

УДК 347.823.1 + 528.94

DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-1-39-52

Рискориентированное геоинформационное моделирование воздушного пространства для построения оптимальных маршрутов перемещения беспилотных воздушных судов гражданской авиации

С.Е. Максимова^{1,2}

¹*Российский университет транспорта, г. Москва, Россия*

²*АО «НИИАС», г. Москва, Россия*

Аннотация: В настоящее время актуальна необходимость создания качественного инструмента автоматизированной оценки рисков применения беспилотных воздушных судов (БВС). В беспилотной гражданской авиации не сформирован универсальный подход к управлению рисками, оценка рисков эксплуатанта в значительной степени имеет индивидуальный характер. На данный момент не разработан инструмент построения оптимальных маршрутов полетов БВС в воздушном пространстве, который позволял бы избегать пилотирования на участках с неприемлемым риском. В статье предложено применение полнофункциональных геоинформационных систем (ГИС) для оценки рисков выполнения полетного задания. Для качественной оценки рисков конкретного полетного задания предложено учитывать ситуационную составляющую в соответствующем сегменте воздушного пространства и наземной (надводной) обстановки. В статье систематизированы основные группы факторов, значимые для оценки рисков применения БВС. Полеты БВС подвергаются воздействию факторов внешней среды, при этом представляют опасность для окружающих объектов. Выведена формула анализа пространственно-временного распределения значений риска в воздушном пространстве. Предложен минимальный размер ячейки моделирования. Обоснован универсальный подход к оценке рисков выполнения полета БВС различными эксплуатантами, дана методика пространственно-временного анализа распределения значений риска на основе применения ГИС. Результаты анализа пространственно-временной информации в ГИС-среде позволяют выполнить зонирование воздушного пространства по степени приемлемости полета и построить оптимальный маршрут за пределами участков с повышенным риском авиационного инцидента или происшествия. Разработанная пространственно-временная рискориентированная модель может быть использована для поддержки принятия управленческих решений в части построения оптимальных маршрутов перемещения БВС.

Ключевые слова: беспилотное воздушное судно, геоинформационное моделирование, оценка рисков, геоинформационные системы, безопасность полетов, пространственно-временная рискориентированная модель.

Для цитирования: Максимова С.Е. Рискориентированное геоинформационное моделирование воздушного пространства для построения оптимальных маршрутов перемещения беспилотных воздушных судов гражданской авиации // Научный вестник МГТУ ГА. 2025. Т. 28, № 1. С. 39–52. DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-1-39-52

Risk-oriented geoinformation airspace modeling for calculating civil aviation unmanned aerial vehicles optimal routes

S.E. Maksimova^{1,2}

¹*Russian University of Transport (RUT), Moscow, Russia*

²*JSC NIIS, Moscow, Russia*

Abstract: Currently, there is an urgent need to create a high-quality automated risk assessment tool for the use of (unmanned aircraft) UAVs. There is no universal approach to risk management in unmanned civil aviation, and the risk assessment of the operator is largely individual. At the moment, no tool has been developed for plotting optimal routes for UAV flights in airspace, which would avoid piloting in areas with unacceptable risk. The article suggests the use of fully functional geographic information systems (GIS) to assess the risks of performing a flight mission. For a qualitative assessment of the risks of a

particular flight assignment, it is proposed to take into account the situational component in the relevant segment of airspace and the ground (surface) situation. The article systematizes the main groups of factors that are important for assessing the risks of using BV. UAV flights are exposed to environmental factors, while posing a danger to surrounding objects. A formula for analyzing the spatial and temporal distribution of risk values in the airspace is derived. The minimum size of the simulation cell is proposed. A universal approach to assessing the risks of a UAV flight by various operators is substantiated, and a methodology for spatiotemporal analysis of the distribution of risk values based on the use of GIS is given. The results of the analysis of spatial and temporal information in the GIS environment make it possible to zone the airspace according to the degree of flight acceptability and build the optimal route outside areas with an increased risk of an aviation incident or accident. The developed spatio-temporal risk-oriented model can be used to support management decision-making in terms of building optimal routes for the movement of UAVs.

Key words: unmanned aerial vehicle, geoinformation modeling, risk assessment, geoinformation systems, flight safety, spatio-temporal risk-oriented model.

For citation: Maksimova, S.E. (2025). Risk-oriented geoinformation airspace modeling for calculating civil aviation unmanned aerial vehicles optimal routes. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 28, no. 1, pp. 39–52. DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-1-39-52

Введение

На сегодняшний день в российской и мировой практике накоплен значительный опыт решения различных задач с применением беспилотных авиационных систем (БАС). Актуальность внедрения и использования БАС подтверждается существующими научными публикациями [1]. Современные тенденции развития и совершенствования беспилотной авиационной техники тесно связаны с процессами структурной перестройки различных сфер экономики [2]. Деятельность компаний-эксплуатантов, применяющих беспилотные воздушные суда (БВС) для выполнения авиационных работ и коммерческих воздушных перевозок, подлежит обязательной сертификации. Сертификации подлежат также эксплуатанты гражданской авиации общего назначения, кроме тех, которые используют легкие либо сверхлегкие гражданские воздушные суда. Исключение может быть предусмотрено только для предприятий, участвующих в экспериментальных правовых режимах в сфере цифровых инноваций.

Эксплуатанты обязаны создавать и обеспечивать функционирование системы управления безопасностью полетов (СУБП). Центральным связующим звеном СУБП является руководство по управлению безопасностью полетов (РУБП). СУБП создаются с учетом внутренней организационной структуры эксплуатанта и специфики задач, выполняемых

с применением БВС. Универсальный подход к управлению риском для безопасности полетов в авиационной отрасли в настоящее время не сформирован [3]. Не разработано специализированное программное обеспечение оценки рисков пилотирования БВС в воздушном пространстве Российской Федерации с учетом изменчивости ситуационной составляющей. Эксплуатанты БВС в ходе разработки СУБП предлагают методики оценки рисков, составленные для предприятия с учетом внутренней специфики организации производственного процесса, используемых типов БВС и особенностей полетных заданий. Также на сегодняшний день не разработаны инструменты автоматизированного построения оптимальных маршрутов полетов БВС из точки старта в точку назначения в воздушном пространстве РФ. Обоснованность и безопасность моделирования, точность решения и способность к глобальной оптимизации в сложных географических условиях являются основными проблемами автоматизированного планирования полета БВС в трехмерном пространстве [4]. Построение оптимального маршрута полета подразумевает уровень риска, допустимый или приемлемый для эксплуатанта. Цель настоящего исследования – разработка подхода к созданию рискориентированной геоинформационной модели воздушного пространства для построения оптимальных маршрутов полетов БВС.

Результаты исследования и обсуждение

В гражданской пилотируемой авиации в рамках проектирования и функционирования СУБП применяются различные методики оценки рисков – матрица оценки рисков ИКАО, метод «Контрольный перечень CFIT» (Controlled-Flight-into-Terrain), методика FRAT (Flight Risk Assessment Tools) [5] и др. Специализированных методик оценки рисков для компаний, эксплуатирующих исключительно БВС, не разработано. В СУБП эксплуатанта БАС могут успешно применяться методы оценки рисков, разработанные для универсального применения в различных отраслях народного хозяйства. СУБП любого поставщика авиационных услуг в значительной степени ориентирована на своевременное выявление и снижение рисков. Использование методов оценки рисков и разработки корректирующих мероприятий, применяемых в пилотируемой авиации, затруднительно ввиду эксплуатационных особенностей БАС [6]. Разделы, связанные с выявлением, анализом факторов опасностей и оценкой различных категорий рисков, занимают более половины содержания РУБП, изложенного в пункте 2.13 ФАП-494. Риски, связанные с применением БВС, следует учитывать при составлении локальных нормативных актов предприятия, в том числе Руководства по производству полетов, инструкций по выполнению работ с применением БВС, инструкций по эксплуатации авиационной техники, учитывать при планировании и оценке рисков выполнения полетного задания, подготовке мероприятий по снижению рисков, а также на этапе предполетной подготовки членов экипажа БВС. Указанные меры окажут положительный эффект в части, касающейся снижения вероятности негативного авиационного события.

В рамках настоящей работы следует руководствоваться следующим определением: факторы риска для безопасности полетов – комбинация прогнозируемой вероятности и серьезности последствий или результатов

реализации опасных факторов¹. Эксплуатант выбирает методики оценки рисков и присвоения значений показателей. В ходе разработки СУБП эксплуатанта возможно предусмотреть присвоение факторам риска (группам факторов риска) коэффициентов значений, необходимых для выполнения алгебраических операций. Кроме того, следует учитывать вариативность значения коэффициента фактора риска в зависимости от сезонных или краткосрочных обстоятельств.

С целью представления примеров расчетов в работе предложена следующая методика на примере гипотетического эксплуатанта А. Прогнозируемую вероятность и серьезность последствий опасных факторов следует измерять в баллах по шкале от 1 до 5, а значение фактора риска для безопасности полета как их произведение. В табл. 1 приведен пример матрицы оценки рисков гипотетического эксплуатанта беспилотных воздушных судов А. В цветных ячейках матрицы оценки рисков указано значение фактора риска, рассчитанное как произведение значений вероятности и серьезности последствий. Значения присваиваются методом экспертной оценки комиссией по оценке рисков, состоящей из наиболее компетентных специалистов эксплуатационного и руководящего персонала эксплуатанта, исходя из опыта выполнения работ с применением БВС, используемых в организации, а также другой информации на усмотрение эксплуатанта, в том числе информации об авиационных инцидентах и происшествиях в отрасли, статистики отказов БВС от разработчика и т. д. Красным цветом обозначен неприемлемый уровень риска, желтым – допустимый, зеленым – приемлемый.

Работа по выявлению и оценке рисков выполнения конкретного полетного задания включает в себя пространственно-временную составляющую, которая должна быть учтена в организации полетов. Как специалистам по управлению безопасностью полетов, так и членам экипажа БВС актуально применять

¹ Дос. 9859: Руководство по управлению безопасностью полетов. 3-е изд. // ИКАО, 2013. 300 с.

Таблица 1
Table 1

Матрица оценки рисков гипотетического эксплуатанта А
The risk assessment matrix of hypothetical operator A

Вероятность	Серьезность последствий				
	Катастрофическая (5 баллов)	Тяжелая (4 балла)	Значительная (3 балла)	Незначительная (2 балла)	Ничтожная (1 балл)
Очень высокая (5 баллов)	25	20	15	10	5
Высокая (4 балла)	20	16	12	8	4
Средняя (3 балла)	15	12	9	6	3
Низкая (2 балла)	10	8	6	4	2
Очень низкая (1 балл)	5	4	3	2	1

в работе простой и надежный инструмент количественной оценки и прогнозирования риска при выполнении полетов [7]. Одним из критериев для автоматизированного построения оптимального маршрута перемещения БВС из точки старта в точку назначения может быть минимизирование или достижение приемлемого уровня рисков. Оценку риска следует использовать как способ учета различных аспектов ситуационной составляющей. Построение указанной модели возможно с применением геоинформационных систем (ГИС). В ГИС объект исследования представлен с учетом пространственного, временного и тематического контекстов.

В настоящее время на авиационных предприятиях, как правило, используют специальные перечни (реестры), где для каждого выявленного фактора опасности дана оценка риска, предложены мероприятия по коррекции риска, проведена оценка эффективности мероприятий [8]. Традиционно в авиационной деятельности при оценке рисков выделяют три основные группы факторов – «Человек – Машина – Среда» [3]. Оценка рисков у предприятий – эксплуатантов БВС имеет индивидуальный характер из-за различных видов применяемого оборудования, региона выполнения полетов, специфики выполняемых полетных заданий и других факторов. Работники и руководители, выполняющие

оценку рисков, руководствуются в том числе личным профессиональным опытом и могут иметь некоторую субъективность суждений. Результаты оценки рисков деятельности эксплуатанта могут измениться с течением времени из-за ввода в эксплуатацию новых типов БВС, повышения уровня квалификации эксплуатационного и руководящего персонала, количества и характера авиационных инцидентов и происшествий, различных событий в регионе выполнения работ и множества других обстоятельств.

При планировании выполнения работ с применением БВС необходимо изучить ситуационную составляющую (обстановку и предполагаемые события) в сегменте воздушного пространства, а также на территории или в акватории, где планируется выполнение полета БВС с учетом предполагаемого времени старта и прибытия в точку назначения. После сбора и изучения информации о ситуационной составляющей предполагаемого полета возможно оценить пригодность различных типов БВС к выполнению поставленной задачи, а затем выбрать конкретное судно с учетом индивидуальных характеристик. Кроме того, на выполнение полетного задания может оказать влияние назначенный экипаж БВС. Своевременная адекватная реакция на опасность повышает шансы избежать авиационного инцидента и происшествия, наземного происше-

Таблица 2
Table 2

Основные группы параметров, значимые для оценки рисков полета БВС
The main groups of parameters that are significant for assessing the risks of UAV flight

Аспект, характеризующий группой факторов риска		Факторы, оказывающие влияние на оценку риска
Экипаж		<ul style="list-style-type: none"> - укомплектованность, - условия пребывания на задании, - квалификация, - стаж работы в области практического применения БВС, - опыт применения и эксплуатации типа БВС, используемого для выполнения полетного задания, - состояние здоровья (утомляемость), - другие факторы
БВС		<ul style="list-style-type: none"> - максимальная взлетная масса БВС, - максимальная скорость полета БВС, - тип (модель) БВС, - тип производства БВС (заводской или самосборный), - тип двигателя, - способ взлета (вертикальный или с катапульты), - способ посадки, - возможность применения БВС-ретранслятора (при необходимости), - размер стартово-посадочной площадки, - степень износа БВС, - другие факторы
Среда	Наземная (надводная) обстановка	<ul style="list-style-type: none"> - рельеф, - растительность, - состояние палубы и судна, - крепость льда, - наличие/отсутствие жилой застройки, - нежилые здания и сооружения (ЛЭП, трубопроводы, мосты, эстакады и проч.), - дороги (вид дороги, интенсивность движения транспортных средств), - промышленные объекты различных классов опасности, - проводимые наземные мероприятия, - другие факторы
	Воздушное пространство	<ul style="list-style-type: none"> - структура воздушного пространства, - погодные-климатические условия, - орнитологическая обстановка, - деятельность, выполняемая в воздушном пространстве, - перемещение других воздушных судов, - другие факторы

ствия, а также снизить возможный ущерб в случае негативного авиационного события. Указанные в настоящем абзаце аспекты подробно рассмотрены в табл. 2.

Факторы риска, рассмотренные в табл. 2, взаимосвязаны и оказывают влияние друг на

друга. При рассмотрении факторов риска следует учитывать не только влияние внешних факторов на полет БВС, но и то, что полеты БВС порождают широкий спектр источников опасности [9] для различных объектов и процессов на земле (на воде) и в воз-

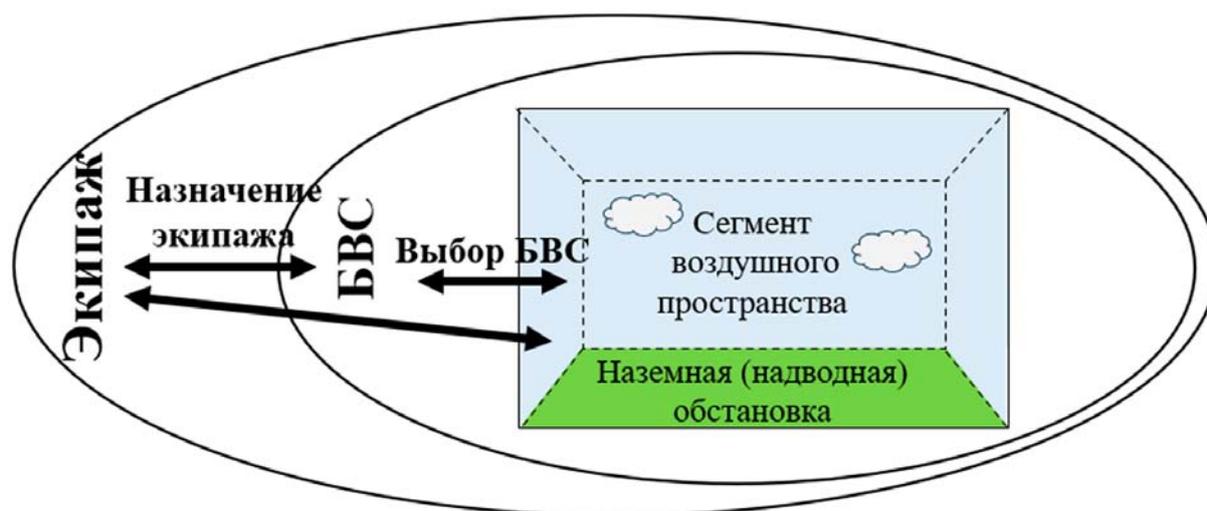


Рис. 1. Схема влияния основных аспектов оценки рисков выполнения полетного задания
Fig. 1. A diagram of the impact of the main aspects of the risk assessment of the flight task performance

душном пространстве. На рис. 1 изображена схема, иллюстрирующая влияние данных аспектов друг на друга в ходе оценки рисков выполнения полетного задания в соответствии с формулой (1). Ниже приведен пример выполнения расчетов.

В зарубежных научных публикациях описаны программы по расширению возможностей применения БВС. Такие программы, как NASA Unmanned Aircraft System Traffic Management (США) [10], UOMS (UAS Operation Management System, Китайская Народная Республика) [11], K-UTM (Korean Unmanned Traffic Management, Республика Корея) [12], UTM-UAS (Urban Traffic Management of Unmanned Aircraft System, Сингапур) [11], U-Space (Европейский союз) [13, 14], разрабатываются и реализуются на уровне государств и их объединений. Неотъемлемой частью любой подобной программы является минимизирование рисков негативного авиационного события с БВС. Авторы научной работы [15, 16] предложили рассчитывать вероятность неблагоприятных для полета БВС погодных условий в ячейках геоинформационной модели территории. В научной работе [17] производится оценка рисков причинения ущерба от БВС третьему лицу (его жизни и имуществу) с учетом различных препятствий в городской среде, предложен алгоритм построения маршрутов полета.

В российских [18–21] и иностранных [22–24] работах опубликованы результаты успешного применения ГИС для решения тематических задач с оценкой рисков в области различных видов транспорта. Геоинформационные системы могут быть использованы для анализа распределения факторов риска выполнения работ с применением БВС в пространстве и во времени. Внесение в ГИС тематического структурированного набора слоев с информацией о факторах, влияющих на безопасность полетов БВС, с привязкой к времени делает возможным создание рискориентированной пространственно-временной геоинформационной модели сегмента воздушного пространства, в котором для каждой ячейки в момент времени присвоено значение коэффициента риска. Таким образом, применение геоинформационных инструментов пространственно-временного анализа повышает качество оценки рисков по сравнению с методами, в которых данные инструменты не задействованы.

Анализ пространственно-временного распределения значений риска с целью определить возможность выполнения полетного задания в пространстве производится согласно формуле

$$I(x, y, z, t) = \Phi_{\text{эк}}[\Phi_{\text{бвс}}(R_{\text{вн}} \& R_{\text{ма}})], \quad (1)$$

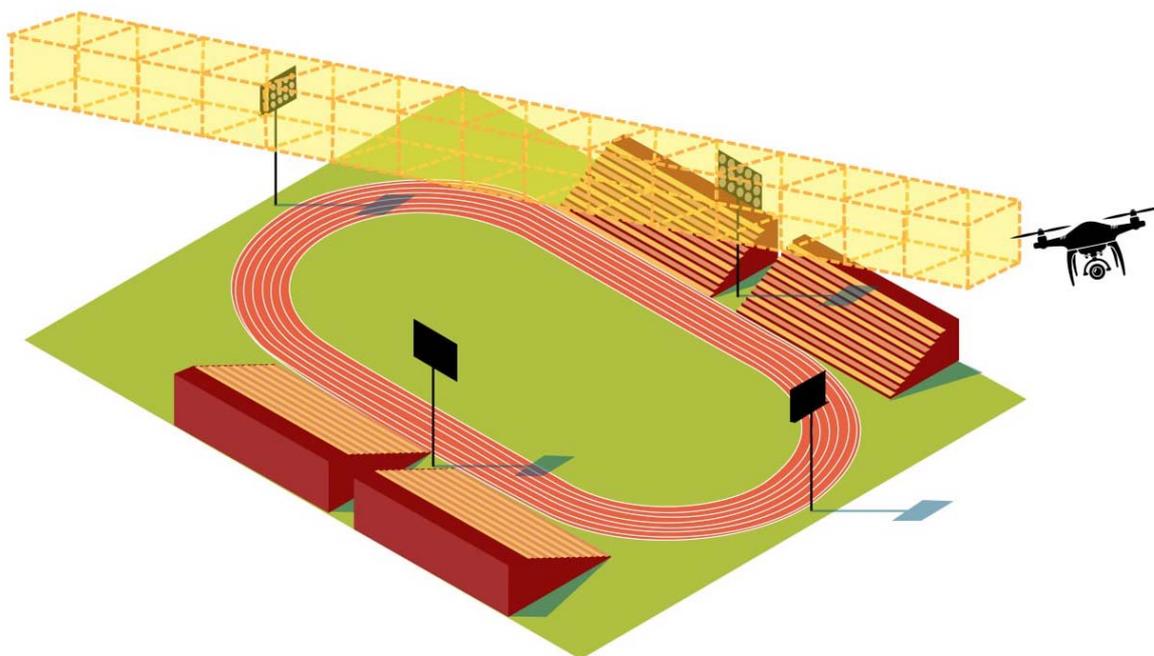


Рис. 2. Оценка рисков выполнения полета БВС
Fig. 2. Assessment of the risks of UAV flights

где $I(x, y, z, t)$ – ячейка пространства по координатам x, y, z в момент времени t ;

R_{en} – совокупность рисков в сегменте воздушного пространства, в котором выполняется пилотирование БВС;

R_{ma} – совокупность рисков на территории или в акватории, над которой выполняется полет БВС;

$\Phi_{бвс}$ – функция, определяющая соответствие ситуационных рисков для применяемого БВС;

$\Phi_{эк}$ – функция, определяющая способность назначенного экипажа БВС к правильным действиям в условиях возможных рисков.

Приведем пример применения формулы (1) для оценки рисков на участке, где планируется выполнение полета БВС эксплуатанта А из точки старта в точку назначения. Экипаж из двух внешних пилотов укомплектован полностью из числа работников, обученных применению данного типа БВС, со стажем работы с беспилотной авиационной техникой и опытом практического применения БВС данного типа 2 года. Используемый БВС с номером W (максимальная взлетная масса – 5 кг) эксплуатируется более 2 лет из шести запланированных, отказов техники за время с момента приема

с завода-изготовителя до времени выполнения полета не зафиксировано. Полет выполняется на высоте 50 м от земной поверхности, погодные условия в пределах эксплуатационных ограничений типа БВС. Рассматриваемый участок представляет собой стадион. Предполагаемый сценарий негативного авиационного события – падение W -го БВС на стадион. Согласно методике оценки рисков компании-эксплуатанта А в случае, если полет БВС запланирован в 06:00 местного времени, когда на стадионе практически нет людей, совокупность рисков на территории и в воздушном пространстве $R_{en} \& R_{ma} = 6$ баллов (вероятность низкая – 2 балла, серьезность последствий – 3 балла), при этом $\Phi_{бвс}$ присвоено низкое значение 1,3 (из-за срока эксплуатации, отсутствия отказов техники, а также соответствия прогнозируемых погодных условий эксплуатационным характеристикам БВС), а значение $\Phi_{эк}$ составляет 1,5 из-за небольшого опыта экипажа. Таким образом, $I(x, y, z, t) = \Phi_{эк} [\Phi_{бвс} (R_{en} \& R_{ma})] = 1,5 \cdot 1,3 \cdot 6 = 11,7$ балла, риск допустимый (рис. 2). При этом, если полет БВС запланировать в 11:00 местного времени по тому же маршруту во время проведения на стадионе массового спортивного соревнования, из-за большого количества людей серьезность последствий падения БВС увели-

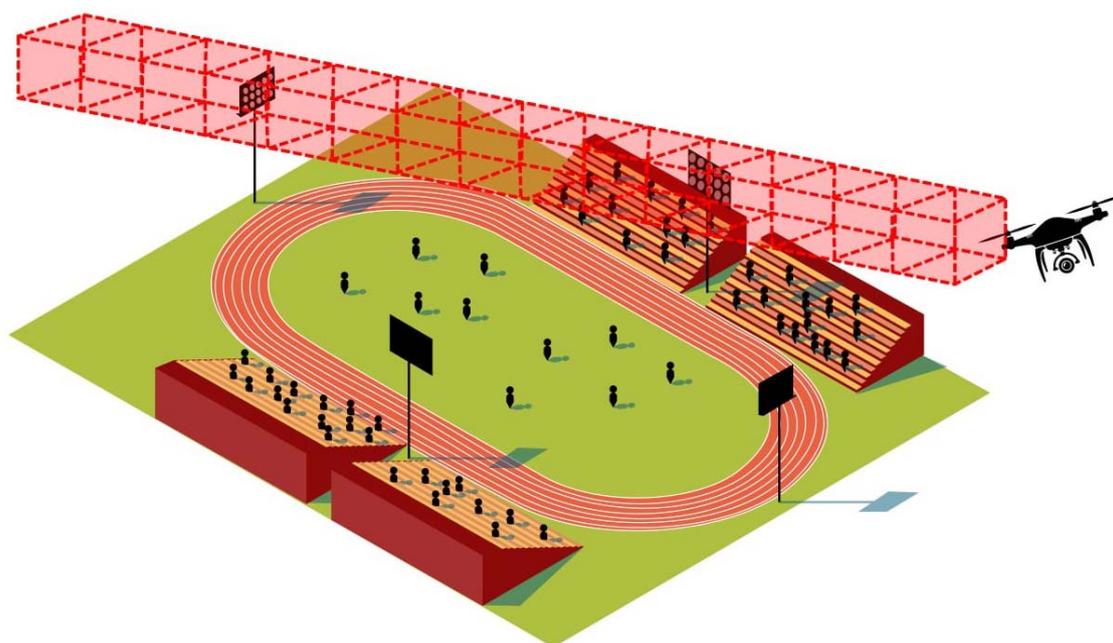


Рис. 3. Оценка риска выполнения полета БВС во время массового мероприятия
Fig. 3. Assessment of the risk of UAV flights during a mass event

Таблица 3
Table 3

Минимальный размер ячейки моделирования
Minimum simulation cell size

Размер	Значение
x	1"
y	1"
z	10 м
t	1 мин

чивается до катастрофической, а совокупность рисков на территории и в воздушном пространстве оценивается как $R_{en} \& R_{ma} = 6$ баллов (вероятность низкая – 2 балла, серьезность последствий – 4 балла). В этом случае $I(x, y, z, t) = 15,6$ балла, риск неприемлемый, следует рассмотреть другие маршруты полета (рис. 3), или назначить более опытных внешних пилотов в состав экипажа, или выбрать другое БВС.

Размер ячейки может быть установлен эксплуатантом в зависимости от особенностей оценки рисков полетов БВС и полетного задания. В случаях когда пилотирование БВС возможно только с подачей представлений на установление местного или временного режима и (или) планов полетов, для вычисле-

ния оптимального маршрута полета актуально установить размеры ячейки с учетом требований, которыми руководствуются органы Единой системы организации воздушного движения Российской Федерации при приеме указанных документов. Исходя из анализа нормативных документов, а также личного профессионального опыта подготовки представлений на установление режимов и планов полетов, минимальный размер ячейки пространственно-временного моделирования предложен в табл. 3.

На основании результатов анализа пространственно-временного распределения значений риска возможно выполнить зонирование сегмента воздушного пространства по

степени приемлемости выполнения полета. На практике принято использовать три категории значений оценки рисков: приемлемо, допустимо, неприемлемо. Возможности полнофункциональной ГИС позволяют исключить («стереть») участки, в границах которых полеты БВС подвергаются повышенному риску негативного авиационного события, из модели сегмента воздушного пространства и таким образом избежать построения маршрута полета на небезопасных участках. Оценка риска в районе планируемого полета в момент времени иллюстрирует рис. 4.

Установленные эксплуатантом пороговые значения предлагается использовать для построения оптимального маршрута перемещения БВС. Оценка рисков выполнения конкретного полетного задания следует выразить формулой

$$R_j = \sum_{i=1}^n I_{(x, y, z, t)}, \quad (2)$$

где R_j – оценка рисков j -го полетного задания.

Эксплуатант вправе установить пороговые значения в отношении ячеек $I_{(x, y, z, t)}$, среднего значения ячеек или их суммы как один из критериев оценки приемлемости построенного оптимального маршрута полета БВС. С учетом полученных результатов оценки рисков эксплуатант может внести изменения в планируемое полетное задание, в том числе предложить заменить беспилотное воздушное судно или подобрать других членов экипажа, а затем выполнить повторную оценку. Таким образом реализуется поддержка принятия управленческих решений.

Заключение

Функционирование инструмента автоматизированного построения оптимального маршрута полета БВС из точки старта в точку назначения невозможно без построения ситуационной модели сегмента воздушного пространства. В геоинформационной модели

должны быть учтены и оценены в соответствии с точкой зрения эксплуатанта факторы, значимые для планирования полета. В работе предложена классификация факторов, значимых для оценки рисков пилотирования БВС. На основе данной классификации разработан подход к рискориентированному геоинформационному моделированию воздушного пространства. Предлагаемый подход позволяет выполнить оценку рисков полета БВС и построить оптимальный маршрут перемещения с допустимым или приемлемым риском негативного авиационного события. Приведен пример оценки рисков гипотетическим эксплуатантом на участке планируемого полета. Подход, основанный на использовании ГИС, является универсальным. Эксплуатант БВС организует пространственно-временные и тематические данные в среде полнофункциональной ГИС, выбирает и комбинирует инструменты пространственного анализа для выполнения расчетов в соответствии с используемыми в организации методиками оценки рисков.

Геоинформационные системы – современный эффективный инструмент решения пространственных задач. Данное программное обеспечение может использоваться для выявления и учета объектов и явлений, значимых для оценки рисков выполнения полетов БВС, комплексной интегральной оценки факторов риска, зонирования сегмента воздушного пространства по степени приемлемости для выполнения полетов. Таким образом, возможно создание геоинформационной модели рискориентированного пространственно-временного образования, результаты анализа которого предназначены для применения алгоритма построения оптимального маршрута полета БВС и поддержки принятия управленческих решений. Рискориентированное геоинформационное моделирование отражает представление воздушного пространства эксплуатантом БВС. Применение ГИС с соответствующим тематическим наполнением повысит качество оценки рисков предстоящего полета БВС, а также ситуационную осведомленность эксплуатационного и руководящего персонала.

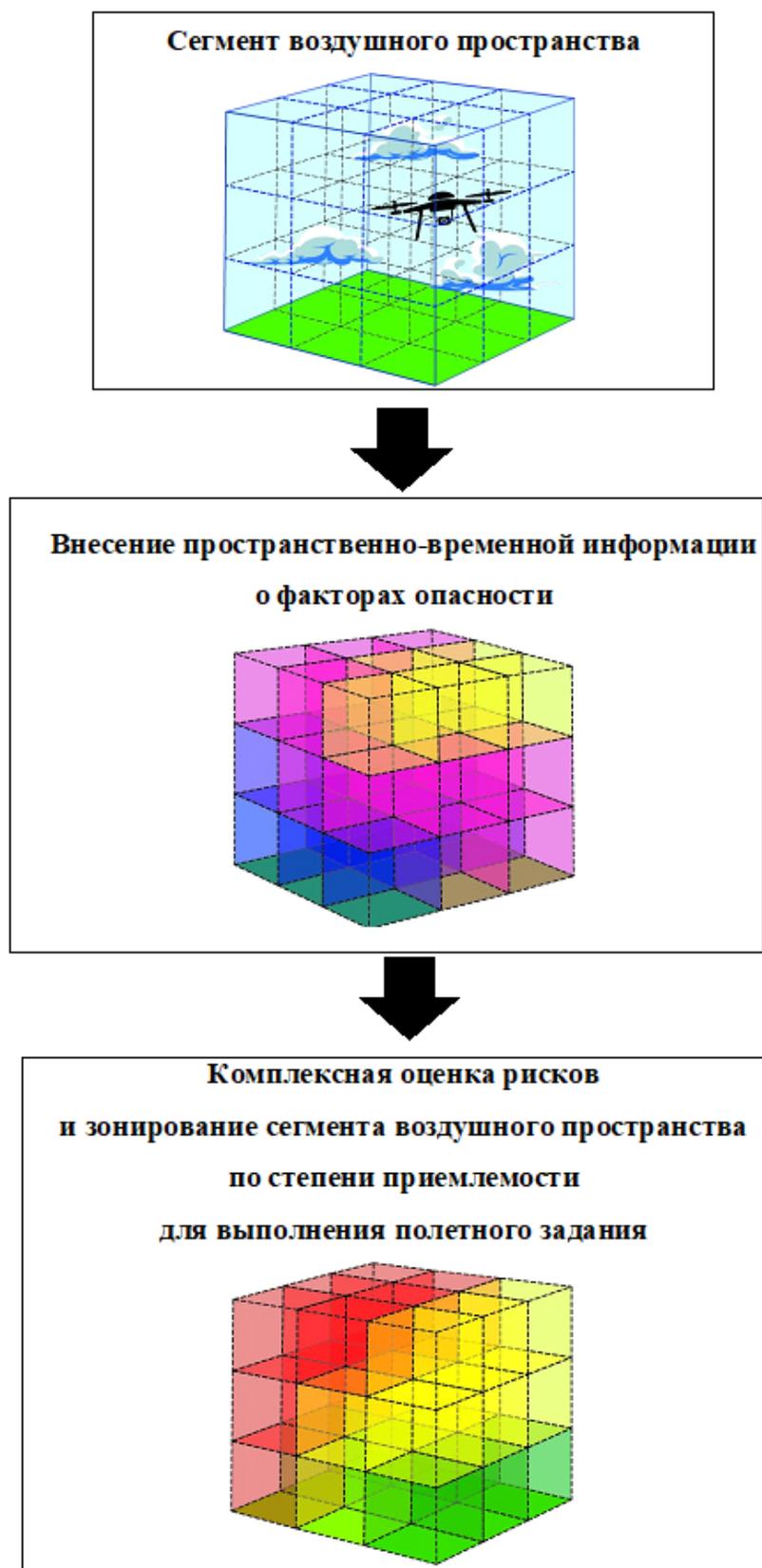


Рис. 4. Оценка рисков в районе планируемого полета в момент времени
Fig. 4. Assessment of risks in the area of the planned flight at a given time

Список литературы

- 1. Фаттахов М.Р., Киреев А.В., Клещ В.С.** Рынок беспилотных авиационных систем в России: состояние и особенности функционирования в макроэкономических условиях 2022 года // Вопросы инновационной экономики. 2022. Т. 12, № 4. С. 2507–2528. DOI: 10.18334/vines.12.4.116912
- 2. Просвирина Н.В.** Анализ и перспективы развития беспилотных летательных аппаратов [Электронный ресурс] // Московский экономический журнал. 2021. № 10. ID: 53. DOI: 10.24412/2413-046X-2021-10619 (дата обращения: 13.09.2024).
- 3. Махитько В.П., Дмитриенко Г.В., Гаврилова Е.А.** Оценка рисков и факторов опасности в системе безопасности полетов воздушных судов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2017. Т. 19, № 4-2. С. 192–197.
- 4. Yin S.** An enhanced whale algorithm for three-dimensional path planning for meteorological detection of the unmanned aerial vehicle in complex environments / S. Yin, J. Yang, L. Ma, M. Fu, K. Xu [Электронный ресурс] // IEEE Access. 2024. № 12. Pp. 60039–60057. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3394055 (дата обращения: 13.09.2024).
- 5. Рыбалкина А.Л., Трусова Е.И., Шаров В.Д.** Методика оценки рисков предстоящего полета для вертолетов с учетом неблагоприятных метеоусловий // Научный вестник МГТУ ГА. 2018. Т. 21, № 6. С. 124–140. DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-6-124-140
- 6. 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. 62–75. DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-6-62-76
- 7. Макаров В.П.** Разработка в авиакомпании системы менеджмента рисков в отношении безопасности полетов [Электронный ресурс] // Труды МАИ. 2013. № 68. 15 с. URL: <https://trudymai.ru/upload/iblock/c9a/c9a09f137f4a3a3273a1a2c407096642.pdf?lang=en&issue=68> (дата обращения: 13.09.2024).
- 8. Мельник Д.М.** Взаимосвязь уровня рисков и уровня качества процессов в авиационном предприятии // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. 2018. № 6 (79). С. 35–39.
- 9. 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
- 10. Jiang T.** Unmanned aircraft system traffic management: Concept of operation and system architecture / T. Jiang, J. Geller, D. Ni, J. Collura // International Journal of Transportation Science and Technology. 2016. Vol. 5, iss. 3. Pp. 123–135. DOI: 10.1016/j.ijtst.2017.01.004
- 11. Shrestha R., Oh I., Kim S.** A survey on operation concept, advancements, and challenging issues of urban air traffic management [Электронный ресурс] // Frontiers in Future Transportation. 2021. № 2. ID: 626935. DOI: 10.3389/ffutr.2021.626935 (дата обращения: 13.09.2024).
- 12. Jung K.** UTM Architecture and flight demonstration in Korea / K. Jung, S. Kim, B. Jung, S. Kim, H. Kang, C. Kang [Электронный ресурс] // Aerospace. 2022. Vol. 9, iss. 11. ID: 650. DOI: 10.3390/aerospace9110650 (дата обращения: 13.09.2024).
- 13. Barrado C., Boyero M., Brucculeri L. et al.** U-Space concept of operations: a key enabler for opening airspace to emerging low-altitude operations [Электронный ресурс] // Aerospace. 2020. Vol. 7, iss. 3. ID: 24. DOI: 10.3390/aerospace7030024 (дата обращения: 13.09.2024).
- 14. Capitan C.** Unmanned aerial traffic management system architecture for u-space inflight services / C. Capitan, H. Perez-Leon, J. Capitan, A. Castano, A. Ollero [Электронный ресурс] // Applied science. 2021. Vol. 11, iss. 9. ID: 3995. DOI: 10.3390/app11093995 (дата обращения: 13.09.2024).
- 15. Zhang B., Tang L., Roemer M.** Probabilistic weather forecasting analysis for unmanned aerial vehicle path planning // Journal of Guidance, Control and Dynamics. 2014. Vol. 37, no. 1. Pp. 309–312. DOI: 10.2514/1.61651

16. **Zhang B., Tang L., Roemer M.** Probabilistic planning and risk evaluation based on ensemble weather forecasting // *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. 2018. Vol. 15, no. 2. Pp. 556–566. DOI: 10.1109/TASE.2017.2648743

17. **Tang H.** UAV path planning based on third-party risk modeling / H. Tang, Q. Zhu, B. Qin, R. Song, Z. Li [Электронный ресурс] // *Scientific Reports*. 2023. No. 13. ID: 22259. DOI: 10.1038/s41598-023-49396-4 (дата обращения: 13.09.2024).

18. **Анардович С.С., Руш Е.А.** Методы оценки рисков и прогнозирование сценариев развития чрезвычайных ситуаций при железнодорожных перевозках // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. 2020. № 1 (65). С. 66–75. DOI: 10.26731/1813-9108.2020.1(65).66-75

19. **Кулыгин В.В.** Совместное использование байесовских сетей и ГИС для оценки рисков штормовых нагонов в дельте р. Дон // *Вестник СГУГиТ*. 2018. Т. 23, № 2. С. 92–107.

20. **Власова Л.В., Ракитина Г.С., Долгов С.И.** Геоинформационные аналитические модели комплексной оценки природных опасностей для Единой системы газоснабжения России // *Вести газовой науки*. 2017. № 1 (29). С. 57–70.

21. **Куракина Н.И., Мышко Р.А., Турьгина А.А.** ГИС оценки влияния дорожного транспорта на шумовое загрязнение городских территорий // *Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ*. 2023. Т. 16, № 4. С. 16–29. DOI: 10.32603/2071-8985-2023-16-4-16-29

22. **Inanlooa B.** A decision aid GIS-based risk assessment and vulnerability analysis approach for transportation and pipeline networks / B. Inanlooa, B. Tansela, K. Shamsb, X. Jinb, A. Gan // *Safety Science*. 2016. № 84. Pp. 57–66. DOI: 10.1016/j.ssci.2015.11.018

23. **Omachi T., Seya H., Fuse M.** A GIS-based risk assessment of hydrogen transport: Case study in Yokohama City // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021. Vol. 46, iss. 23. Pp. 12420–12428. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.09.158

24. **Susini A., Hurzeler C., Schonenberger A. et al.** Assessment of aircraft accident

probability on industrial facilities by means of GIS risk-register, the examples of Geneva // *Proceedings of the EnviroInfo 2008 Conference*. Luneburg, 2008. Pp. 466–475.

References

1. **Fattakhov, M.R., Kireev, A.V., Kleshch, V.S.** (2022). The market of unmanned aircraft systems in Russia: status and characteristics of functioning in the macroeconomic environment of 2022. *Russian Journal of Innovation Economics*, vol. 12, no. 4, pp. 2507–2528. (in Russian)

2. **Prosvirina, N.V.** (2021). Analysis and prospects for the development of unmanned aircraft. *Moscow Economic Journal*, no. 10, ID: 53. DOI: 10.24412/2413-046X-2021-10619 (accessed: 13.09.2024). (in Russian)

3. **Makhitko, V.P., Dmitrienko, G.V., Gavrilova, E.A.** (2017). Estimation of risks and factors of danger in the system of safety of flights of air ships. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*, vol. 19, no. 4-2, pp. 192–197. (in Russian)

4. **Yin, S., Yang, J., Ma, L., Fu, M., Xu, K.** (2024). An enhanced whale algorithm for three-dimensional path planning for meteorological detection of the unmanned aerial vehicle in complex environments. *IEEE Access*, no. 12, pp. 60039–60057. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3394055 (accessed: 13.09.2024).

5. **Rybalkina, A.L., Trusova, E.I., Sharov, V.D.** (2018). Risk assessment methodology for a forthcoming flight of helicopters taking into account unfavorable meteorological conditions. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 21, no. 6, pp. 124–140. DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-6-124-140 (in Russian)

6. **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. 62–75. DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-6-62-76 (in Russian)

7. **Makarov, V.P.** (2013). Development of a flight safety risk management system in an airline. *Trudy MAI*, no. 68, 15 p. Available at:

<https://trudymai.ru/upload/iblock/c9a/c9a09f137f4a3a3273a1a2c407096642.pdf?lang=en&issue=68> (accessed: 13.09.2024). (in Russian)

8. **Mel'nik, D.M.** (2018). Interrelation of risk level and process quality level in an air transport enterprise. *Transport Rossiyskoy Federatsii. Zhurnal o nauke, praktike, ekonomike*, no. 6 (79), pp. 35–39. (in Russian)

9. **Sharov, V.D., Yeliseyev, 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)

10. **Jiang, T., Geller, J., Ni, D., Collura, J.** (2016). Unmanned aircraft system traffic management: Concept of operation and system architecture. *International Journal of Transportation Science and Technology*, vol. 5, issue 3, pp. 123–135. DOI: 10.1016/j.ijtst.2017.01.004

11. **Shrestha, R., Oh, I., Kim, S.** (2021). A survey on operation concept, advancements, and challenging issues of urban air traffic management. *Frontiers in Future Transportation*, no. 2, ID: 626935. DOI: 10.3389/ffutr.2021.626935 (accessed: 13.09.2024).

12. **Jung, K., Kim, S., Jung, B., Kim, S., Kang, H., Kang, C.** (2022). UTM architecture and flight demonstration in Korea. *Aerospace*, vol. 9, issue 11. ID: 650. DOI: 10.3390/aerospace9110650 (accessed: 13.09.2024).

13. **Barrado, C., Boyero, M., Bruccoleri, L. et al.** (2020). U-Space concept of operations: a key enabler for opening airspace to emerging low-altitude operations. *Aerospace*, vol. 7, issue 3, ID: 24. DOI: 10.3390/aerospace7030024 (accessed: 13.09.2024).

14. **Capitan, C., Perez-Leon, H., Capitan, J., Castano, A., Ollero, A.** (2021). Unmanned aerial traffic management system architecture for u-space in-flight services. *Applied science*, vol. 11, issue 9, ID: 3995. DOI: 10.3390/app11093995 (accessed: 13.09.2024).

15. **Zhang, B., Tang, L., Roemer, M.** (2014). Probabilistic weather forecasting analysis for unmanned aerial vehicle path planning. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, vol. 37, no. 1, pp. 309–312. DOI: 10.2514/1.61651

16. **Zhang, B., Tang, L., Roemer, M.** (2018). Probabilistic planning and risk evaluation based on ensemble weather forecasting. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 15, no. 2, pp. 556–566. DOI: 10.1109/TASE.2017.2648743

17. **Tang, H., Zhu, Q., Qin, B., Song, R., Li, Z.** (2023). UAV path planning based on third-party risk modeling. *Scientific Reports*, no. 13, ID: 22259. DOI: 10.1038/s41598-023-49396-4 (accessed: 13.09.2024).

18. **Anardovich, S.S., Rush, E.A.** (2020). Risk assessment methods and emergency scenarios forecasting in railway transportation. *Modern Technologies. System Analysis. Modeling*, no. 1 (65), pp. 66–75. DOI: 10.26731/1813-9108.2020.1(65).66-75 (in Russian)

19. **Kulygin, V.V.** (2018). Joint use of Bayesian networks and GIS for risks assessment of storm surges in the delta of the Don river. *Vestnik SSUGT*, vol. 23, no. 2, pp. 92–107. (in Russian)

20. **Vlasova, L.V., Rakitina, G.S., Dolgov, S.I.** (2017). Geoinformational analytical models for complex estimation of environmental hazards menacing the unified gas supply system of Russia. *Vesti gazovoy nauki*, no. 1 (29), pp. 57–70. (in Russian)

21. **Kurakina, N.I., Myshko, R.A., Turygina, A.A.** (2023). GIS for assessing the impact of road transport on noise pollution in urban territories. *Izvestiya SPbGETU LETI*, vol. 16, no. 4, pp. 16–29. DOI: 10.32603/2071-8985-2023-16-4-16-29 (in Russian)

22. **Inanlooa, B., Tansela, B., Shamsb, K., Jinb, X., Gan, A.** (2016). A decision aid GIS-based risk assessment and vulnerability analysis approach for transportation and pipeline networks. *Safety Science*, no. 84, pp. 57–66. DOI: 10.1016/j.ssci.2015.11.018

23. **Omachi, T., Seya, H., Fuse, M.** (2021). A GIS-based risk assessment of hydrogen transport: Case study in Yokohama City. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 46, issue 23, pp. 12420–12428. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.09.158

24. **Susini, A., Hurzeler, C., Schonenberger, A. et al.** (2008). Assessment of aircraft accident probability on industrial facilities by

means of GIS risk-register, the examples of Geneva. In: *Proceedings of the EnviroInfo 2008 Conference*, Luneburg, pp. 466–475.

Сведения об авторе

Максимова Софья Евгеньевна, аспирант кафедры геодезии, геоинформатики и навигации Российского университета транспорта, ведущий специалист отдела спутникового мониторинга АО «НИИАС», sofya.maksimova.1992@mail.ru.

Information about the author

Sofya E. Maksimova, Postgraduate Student of the Chair of Geodesy, Geoinformatics and Navigation, Russian University of Transport, Leading Expert of the Satellite Monitoring Department, JSC Research and Design Institute of Informatization, Automation and Communications in Railway Transport, sofya.maksimova.1992@mail.ru.

Поступила в редакцию	28.09.2024	Received	28.09.2024
Одобрена после рецензирования	10.12.2024	Approved after reviewing	10.12.2024
Принята в печать	23.01.2025	Accepted for publication	23.01.2025