

УДК 629.735.33:004.021

DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-6-62-76

К методике управления рисками эксплуатантов беспилотных авиационных систем

В.Д. Шаров¹, В.Л. Кузнецов¹, П.М. Поляков¹

¹*Московский государственный технический университет гражданской авиации,
г. Москва, Россия*

Аннотация: Эксплуатанты беспилотных авиационных систем (БАС), выполняющие авиационные работы, в соответствии с сертификационными требованиями федеральных авиационных правил обязаны иметь систему управления безопасностью полетов, центральным компонентом которой является управление рисками. Непосредственное использование методов оценки рисков и разработки корректирующих мероприятий, применяемых в пилотируемой авиации, затруднительно ввиду эксплуатационных особенностей БАС. В статье представлена методика управления рисками для безопасности полетов БАС категории В (специальной категории), основанная на разработках группы JARUS, созданной при EASA для решения проблем беспилотной авиации. Предлагаемая методика объединяет положения метода SORA, разработанные JARUS и разбросанные в семи документах, в единую логически связанную систему с учетом особенностей воздушного законодательства РФ и принятой в ГА РФ терминологии. Важная задача оценки предполагаемой эффективности мероприятий по управлению рисками в методических разработках JARUS не имеет законченного решения. В статье предлагается восполнить этот пробел с применением обработки экспертных оценок методом анализа иерархий теории нечетких множеств. Это позволяет обоснованно построить иерархию мероприятий по степени их влияния на снижение рисков и разделить их на три группы. Такое деление необходимо для оценки применимости мероприятий в зависимости от величины суммарного риска. Хотя эксплуатация БАС категории В предполагается в сегрегированном воздушном пространстве, методика учитывает не только риски столкновения с объектами на земле, но и риски столкновения с пилотируемыми ВС, поскольку на практике создать «идеальное» сегрегированное пространство обычно не удается. Предлагаемая методика может использоваться в перспективе при разработке методов управления риском эксплуатации БАС категории С в открытом воздушном пространстве.

Ключевые слова: беспилотная авиационная система, риск для безопасности полетов, экспертное оценивание, метод анализа иерархий.

Для цитирования: Шаров В.Д., Кузнецов В.Л., Поляков П.М. К методике управления рисками эксплуатантов беспилотных авиационных систем // Научный Вестник МГТУ ГА. 2022. Т. 25, № 6. С. 62–76. DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-6-62-76

To the risk management methodology of unmanned aircraft systems operators

V.D. Sharov¹, V.L. Kuznetsov¹, P.M. Polyakov¹

¹*Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia*

Abstract: Operators of unmanned aircraft systems (UAS), performing aeronautical work in accordance with the certification requirements of the Federal Aviation Regulations, are obliged to have a Flight Safety Management System (FSMS), the critical element of which is risk management. The utilization of the risk assessment methods and the development of corrective actions, used in manned aviation, is problematic due to the UAS operational characteristics. The article presents the FSMS methodology for UAS of category B (special category) based on the developments of JARUS group, established with EASA, to address the unmanned aviation operation issues. The proposed methodology integrates the SORA method provisions, developed by JARUS, and comprised into seven documents, into the unified logically related system with consideration to the specific traits of the Russian Federation Aviation legislation and the terminology adopted in the Russian Federation civil aviation. The key problem of assessing the expected effectiveness of risk management actions in the JARUS methodological guidelines does not have a complete solution.

The article proposes to solve the problem using professional evaluation by means of the hierarchy analysis method of the fuzzy set theory. This allows us to reasonably build the hierarchy of actions according to their impact on risk mitigation and to classify them into three categories. Such a classification is imperative to evaluate the applicability of actions depending on the amount of total risk. Although the UAS operation of category B is supposed to be performed in the segregated airspace, the methodology takes into consideration not only the risks of collision with objects on the ground but also mid-air collision risks with manned aircraft, since it is usually impractical to create the “ideal” segregated airspace. The proposed methodology can be utilized in the long view when developing risk management practices of UAS operation of category C in open skies.

Key words: unmanned aircraft systems, flight safety risk, professional evaluation, hierarchy analysis method.

For citation: Sharov, V.D., Kuznetsov, V.L. & Polyakov, P.M. (2022). To the risk management methodology of unmanned aircraft systems operators. Civil Aviation High Technologies, vol. 25, no. 6, pp. 62–76. DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-6-62-76

Введение

В данной статье используется принятая в РФ терминология¹: беспилотная авиационная система (БАС) состоит из беспилотного воздушного судна (БВС) и наземного оборудования для управления БВС.

Беспилотная авиация является самым быстрорастущим сегментом отрасли, а эксплуатация БАС обходится в 10 раз дешевле, чем вертолета или самолета [1]. Современные БВС выполняют полеты на значительные расстояния при невозможности их визуального наблюдения. Примерами могут быть полеты для контроля загрязнения окружающей среды выбросами от морских судов [2] или использование БВС для доставки больному критически важных медикаментов в условиях городской среды [3].

Обеспечение безопасности полетов (БП) при эксплуатации БАС является, безусловно, важнейшей задачей. БВС представляют опасность как для людей и объектов на земле, так и для пилотируемых воздушных судов (ПВС). При этом, как отмечено в [4] на основе анализа 152 событий, наибольшие риски при эксплуатации БАС связаны с потерей управления в полете и техническими отказами. По сравнению с ПВС события с БВС случаются чаще на этапах взлета и полета по

маршруту. По данным Росавиации, в 2021 г. отмечено увеличение случаев, когда экипажи ПВС наблюдали БВС в непосредственной близости от себя.

В государственном реестре воздушных судов РФ по состоянию на 01.01.2022 было зарегистрировано 34 БВС с максимальной взлетной массой более 30 кг, на учет было поставлено 42204 БВС с массой 30 кг и менее². Известно, что в РФ работают более 100 организаций и частных компаний, чья деятельность связана с разработкой, производством и эксплуатацией БАС гражданского назначения. Большинство этих организаций должны иметь систему управления безопасностью полетов (СУБП). Разработчики и производители – в соответствии с требованиями ФАП-21³, а эксплуатанты, если они выполняют авиационные работы, – в соответствии с ФАП-494⁴. Центральным компонен-

¹ Воздушный кодекс РФ от 19 марта 1997 г. № 60-ФЗ. Глава V. Воздушные суда. П. 5.6. [Электронный ресурс] // Гарант.ру. Информационно-правовой портал. URL: <https://base.garant.ru/10200300/b3975f01ce8b0eb0c9b11526d9b4c7bf/#friends> (дата обращения: 27.01.2022).

² Анализ состояния безопасности полетов в ГА РФ в 2021 г. [Электронный ресурс] // ФАВТ. Росавиация. 2022. URL: <https://favt.gov.ru/deyatelnost-bezopasnost-poletov-amripp-obnovleniya/> (дата обращения: 27.01.2022).

³ Приказ Министерства транспорта РФ от 17 июня 2019 г. № 184 «Об утверждении Федеральных авиационных правил "Сертификация авиационной техники, организаций разработчиков и изготовителей. Часть 21» [Электронный ресурс] // Гарант.ру. Информационно-правовой портал. URL: <https://base.garant.ru/72701980/> (дата обращения: 27.01.2022).

⁴ Приказ Министерства транспорта РФ от 19 ноября 2020 г. № 494 «Об утверждении Федеральных авиационных правил "Требования к юридическим лицам, индивидуальным предпринимателям, выполняющим авиационные работы, включенные в перечень авиационных работ, предусматривающих получение до-

том СУБП является управление рисками для БП. Для эксплуатантов БАС разрабатываемые методы должны учитывать специфику этого сегмента авиации, непосредственное применение методов, работающих в пилотируемой авиации, затруднительно.

При разработке и внедрении наборов корректирующих и предупреждающих мероприятий всегда возникает задача оценки их сравнительной эффективности, т. е. их ранжирования или построения иерархии. Такая оценка должна выполняться в каждой организации с учетом особенностей эксплуатации и парка БАС, поэтому всегда будет велика роль экспертного оценивания.

Задача обработки результатов такого оценивания может решаться различными методами. Ввиду высокого уровня неопределенности факторов опасности естественным инструментом построения иерархий могут быть приложения теории нечетких множеств.

1. Основные положения методики оценки рисков для БАС

В РФ в соответствии с ГОСТ Р 59517-2021⁵ установлены 3 категории БАС: А, В, С. Наиболее актуальной является разработка метода оценки рисков для категории В, поскольку такие БАС используются уже достаточно широко для выполнения авиационных работ.

Критерии для отнесения БАС к категории В следующие:

кумента, подтверждающего соответствие требованиям федеральных авиационных правил юридического лица, индивидуального предпринимателя. Форма и порядок выдачи документа (сертификата эксплуатанта), подтверждающего соответствие юридического лица, индивидуального предпринимателя требованиям федеральных авиационных правил. Порядок приостановления действия, введения ограничений в действие и аннулирования сертификата эксплуатанта» [Электронный ресурс] // Гарант.ру. Информационно-правовой портал. URL: <https://base.garant.ru/400164758/> (дата обращения: 27.01.2022).

⁵ ГОСТ Р 59517-2021. Беспилотные авиационные системы. Классификация и категоризация. М.: Стандартинформ, 2021. 5 с.

1. Характеристики и конструкция БАС превышает ограничения категории А, т. е.:

- а) масса БВС может быть более 30 кг;
- б) максимальная кинетическая энергия БВС в полете более 100 Дж;
- в) БВС имеет вращающиеся части, способные нанести телесные повреждения;
- г) допускается выполнение авиационных работ;
- д) высота полета не ограничена;
- е) полеты могут выполняться в условиях VLOS, EVLOS и BVLOS⁶;
- ж) полеты могут выполняться вблизи людей и строений.

2. Система автоматического управления в случае потери связи обеспечивает возвращение в точку начала полета или завершение полета.

3. БАС предполагается использовать для выполнения работ в одобренном объеме воздушного пространства в соответствии с Правилами⁷.

4. БАС допускается к полетам при условии подтверждения соответствия требованиям к единичному экземпляру БВС в составе БАС или утвержденному федеральным органом исполнительной власти в области ГА объему требований к летной годности БАС с БВС соответствующего типа в форме сертификата типа.

5. Для доказательства соответствия БАС категории В ожидаемым условиям эксплуатации заявитель может использовать резуль-

⁶ VLOS – Visual Line of Sight – обеспечивается визуальное наблюдение командира воздушного судна (КВС) за БВС в полете.

EVLOS – Extended Visual Line of Sight – поддерживается непрерывная ситуационная осведомленность КВС о воздушном пространстве посредством визуального наблюдения с помощью других людей и/или технических средств.

BVLOS – Beyond Visual Line of Sight – управление БВС без прямого визуального контакта с БВС.

⁷ Постановление Правительства РФ от 22 сентября 1999 г. № 1084 «Об утверждении Федеральных правил использования воздушного пространства Российской Федерации» [Электронный ресурс] // Гарант.ру. Информационно-правовой портал. URL: <https://base.garant.ru/180938/> (дата обращения: 27.01.2022).

таты оценки риска особых ситуаций, возникновение которых возможно во время полета БВС, в соответствии с методами, утвержденными федеральным органом исполнительной власти в области ГА.

Утвержденных методов оценки рисков для БАС категории В в ГА РФ пока нет. Критический анализ некоторых практик, применяемых в США и Великобритании [5], показал их ограниченность. Наиболее проработанным является подход организации *Joint Authorities for Rulemaking of Unmanned Systems* (JARUS), образованной EASA, его и предлагается взять за основу. Эта методика ориентирована на БАС «специальной категории» по международной классификации⁸, которая аналогична категории В по классификации, принятой в РФ.

Результаты JARUS опубликованы в документе «Руководящие принципы по оценке рисков специальной категории» (SORA) [6] и в шести приложениях к нему. Эта разработка применяется в ряде стран, например в Швейцарии и Дании [7], для подтверждения соответствия БАС условиям эксплуатации. Предлагаемая в настоящей статье методика впервые на русском языке объединяет положения семи указанных документов с учетом требований воздушного законодательства РФ. Принятое понимание риска как «сочетания вероятности события и тяжести последствий» соответствует «технократической концепции риска», выраженной в понятии «риск для БП» в Приложении 19 ИКАО.

В настоящее время БВС штатно эксплуатируются в сегрегированном пространстве, но исследования по оценкам риска полетов в несегрегированном пространстве ведутся. Например, в [8] на основе классического вероятностного подхода с учетом длины участков трасс и углов их пересечения предлагается метод расчета предельного числа БВС

на воздушной трассе. Выводы в статье осторожные, окончательного решения задачи нет. Расширению зоны полетов, как отмечено в глубоком анализе вопроса⁹, препятствует отсутствие апробированных технологий, правил, процедур и требований к минимальным характеристикам БАС, недостаток технических решений по линиям С2, по системам предотвращения столкновений, связи, навигации и наблюдения БАС. Тем не менее в РФ в соответствии с Концепцией интеграции БВС уже в 2027 г. планируется начать полеты в несегрегированном воздушном пространстве¹⁰.

В предлагаемой методике также рассматриваются риски, связанные со столкновением БВС с ПВС, поскольку создать «идеальное» сегрегированное пространство в большинстве случаев не удастся и возможно проникновение БВС в «примыкающее воздушное пространство» (рис. 1). Рассматриваются риски столкновения БВС с объектом на земле и с ПВС в воздухе. Риски столкновения между двумя БВС не рассматриваются.

2. Оценка рисков столкновения БАС с объектами на земле и в воздухе

Пошаговая схема процесса управления рисками приведена на рис. 2.

Шаг 1. Описание концепции эксплуатации. Оно должно быть максимально подроб-

⁸ Unmanned aircraft system (UAS) operations in the "open" and "specific" categories [Электронный ресурс] // EASA. 06.02.2018. URL: <https://www.easa.europa.eu/document-library/opinions/opinion-012018> (дата обращения: 27.01.2022).

⁹ Анализ международных и национальных программ, нормативных актов и современных технологических решений, относящихся к интеграции беспилотных авиационных систем в контролируемое и неконтролируемое воздушное пространство, и предложения по их совершенствованию в РФ. Аналитический центр «Аэронет» [Электронный ресурс] // Аэронет. Национальная технологическая инициатива. 01.04.2019. URL: <http://nti-aeronet.ru/blog/2019/04/01/analiz-mezhdunarodnyh-i-nacionalnyh-programm-otnosjashhihsja-k-integracii-bas/> (дата обращения: 27.01.2022).

¹⁰ Концепция интеграции БВС в воздушное пространство РФ. Утверждено Распоряжением Правительства РФ от 05.10.2021 № 28.06-р [Электронный ресурс] // Правительство России. 11.10.2021. 21 с. URL: <http://government.ru/docs/43502/> (дата обращения: 27.01.2022).

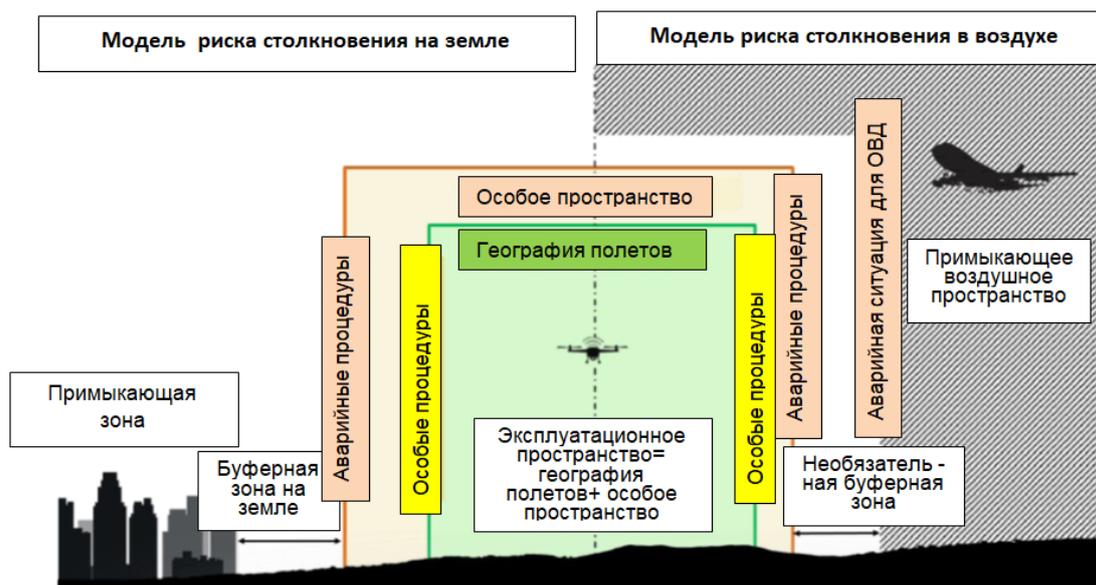


Рис. 1. Графическое представление семантической модели методики
Fig. 1. Diagram representation of the semantic model of methodology

Таблица 1
Table 1

Определение классов наземного риска (GRC)
Ground Risk Classification (GRC)

Класс внутреннего наземного риска БВС				
Максимальный характеристический размер БВС	1 м	3 м	8 м	> 8 м
Ожидаемая кинетическая энергия	< 700 Дж	< 34 КДж	< 1084 КДж	> 1084 КДж
Условия эксплуатации				
VLOS/BVLOS в контролируемой зоне	1	2	3	4
VLOS в малонаселенной среде	2	3	4	5
BVLOS в малонаселенной среде	3	4	5	6
VLOS в густонаселенной среде	4	5	6	8
BVLOS в густонаселенной среде	5	6	8	10
VLOS над скоплением людей	7			
BVLOS над скоплением людей	8			

ным и включать соответствующую техническую, операционную и системную информацию, необходимую для оценки риска.

Оценка риска столкновения с объектом на земле

Шаг 2. Определение класса наземного риска (*Ground Risk Classification – GRC*). Основные положения:

а) наземный риск БАС относится к риску поражения человека;

б) для определения GRC необходимо знать максимальный размер БВС (размах крыла, диаметр лопасти и т. д.) и сценарий эксплуатации;

в) заявитель определяет зону риска, включая весь оперативный объем, как показано на рис. 1. Конкретное значение GRC определяется по табл. 1.

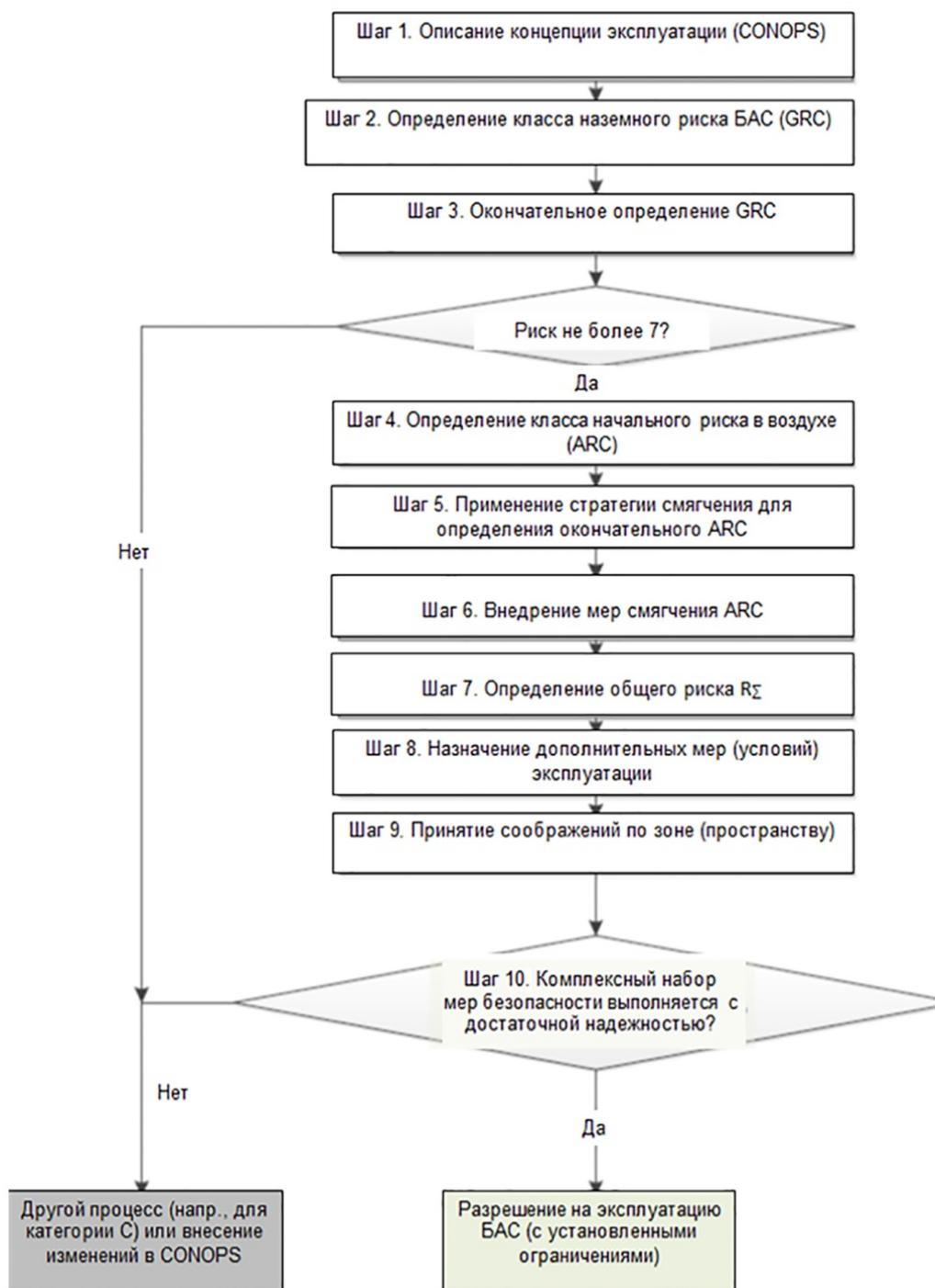


Рис. 2. Общая схема управления риском
Fig. 2. The general diagram of risk management

Если сочетания условий попадают в темную зону табл. 1, то такие операции не подерживаются данной методикой.

Шаг 3. Полученная по табл. 1 балльная оценка риска может быть снижена с помощью демпфирующих риск мероприятий. При этом

необходимо иметь оценку эффективности мероприятий, отнеся каждое из них к одной из групп эффективности: «низкая», «средняя» или «высокая». Поправка в GRC может достигать -4 , и, если итоговая оценка превышает 7, считается, что риски неприемлемы.

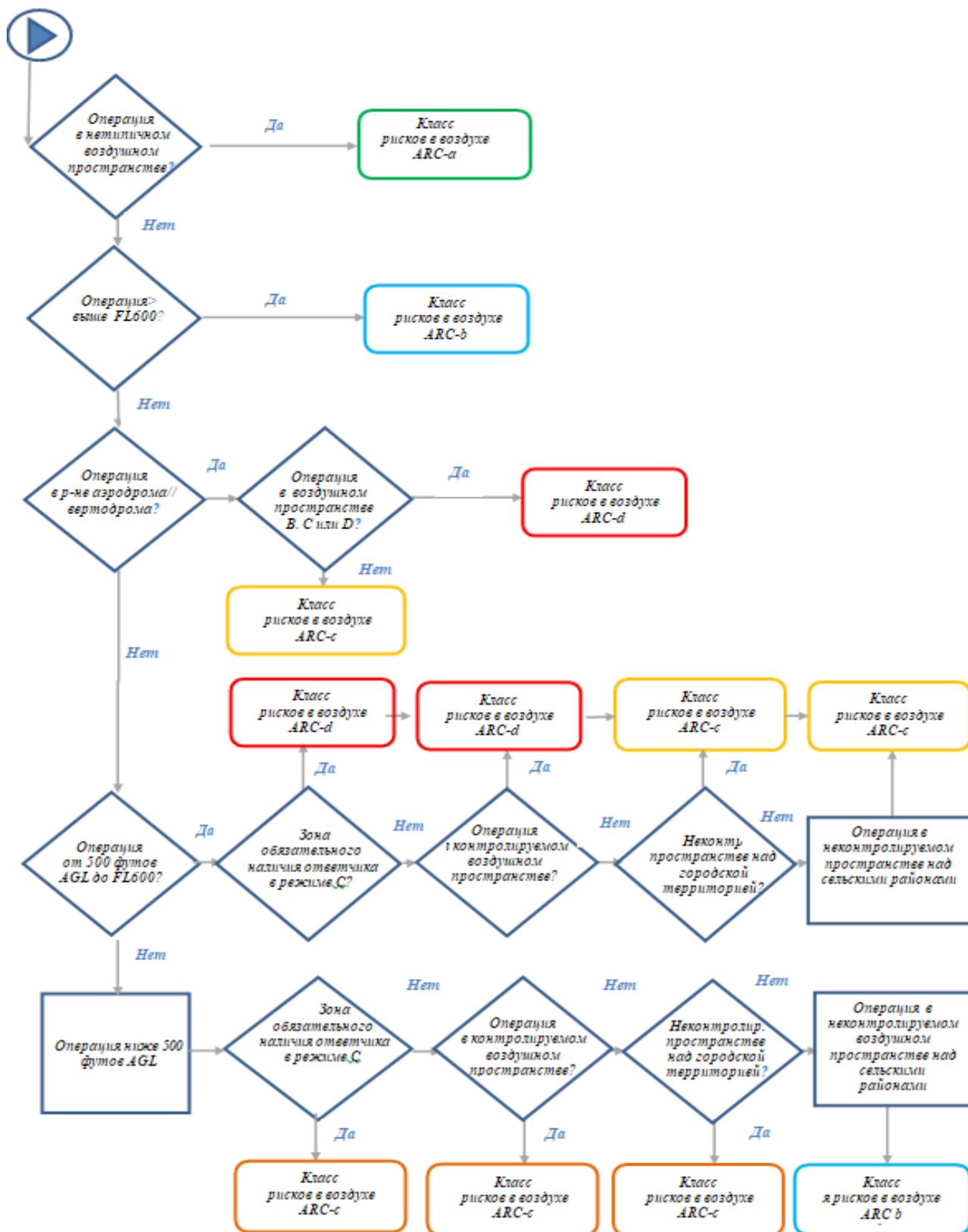


Рис. 3. Дерево решений для определения класса риска столкновения в воздухе ARC
Fig. 3. The decision tree for determining Air Collision Risk Class ARC

Таблицы 2
Table 2

Определение общего риска эксплуатации R_{Σ}
Determination of the general operation risk R_{Σ}

R_{Σ}				
GRC	ARC			
	a	b	c	d
≤ 2	I	II	IV	VI
3	II	II	IV	VI
4	III	III	IV	VI
5	IV	IV	IV	VI
6	V	V	V	VI
7	VI	VI	VI	VI
> 7	Условия эксплуатации соответствуют БАС категории С			

Оценка риска столкновения в воздухе

Шаг 4. Определение начального класса риска в воздухе (*Air Risk Classification – ARC*).

Начальный ARC подразделяется на 4 класса: a, b, c, d. Класс определяется по дереву решений (рис. 3). Отметим, что указанные на схеме классы воздушного пространства соответствуют классификации из Приложения 11 ИКАО¹¹ и классы В и D не применяются в РФ, однако это никак не влияет на оценку ARC по дереву решений.

Класс риска может быть снижен с помощью стратегических и тактических мер управления.

Шаг 5. Стратегические меры предполагают планирование полетов с учетом ограничений по зоне и времени так, чтобы минимизировать нахождение БВС в районе полетов пилотируемых ВС.

Шаг 6. Тактические меры принимают форму систем обнаружения и предотвращения, таких как ADS-B, FLARM, или оперативных процедур. В зависимости от остаточного риска требования к тактическим мерам могут варьироваться. Также оператор должен

сотрудничать с соответствующим органом ОВД и должен уделять внимание функциям, которые могут повысить заметность БВС в воздухе, в том числе радиолокационную.

Подробное описание шагов 5 и 6 выходит за рамки формата статьи.

Шаг 7. Определение общего риска эксплуатации БАС. После определения окончательного GRC и остаточного ARC имеем общий риск R_{Σ} (табл. 2).

Шаг 8. Определение мероприятий и условий снижения рисков.

На данном шаге необходимо предложить дополнительные мероприятия и возможность их использования в зависимости от эффективности мероприятия и значения R_{Σ} . Установлены 3 уровня эффективности: L – низкая, M – средняя, H – высокая. Например, как показано в табл. 3, мероприятие 1 может использоваться для снижения риска при R_{Σ} уровня I или II даже при малой эффективности (L), для R_{Σ} уровня III или IV – только если его эффективность не ниже средней (M), а для R_{Σ} уровня V или VI – только если его эффективность высокая (H).

Для других возможных мероприятий требования будут другими.

Таким образом, на шаге 8 (как и на шаге 3) организация должна иметь методику оценки эффективности мероприятий приме-

¹¹ Обслуживание воздушного движения. Приложение 11 к Конвенции о международной ГА. 14-е изд. // ИКАО, 2016. 144 с.

Таблица 3
Table 3

Пример формирования требований к эффективности мероприятий
Pattern of requirements formation for effectiveness of actions

№	Мероприятие (условие) снижения риска	R _Σ					
		I	II	III	IV	V	VI
		Требование к эффективности мероприятия					
1	Удаленный экипаж обучен определять критические условия окружающей среды и избегать их	L	L	M	M	M	H
2	Существуют процедуры для устранения износа внешних систем, поддерживающих работу БАС	L	M	H	H	H	H

Таблица 4
Table 4

Определение уровня эффективности мероприятий
Level determination of actions effectiveness

Влияние \ Надежность	Надежность		
	Низкая надежность	Средняя надежность	Высокая надежность
Малое снижение риска	Низкая эффективность	Низкая эффективность	Низкая эффективность
Существенное снижение риска	Низкая эффективность	Средняя эффективность	Средняя эффективность
Значительное снижение риска	Низкая эффективность	Средняя эффективность	Высокая эффективность

нительно к своим условиям. JARUS предлагает устанавливать уровень эффективности мероприятия как сочетание двух оценок (табл. 4).

1. Оценка уровня влияния мероприятия на снижение риска («влияние»). Установлены три уровня влияния – малое, существенное и значительное.

2. Оценка уровня уверенности в том, что мероприятие будет внедрено («надежность»). Установлены три уровня надежности – низкая, средняя и высокая. Низкая надежность – заявлено, что снижение риска будет достигнуто, средняя – имеются доказательства (расчеты, тестирование), высокая – если сниже-

ние риска признано компетентной третьей стороной.

При этом JARUS не дает каких-либо указаний, как оценивается характеристика «влияние». Поэтому представляется целесообразным разработать дополнительную научно обоснованную методику ранжирования мероприятий по этой характеристике с использованием аппарата теории нечетких множеств.

Шаг 9 представляет собой составление описания особенностей зоны полетов без каких-либо конкретных оценок, а действия на **шаге 10** очевидны из схемы рис. 2 и не требуют дополнительных пояснений.

Таблица 5
Table 5

Мероприятия по управлению рисками БАС
UAS Risk Management Actions

№	Мероприятия
1	Поддержание буферной зоны – ширина зоны не менее высоты полета
2	Ограничения по району полета (при полетах БВС в районе аэродрома выделение для полета БВС специального коридора)
3	Ограничения по времени полета (планирование полетов БВС в районе аэродрома в период, когда пилотируемые ВС практически не летают)
4	Учет количества людей, подверженных риску в районе работ
5	При операции VLOS постоянное наблюдение КВС за обстановкой самостоятельно и своевременное принятие мер
6	При операции EVLOS постоянное наблюдение КВС за обстановкой самостоятельно и с помощью наблюдателя и своевременное принятие мер
7	Предусмотреть конструктивные доработки БВС, чтобы при падении на человека уменьшить риск (смерть человека не наступит)
8	Обязательное наличие у всех БВС системы DAA (обнаружение пилотируемого ВС, принятие решения, передача команды на БВС, ее выполнение, обратная связь)
9	Удаленный экипаж обучен контролировать нештатную ситуацию
10	БВС адаптировано к неблагоприятным условиям внешней среды (ветер, осадки, обледенение, птицы)
11	Обеспечено безопасное восстановление БВС после технической проблемы или деградации линии С2 (резервирование, дублирование линии связи, системы экстренной посадки, парашют и т. д.)

3. Ранжирование мероприятий по их значимости с использованием метода анализа иерархий

Для иллюстрации методики составлен перечень типовых мероприятий по снижению риска для БП при эксплуатации БАС (табл. 5).

При определении уровня эффективности мероприятий по снижению риска инцидентов с участием БАС (табл. 5) все мероприятия были условно распределены на три группы по уровню их влияния: низкая, средняя и высокая. Однако конкретных указаний на то, какое мероприятие следует причислить к каждой конкретной группе, не дается. Вместе с тем для определения их эффективности эта информация, безусловно, необходима. Восстановление подобной иерархии возможно лишь с привлечением мнений экспертов. По-

следнее означает, что для решения этой задачи необходимо воспользоваться теорией нечетких множеств.

В качестве экспертов в данной работе выступили специалисты дирекции по СУБП АО «Кронштадт» – крупной российской организации, занимающейся разработкой, производством и эксплуатацией БАС.

Однако прямые экспертные оценки страдают излишним субъективизмом. Для уменьшения этого негативного аспекта обычно используют косвенные методы определения функции принадлежности (в нашем случае – для мероприятия) к числу мер, предотвращающих возможность инцидента. Обычно для этой цели используется метод анализа иерархий (МАИ), предложенный Т. Саати [9].

В основе МАИ лежит обработка матрицы, полученной методом парных сравнений, когда эксперт попарно сравнивает значимость

различных методов и результаты записывает в виде матрицы $M = \|a_{ij}\|$, где a_{ij} – оценка экспертом отношения двух функций принадлежности μ_i/μ_j , в нашем случае – значимостей i -го и j -го мероприятий. В случае когда эксперт не допустил искажений при описании всех парных сравнений (гипотетический вариант – идеальное согласование матрицы), искомым вектор принадлежности $\mu = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n)^T$ может быть найден как собственный вектор матрицы M , соответствующий максимальному собственному значению.

Т. Саати предложил использовать этот факт и при обработке реальных матриц парных сравнений, содержащих как некоторый субъективизм эксперта, так и погрешности, связанные с «квантованием» результатов сравнений (целочисленные оценки в таблице фундаментальной шкалы [10]). При этом в качестве коэффициента в уравнении должно использоваться максимальное собственное значение λ_{max} :

$$M\mu = \lambda_{max} \mu. \quad (1)$$

Построенная экспертом матрица парных сравнений должна удовлетворять ряду свойств [11–13], одно из которых, а именно, свойство совместности, обычно нарушается:

$$a_{ij} a_{jk} = \frac{\mu_i}{\mu_j} \frac{\mu_j}{\mu_k} = \frac{\mu_i}{\mu_k} = a_{ik}. \quad (2)$$

В работе [14] для устранения этого дефекта предложена следующая модификация МАИ. Среди всех парных сравнений a_{ij} можно выделить $(n - 1)$ элементов, на основе которых можно восстановить все остальные элементы матрицы M . В качестве примера автор рассматривает задание первой строки матрицы, когда эксперт по очереди сравнивает первый объект сначала со вторым, затем с третьим, затем с четвертым и т. д., до n -го включительно. То есть эксперт определяет все элементы множества $\{a_{1k}\}, k = \overline{2, n}$. Далее, используя свойства обратной симметрии мат-

рицы ($a_{ij} = \mu_i/\mu_j = (\mu_j/\mu_i)^{-1} = a_{ji}^{-1}$) и желаемое свойство совместности (2), можно вычислить любой недостающий элемент матрицы по формуле

$$a_{ij} = a_{i1} a_{1j} = a_{1j}/a_{1i}. \quad (3)$$

Построенная таким образом матрица абсолютно совместна.

Набор элементов, определяемых экспертом при таком подходе, следуя [14], назовем базисным. Очевидно, что базисный набор не единственный, но и не любая комбинация из $(n - 1)$ элементов матрицы M дает базисный набор. Так, например, для матрицы четвертого порядка их всего 16.

Здесь надо, однако, отметить следующее обстоятельство. Каждому базисному набору, в силу гипотезы о несовместности исходной матрицы парных сравнений, будет соответствовать своя, вообще говоря, не совпадающая с M матрица M_k и, соответственно, свой собственный вектор $\mu^k = (\mu_1^k, \mu_2^k, \dots, \mu_n^k)^T$. Это приводит к неоднозначности решения, усилению роли субъективизма в оценках эксперта: неясно, в каком из базисных наборов и сколько раз экспертом была допущена необъективность.

Естественным при этом видится представление ответа в виде среднего по всему ансамблю базисных наборов $\mu_{cp} = (1/N) \sum_k \mu^k$. Здесь N – число различных базисных наборов.

Наша гипотеза заключается в том, что собственный вектор для исходной, вообще говоря, несовместной матрицы парных сравнений следует трактовать как описанное выше среднее.

При ранжировании мероприятий будем полагать, что вся их совокупность представляет достаточный набор средств для предотвращения инцидентов с участием БАС. Поэтому далее будем полагать, что $\sum_i \mu_i = 1$.

Матрица парных сравнений, представленная коллективным экспертом АО «Кронштадт», имеет следующий вид:

$$M = \begin{pmatrix} 1 & 1/7 & 1/7 & 1/5 & 1/3 & 1/5 & 3 & 3 & 1/7 & 1 & 1/5 \\ 7 & 1 & 3 & 3 & 1 & 1 & 5 & 9 & 1 & 3 & 1 \\ 7 & 1/3 & 1 & 3 & 1/3 & 1/3 & 5 & 9 & 1/3 & 3 & 1 \\ 5 & 1/3 & 1/3 & 1 & 1 & 1 & 3 & 7 & 1 & 5 & 1/3 \\ 3 & 1 & 3 & 1 & 1 & 1 & 5 & 5 & 1 & 1 & 3 \\ 5 & 1 & 3 & 1 & 1 & 1 & 5 & 7 & 1 & 1 & 1 \\ 1/3 & 1/5 & 1/5 & 1/3 & 1/5 & 1/5 & 1 & 5 & 1/5 & 1/3 & 1/5 \\ 1/3 & 1/9 & 1/9 & 1/7 & 1/5 & 1/7 & 1/5 & 1 & 1/7 & 1/3 & 1/7 \\ 7 & 1 & 3 & 1 & 1 & 1 & 5 & 7 & 1 & 7 & 1 \\ 1 & 1/3 & 1/3 & 1/5 & 1 & 1 & 3 & 3 & 1/7 & 1 & 1/5 \\ 5 & 1 & 1 & 3 & 1 & 1 & 5 & 7 & 1 & 5 & 1 \end{pmatrix}$$

Решая задачу на собственные значения, собственные векторы для представленной матрицы, находим:

- максимальное собственное значение – $\lambda_{max} = 13,1271$;

- компоненты соответствующего вектора – $(0,0446, 0,0457, 0,2576, 0,0097, 0,0311, 0,1024, 0,0276, 0,1435, 0,1201, 0,0663, 0,1514)^T$.

В табл. 6 представлены результаты ранжирования мероприятий по их значимости на основе экспертных оценок.

Таблица 6
Table 6

Ранжирования мероприятий по их значимости на основе экспертных оценок
Ranking of actions by their significancy based on professional evaluation

Влияние	Мероприятия снижения риска	Важность мероприятия
Малое снижение риска	Учет количества людей, подверженных риску в районе работ	0,0097
	Предусмотреть конструктивные доработки БВС, чтобы при падении на человека уменьшить риск (смерть человека не наступит)	0,0276
	При операции VLOS постоянное наблюдение КВС за обстановкой самостоятельно и своевременное принятие мер	0,0311
Существенное снижение риска	Поддержание буферной зоны – ширина зоны не менее высоты полета	0,0446
	Ограничения по району полета (при полетах БВС в районе аэродрома выделение для полета БВС специального коридора)	0,0457
	БВС адаптировано к неблагоприятным условиям внешней среды (ветер, осадки, обледенение, птицы)	0,0663
Значительное снижение риска	При операции EVLOS постоянное наблюдение КВС за обстановкой самостоятельно и с помощью наблюдателя и своевременное принятие мер	0,1024
	Удаленный экипаж обучен контролировать нештатную ситуацию	0,1201
	Обязательное наличие у всех БВС системы DAA (обнаружение пилотируемого ВС, принятие решения, передача команды на БВС, ее выполнение, обратная связь)	0,1435
	Обеспечено безопасное восстановление БВС после технической проблемы или деградации линии С2 (резервирование, дублирование линии связи, системы экстренной посадки, парашют и т. д.)	0,1514
	Ограничения по времени полета (планирование полетов БВС в районе аэродрома в период, когда пилотируемые ВС практически не летают)	0,2576

Полученные оценки позволяют более обоснованно оценить эффективность мероприятий (табл. 4) и принимать решения об их внедрении при выполнении шагов 3 и 8 методики.

Заключение

Представлена в компактной форме методика оценки риска для безопасности полетов БАС категории В (специальной категории), основанная на разработках SORA группы JARUS. При этом предлагаемая методика адаптирована к условиям эксплуатации БАС в РФ и дополнена методом ранжирования мероприятий по степени влияния на снижение риска, что позволило конкретизировать некоторые элементы методики.

Очевидно, что оценки эффективности и ранжирование мероприятий с использованием аппарата теории нечетких множеств должны выполняться в каждой отдельной организации – операторе БАС экспертами этой организации с учетом отличий в парке БВС, концепции эксплуатации и районах полетов.

Методика может применяться для доказательства соответствия БАС категории В ожидаемым условиям эксплуатации, что предполагает ГОСТ Р 59517-2021.

Хотя методика предназначена прежде всего для эксплуатантов БАС, выполняющих полеты в сегрегированном воздушном пространстве, она предусматривает и оценки рисков столкновения с пилотируемыми ВС. Соответственно, предлагаемый подход к управлению риском может использоваться в ходе проводимых в настоящее время работ по формированию требований к БАС, полеты которых предполагаются в открытом воздушном пространстве с учетом задач, поставленных Правительством РФ в Концепции интеграции беспилотных воздушных судов в воздушное пространство Российской Федерации.

Авторы статьи выражают глубокую признательность специалистам АО «Кронштадт» за предоставление реальных экспертных оценок, которые были использованы в работе.

Список литературы

1. **Просвирина Н.В.** Анализ и перспективы развития беспилотных летательных аппаратов // Московский экономический журнал. 2021. № 10. С. 560–575. DOI: 10.24412/2413-046X-2021-10619
2. **Xia J., Wang K., Wang S.** Drone scheduling to monitor vessels in emission control areas // Transportation Research Part B: Methodological. 2019. Vol. 119. Pp. 174–196. DOI: 10.1016/j.trb.2018.10.011
3. **Bhosale S.** Air Ambulance Drone (UAV) / S. Bhosale, S. Shelar, V. Anadkar, S. Pawar, S. Sarange // International Research Journal of Engineering and Technology. 2019. No. 6. Pp. 152–154.
4. **Wild G., Murray J., Baxter G.** Exploring civil drone accidents and incidents to help prevent potential air disasters [Электронный ресурс] // Aerospace. 2016. Vol. 3, iss. 3. 22 p. DOI: 10.3390/aerospace3030022 (дата обращения: 27.01.2022).
5. **Шаров В.Д., Елисеев Б.П., Поляков П.М.** Об управлении безопасностью полетов при эксплуатации беспилотных авиационных систем // Научный Вестник МГТУ ГА. 2021. Т. 24, № 3. С. 42–56. DOI: 10.26467/2079-0619-2021-24-3-42-56
6. **Murzilli L.** JARUS guidelines on specific operations risk assessment [Электронный ресурс] // JARUS. 26.06.2017. URL: http://jarus-rpas.org/sites/jarus-rpas.org/files/jar_doc_06_jarus_sora_v1.0.pdf (дата обращения: 27.01.2022).
7. **Terkildsen K.H., Jensen K.** Towards a tool for assessing UAS compliance with the JARUS SORA guidelines // 2019 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 11–14 June 2019. USA: Atlanta, GA, 2019. Pp. 460–466. DOI: 10.1109/ICUAS.2019.8798236
8. **Perez-Casten J.A.** RPAS conflict-risk assessment in non-segregated airspace / J.A. Pérez-Castána, F.G. Comendadora, A. Rodríguez-SanzaI, I.A. Cabreraa, J. Torrecilla // Safety Science. 2019. Vol. 111. Pp. 7–16. DOI: 10.1016/j.ssci.2018.08.018

9. Саати Т.Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Пер. с англ. Р.Г. Вацнадзе. М.: Радио и связь, 1993. 278 с.

10. Саати Т.Л. Об измерении неосязаемого. Подход к относительным измерениям на основе главного собственного вектора матрицы парных сравнений [Электронный ресурс] // Cloud of Science. 2015. Т. 2, № 1. С. 5–39. URL: http://tw.t.mpei.ac.ru/ochkov/CoS_2_1.pdf (дата обращения: 27.01.2022).

11. Богаченко Н.Ф., Лавров Д.Н. Об особенностях реализации интервального метода анализа иерархий в задаче оценки эффективности работы службы занятости // Математические структуры и моделирование. 2020. № 4 (56). С. 41–48. DOI: 10.24147/2222-8772.2020.4.41-48

12. Коробов В.Б., Тутьгин А.Г. Проблемы использования метода анализа иерархий и пути их решения // Экономика и управление. 2016. № 8 (130). С. 60–65.

13. Воскобинский М.Ю., Пекарская О.А., Рази Д.А. Принятие решений на основе метода анализа иерархий // Экономика и управление народным хозяйством. 2016. № 2. С. 33–42.

14. Ногин В.Д. Упрощенный вариант метода анализа иерархий на основе нелинейной свертки критериев // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2004. Т. 44, № 7. С. 1261–1270.

References

1. Prosvirina, N.V. (2021). *Analysis and prospects for the development of unmanned aircraft*. Moskovskiy ekonomicheskij jurnal, no. 10, pp. 560–575. DOI: 10.24412/2413-046X-2021-10619 (in Russian)

2. Xia, J., Wang, K. & Wang, S. (2019). *Drone scheduling to monitor vessels in emission control areas*. Transportation Research Part B: Methodological, vol. 119, pp. 174–196. DOI: 10.1016/j.trb.2018.10.011

3. Bhosale, S., Shelar, S., Anadkar, V., Pawar, S. & Sarange, S. (2019). *Air Ambulance Drone (UAV)*. International Research Journal of Engineering and Technology, no. 6, pp. 152–154.

4. Wild, G., Murray, J. & Baxter, G. (2016). *Exploring civil drone accidents and incidents to help prevent potential air disasters*. Aerospace, vol. 3, issue 3, 22 p. DOI: HYPERLINK "<http://dx.doi.org/10.3390/aerospace3030022>"10.3390/aerospace3030022 (accessed: 27.01.2022).

5. Sharov, V.D., Eliseev, B.P. & Polyakov, P.M. (2021). *About flight safety management during operation of unmanned aircraft systems*. Civil Aviation High Technologies, vol. 24, no. 3, pp. 42–56. DOI: 10.26467/2079-0619-2021-24-3-42-56 (in Russian)

6. Murzilli, L. (2017). *JARUS guidelines on specific operations risk assessment*. JARUS. 26.06.2017. Available at: http://jarusrpas.org/sites/jarus-rpas.org/files/jar_doc_06_jarus_sora_v1.0.pdf (accessed: 27.01.2022).

7. Terkildsen, K.H. & Jensen, K. (2019). *Towards a tool for assessing UAS compliance with the JARUS SORA guidelines*. 2019 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). Atlanta, GA, USA, pp. 460–466. DOI: 10.1109/ICUAS.2019.8798236

8. Pérez-Castána, J.A., Comendadora, F.G., Rodríguez-Sanzal, A., Cabreara, I.A. & Torrecilla, J. (2019). *RPAS conflict-risk assessment in non-segregated airspace*. Safety Science, vol. 111, pp. 7–16. DOI: 10.1016/j.ssci.2018.08.018

9. Saati, T.L. (1993). [*Decision-making. Method of hierarchy analysis*]. Translated from English by R.G. Vachnadze. Moscow: Radio i svyaz, 278 p. (in Russian)

10. Saati, T.L. (2015). *On the measurement of intangibles. A principal eigenvector approach to relative measurement derived from paired comparisons*. Cloud of Science, vol. 2, no. 1, pp. 5–39. Available at: http://tw.t.mpei.ac.ru/ochkov/CoS_2_1.pdf (accessed: 27.01.2022). (in Russian)

11. Bogachenko, N.F. & Lavrov, D.N. (2020). *On the features of the implementation of the interval method for analytic hierarchy process in the problem of assessing the effectiveness of the employment service*. Mathematical Structures and Modeling, no. 4 (56), pp. 41–48. DOI: 10.24147/2222-8772.2020.4.41-48 (in Russian)

12. **Korobov, V.B. & Tutygin, A.G.** (2016). *Problems of the analytic hierarchy process and some solutions*. Economics and management, no. 8 (130), pp. 60–65. (in Russian)

13. **Voskobinsky, M.Yu., Pekarskaya, O.A. & Razi, D.A.** (2016). [*Decision making based on the hierarchy analysis method*].

Ekonomika i upravleniye narodnym khozyaystvom, no. 2, pp. 33–42. (in Russian)

14. **Nogin, V.D.** (2004). [*A simplified version of the hierarchy analysis method based on nonlinear criteria convolution*]. Zhurnal Vychislitelnoi Matematiki i Matematicheskoi Fiziki, vol. 44, no. 7, pp. 1261–1279. (in Russian)

Сведения об авторах

Шаров Валерий Дмитриевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры безопасности полетов и жизнедеятельности МГТУ ГА, v.sharov@mstuca.aero.

Кузнецов Валерий Леонидович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной математики МГТУ ГА, v.kuznetsov@mstuca.aero.

Поляков Павел Михайлович, старший преподаватель кафедры безопасности полетов и жизнедеятельности МГТУ ГА, p.polyakov@mstuca.aero.

Information about the authors

Valeriy D. Sharov, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Life and Flight Safety Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, v.sharov@mstuca.aero.

Valeriy L. Kuznetsov, Doctor of Technical Sciences, Professor, The Head of the Applied Mathematics Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, v.kuznetsov@mstuca.aero.

Pavel M. Polyakov, Senior Lecturer, The Life and Flight Safety Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, p.polyakov@mstuca.aero.

Поступила в редакцию 14.07.2022
Принята в печать 24.11.2022

Received 14.07.2022
Accepted for publication 24.11.2022