Volokolamskoe Shosse, 125993, Moscow, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-8439-6142, eLIBRARY SPIN-code: 7128-1602. E-mail: [sovietserega@gmail.com](mailto:sovietserega@gmail.com)