

Труды МАИ. 2022. № 122  
Trudy MAI, 2022, no. 122

Научная статья  
УДК 519.8  
DOI: [10.34759/trd-2022-122-15](https://doi.org/10.34759/trd-2022-122-15)

## **МЕТОДИКА СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО КОНФИГУРИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ И НАВИГАЦИЕЙ МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СЦЕНАРИЯХ ДЕСТРУКТИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ**

**Валентин Николаевич Воротягин**

Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского,  
Санкт-Петербург, Россия  
[vka@mil.ru](mailto:vka@mil.ru)

*Аннотация.* В данной статье рассмотрен концептуально новый подход к обеспечению надежности, живучести и эффективности функционирования малого космического аппарата, учитывающий структурно-функциональные, структурно-технологические особенности управления, многокритериальный характер оценивания, анализа и выбора структуры и параметров бортовых систем малого космического аппарата дистанционного зондирования Земли в условиях ограниченных бортовых ресурсов, деструктивных воздействий и постоянно растущей номенклатуры элементной базы космической техники.

*Ключевые слова:* система управления движением и навигацией, структурно-параметрическая конфигурация, рациональные варианты

*Для цитирования:* Воротягин В.Н. Методика структурно-параметрического конфигурирования системы управления движением и навигацией малого космического аппарата дистанционного зондирования земли при различных сценариях деструктивных воздействий // Труды МАИ. 2022. № 122. DOI: [10.34759/trd-2022-122-15](https://doi.org/10.34759/trd-2022-122-15)

## **METHOD OF STRUCTURAL AND PARAMETRIC CONFIGURATION OF THE MOTION AND NAVIGATION CONTROL SYSTEM OF A SMALL SPACE VEHICLE FOR REMOTE EARTH SENSING UNDER DIFFERENT SCENARIOS OF DESTRUCTIVE IMPACTS**

**Valentin N. Vorotyagin**

Military space Academy named after A.F. Mozhaisky,

Saint Petersburg, Russia

[vka@mil.ru](mailto:vka@mil.ru)

*Abstract.* Today, methods and technologies employing Earth remote probing data being developed by Roscosmos enterprises allow suggesting unique ways for ensuring safety, increasing efficiency of exploration and extraction of natural resources, introducing the latest practices into agriculture, preventing and eliminating consequences of emergencies, as well as protecting environment and controlling climate change. The issue of new space technology developing (a small spacecraft for the Earth remote probing in particular) is becoming most relevant.

To increase the degree of the design decisions validity while creating a small spacecraft, the article considers:

- Conceptually new approach to the development of a scientific-and-methodological apparatus for multi-criteria selection of the onboard control system structure and parameter on the example of a small spacecraft motion and navigation control system;
- Optimization of its limited resources to ensure proactive compensation of destructive external agency impacts

The article presents the developed structural-and-logical scheme for motion and navigation control system configuring of the Earth remote probing small spacecraft. The proposed approach allows putting into practice a multi-criteria selection of effective configuration options for motion and navigation control system of a small spacecraft with account for various types of structural redundancy of the onboard equipment, and a wide range of element base. The conceptual and mathematical statements of the problem are given, and an algorithm for multi-criteria synthesis of the motion and navigation control system appearance of a small spacecraft is developed.

The proposed technique will allow, even at the spacecraft design stage, significantly reducing the number of design errors by the decision-maker, as well as improving the quality and efficiency of the created space systems application.

**Keywords:** motion and navigation control system, structural-parametric configuration, rational options

**For citation:** Vorotyagin V.N. Method of structural and parametric configuration of the motion and navigation control system of a small space vehicle for remote earth sensing

under different scenarios of destructive impacts. *Trudy MAI*, 2022, no. 122. DOI: [10.34759/trd-2022-122-15](https://doi.org/10.34759/trd-2022-122-15)

## Введение

В последние годы наиболее важным и актуальным направлением развития космоса является повышение продолжительности срока активного существования любой космической техники (в частности, малых космических аппаратов (МКА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ)). Полученная информация ДЗЗ используются всеми ведомствами нашего государства в различных ее отраслях, особенно в условиях действующих мировых санкций в отношении государственных предприятий. Вопросы автономности и надежности встают от момента проектирования до эксплуатации космических объектов.

На сегодняшний день активно используются около 400 спутников, занятых именно дистанционным зондированием<sup>1</sup>. Безотказность работы МКА ДЗЗ напрямую зависит от прочности и упругости конструкционных материалов и составляющих бортового оснащения к воздействию находящейся вокруг космической среды. По различным оценкам специалистов в области оборонной индустрии, более пятидесяти процентов отказов и сбоев в работе бортовой аппаратуры МКА обосновано разрушительным воздействием факторов космического пространства (ФКП). Во время выполнения программы полета на космические средства воздействует [1,2]

---

<sup>1</sup> КОНЦЕПЦИЯ развития российской космической системы дистанционного зондирования Земли на период до 2025 года.

обширный комплекс ФКП. В итоге такого влияния в материалах и деталях бортового оснащения МКА проходят различные физико-химические процессы, приводящие к усилению негативных тенденций их данных и характеристик.

В результате реализации государственных программ связанных с космической деятельностью России должны быть разработаны новые конкурентоспособные производственные технологии, технологии спутниковой связи, дистанционного зондирования Земли. Важнейшим приоритетом согласно данной стратегии являются работы связанные с развитием и внедрением космической техники, технологий и предложений, в заинтересованности необходимости защиты и защищенности государства (космические комплексы и системы связи ДЗЗ). Согласно данной концепции для создания современной и эффективной системы ДЗЗ необходимо осуществлять увеличение относительного количества малоразмерных КА (малых, мини и микроспутников), а также интенсивно осваивать микро/нано-технологии и создавать сверхбольшие кластерные космических систем из микро- и нано-спутников.

В данной статье рассмотрен концептуально новый подход к обеспечению эффективности функционирования, живучести и надежности МКА, учитывающий структурно-функциональные, структурно-технологические особенности управления, многокритериальный характер оценивания, анализа и выбора структуры и параметров бортовых систем МКА ДЗЗ в условиях ограниченных бортовых ресурсов, деструктивных воздействий и постоянно растущей номенклатуры элементной базы КА.

При решении поставленных в госпрограммах задач требуется учитывать требования к миниатюризации космических автоматических систем информационного обеспечения, внедрению новых принципов информационного взаимодействия МКА, увеличению сроков активного существования, решению круга целевых и функциональных задач современными МКА.

Появляется необходимость эффективной и качественной работы бортового комплекса управления (БКУ) в условиях возможного возникновения расчетных и, особенно, нерасчетных аварийных полетных ситуаций, вызванных воздействием ФКП, а также проектными, производственными и эксплуатационными ошибками, имеющими объективный и субъективный характер. Выдвигая предположение о неопределенности отказа бортовой аппаратуры и его характеристик модели и методы, применяемые в теории надежности, становятся не применимы для процесса обоснования проектных решений по обеспечению живучести функционирования БКУ МКА в условиях деструктивных воздействий.

### **Концептуальная и математическая постановка задачи**

Управление функционированием МКА ДЗЗ осуществляется автоматизированной системой управления (АСУ) КА, и традиционно реализуется в виде двух комплексов: бортового (БКУ) и наземного (НКУ) комплексов управления, связанных между собой командной радиолинией управления и радиолинией телеметрической системы. Важную роль в получении необходимой целевой информации (ЦИ) от МКА играет БКУ, который непосредственно определяет

процессы управления бортовыми системами (БС) аппарата как в штатных, так и в нештатных ситуациях.

В отличие от обычно применяемого на практике реактивного управления БС технологию проактивного (упреждающего) мониторинга и управления такими системами, возможно рассматривать как перспективную интеллектуальную технологию управления сложностью [3-7]. Эта разработка подразумевает предотвращение появления конфликтов за счет создания в соответствующей системе мониторинга и управления принципиально новых прогнозирующих и упреждающих возможностей при формировании и реализации управляющих воздействий, основанных на концепции системного (комплексного) моделирования [8]. Методология и технологии комплексного моделирования предполагает полимодельное описание исследуемой предметной области, а также комбинированное использование методов, алгоритмов и методик многокритериального оценивания, анализа и выбора наиболее предпочтительных решений [9].

Особенно важной с точки зрения обеспечения штатной работы целевой аппаратуры и выполнения поставленных перед МКА задач служебной системой БКУ является система управления движением и навигацией (СУДН). Так на примере МКА ДЗЗ «Аист-2Д» СУДН имеет сложную техническую и функциональную структуру, состоящую из чувствительных элементов и исполнительных органов, приведенные на рис. 1, бортового вычислителя и программного обеспечения, в котором реализованы алгоритмы СУДН [10].

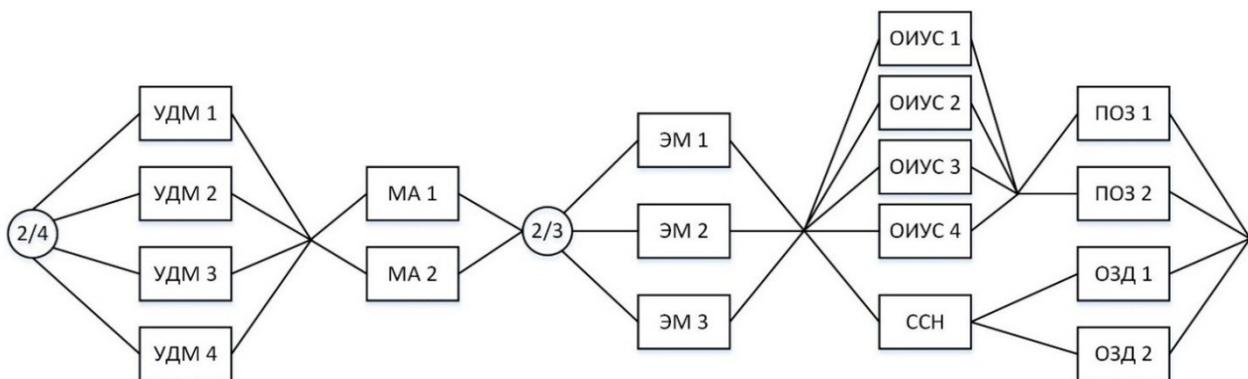
В состав СУДН входят следующие функциональные элементы (ФЭ): отдельные измерители угловой скорости (ОИУС), управляющие двигатели маховики (УДМ), приборы ориентации по Земле (ПОЗ), система спутниковой навигации (ССН), оптические звездные датчики (ОЗД), магнитометры (МА), электромагниты (ЭМ)



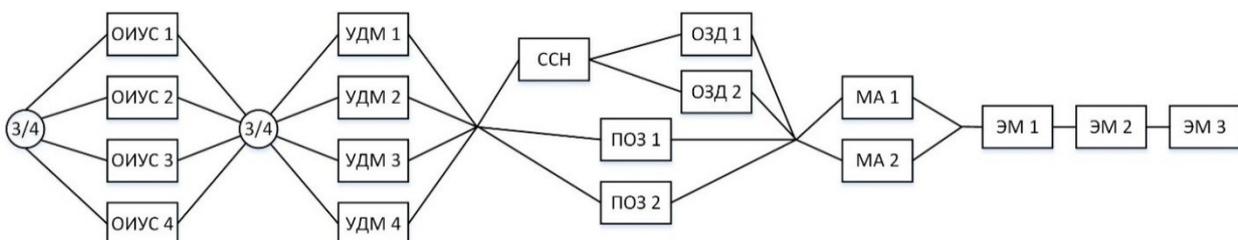
Рис. 1 – Чувствительные элементы и исполнительные органы

### СУДН МКА ДЗЗ «Аист-2Д»

Для реализации основных функций МКА будем рассматривать следующие режимы ориентации МКА [10] при штатном его функционировании (рис. 2).



а)



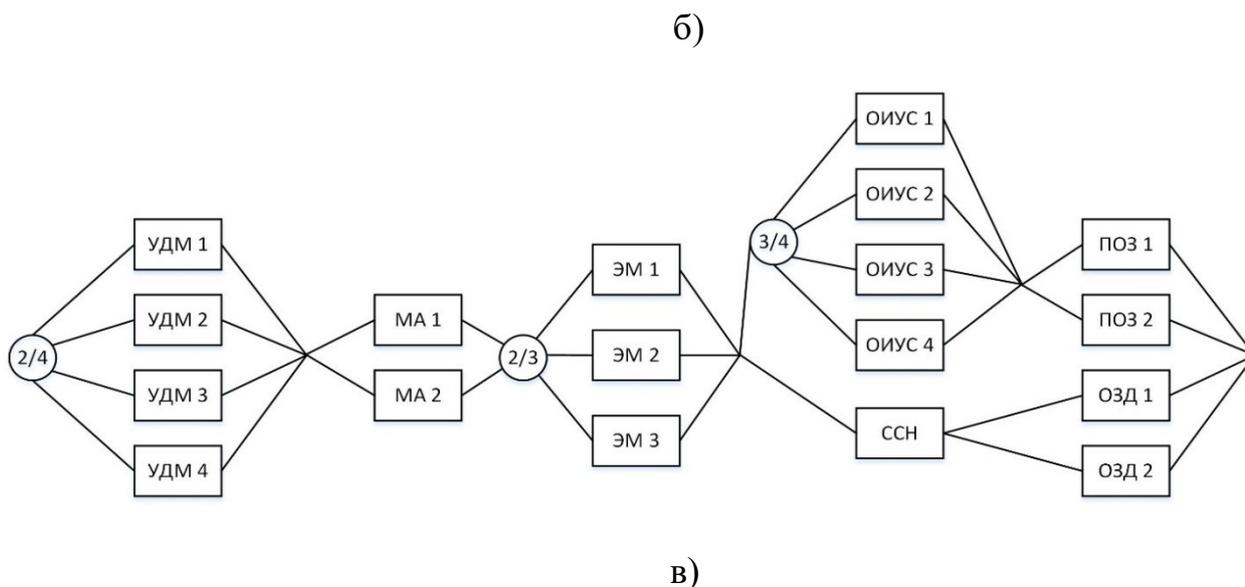


Рис.2 – Режимы ориентации МКА: а) «грубая» ориентация, б) «точная» ориентация, в) «ориентация на Солнце»

Указанные режимы ориентации СУДН МКА ДЗЗ различаются с точки зрения, как характера, так и интенсивности их использования, в зависимости от решаемой целевой задачи МКА ДЗЗ, процесса движения по орбите, рассматриваемого интервала времени и других факторов.

Таким образом, для каждого режима предусматривается определённый состав бортовой аппаратуры и алгоритмов ориентации СУДН.

На основании вышеизложенной концептуальной постановки суть решаемой задачи конфигурирования облика БКУ МКА ДЗЗ (на примере СУДН) с проактивной компенсацией деструктивных возмущений среды в условиях ограниченных бортовых ресурсов сводится к следующему:

**Известно:** номенклатурная база ЧЭ и ИО, возможности структурного резервирования БА СУДН МКА, режимы ориентации, а также ограничения на расход бортовых ресурсов МКА.

**Требуется найти:** такие эталонные эффективные варианты структурно-параметрической конфигурации СУДН МКА ДЗЗ, которые при выполнении ресурсных ограничений обеспечивают заданные (либо оптимальные) уровни значений структурно-функциональной, структурно-технологической живучести, а также показателей надежности функционирования МКА.

Опираясь на концептуальную модель для формализации решаемой задачи была осуществлена теоретико-множественная постановка с использованием структурно-математического подхода [9].

Математическая структура выбора решаемой задачи имеет следующий вид:

$$\left( \left\{ G(\omega, s) \right\}_{s \in S}, \Delta_{G\beta}(\omega), \left\{ F_h \right\}_{h \in H}, \left\{ \Phi^k \right\}_{k \in \Gamma}, (\Omega = \{\omega\}, \mathfrak{Z}, P) \right), \quad \text{представленная}$$

следующей математической структурой выбора, включающей в свой состав:

- $\left\{ G(\omega, s) \right\}_{s \in S}$  - полимодельный комплекс структурно-параметрического конфигурирования СУДН МКА в условиях неопределенности;

- $\Delta_{G\beta}(\omega)$  - множество допустимых вариантов облика СУДН МКА ДЗЗ с учетом основных ресурсных, технических и технологических ограничений, связанных с процессом его функционирования;

- $\left\{ F_h(\vec{u}), \vec{u} \in \Delta_{G\beta}(\omega) \right\}_{h \in H}$  - частные показатели качества функционирования СУДН МКА (ресурсные, надежности, структурно-функциональной живучести, структурно-технологической живучести, коэффициент технического использования, коэффициент сохранения целевой эффективности );

-  $\{\Phi^k\}_{k \in \Gamma}$  - множество согласующих правил, позволяющих задавать

результатирующее отношение предпочтения задачи конфигурирования СУДН МКА;

-  $(\Omega, \mathfrak{Z}, P)$  - пространство неопределенности.

Обобщенная постановка задачи конфигурирования СУДН МКА состоит в следующем:

*определить* результирующее отношение предпочтения  $r^{pez} = \Phi^{pez}(\{F_h, h \in H\})$

с учетом множества согласующих правил  $\{\Phi^k\}_{k \in \Gamma}$  для нахождения

$U^* \subseteq \Delta_{SP}^{nd} = \{\vec{u} \in \Delta_{SP}(\omega) \mid \exists z : z r^* \vec{u}, \omega \in \mathfrak{Z}\}$  множества рациональных вариантов облика СУДН МКА в условиях деструктивных воздействий.

### **Схема решения задачи конфигурирования СУДН МКА ДЗЗ**

Для решения задачи конфигурирования СУДН МКА ДЗЗ предлагается использовать следующую структурно-логическую схему, представленную на рис. 3.

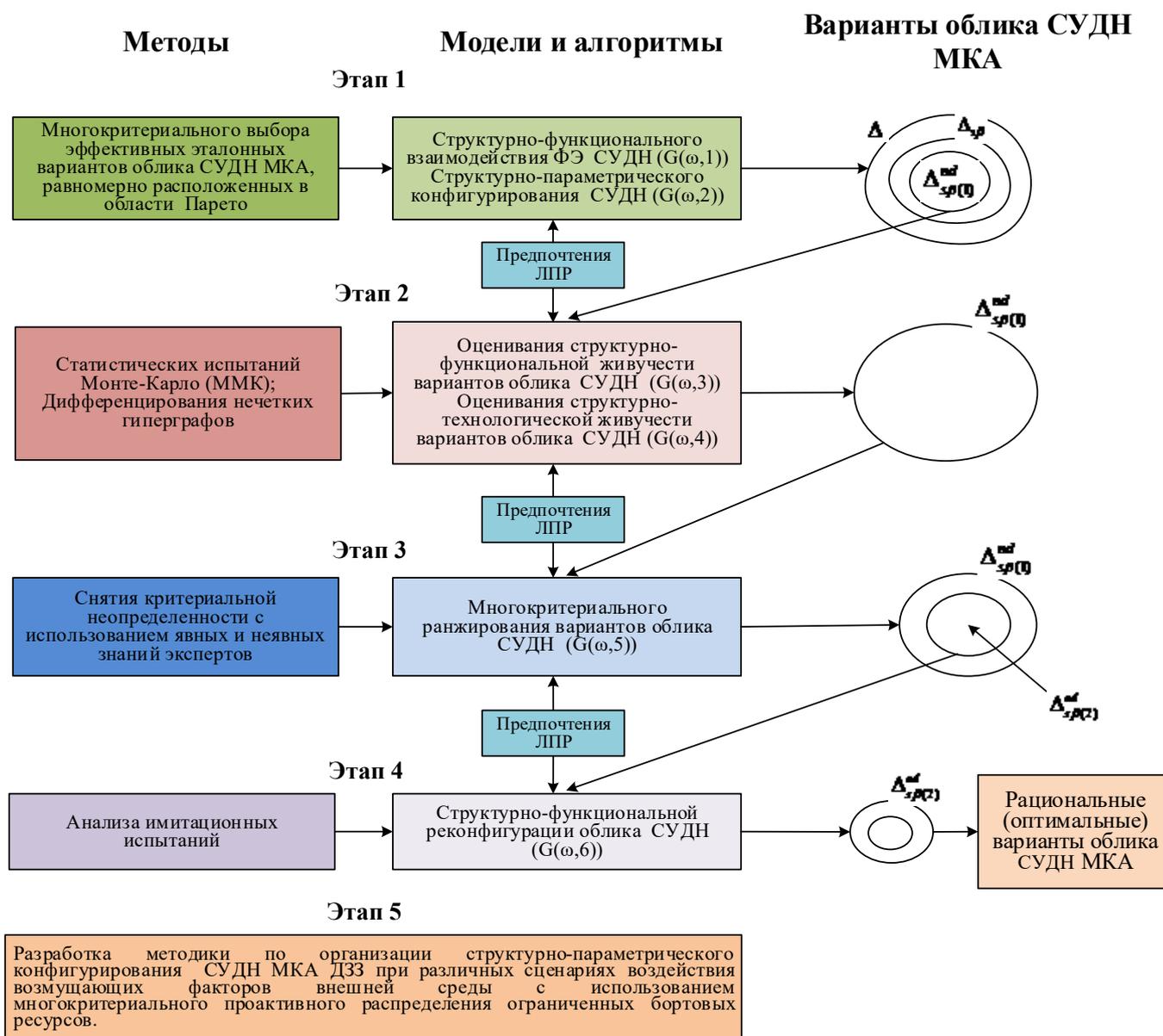


Рис. 3 – Структурно-логическая схема конфигурирования СУДН МКА ДЗЗ

На 1 этапе предлагается разработка модели структурно-функционального взаимодействия ЧЭ и ИО СУДН при реализации различных режимов ориентации МКА и модели многокритериального структурно-параметрического конфигурирования СУДН МКА ДЗЗ, используемых при генерировании (синтезе) эталонных вариантов конфигурации облика СУДН, равномерно расположенных в области компромиссов (множестве Парето), с учетом показателей структурно-функциональной надежности и ресурсных показателей.

**Этап 2** заключается в разработке аналитико-имитационной модели оценивания структурно-функциональной живучести эталонных вариантов облика СУДН МКА ДЗЗ и модели оценивания структурно-технологической живучести эталонных вариантов облика СУДН МКА ДЗЗ для проактивной компенсации различных непредсказуемых воздействий ФКП

**Этап 3** состоит в разработке модели многокритериального ранжирования эталонных вариантов облика СУДН МКА ДЗЗ с учетом показателей структурно-функциональной и структурно-технологической живучести для дальнейшего сужения множества Парето.

**На этапе 4** осуществляется формирование множества и выбор вариантов облика СУДН МКА с использованием аналитико-имитационной модели структурно-функциональной реконфигурации облика СУДН МКА ДЗЗ.

**И, наконец, на этапе 5** разрабатывается методика по организации структурно-параметрического конфигурирования СУДН МКА ДЗЗ при различных сценариях воздействия возмущающих факторов внешней среды с использованием многокритериального проактивного распределения ограниченных бортовых ресурсов.

С целью создания высоконадежных автоматических космических аппаратов необходимо проводить комплексное проактивное моделирование конфигурации облика СУДН МКА ДЗЗ с учетом номенклатуры элементной базы, количественных и качественных показателей эффективности и живучести функционирования объекта, выбор которых зависит от класса изделий, режимов и условий эксплуатации,

характера отказов и их последствий. При этом центральными проблемами при постановке и решении указанных задач, также, как и в целом для задач выбора, являются проблемы полимодельности и многокритериальности. После проведенного анализа методов многокритериального выбора [11-15] задачу предлагается решать с помощью методов покомпонентного построения результирующего отношения предпочтения и методов построения сверток показателей обоснованных в работах [16,17], а именно, предлагается использовать на 1 этапе классическое Паретовское и интервальное лексикографическое отношения предпочтения (метод уступок), а на 3 этапе псевдоуниверсальные свертки представленных в работах [18,19], в основе которых лежат производственные модели, методы планирования эксперимента и нечетко-возможностное описание (аддитивная, мультипликативная и нечеткая свертка).

Для оценивания структурно-технологической живучести эталонных вариантов облика СУДН МКА ДЗЗ в работах [20-22] был предложен оригинальный подход, основанный на нечетком гиперграфовом формальном представлении технологических операций управления ориентацией МКА, в котором ребра соединяют ФЭ и подсистемы СУДН, входящих в один из процессов управления, и использовании операции дифференцирования нечеткого гиперграфа, построения его производной, представляющей собой нечеткий граф технологической независимости ФЭ СУДН и позволяющей ввести показатели уровня структурно-технологической живучести варианта облика СУДН МКА. Приведенный подход, позволил провести анализ влияния ФЭ на СУДН, выявить наиболее критичные элементы, обладающие

наименьшей технологической независимостью в условиях реализации программы полета.

Поскольку специфика целевого функционирования СУДН МКА ДЗЗ требует учета внешних деструктивных воздействий космического пространства, то для учета функциональных особенностей в работах [6,22,23] была разработана имитационная модель оценивания структурно-функциональной живучести вариантов облика СУДН МКА, в основе которой лежит метод Монте-Карло и на примере бортовой системы управления движением малого космического аппарата «Аист-2Д» представлен пример практической реализации предложенного комплексного подхода.

Ранжирование вариантов облика СУДН МКА  $\Delta_{s\beta(1)}^{nd}$  с использованием показателей структурно-функциональной и структурно-технологической живучести относится к задачам многокритериального принятия решений для последующего его сужения  $\Delta_{s\beta(2)}^{nd} \subseteq \Delta_{s\beta(1)}^{nd}$ . Процесс многокритериального ранжирования вариантов облика СУДН МКА ДЗЗ представлен в работе [18].

Новизна предложенного подхода состоит в том, что позволяет формализовать подготовленные явные и неявные экспертные знания при минимуме обращений к эксперту

аналитическим

выражением

$$F_{res} = \lambda_0 + \sum_{i=1}^m \lambda_i F_i + \sum_{i=1}^m \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^m \lambda_{ij} F_i F_j + \dots + \lambda_{12\dots m} F_1 F_2 \dots F_m,$$

учитывающим

комплексное влияние рассматриваемых частных показателей при ранжировании и

соответствующем сужении множества эталонных вариантов облика СУДН МКА с учетом требований лица принимающего решение (ЛПР).

Далее отранжированное множество вариантов облика СУДН МКА исследуем с применением аналитико-имитационного комплекса моделирования структурно-функциональной реконфигурации СУДН МКА [16] с целью оценивания коэффициента технического использования и коэффициента сохранения целевой эффективности. Данные оценки позволяют осуществить окончательного выбор наиболее рациональных вариантов конфигурации СУДН МКА при различных сценариях деструктивных воздействий.

### **Обобщенный алгоритм многокритериального структурно-параметрического синтеза облика СУДН МКА ДЗЗ**

Проведенный анализ способов решения задач СУДН МКА ДЗЗ показал, что применение стандартных (классических) подходов при решении рассматриваемой задачи недостаточно. Для конфигурирования облика СУДН МКА ДЗЗ в условиях деструктивных воздействий возмущающих факторов среды, был разработан обобщенный алгоритм многокритериального структурно-параметрического синтеза облика СУДН МКА ДЗЗ, схема которого представлена на рис. 4 и включает следующие шаги.

**Шаг 1.** Задание ЛПР, необходимого числа эффективных эталонных вариантов реализации СУДН МКА ДЗЗ, равномерно распределенных в области Парето  $\Delta_{сф}^{nd}$ ; сужение множества допустимых вариантов СУДН МКА ДЗЗ до заданного числа с

использованием метода уступок с учетом ресурсных показателей и показателя структурно-функциональной надежности; вывод результатов многокритериального структурно-параметрического конфигурирования эталонных вариантов облика СУДН МКА ДЗЗ.

**Шаг 2.** Оценивание эталонных вариантов облика по показателю структурно-функциональной живучести СУДН МКА ДЗЗ с помощью имитации случайных отказов ФЭ варианта облика системы и проверка работоспособности СУДН МКА ДЗЗ.

**Шаг 3.** Оценивание структурно-технологической живучести вариантов облика СУДН МКА ДЗЗ с использованием операции дифференцирования нечеткого гиперграфа технологических операций ориентации, построения нечеткого графа технологической независимости ФЭ СУДН и вычисления значений показателя структурно-технологической живучести СУДН МКА ДЗЗ.

**Шаг 4.** Проведение многокритериального ранжирования эталонных вариантов облика СУДН МКА ДЗЗ с использованием значений показателей структурно-функциональной и структурно-технологической живучести, полученных на шаге 2 и шаге 3 соответственно.

**Шаг 5.** Вычисление обобщенных показателей эффективности - коэффициента технического использования, коэффициента сохранения целевой эффективности функционирования вариантов облика СУДН МКА ДЗЗ с помощью аналитико-имитационной модели структурно-функциональной реконфигурации СУДН МКА ДЗЗ.

**Шаг 6.** Выдача предложения по организации структурно-параметрического конфигурирования СУДН МКА ДЗЗ при различных сценариях воздействия возмущающих факторов внешней среды с использованием многокритериального проактивного распределения ограниченных бортовых ресурсов.

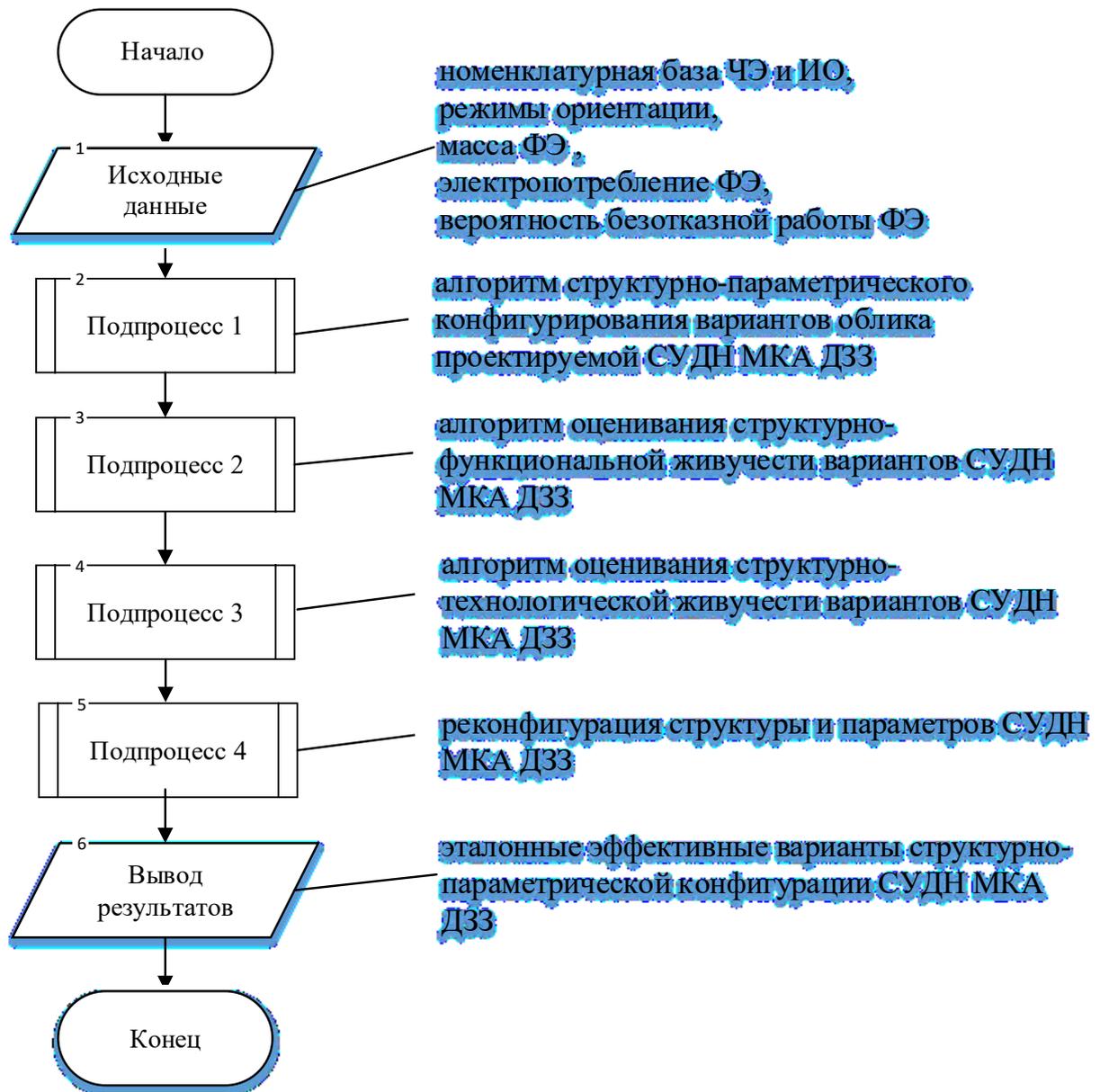


Рис. 4 – Схема алгоритма многокритериального структурно-параметрического синтеза облика СУДН МКА ДЗЗ

## Заключение

Роль и место разработанной методики заключается в согласованном применении разработанных алгоритмов и моделей многокритериального структурно-параметрического синтеза облика СУДН МКА ДЗЗ при различных сценариях деструктивных воздействий.

Повышение степени обоснованности проектных решений по обеспечению живучести функционирования СУДН МКА ДЗЗ в условиях деструктивных воздействий является одним из перспективных направлений в области космического приборостроения. Сегодня на смену традиционным подходам к созданию нового облика борта космического аппарата все чаще используют интеллектуальные системы поддержки проектных решений, которые позволяют в более короткие сроки сформировать облик космических систем с наилучшими тактико-техническими характеристиками. Для создания улучшенной модели борта необходимо, чтобы еще на этапе проектирования в ее создании принимали активное участие все: от системщиков, специалистов по космической баллистике до специалистов связи и передачи данных.

Используя данную методику по организации структурно-параметрического конфигурирования системы управления движением и навигации МКА ДЗЗ при различных сценариях воздействия возмущающих факторов внешней среды с использованием многокритериального проактивного распределения ограниченных бортовых ресурсов, ЛПР сможет существенно снизить количество ошибок при

проектировании и тем самым обоснованно выбирать вариант реализации облика сложного объекта еще на этапе его создания.

### **Список источников**

1. История развития систем управления, радиотехнических систем и наземного автоматизированного комплекса управления отечественной ракетно-космической техники. - М.: Издательский дом «Столичная энциклопедия», 2019. Т. 6. – 600 с.
2. Семкин Н.Д., Телегин А.М., Калаев М.П. Космическое пространство и его влияние на элементы конструкций космических аппаратов. – Самара: СГАУ, 2013. – 46 с.
3. Бородин В.В. Оценка надежности обслуживаемых устройств орбитальной космической станции // Труды МАИ. 2012. № 58. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=33036>
4. Быков А.П., Пиганов М.Н. Прогнозирование показателей качества бортовых радиоэлектронных устройств // Труды МАИ. 2021. № 116. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=121012>. DOI: [10.34759/trd-2021-116-05](https://doi.org/10.34759/trd-2021-116-05)
5. Ушаков И.А Курс Теории надежности систем. – М.: Дрофа, 2008. - 239 с.
6. Васильков Ю.В., Тимошенко А.В., Советов В.А., Кирмель А.С. Методика оценки функциональных характеристик систем радиомониторинга при ограниченных данных о параметрах надежности // Труды МАИ. 2019. № 108. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=109557>. DOI: [10.34759/trd-2019-108-16](https://doi.org/10.34759/trd-2019-108-16)

7. Охтилев М.Ю., Мустафин Н.Г., Миллер В.Е., Соколов Б.В. Концепция проактивного управления сложными объектами: теоретические и технологические основы // Известия вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57. № 11. С. 7–14.
8. Павлов А.Н., Соколов Б.В., Осипенко С.А. и др. Системный анализ организационно-технических систем космического назначения. – СПб.: ВКА имени А.Ф.Можайского, 2018. – 357 с.
9. Кирилин А.Н., Ахметов Р.Н., Шахматов Е.В. и др. Опыт-технологический малый космический аппарат «АИСТ-2Д». - Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2017. – 324 с.
10. Микони С.В. Теория принятия управленческих решений. – СПб.: Лань, 2015. - 448 с.
11. Петровский А.Б., Ройзензон Г.В., Тихонов И.П., Бальшев А.В. Ретроспективный анализ результативности научных проектов // International Journal Information Models and Analyses, 2012, vol. 1, no. 4, pp. 349-356.
12. Podinovski V.V. Decision making under uncertainty with unknown utility function and rank-ordered probabilities // European Journal of Operational Research, 2014, vol. 239, no. 2, pp. 537–541. DOI:[10.1016/j.ejor.2014.05.023](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.05.023)
13. Ларичев О.И. Вербальный анализ решений. - М.: Наука, 2006. - 181 с.
14. Ногин В.Д. Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. - 176 с.
15. Павлов А.Н., Воротягин В.Н., Павлов Д.А., Кулаков А.Ю. Алгоритм проектирования надежности системы управления движением малого космического аппарата // Международная конференция «Моделирование и анализ безопасности и

риска в сложных системах (Санкт-Петербург, 23-25 июня 2020): сборник трудов. – СПб.: ГУАП, 2020. С. 115-121.

16. Павлов А.Н., Воротягин В.Н., Гордеев А.В. Применение аналитико-имитационного моделирования для оценивания структурно-функциональной живучести малого космического аппарата в условиях деструктивных воздействий // Десятая Всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2021) (Санкт-Петербург, 20–22 октября 2021): сборник трудов. – СПб.: АО «ЦТСС», 2021. С. 594-600.

17. Соколов Б.В., Москвин Б.В., Павлов А.Н. и др. Военная системотехника и системный анализ. Модели и методы принятия решений в сложных организационно-технических комплексах в условиях неопределённости и многокритериальности. – СПб.: ВИККУ имени А. Ф. Можайского, 1999. – 496 с.

18. Поленин В.И., Рябинин И.А., Свирин С.К., Гладкова И.А. Применение общего логико-вероятностного метода для анализа технических, военных организационно-функциональных систем и вооруженного противоборства: монография. – СПб.: НИКА, 2011. – 416 с.

19. Павлов А.Н. Соколов Б.В. Нечеткий гиперграфовый подход к исследованию ценности социальных сетей // Информатизация и связь. 2019. № 3. С. 57-62.  
DOI: [10.34219/2078-8320-2019-10-3-57-62](https://doi.org/10.34219/2078-8320-2019-10-3-57-62)

20. Воротягин В.Н. Гончаров А.М., Павлов А.Н. Методология гиперграфового моделирования структурно-технологических возможностей бортовых систем малых

космических аппаратов // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2020. № 673. С. 7-17.

21. Павлов А.Н. Воротягин В.Н., Павлов Д.А. Метод использования нечетких гиперграфов для оценивания структурно-технологической живучести элементов системы управления ориентацией автоматических космических аппаратов // Космическая техника и технологии. 2020. № 3 (30). С. 103-113. DOI: [10.33950/spacetech-2308-7625-2020-3-103-113](https://doi.org/10.33950/spacetech-2308-7625-2020-3-103-113)

22. Павлов А.Н. Кулаков А.Ю., Воротягин В.Н., Умаров А.Б. Исследование структурно-функциональной надёжности малых космических аппаратов при решении задач ориентации // Информатизация и связь. 2020. № 4. С. 156-164.

23. Pavlov A.N., Pavlov D.A., Vorotyagin V.N., Ymarov A.B. Structural and Functional Analysis of Supply Chain Reliability in the Presence of Demand Fluctuations // Models and Methods for Researching Information Systems in Transport Workshop 2020 (MMISR 2020), 2020, vol. 2803, pp. 61-66.

## References

1. *Istoriya razvitiya sistem upravleniya, radiotekhnicheskikh sistem i nazemnogo avtomatizirovannogo kompleksa upravleniya otechestvennoi raketno-kosmicheskoi tekhniki* (The history of the development of control systems, radio engineering systems and ground-based automated control complex of domestic rocket and space technology), Moscow, Izdatel'skii dom «Stolichnaya entsiklopediya», 2019, vol. 6, 600 p.

2. Semkin N.D., Telegin A.M., Kalaev M.P. *Kosmicheskoe prostranstvo i ego vliyanie na elementy konstruksii kosmicheskikh apparatov* (Outer space and its influence on the structural elements of spacecraft), Samara, SGAU, 2013, 46 p.
3. Borodin V.V. *Trudy MAI*, 2012, no. 58. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=33036>
4. Bykov A.P., Piganov M.N. *Trudy MAI*, 2021, no. 116. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=121012>. DOI: [10.34759/trd-2021-116-05](https://doi.org/10.34759/trd-2021-116-05)
5. Ushakov I.A. *Kurs Teorii nadezhnosti sistem* (The course of the Theory of reliability of systems), Moscow, Drofa, 2008, 239 p.
6. Vasil'kov Yu.V., Timoshenko A.V., Sovetov V.A., Kirmel' A.S. *Trudy MAI*, 2019, no. 108. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=109557>. DOI: [10.34759/trd-2019-108-16](https://doi.org/10.34759/trd-2019-108-16)
7. Okhtilev M.Yu., Mustafin N.G., Miller V.E., Sokolov B.V. *Izvestiya vuzov. Priborostroenie*, 2014, vol. 57, no. 11, pp. 7–14.
8. Pavlov A.N., Sokolov B.V., Osipenko S.A. et al. *Sistemnyi analiz organizatsionno-tekhnicheskikh sistem kosmicheskogo naznacheniya* (System analysis of organizational and technical systems for space purposes), Saint Petersburg, VKA imeni A.F.Mozhaiskogo, 2018, 357 p.
9. Kirilin A.N., Akhmetov R.N., Shakhmatov E.V. et al. *Opytno-tekhnologicheskii maliy kosmicheskii apparat «AIST-2D»* (Technological small spacecraft "AIST-2D"), Samara, Izd-vo SamNTs RAN, 2017, 324 p.

10. Mikoni S.V. *Teoriya prinyatiya upravlencheskikh reshenii* (Theory of managerial decision-making), Saint Petersburg, Lan', 2015, 448 p.
11. Petrovskii A.B., Roizenzon G.V., Tikhonov I.P., Balyshev A.V. Retrospektivnyi analiz rezul'tativnosti nauchnykh proektov, *International Journal Information Models and Analyses*, 2012, vol. 1, no. 4, pp. 349-356.
12. Podinovski V.V. Decision making under uncertainty with unknown utility function and rank-ordered probabilities, *European Journal of Operational Research*, 2014, vol. 239, no. 2, pp. 537–541. DOI:[10.1016/j.ejor.2014.05.023](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.05.023)
13. Larichev O.I. *Verbal'nyi analiz reshenii* (Verbal analysis of solutions), Moscow, Nauka, 2006, 181 p.
14. Nogin V.D. *Prinyatie reshenii v mnogokriterial'noi srede: kolichestvennyi podkhod* (Decision-making in a multicriteria environment: a quantitative approach), Moscow, FIZMATLIT, 2005, 176 p.
15. Pavlov A.N., Vorotyagin V.N., Pavlov D.A., Kulakov A.Yu. *Mezhdunarodnaya konferentsiya «Modelirovanie i analiz bezopasnosti i riska v slozhnykh sistemakh»: sbornik trudov*, Saint Petersburg, GUAP, 2020, pp. 115-121.
16. Pavlov A.N., Vorotyagin V.N., Gordeev A.V. *Desyataya Vserossiiskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya po imitatsionnomu modelirovaniyu i ego primeneniyu v nauke i promyshlennosti «Imitatsionnoe modelirovanie. Teoriya i praktika» (IMMOD-2021): sbornik trudov*, Saint Petersburg, AO «TsTSS», 2021, pp. 594-600.
17. Sokolov B.V., Moskvina B.V., Pavlov A.N. et al. *Voennaya sistemotekhnika i sistemnyi analiz. Modeli i metody prinyatiya reshenii v slozhnykh organizatsionno-tekhnicheskikh*

*kompleksakh v usloviyakh neopredelennosti i mnogokriterial'nosti* (Military system engineering and system analysis. Models and methods of decision-making in complex organizational and technical complexes in conditions of uncertainty and multicriteria), Saint Petersburg, VIKKU imeni A. F. Mozhaiskogo, 1999, 496 p.

18. Polenin V.I., Ryabinin I.A., Svirin S.K., Gladkova I.A. *Primenenie obshchego logiko-veroyatnostnogo metoda dlya analiza tekhnicheskikh, voennykh organizatsionno-funktional'nykh sistem i vooruzhennogo protivoborstva: monografiya* (Application of the general logical-probabilistic method for the analysis of technical, military organizational and functional systems and armed confrontation), Saint Petersburg, NIKA, 2011, 416 p.

19. Pavlov A.N. Sokolov B.V. *Informatizatsiya i svyaz'*, 2019, no. 3, pp. 57-62. DOI: [10.34219/2078-8320-2019-10-3-57-62](https://doi.org/10.34219/2078-8320-2019-10-3-57-62)

20. Vorotyagin V.N. Goncharov A.M., Pavlov A.N. *Trudy Voенno-kosmicheskoi akademii imeni A.F. Mozhaiskogo*, 2020, no. 673, pp. 7-17.

21. Pavlov A.N. Vorotyagin V.N., Pavlov D.A. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii*, 2020, no. 3 (30), pp. 103-113. DOI: [10.33950/spacetech-2308-7625-2020-3-103-113](https://doi.org/10.33950/spacetech-2308-7625-2020-3-103-113)

22. Pavlov A.N. Kulakov A.Yu., Vorotyagin V.N., Umarov A.B. *Informatizatsiya i svyaz'*, 2020, no. 4, pp. 156-164.

23. Pavlov A.N., Pavlov D.A., Vorotyagin V.N., Umarov A.B. Structural and Functional Analysis of Supply Chain Reliability in the Presence of Demand Fluctuations, *Models and Methods for Researching Information Systems in Transport Workshop 2020 (MMISR 2020)*, 2020, vol. 2803, pp. 61-66.

Статья поступила в редакцию 02.12.2021; одобрена после рецензирования 27.12.2021; принята к публикации 21.02.2022.

The article was submitted on 02.12.2021; approved after reviewing on 27.12.2021; accepted for publication on 21.02.2022.