

Том 28, № 01, 2025

ISSN 2079-0619

e-ISSN 2542-0119

Научный Вестник МГТУ ГА



Civil Aviation High TECHNOLOGIES

Vol. 28, No. 01, 2025

Издается с 1998 г.

Москва
2025

Научный Вестник МГТУ ГА решением Президиума ВАК Министерства образования и науки РФ включен в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук.

Главная редакция

Главный редактор: *Елисеев Б.П.*, заслуженный юрист РФ, проф., д. ю. н., ректор МГТУ ГА, Москва, Россия.

Зам. главного редактора: *Воробьев В.В.*, проф., д. т. н., зав. каф. МГТУ ГА, Москва, Россия.

Ответственные секретари главной редакции: *Наумова Т.В.*, доцент, д. филос. н., профессор кафедры МГТУ ГА, Москва, Россия;
Полешкина И.О., доцент, д.т.н., старший научный сотрудник отдела научных исследований МГТУ ГА, Москва, Россия.

Члены главной редакции:

Боев С.Ф., проф., д. т. н., д. э. н., генеральный директор Межгосударственной акционерной корпорации «Вымпел», Москва, Россия;

Гаранина О.Д., почетный работник науки и техники РФ, проф., д. филос. н., профессор МГТУ ГА, Москва, Россия;

Желтов С.Ю., заслуженный деятель науки РФ, академик РАН, профессор, д. т. н., первый заместитель генерального директора ГосНИИАС, Москва, Россия;

Калугин В.Т., проф., д. т. н., декан МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия;

Козлов А.И., заслуженный деятель науки и техники РФ, проф., д. ф.-м. н., профессор МГТУ ГА, Москва, Россия;

Лукин Д.С., заслуженный деятель науки РФ, проф., д. ф.-м. н., проф. МФТИ, Москва, Россия;

Махутов Н.А., член-корреспондент РАН, профессор, д. т. н., г. н. с. ФГБУН Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия;

Туркин И.К., проф., д. т. н., зав. каф. МАИ (национального исследовательского университета), Москва, Россия;

Ченцов А.Г., член-корреспондент РАН, проф., д. ф.-м. н., г. н. с. Института математики и механики им. Н.Н. Красовского УрО РАН, Екатеринбург, Россия;

Чернышев С.Л., академик РАН, профессор, д. ф.-м. н., вице-президент РАН, научный руководитель ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского, Москва, Россия;

Шапкин В.С., заслуженный работник транспорта РФ, проф., д. т. н., первый заместитель генерального директора Национального исследовательского центра «Институт имени Н.Е. Жуковского», Москва, Россия;

Дамиан Ривас Ривас, проф., PhD, проф. Университета Севильи, Севилья, Испания;

Сюй Хаудзюнь, PhD, Университет военно-воздушных сил, Хянань, Китай;

Франческа де Кресченцио, профессор, кафедра промышленной инженерии, Болонский университет, Болонья, Италия;

Владимир Немец, PhD, Транспортный факультет Яна Пернера, кафедра воздушного транспорта, Университет Пардубице, Пардубице, Чешская Республика;

Станислав Сзабо, PhD, Факультет авиации, Технический университет в Кошице, Кошице, Словацкая Республика.

Editorial Board

- Editor-in-Chief:** *Boris P. Eliseev*, Professor, Doctor of Sciences, Rector, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia;
- Deputy Editor-in-Chief:** *Vadim V. Vorobyev*, Professor, Doctor of Sciences, Head of Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia;
- Executive Secretaries:** *Tatiana V. Naumova*, Associate Professor, Doctor of Sciences, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia;
Irina O. Poleshkina, Associate Professor, Doctor of Science, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia.

Chief Editorial Board:

Sergey F. Boev, Professor, Doctor of Sciences, General Director, Interstate Joint Stock Corporation "Vypel", Moscow, Russia;

Olga D. Garanina, Honorary Worker of Science and Technology of the Russian Federation, Professor, Doctor of Sciences, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia;

Sergey Y. Zheltov, Honored Worker of Science of the Russian Federation, Academician, Russian Academy of Sciences, Professor, Doctor of Sciences, First Deputy General Director, State Research Institute of Aviation Systems, Moscow, Russia;

Vladimir T. Kalugin, Professor, Doctor of Sciences, Dean, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia;

Anatoly I. Kozlov, Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation, Professor, Doctor of Sciences, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia;

Dmitry S. Lukin, Honored Worker of Science of the Russian Federation, Professor, Doctor of Sciences, Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia;

Nikolay A. Makhutov, Corresponding Member, The Russian Academy of Sciences, prof., Doctor of Science, Principal Researcher, FSBIS, Institute of Machine Science named after A.A. Blagonravov, Moscow, Russia;

Igor K. Turkin, Professor, Doctor of Sciences, Head of Chair, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia;

Aleksander G. Chentsov, Corresponding Member, The Russian Academy of Sciences, prof., Doctor of Science, Principal Researcher, Institute of Mathematics and Mechanics, named after N.N. Krasovsky, the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia;

Sergey L. Chernishov, Academician, Russian Academy of Sciences, Professor, Doctor of Sciences, Vice-President, Russian Academy of Sciences, Academic Adviser, National Research Center "Zhukovsky Institute", Moscow, Russia;

Vasily S. Shapkin, Honored Worker of Transport of the Russian Federation, Professor, Doctor of Sciences, First Deputy General Director, The National Research Center "Zhukovsky Institute" Moscow, Russia;

Damian Rivas Rivas, Professor, PhD, University of Seville, Seville, Spain;

Xu Haojun, PhD, Air Force Engineering University, Xi'an, China;

Francesca De Crescenzo, Professor, Department of Industrial Engineering DIN, University of Bologna, Bologna, Italy;

Vladimir Němec, PhD, Faculty of Transportation Sciences, Jan Perner Transport Faculty, University of Pardubice, Pardubice, Czech Republic;

Stanislav Szabo, Associate Professor, PhD, Dean, Faculty of Aeronautics, Technical University of Košice, Košice, Slovak Republic.

Редакционный совет

Абрамов О.В., заслуженный деятель науки РФ, проф., д. т. н., Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения РАН, Владивосток, Россия;

Акиншин Р.Н., проф., д. т. н., в. н. с., секция оборонных проблем МО РФ при президиуме РАН, Москва, Россия;

Бачкало Б.И., проф., д. т. н., в. н. с. ЦНИИ ВВС МО РФ, Щелково, Россия;

Брусов В.С., проф., д. т. н., проф. МАИ (национального исследовательского университета), Москва, Россия;

Васильев О.В., проф., д. т. н., г.н.с. ООО «НПО НаукаСофт», Москва, Россия;

Вышинский В.В., проф. МФТИ, г. н. с. ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского, Жуковский, Россия;

Горелик А.Г., проф., д. ф-м. н., проф. МИФИ, Москва, Россия;

Гузий А.Г., д. т. н., зам. директора ПАО «Авиакомпания «ЮТэйр», Москва, Россия;

Давидов А.О., доцент, д. т. н., Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина;

Красильщик И.С., проф., д. ф-м. н., проф. МНУ, Москва, Россия;

Кузнецов В.Л., проф., д. т. н., зав. каф. МГТУ ГА, Москва, Россия;

Кузнецов С.В., проф., д. т. н., зав. каф. МГТУ ГА, Москва, Россия;

Логвин А.И., заслуженный деятель науки РФ, проф., д. т. н., профессор МГТУ ГА, Москва, Россия;

Пантелеев А.В., проф., д. ф-м. н., зав. каф. МАИ (национального исследовательского университета), Москва, Россия;

Полтавский А.В., д. т. н., с. н. с., ведущий научный сотрудник Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия;

Рухлинский В.М., д. т. н., председатель комиссии МАК по связям с Международной организацией гражданской авиации, Москва, Россия;

Самохин А.В., д. т. н., в. н. с. Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия;

Сарычев В.А., проф., д. т. н., г. н. с. АО «Радар-ММС», Санкт-Петербург, Россия;

Татаринов В.Н., действительный член Академии электромагнетизма США, проф., д. т. н., проф. ТУСУР, Томск, Россия;

Увайсов С.У., проф., д. т. н., зав. каф. МТУ, Москва, Россия;

Халютин С.П., проф., д. т. н., ген. директор ООО «НПО НаукаСофт», Москва, Россия;

Харитонов С.А., проф., д. т. н., зав. каф. НГТУ, Новосибирск, Россия;

Ходаковский В.А., заслуженный деятель науки ЛССР, проф., д. т. н., Рига, Латвия;

Чинючин Ю.М., проф., д. т. н., профессор МГТУ ГА, Москва, Россия;

Шахтарин Б.И., академик РАЕН, заслуженный деятель науки и техники РФ, проф., д. т. н., проф. МГТУ им. Н.Э. Баумана (национального исследовательского университета), Москва, Россия;

Юрков Н.К., заслуженный деятель науки РФ, почетный работник высшего профессионального образования РФ, проф., д. т. н., проф. ПГУ, Пенза, Россия.

Editorial Council

Oleg V. Abramov, Honored Worker of Science of the Russian Federation, Professor, Doctor of Sciences, Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia;

Ruslan N. Akinshin, Professor, Doctor of Sciences, Leading Researcher, Section of Applied Problems under the Presidium of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;

Boris I. Bachkalo, Professor, Doctor of Sciences, Leading Research Fellow, Russian Air Force Central Scientific Research Institute of Ministry of Defence, Shchelkovo, Russia;

Vladimir S. Brusov, Professor, Doctor of Sciences, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia;

Oleg V. Vasiliev, Professor, Doctor of Science, Principal Researcher, LLC "Scientific Production Association, NaukaSoft", Moscow, Russia;

Viktor V. Vyshinsky, Professor, Doctor of Sciences, Head of Chair, Moscow Institute of Physics and Technology, Chief Research Fellow, Central Aerohydrodynamic Institute, Zhukovskiy, Russia;

Andrey G. Gorelik, Professor, Doctor of Sciences, Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia;

Anatoliy G. Guziy, Doctor of Sciences, UTair Airlines, Moscow, Russia;

Albert O. Davidov, Assistant Professor, Doctor of Sciences, National Aerospace University Kharkiv Aviation Institute, Kharkiv, Ukraine;

Iosif S. Krasilschik, Professor, Doctor of Sciences, Moscow Independent University, Moscow, Russia;

Valeriy L. Kuznetsov, Professor, Doctor of Sciences, Head of Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia;

Sergey V. Kuznetsov, Professor, Doctor of Sciences, Head of Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia;

Aleksandr I. Logvin, Honored Worker of Science of the Russian Federation, Professor, Doctor of Sciences, Moscow State Technical University of Civil Aviation Moscow, Russia;

Andrey V. Panteleev, Professor, Doctor of Sciences, Head of Chair, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia;

Alexandr V. Poltavsky, Doctor of Technical Sciences, Senior Scientific Researcher, Leading Researcher, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Science, Moscow, Russia;

Victor M. Rukhlinskiy, Doctor of Sciences, Chairman of the Commission for Relations with ICAO Board, International and Interstate Organizations of the Interstate Aviation Committee, Moscow, Russia;

Aleksey V. Samokhin, Doctor of Sciences, Leading Researcher, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Science, Moscow, Russia.

Valentin A. Sarychev, Professor, Doctor of Sciences, "Radar-MMS" Joint-Stock Company, St.Petersburg, Russia;

Viktor N. Tatarinov, Actual Member of the US Electrical Magnetism Academy, Professor, Doctor of Sciences, Tomsk State Radio Electronic and Control Systems University, Tomsk, Russia;

Saygid U. Uvaysov, Professor, Doctor of Sciences, Head of Chair, Moscow Technological University, Moscow, Russia;

Sergey P. Khalyutin, Professor, Doctor of Sciences, Director General, CEO LLC "Scientific Production Association, NaukaSoft", Moscow, Russia;

Sergey A. Kharitonov, Professor, Doctor of Sciences, Head of Chair, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia;

Vladimir A. Hodakovsky, Honored Worker of Science of Latvian Soviet Socialist Republic, Professor, Doctor of Sciences, Riga, Latvia;

Yuriy M. Chinyuchin, Professor, Doctor of Sciences, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia;

Boris I. Shakhtarin, Academician of the Russian Academy of Natural Sciences, Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation, Professor, Doctor of Sciences, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia;

Nikolay K. Urkov, Honored Worker of Science of the Russian Federation, Honorary Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation, Professor, Doctor of Sciences, Penza State University, Penza, Russia.

СОДЕРЖАНИЕ

ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

Bodrova I.Y., Gostev A.V., Fainburg G.D. Aviation industry technological sovereignty optimization problem formulation	8
Коваленко Г.В., Ядров И.А. Применение Seq2seq-моделей для прогнозирования развития грозовой деятельности с целью повышения уровня ситуационной осведомленности пилота в полете	20
Максимова С.Е. Рискориентированное геоинформационное моделирование воздушного пространства для построения оптимальных маршрутов перемещения беспилотных воздушных судов гражданской авиации	39
Savchuk A.T., Moskalenko L.V. Grid influence issues in the methodology of numerical modelling of non-stationary combustion processes	53
Субботин Р.А. К вопросу об упражнении на диспетчерском тренажере при подготовке диспетчеров управления воздушным движением в образовательных организациях гражданской авиации	67
Трофименко Ю.В., Гинзбург В.А., Якубович А.Н., Лытов В.М., Шелмаков С.В., Зеленова М.С. Усовершенствованная методика расчетного мониторинга выбросов парниковых газов от деятельности автомобильного и внедорожного транспорта в Российской Федерации	78

CONTENTS

TRANSPORTATION SYSTEMS

Bodrova I.Y., Gostev A.V., Fainburg G.D. Aviation industry technological sovereignty optimization problem formulation	8
Kovalenko G.V., Yadrov I.A. Application of Seq2Seq models for predicting the development of thunderstorm activity to enhance the pilot's situational awareness in flight	20
Maksimova S.E. Risk-oriented geoinformation airspace modeling for calculating civil aviation unmanned aerial vehicles optimal routes	39
Savchuk A.T., Moskalenko L.V. Grid influence issues in the methodology of numerical modelling of non-stationary combustion processes	53
Subbotin R.A. On the subject of an ATC simulator exercise in the training of air traffic controllers at Civil Aviation Educational Institutions	67
Trofimenko Y.V., Ginzburg V.A., Yakubovich A.N., Lytov V.M., Shelmakov S.V., Zelenova M.S. Improved methodology for the calculated monitoring of greenhouse gas emissions from the activities of road and off-road transport in the Russian Federation	78

ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

2.9.1 – Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте;

2.9.4. – Управление процессами перевозок;

2.9.6 – Аэронавигация и эксплуатация авиационной техники;

2.9.8 – Интеллектуальные транспортные системы

УДК 629.7.08

DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-1-8-19

Aviation industry technological sovereignty optimization problem formulation

I.Y. Bodrova¹, A.V. Gostev², G.D. Fainburg¹

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

²*Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia*

Abstract: The aviation industry faces the difficult task of maintaining and further increasing the population air mobility at the present stage of domestic air transport and country economy development. It is fixed in the Comprehensive Program for Russian Federation Aviation Industry Development until 2030 (as amended by Decree of Russian Federation Government No. 1102-r dated May 4, 2024). There is an urgent need to develop and introduce domestic production components into aircraft type design in the context of the cessation of interaction between Russian aviation enterprises and foreign suppliers of goods and services. These actions make it possible to ensure industrial technological sovereignty and further operation of aviation equipment with the required levels of reliability and safety. The article presents a flowchart of this process developed by the authors. The flowchart considers possible types of import substitution of components. The authors performed a comparative analysis of the forecast of fleet retirement and commissioning of newly developed aviation equipment based on the available statistical data on the operation of short-haul aircraft. The need for the development of sectoral corrective measures is shown based on its results. This fact confirms the relevance of the chosen research area. The process of integration of Russian-made components into the aircraft structure is considered from the point of view of program management in the publication. The authors describe the basic principles and methods of prioritizing projects using the example of 10 components. This considers the total budget of the program, as well as its resource intensity. The optimization task is formulated in the publication based on the results of the work performed. This publication is the main one for the further development of an algorithm that will allow solving priority tasks of continued airworthiness of both the fleet in operation and newly developed aircraft.

Key words: aircraft operation, aviation, component, project, program, planning, prioritization.

For citation: Bodrova, I.Y., Gostev, A.V., Fainburg, G.D. (2025). Aviation industry technological sovereignty optimization problem formulation. Civil Aviation High Technologies, vol. 28, no. 1, pp. 8–19. DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-1-8-19

Формулировка задачи оптимизации в рамках реализации технологического суверенитета авиационной отрасли

И.Е. Бодрова¹, А.В. Гостев², Г.Д. Файнбург¹

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

²*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия*

Аннотация: На современном этапе развития отечественного воздушного транспорта и экономики страны в целом перед авиационной отраслью стоит непростая задача поддержания и дальнейшего роста авиамобильности населения. Это зафиксировано в Комплексной программе развития авиационной отрасли Российской Федерации до 2030 года

(в редакции распоряжения Правительства Российской Федерации от 4 мая 2024 года № 1102-р). В условиях прекращения взаимодействия российских авиационных предприятий с иностранными компаниями – поставщиками товаров и услуг существует острая необходимость разработки и внедрения в типовую конструкцию воздушных судов комплектующих изделий отечественного производства. Данные мероприятия позволяют обеспечить отраслевой технологический суверенитет и дальнейшую эксплуатацию авиационной техники с требуемыми уровнями надежности и безопасности. В публикации представлена разработанная авторами блок-схема данного процесса с учетом возможных типов импортозамещения комплектующих изделий. На основании доступных статистических данных эксплуатации ближнемагистральных воздушных судов авторами выполнен сравнительный анализ прогноза выбытия флота и ввода в эксплуатацию вновь разрабатываемой авиационной техники. По его результатам показана необходимость разработки отраслевых корректирующих мероприятий. Данный факт подтверждает актуальность области выбранного исследования. Процесс внедрения комплектующих изделий российского производства в типовую конструкцию эксплуатируемого воздушного судна рассматривается в публикации с точки зрения программного управления. Авторы приводят описание основных принципов и методик приоритизации проектов на примере 10 комплектующих изделий. При этом учитывается суммарный бюджет программы, а также ее ресурсоемкость. По результатам выполненных работ в публикации формулируется задача оптимизации. Данная публикация является основой для дальнейшей разработки алгоритма, который позволит решать приоритетные задачи поддержания летной годности как находящегося в эксплуатации флота, так и вновь разрабатываемой авиационной техники.

Ключевые слова: эксплуатация воздушных судов, авиация, комплектующее изделие, проект, программа, планирование, приоритизация.

Для цитирования: Бодрова И.Е., Гостев А.В., Файнбург Г.Д. Формулировка задачи оптимизации в рамках реализации технологического суверенитета авиационной отрасли // Научный вестник МГТУ ГА. 2025. Т. 28, № 1. С. 8–19. DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-1-8-19

Introduction

Transport connexity of the country is the primary objective of its aircraft field. Sanctions imposed by foreign companies in February 2022 have drastically changed its development environment and priorities. Interaction in terms of aircraft components supply and maintenance was ceased.

Immediate governmental support measures have allowed to preserve the aircraft fleet and infrastructure. Comprehensive Program for Russian Federation Aviation Industry Development until 2030 objective is to ensure the air transport connexity of the regions, mobility of the citizens and the necessary flight safety level, along with technological sovereignty within the air transportation industry. The number of aircraft necessary for fleet update and replenishment, the optimal classification, supply scopes and periods are chosen, periods of domestic production components production are scheduled, full range of domestic aircraft maintenance is formed and sanctions negative effects are reduced, including foreign made aircraft supply, maintenance and leasing in order to preserve air service competitive market.

Figure 1 shows the forecast data on domestic production aircraft supply according to Appen-

dix 2 for Comprehensive Program for Russian Federation Aviation Industry Development (as amended by Decree of Russian Federation Government No. 1102-r dated May 4, 2024).

Russian manufacturers are currently facing the urgent challenge of developing the mechanisms providing the ongoing aircraft operation by the domestic airlines and maintaining high flight safety level [1, 2]. Measures on foreign aircraft maintenance on the territory of the Russian Federation along with their certain type design modification and substitute domestic domestically produced components implication, which are going or have already gone through testing for new domestic production aircraft under development, were initiated [3].

Research methods and methodology

Making a list of priority components [4, 5] is a primary objective in corrective actions projects. Trade-off fleet retirement analysis is conducted for aircraft in operation on condition of taking or not taking the above mentioned measures. Accuracy and basing on real statistics, not on forecasts or assumptions [6] are principal benefits of this technique.

"ПРИЛОЖЕНИЕ № 2 к комплексной программе развития авиационной отрасли Российской Федерации до 2030 года (в редакции распоряжения Правительства Российской Федерации от 4 мая 2024 г. № 1102-р) ПРОГНОЗНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ поставок авиационной техники отечественного производства по годам											
Тип воздушного судна	Вместимость, человек	2022 год	2023 год	2024 год	2025 год	2026 год	2027 год	2028 год	2029 год	2030 год	Всего, единиц
Самолеты:											
SSJ-NEW	98 - 103	-	-	-	-	30	28	28	28	28	142
МС-21-310	181 - 211	-	-	-	9	31	36	50	72	72	270
Ил-114-300	64 - 68	-	-	-	-	3	12	12	12	12	51
Ту-214	150 - 215	1	1	1	4	7	17	28	28	28	115
Ил-96-300	237 - 300	1	1	-	2	1	2	2	3	2	14
ТВРС-44 "Ладoga"	44	-	-	-	-	-	-	35	35	35	105
"Освей" (ЛМС-192)	15 - 19	-	-	-	-	-	20	46	46	46	158
"Байкал" (ЛМС-901)	9	-	-	-	5	25	25	25	25	34	139
Итого		2	2	1	20	97	140	226	249	257	994

Fig. 1. Supply forecast of domestic aircraft
(headlines downwards: Appendix 2 for Comprehensive Program for Russian Federation Aviation Industry Development (as amended by Decree of Russian Federation Government No. 1102-r dated May 4, 2024). Supply forecast of domestic production aircraft arranged by the years.
Table header, left to right: aircraft type, seat capacity (by number of people), 2022-2030, a total of units. Aircraft, downwards: SSJ-NEW, Yakovlev MC-21-310, Ilyushin Il-114-300, Tupolev Tu-214, Ilyushin-96-300, TVRS-44 Ladoga, UZGA LMS-901 Baikal Total

There is a number of aircraft in operation by years provided not taking any measures in terms of component technological sovereignty shown in continuous line in Figure 2. At the same time the dashed diagram area shows the aircraft number in case of domestic production components application. Graph in Figure 3 shows that these measures are mostly efficient up to 2029, as the retirement due to lifetime is the reason of further decrease in number of aircraft in operation.

The monthly schedule of putting new Russian-made aircraft into operation is unknown. We assume that they are transferred to airlines annually in December. Thus, the schedules for the retirement of the aircraft fleet and the ones newly developed and put into operation appear like shown in Figure 4.

Trade-off analysis shows that even if new aircraft are put into operation, their retirement is so quick that the total number of aircraft in oper-

ation is significantly reduced. Under these circumstances, transition to cannibalism is natural one or more units of equipment are selected in order to ensure spare parts for its remaining units [7].

When performing the analysis in this study, the possibility of cannibalization, as well as repair or maintenance of foreign components at a Russian industry enterprise, is not taken into account. Each component is considered independently, assuming that components do not influence each other.

All of the above proves the need to build a global mathematical model and then form a mathematical optimization problem based on it. At the same time, it is quite difficult to give an exhaustive representation of it taking into account all existing internal connections of objects, as well as the impact of external factors. Based on [8], in such a case, it is usually necessary to

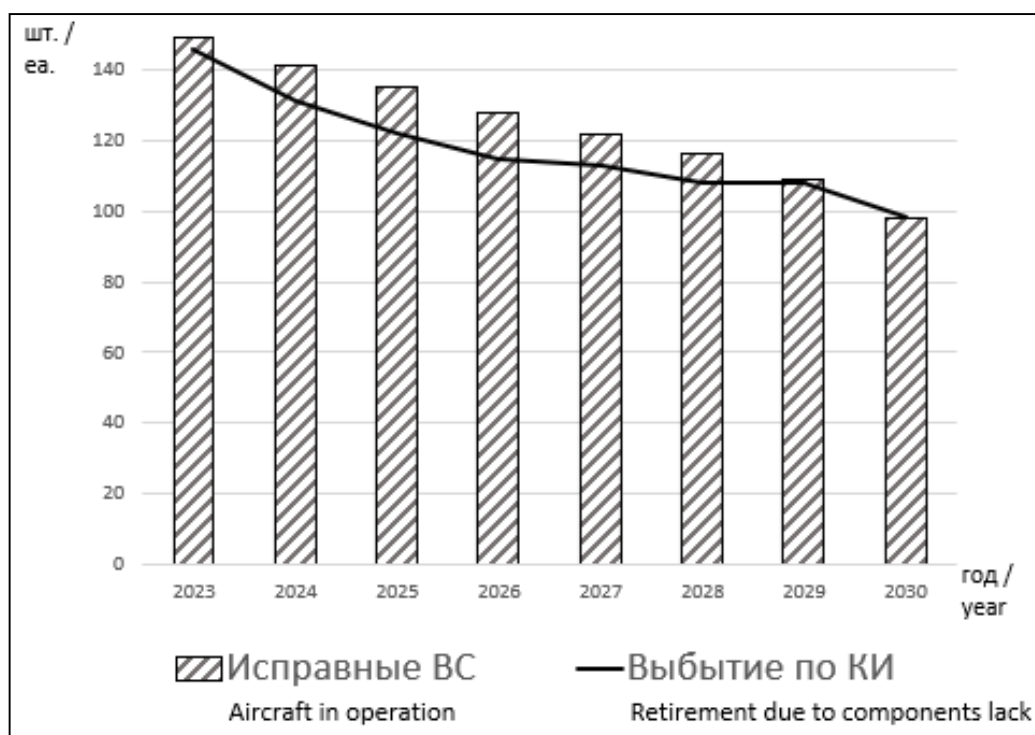


Fig. 2. Aircraft fleet retirement schedule considering the retirement due to components lack

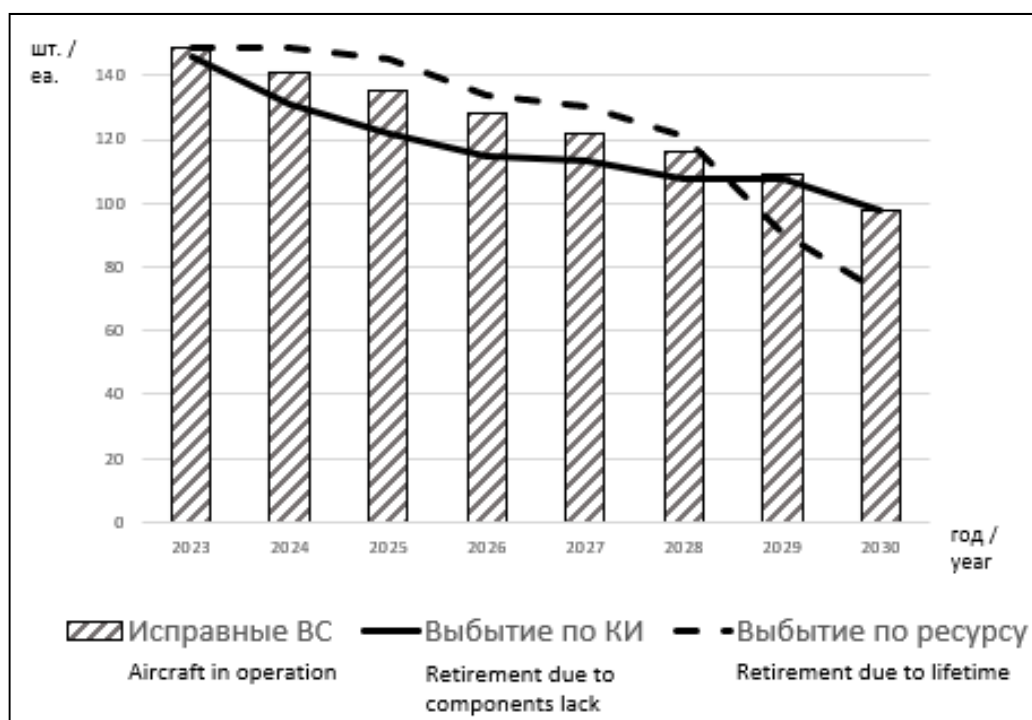


Fig. 3. Aircraft fleet retirement schedule considering the retirement due to lifetime

identify and take into account only the most important aspects of the object under study in order to make its mathematical description possible, as

well as the subsequent solution of the problem, while unaccounted factors should not significantly affect the final result of optimization.

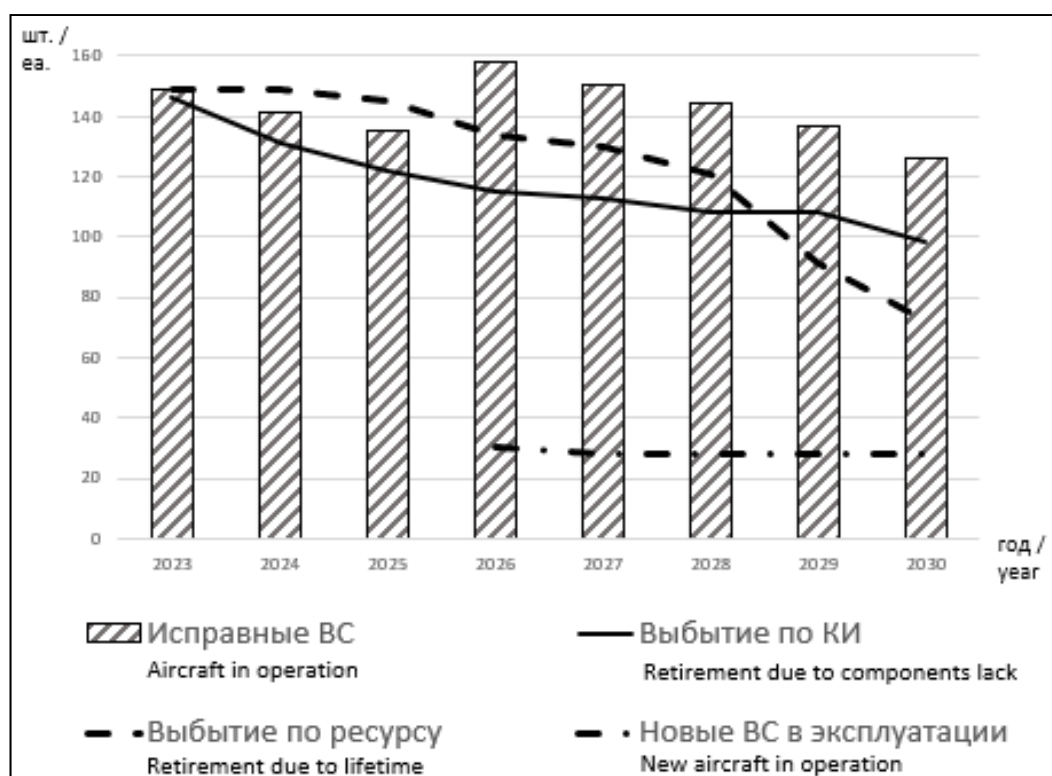


Fig. 4. Aircraft in operation number changes schedule

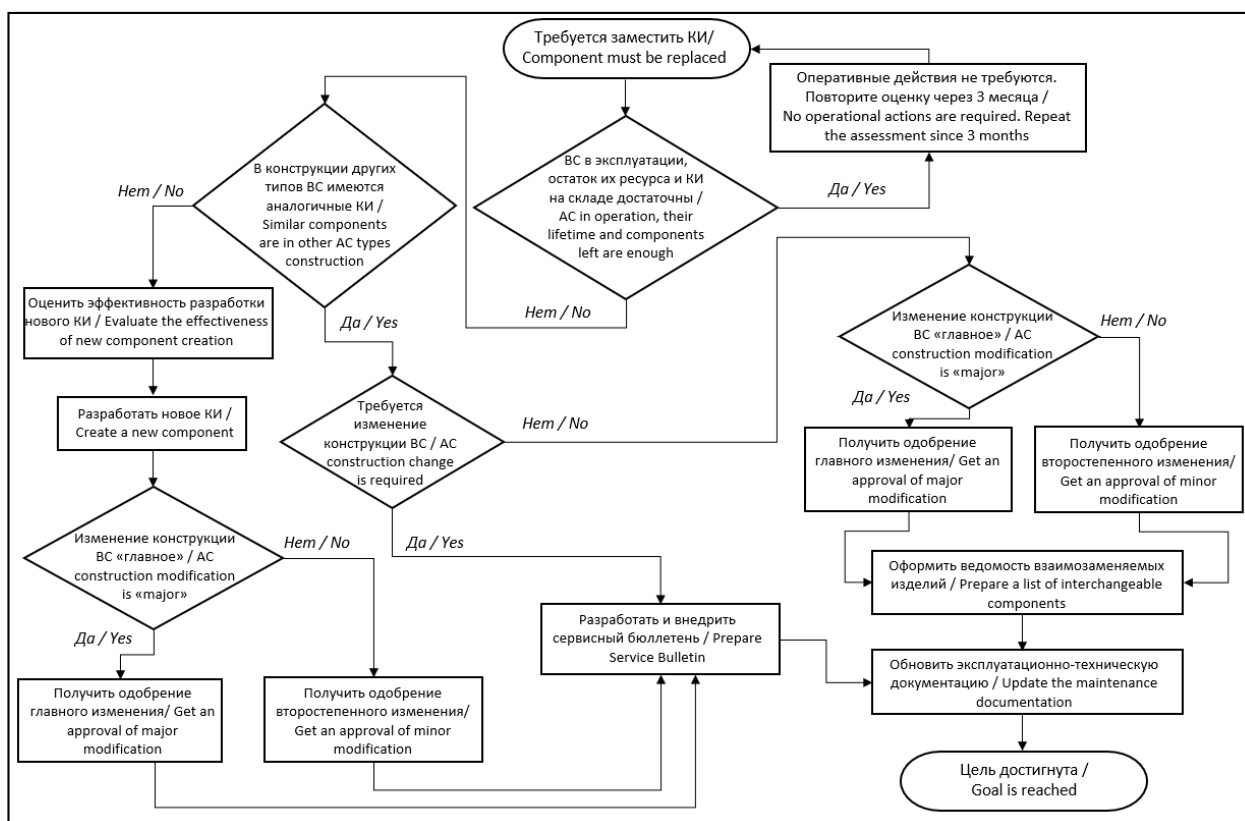


Fig. 5. Process of technological sovereignty ensuring flowchart

This study presents a flowchart developed by the authors for the process of ensuring technological sovereignty, where the input is the emerging need for import substitution of components on the aircraft in operation. This diagram is used to detail the process and also displays the sequence of operations required to be performed.

Figure 5 shows that in order to introduce an alternative domestic product into a standard aircraft design, it is necessary to perform a sequence of actions typical for the process approach [9].

Thus, it is advisable to consider the activities to ensure the technological sovereignty of the aircraft fleet in operation as a set of projects. In this case, each of the changes introduced into the standard aircraft design can be taken as a separate project [10]. At the same time, they all compete for both financial and organizational resources of the aircraft developer, industry production enterprises and certification centers. Consequently, the introduction of domestic production components into the standard aircraft design is a program, the management of which allows for the maximum effect of the import phase-out process [11].

To ensure the most efficient operation of aircraft, it is necessary that their number in the fleet were as large as possible [12]. This paper does not consider the process of putting new aircraft into operation, as it does not depend on ensuring the technological sovereignty of the industry. It is believed that it does not have a significant impact on the disposal of aircraft currently in operation.

Achieving the maximum possible number of aircraft in the fleet is possible in the event of the implementation of the projects of the highest priority [13]. This problem is solved in within the framework of program management [14].

It is known that the highest priority is given to those projects that have a greater effect and lower costs [15]. At the same time, to ensure technological sovereignty, it is necessary to implement projects in parallel [16].

In this study, the absence of synergy is assumed: the influence of the effect of previously completed projects of the program on subsequent

projects. At the same time, the effect of completed projects does not increase the budget of the program as a whole [17].

Taking V_i as the priority of the i -th project, the total priority of a program that includes n projects can be written as

$$SUM = V_1P_1 + V_2P_2 + \dots + V_nP_n; \quad (1)$$

where the variables P_i take the value 1 if the project is implemented, and the value 0 if the project is postponed.

For further formulation of the optimization problem, SUM is taken as the objective function. Thus, the optimization problem in implementing technological sovereignty of the aviation industry can be formulated as follows.

$$SUM \rightarrow \max. \quad (2)$$

The constraints in this case are:

– the total budget of the implemented projects for the introduction of domestic production components into the type design of aircraft in operation, in this program:

$$C_1P_1 + C_2P_2 + \dots + C_nP_n \leq C; \quad (3)$$

– program resource intensity:

$$L_1P_1 + L_2P_2 + \dots + L_nP_n \leq L. \quad (4)$$

The program for ensuring technological sovereignty of the aviation industry assumes a phased implementation [18]. In this case, the launch of at least one project in terms of introducing Russian made components into a standard aircraft design, subject to sufficient budget and resources, partially restored after the completion of a previously launched project, is the next stage of the program. In this case, the restrictions on C_i and L_i , given above, change at each subsequent stage.

For the subsequent formation of a list of priority components, it is necessary to take into account data in the form of the number of foreign-made components remaining in warehouses, as well as data on their reliability and assessment of their failures in operation. At the same time, the

process of import substitution of components should ensure the safe operation of aviation equipment with a given level of flight regularity.

The required parameter V_i , which allows to form and sort the list of the most critical components, is calculated as follows:

$$V_i = \left(T_i - \frac{S_i}{U_i} \right). \quad (5)$$

Here T_i is the period of time during which it is necessary to ensure the operation of the aircraft due to the components stock available in the warehouse. As shown above in Figure 3, these measures will be effective within the next 72 months. Therefore, within the framework of this study, we take the value of T_i equal to 72 months. Also here is S_i the remainder of serviceable components in warehouses, U_i is the current components consumption in operation per unit of time.

The parameter U_i is determined based on the number of components of one type installed on the aircraft, the planned fleet of aircraft and its planned flight time, as well as the statistics of failures and reliability indicators of components (MTBUR):

$$U_i = \frac{n_i \cdot P_i \cdot F_i}{MTBUR_i}. \quad (6)$$

Here n_i is the number of certain type components installed on one aircraft, P_i is the planned number of aircraft in the operating fleet (according to the 2023 data presented in Figure 2, this parameter takes the value of 149), F_i is the flight hours per aircraft, $MTBUR_i$ is the Mean Time Between Unscheduled Removals.

Research results

The list of 987 components, mostly influencing further aircraft fleet operation was formed and prioritized according to the trade-off analysis conducted. The necessary solutions on each component were classified in accordance with the process block scheme in Figure 5 in the following way:

- foreign-made components replacement for the equivalent certified domestic production one without any extra development necessity;
- foreign-made components replacement for the equivalent certified domestic production one with the necessity of aircraft structure development;
- a brand-new Russian-made component development with its implementation into the aircraft structure.

987 projects by the number of selected and prioritized components were considered within the program of aviation technological sovereignty. The results of the research are presented below in ten entries.

Table 1 shows that sensor with the parameter $V = 71$ months is the most crucial in terms of technological sovereignty ensuring. In other words, in given period of 72 months stocking with current aircraft fleet flight experience will be enough for 1 month.

Project resource intensity, duration and cost directly depends on technical solution according to block-scheme of technological sovereignty ensuring process. Table 2 data are received for the 10 components considered.

The following optimization restrictions are adopted in this research:

- the project summary budget C is 1000000 rub.;
- program resource intensity L is 100%.

First-stage restrictions according to project priority:

$$87\,823 \cdot 1 + 0 + 0 + 0 + 0 + 131\,594 \cdot 1 + 0 + 0 + 766\,373 \cdot 1 + 0 \leq 1000000; \quad (7)$$

$$15\% \cdot 1 + 0 + 0 + 0 + 0 + 20\% \cdot 1 + 0 + 0 + 60\% \cdot 1 + 0 \leq 100\%. \quad (8)$$

Project delivery stages may be presented by Gant diagram [19].

Project delivery in 12 months is shown in Figure 6. It is shown that resource release takes

Table 1

Components prioritized list

№	Name	S, stock balance, ea (each)	MTBUR	Quantity per aircraft, ea (each)	Component con- sumption, ea (each)/month	V, month
1	Sensor	2	11 077	1	2.06	71.0
2	Valve	4	12 378	2	3.68	70.9
3	Pump	5	49 071	3	1.39	68.4
4	Gate	9	32 714	2	1.39	65.5
5	Board	7	22 900	1	0.99	65.0
6	Antenna	76	11 644	3	5.87	59.0
7	Alarm system	21	127 221	5	0.90	48.5
8	Fan	8	149 902	2	0.30	45.7
9	Module	26	26 378	1	0.86	41.9
10	Computer	13	57 249	1	0.40	39.3

Table 2

Technical solutions

№	Name	Technical solution type	Duration, month	Resource intensity, %	Price, rub.	Price per 1 month, rub.
1	Sensor	Without any extra development	2	15	175 645	87 823
2	Valve	Without any extra development	2	15	202 587	101 294
3	Pump	Extra development	6	20	675 999	112667
4	Gate	Extra development	6	20	543 897	90 650
5	Board	Extra development	6	20	890 654	148 442
6	Antenna	Extra development	6	20	789 566	131 594
7	Alarm system	Extra development	6	20	1 065 066	177 511
8	Fan	Extra development	6	20	589 678	98 280
9	Module	Development of a brand-new component	36	60	27 589 432	766 373
10	Computer	Development of a brand-new component	36	60	31 654 389	879 289

		1 мес	2 мес	3 мес	4 мес	5 мес	6 мес	7 мес	8 мес	9 мес	10 мес	11 мес	12 мес
1	Датчик												
2	Заслонка												
3	Насос												
4	Клапан												
5	Пульт												
6	Антенна												
7	Сигнализатор												
8	Вентилятор												
9	Блок												
10	Компьютер												

Fig. 6. Implementation stage within program framework (downwards: sensor, valve, pump, gate, board, antenna, alarm system, fan, module, computer; Table header, left to right: months from 1 to 12)

place after each project maturation. At the same time the budget for the period is saved for the next stage [20]. This allows to start the further

project delivery in accordance with their priority on the second stage of the program [21].

Results discussion and conclusion

Research showed that aviation industry technological sovereignty ensuring in terms of components is relevant nowadays. It is necessary to reduce aircraft retirement due to lack of components, by using their maximum number in operation.

To achieve this goal, the authors proposed to use the basic principles of software control. With their help, the optimization problem was formulated in the work. Calculations performed on the example of 10 components showed a satisfactory result. In further research, to solve the problem with modern software, it is proposed to build an algorithm.

The results of this work can be used by both design bureau employees and maintenance and repair organizations to create an effective strategy for continued airworthiness of the fleet. They allow you to form plans for the development of components, their purchases and deliveries, taking into account the needs of operating organizations.

References

1. **Omarov, Z.G.** (2022). Issues of aircraft exploitation at the present stage. *Voennaya mysl'*, no. 4, pp. 112–116. (in Russian)
2. **Kapoguzov, E.A.** (2022). Import dependency of the Russian civil aviation industry: development prospects in the light of “sanctions 2022”. *Tomsk State University Journal of Economics*, no. 58, pp. 58–76. DOI: 10.17223/19988648/58/4 (in Russian)
3. **Romanov, M.I.** (2021). Analysis of the current state of the export potential of Russian civil aircraft products. *Industrial Economics*, no. 3-2, pp. 89–96. DOI: 10.47576/2712-7559_2021_3_2_89 (in Russian)
4. **Rampersad-Jagmohan, M., Wang, Y.** (2024). Predictive Analytics in Aviation Management. In: *Advanced Manufacturing and Automation XIII*, vol. 1154, pp. 401–406. DOI: 10.1007/978-981-97-0665-5_52
5. **Verhoeff, M., Verhagen, W.J.C.** (2023). Component maintenance planning optimization in defense aviation. *Aerospace*, vol. 10, issue 3, p. 255. DOI: 10.3390/aerospace10030255/ (accessed: 16.08.2024).
6. **Novikova, T.V., Blinov, A.A.** (2022). Application of comparative approach methods in russian practice. *Chronos Journal*, vol. 6, no. 11 (73), pp. 173–176. DOI: 10.52013/2658-7556-73-11-51 (in Russian)
7. **Kiselev, Y.V., Kiselev, D.Y.** (2014). Current ideas about the organization interactions in technical maintenance system of aircraft equipment. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*, vol. 16, no. 1-5, pp. 1407–1413. (in Russian)
8. **Kostin, V.N., Kalinin, A.N.** (2008). Methods of optimization in examples and tasks: Tutorial. Orenburg: OGU, 153 p. (in Russian)
9. **Fadeeva, N.V.** (2022). Process approach to management: definitions and interpretations. *Ekonomika stroitelstva*, no. 11, pp. 30–37. (in Russian)
10. **Baklanova, Yu.O.** (2012). Evolution of the approach to project innovation management: initiative, project, program, portfolio. *Sovremennyye tekhnologii upravleniya*, no. 3, pp. 1–8. (in Russian)
11. **Itskovich, A.A., Chernov, A.O., Fainburg, G.D., Fainburg, I.A.** (2017). Increasing the aircraft airworthiness maintenance efficiency based on the project management methodology. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 20, no. 1, pp. 26–35. (in Russian)
12. **Kul, R.H., Ates, M.** (2024). A comprehensive review on the global aviation industry and aircraft maintenance management processes. *Izlek Akademik Dergi*, vol. 6, issue 1, pp. 20–36. DOI: 10.53804/izlek.1460088/ (accessed: 16.08.2024).
13. **Kandibko, N.V.** (2013). Project methods in management of defense-industrial complex innovation and investment activity. *Vestnik moskovskogo universiteta im. S.Yu. Vitte. Seriya 1: ekonomika i upravleniye*, no. 2 (4), pp. 52–58. (in Russian)
14. **Borhan, N.H., Zulzalil, H., Hassan, S., Ali, N.M.** (2022). Requirements prioritization in agile projects: from experts' perspectives. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, vol. 100, no. 19, pp. 5710–5723.

15. Sapegina, O.A., Sumina, E.V. (2016). Projects prioritization as a basis for a strategic development of a company in a crisis. *Ekonomika i sotsium*, no. 10 (29), pp. 875–877. (in Russian)

16. Rudenko, M.N., Subbotina, Y.D. (2019). The organization's project management maturity assessment. *Upravlencheskoye konsul'tirovaniye*, no. 7, pp. 50–55. (in Russian)

17. Wagner, D.N. (2017). Learning from Aviation project resource management to avoid project failure. *PM World Journal*, vol. 6, issue 2, 11 p. Available at: https://www.researchgate.net/publication/320839951_Learning_from_Aviation_Project_Resource_Management_to_avoid_Project_Failure (accessed: 20.08.2024).

18. Ciric, D., Delic, M., Lalic, B., Gracanin, D., Lolic, T. (2021). Exploring the link between project management approach and project success dimensions: A structural model approach. *Advances in Production Engineering & Management*, vol. 16, issue 1, pp. 99–111. DOI: 10.14743/apem2021.1.387/ (accessed: 16.08.2024).

19. Petrov, T.V. (2017). Network planning as a project management tool. *Forum molodykh uchynykh*, no. 6 (10), pp. 1391–1397. (in Russian)

20. Bogomolov, D.V., Kharchenko, M.E. (2017). Planning the work of aviation units using project management tools. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 20, no. 1, pp. 88–96. (in Russian)

21. Ildarkhanova, A.K. (2018). Development of a model of financial efficiency of design and technological preproduction project portfolio on the basis of project team members employment optimization. *Financial Analytics: Science and Experience*, vol. 11, no. 3 (345), pp. 256–268. DOI: 10.24891/fa.11.3.256 (in Russian)

Список литературы

1. Омаров З.Г. Проблемы эксплуатации авиационной техники на современном этапе // Военная мысль. 2022. № 4. С. 112–116.

2. Капогузов Е.А. Импортозависимость Российской гражданской авиационной про-

мышленности // Вестник Томского государственного университета. Экономика. 2022. № 58. С. 58–76. DOI: 10.17223/19988648/58/4

3. Романов М.И. Анализ современного состояния экспортного потенциала Российской продукции гражданского авиастроения // Индустриальная экономика. 2021. № 3-2. С. 89–96. DOI: 10.47576/2712-7559_2021_3_2_89

4. Rampersad-Jagmohan M., Wang Y. Predictive Analytics in Aviation Management // Advanced Manufacturing and Automation XIII. 2024. Vol. 1154. Pp. 401–406. DOI: 10.1007/978-981-97-0665-5_52

5. Verhoeff M., Verhagen W.J.C. Component maintenance planning optimization in defense aviation [Электронный ресурс] // Aerospace. 2023. Vol. 10, iss. 3. P. 255. DOI: 10.3390/aerospace10030255/ (дата обращения: 16.08.2024).

6. Новикова Т.В., Блинов А.А. Применение методов сравнительного подхода в российской практике // Chronos Journal. 2022. Т. 6, № 11 (73). С. 173–176. DOI: 10.52013/2658-7556-73-11-51

7. Киселев Ю.В., Киселев Д.Ю. Текущие представления об организации взаимодействия в системе технической эксплуатации авиационной техники // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2014. Т. 16, № 1-5. С. 1407–1413.

8. Костин В.Н., Калинин А.Н. Методы оптимизации в примерах и задачах: учеб. пособие. Оренбург: ОГУ, 2008. 153 с.

9. Фадеева Н.В. Процессный подход к управлению: дефиниции и интерпретации // Экономика строительства. 2022. № 11. С. 30–37.

10. Бакланова Ю.О. Эволюция подхода к проектному управлению инновациями: инициатива, проект, программа, портфель // Современные технологии управления. 2012. № 3. С. 1–8.

11. Ицкович А.А. Повышение эффективности процессов поддержания летной годности воздушных судов на основе методологии управления проектами / А.А. Ицкович, А.О. Чернов, Г.Д. Файнбург, И.А. Файнбург // Научный вестник МГТУ ГА. 2017. Т. 20, № 1. С. 26–35.

12. **Kul R.H., Ates M.** A Comprehensive review on the global aviation industry and aircraft maintenance management processes [Электронный ресурс] // *Izlek Akademik Dergi*. 2024. Vol. 6, iss. 1. Pp. 20–36. DOI: 10.53804/izlek.1460088/ (дата обращения: 16.08.2024).

13. **Кандыбко Н.В.** Проектный подход к управлению инновационно-инвестиционной деятельностью предприятий оборонно-промышленного комплекса // *Вестник московского университета им. С.Ю. Витте. Серия 1: экономика и управление*. 2013. № 2 (4). С. 52–58.

14. **Borhan N.H.** Requirements prioritization in agile projects: from experts' perspectives / N.H. Borhan, H. Zulzalil, S. Hassan, N.M. Ali // *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. 2022. Vol. 100, no. 19. Pp. 5710–5723.

15. **Сапегина О.А., Сумина Е.В.** Приоритизация проектов как основа стратегического развития компании в условиях кризиса // *Экономика и социум*. 2016. № 10 (29). С. 875–877.

16. **Руденко М.Н., Субботина Ю.Д.** Оценка зрелости проектного управления организации // *Управленческое консультирование*. 2019. № 7 (127). С. 50–55. DOI: 10.22394/1726-1139-2019-7-50-55

17. **Wagner D.N.** Learning from aviation project resource management to avoid project

failure [Электронный ресурс] // *PM World Journal*. 2017. Vol. 6, iss. 2. 11 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/320839951_Learning_from_Aviation_Project_Resource_Management_to_avoid_Project_Failure (дата обращения: 20.08.2024).

18. **Ciric D.** Exploring the link between project management approach and project success dimensions: A structural model approach / D. Ciric, M. Delic, B. Lalic, D. Gracanin, T. Lolic [Электронный ресурс] // *Advances in Production Engineering & Management*. 2021. Vol. 16, iss. 1. Pp. 99–111. DOI: 10.14743/apem.2021.1.387/ (дата обращения: 16.08.2024).

19. **Петров Т.В.** Сетевое планирование как инструмент управления проектами // *Форум молодых ученых*. 2017. № 6 (10). С. 1391–1397.

20. **Богомолов Д.В., Харченко М.Э.** Планирование деятельности авиационных подразделений при помощи средств управления проектами // *Научный Вестник МГТУ ГА*. 2017. Т. 20, № 1. С. 88–96.

21. **Ильдарханова А.К.** Разработка модели финансовой эффективности портфеля проектов конструкторско-технологической подготовки производства на основе оптимизации загрузки участников проектной команды // *Финансовая аналитика: проблемы и решения*. 2018. Т. 11, № 3 (345). С. 256–268. DOI: 10.24891/fa.11.3.256

Information about the authors

Irina Y. Bodrova, Postgraduate Student of the Aircraft and Aircraft Engines Maintenance Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, irisha_i_b@mail.ru.

Aleksandr V. Gostev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Design and Certification of Aircraft Chair, Moscow Aviation Institute (National Research University), aleksgostev@yandex.ru.

Grigory D. Fainburg, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Aircraft and Aircraft Engines Maintenance Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, fain2000@mail.ru.

Сведения об авторах

Бодрова Ирина Евгеньевна, аспирант кафедры технической эксплуатации летательных аппаратов и авиационных двигателей МГТУ ГА, irisha_i_b@mail.ru.

Гостев Александр Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования и сертификации авиационной техники МАИ (НИУ), aleksgostev@yandex.ru.

Файнбург Григорий Давидович, кандидат технических наук, доцент кафедры технической эксплуатации летательных аппаратов и авиационных двигателей МГТУ ГА, fain2000@mail.ru.

Поступила в редакцию	11.09.2024	Received	11.09.2024
Одобрена после рецензирования	11.11.2024	Approved after reviewing	11.11.2024
Принята в печать	23.01.2025	Accepted for publication	23.01.2025

УДК 621.396.96

DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-1-20-38

Применение Seq2seq-моделей для прогнозирования развития грозовой деятельности с целью повышения уровня ситуационной осведомленности пилота в полете

Г.В. Коваленко¹, И.А. Ядров¹

¹ Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А.А. Новикова, г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация: В статье представлены результаты применения моделей Seq2seq на основе нейронных сетей для наукастинга – прогнозирования с заблаговременностью до 2 часов грозовой активности с целью повышения ситуационной осведомленности экипажей воздушных судов. На основе данных радиолокационных метеорологических наблюдений за грозовыми очагами были созданы и обучены различные рекуррентные и сверточные рекуррентные модели. Результаты исследования показали, что сверточные рекуррентные нейронные сети (ConvRNN, ConvLSTM, ConvGRU) превосходят классические рекуррентные модели, и при этом позволяют улучшить прогноз развития грозы на 25–30 % по метрике RMSE (корень среднеквадратической погрешности) по сравнению с базовой моделью, каждый раз в качестве предсказания выбирающей последнее доступное на момент предсказания радиолокационное изображение. Тем не менее, несмотря на то что сверточные рекуррентные сети позволяют достаточно точно передать общую тенденцию изменения формы грозового облака, точность предсказания интенсивности элементов грозового очага оказывается, как правило, завышенной. Применение предложенной технологии прогнозирования грозовой активности может способствовать повышению уровня ситуационной осведомленности летного экипажа, улучшая проекцию текущей обстановки на ближайшее будущее и оптимизируя процесс принятия решений по обходу грозы за счет предоставления членам экипажа прогностической информации о развитии грозы на экране навигационного дисплея. В рамках будущих исследований предполагается дальнейшая оптимизация архитектуры моделей, а также интеграция прогностической технологии в системы поддержки принятия решений экипажем.

Ключевые слова: Seq2seq, прогнозирование, рекуррентные нейронные сети, сверточные рекуррентные нейронные сети, ситуационная осведомленность, обход грозы.

Для цитирования: Коваленко Г.В., Ядров И.А. Применение Seq2seq-моделей для прогнозирования развития грозовой деятельности с целью повышения уровня ситуационной осведомленности пилота в полете // Научный вестник МГТУ ГА. 2025. Т. 28, № 1. С. 20–38. DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-1-20-38

Application of Seq2Seq models for predicting the development of thunderstorm activity to enhance the pilot's situational awareness in flight

G.V. Kovalenko¹, I.A. Yadrov¹

¹ Saint Petersburg State University of Civil Aviation named after Chief Marshal of Aviation A.A. Novikov, St. Petersburg, Russia

Abstract: The paper presents the results of application of Seq2seq models based on neural networks for nowcasting-forecasting with a lead time of up to 2 hours – of thunderstorm activity in order to increase situational awareness of aircraft crews. Various recurrent and convolutional recurrent models were created and trained on the basis of radar meteorological observations of thunderstorm cells. The results showed that convolutional recurrent neural networks (ConvRNN, ConvLSTM, ConvGRU) outperform classical recurrent models and improve the thunderstorm forecast by 25–30% in terms of RMSE (root mean square

error) metric compared to the baseline model, which always selects the most recent radar image available at the time of prediction. Nevertheless, despite the fact that the convolution recurrence models can accurately represent the general trend of thunderstorm cloud shape changes, the accuracy of predicting the intensity of thunderstorm cells is usually overestimated. Application of the proposed thunderstorm activity forecasting technology can enhance the situational awareness of the flight crew improving the projection of the current situation into the near future and optimizing the decision-making process for thunderstorm avoidance by providing crew members with predictive information about thunderstorm development on the navigation display screen. Future research is expected to further optimize the model architecture and integrate the predictive technology into flight crew decision support systems.

Key words: Seq2seq, prediction, recurrent neural networks, convolutional recurrent neural networks, situational awareness, thunderstorm avoidance.

For citation: Kovalenko, G.V., Yadrov, I.A. (2025). Application of Seq2Seq models for predicting the development of thunderstorm activity to enhance the pilot's situational awareness in flight. Civil Aviation High Technologies, vol. 28, no. 1, pp. 20–38. DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-1-20-38

Введение

Ситуационную осведомленность члена летного экипажа воздушного судна (ВС) при выполнении полета можно определить как совокупность: 1) восприятия элементов окружающей среды; 2) понимания их значения; 3) проекции их состояния на ближайшее будущее [1]. Уровень безопасности и надежности, с которым экипажи ВС гражданской авиации выполняют полет, во многом обусловлен уровнем их ситуационной осведомленности [2, 3]: этот факт подтверждает актуальность работы по поддержанию и повышению ситуационной осведомленности пилота на различных этапах полета.

Сложности в обеспечении необходимого уровня ситуационной осведомленности могут возникать при выполнении полета в условиях неопределенности, например при полетах в зонах грозовой деятельности и сильных ливневых осадков. Нетривиальность процесса принятия решения по выбору оптимального маршрута обхода грозы подчеркивается в работе [4]: находясь в одних и тех же условиях, пилоты могут принять кардинально различающиеся решения по обходу зоны грозовой активности, причем сам процесс принятия решения усложняется необходимостью учитывать тенденцию развития грозовых очаговых движений относительно ВС. Предполагается, что предоставление членам экипажа на экране навигационного дисплея прогностической информации о развитии грозы (а также информации о местоположении ВС

относительно грозовых очагов в соответствующие моменты времени в соответствии с текущим планом полета) может способствовать повышению ситуационной осведомленности пилотов, оптимизации процесса работы экипажа при выполнении полетов в сложных метеорологических условиях и, как следствие, принятию наиболее рациональных решений по обходу грозы.

Стоит отметить, что в настоящей работе бортовые радиолокаторы рассматриваются в качестве единственного источника информации, на основе которой предполагается осуществлять прогнозирование развития очагов грозовой деятельности. Достоинство такого подхода заключается в простоте и автономности предлагаемого метода прогнозирования, который, таким образом, не будет зависеть от наличия информации от прочих источников – спутниковых систем, станций наземной сети, грозопеленгаторов и т. д. В то же время объединение данных из различных источников потенциально могло бы позволить учесть большее количество факторов, влияющих на развитие гроз, и обеспечить более полную картину атмосферных процессов: такой подход имеет большой практический интерес, поскольку может способствовать значительному улучшению качества и точности прогнозов, тем не менее его реализация требует разработки новых алгоритмов обработки и интеграции данных о развитии гроз и выходит за пределы настоящего исследования.

Прогнозирование развития грозового очага может быть рассмотрено как решение за-

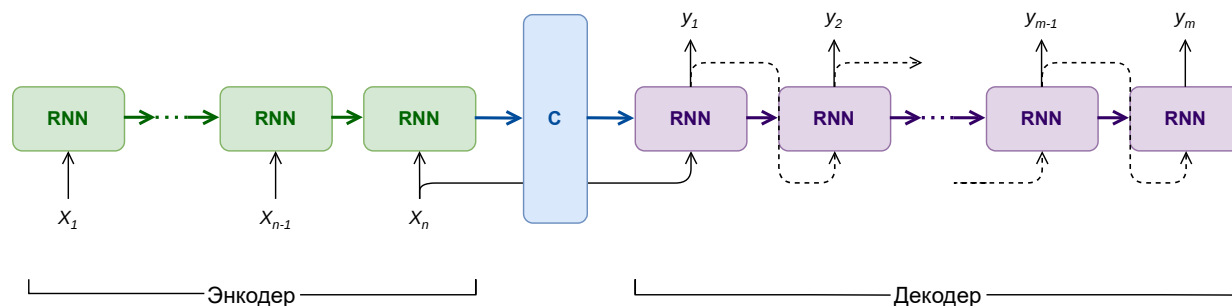


Рис. 1. Seq2seq-модель [12]: *RNN* – Recurrent Neural Network, рекуррентная нейронная сеть; *C* – контекстный вектор; x_i – элемент входной последовательности; y_i – элемент выходной последовательности

Fig. 1. Seq2seq architecture [12]: *RNN* – Recurrent Neural Network; *C* – context vector; x_i – input sequence element; y_i – output sequence element

дачи предсказания временных рядов, при которой параметры используемой для этого модели машинного обучения подбираются таким образом, чтобы наиболее точно уловить закономерности во временных данных, а также выделить наиболее правдоподобный сценарий развития ситуации [5]. К классическим методам предсказания временных рядов можно отнести как разработанные специально для решения данной задачи модели, такие как, например, интегрированная модель авторегрессии – скользящего среднего ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average) и ее модификации [6] или модель экспоненциального сглаживания (Exponential Smoothing) [7], так и более общие классические подходы, как, например, модели градиентного бустинга [8]. Главными достоинствами таких моделей являются их стабильность при работе с «табличными» данными и относительная легкость интерпретации параметров моделей [9]. Тем не менее современные исследования показывают, что в случае применения таких моделей для прогнозирования в задачах, где данные имеют более сложную, «нетабличную» структуру (изображения, текст, звук) или где необходимо учитывать более сложные нелинейные взаимосвязи между элементами входной последовательности, классические модели показывают заметно более слабый результат по сравнению с нейросетевыми подходами: так, модель LSTM (Long Short-Term Memory, длинная цепь элементов краткосрочной памяти) про-

демонстрировала превосходство над классической ARIMA на 5–15 % по метрикам MAPE (Mean Absolute Percentage Error, средняя абсолютная ошибка) и sMAPE (Symmetric MAPE, симметричная средняя абсолютная ошибка) [10], а более сложные архитектурные решения, как, например, модели Seq2seq (Sequence-to-sequence, генерация последовательности на основе последовательности), превзошли показатели классических моделей на 20–30 % [11].

Архитектура Seq2seq [12] представляет собой нейросетевую модель, предназначенную для прогнозирования выходной последовательности $Y = [y_1, y_2, \dots, y_m]^T$ некоторой заданной длины m на основе входной последовательности $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ длины n таким образом, чтобы максимизировать условную вероятность $\Pr(Y|X) = \prod_{t=1}^m \Pr(y_t | y_{1:(t-1)}, X)$, при этом выходное значение y_t в момент времени t определяется как матрицей входных векторов X , так и всеми предшествующими выходными значениями $y_{1:(t-1)}$. Модель Seq2seq состоит из энкодера и декодера: на основе набора обучающих примеров X энкодер формирует контекстный вектор C , который в свою очередь используется в декодере для генерации результирующей матрицы Y и в дальнейшем обновляется после получения на вход декодера очередного предыдущего предсказания y_{t-1} (рис. 1). В основе функционирования описанной модели лежит принцип формирования и обновления вектора скрыто-

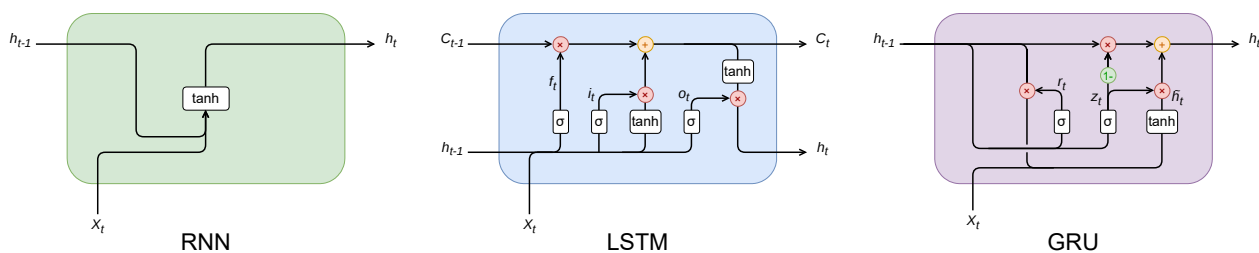


Рис. 2. Схемы ячеек рекуррентных нейронных сетей [16]: *RNN* – рекуррентная нейронная сеть; *LSTM* – длинная цепь элементов краткосрочной памяти; *GRU* – управляемый рекуррентный блок

Fig. 2. Recurrent neural networks cells [16]: *RNN* – Recurrent Neural Network; *LSTM* – Long Short-Term Memory; *GRU* – Gated Recurrent Unit

го состояния, реализованный в рекуррентных нейронных сетях (Recurrent Neural Networks, RNN).

К рекуррентным относят класс нейронных сетей, в которых связи между элементами образуют направленную последовательность [13]: за счет формирования и обновления вектора скрытого состояния h_t нейронная сеть в каждый момент времени несет в себе информацию об элементах входной последовательности, поступивших на вход сети ранее. Структуру классической RNN [14] можно описать с помощью уравнений обновления скрытого состояния h_t и получения предсказания y_t в момент времени t (рис. 2):

$$h_t = \sigma(W_{hh}h_{t-1} + W_{xh}x_t + b_h), \quad (1)$$

$$y_t = W_{hy}h_t + b_y, \quad (2)$$

где h_t – вектор скрытого состояния в момент времени t ; x_t – входной вектор в момент времени t ; σ – некоторая нелинейная функция активации, как правило гиперболический тангенс или ReLU (Rectified Linear Unit, линейный блок с выпрямлением) [15]; W_{hh} , W_{xh} и W_{hy} – матрицы весов (обучаемые параметры сети); b_h и b_y – свободные члены (обучаемые параметры сети).

Усовершенствованный способ хранения и обработки информации, попавшей на вход сети, реализован в модели LSTM [17]: в ней в дополнение к вектору скрытого состояния, в котором хранится краткосрочная информация, вводятся отвечающая за долгосрочное хранение информации ячейка памяти c_t , а также

коэффициенты i_t , f_t и o_t , известные как фильтр входа (input gate), фильтр забывания (forget gate) и фильтр выхода (output gate) соответственно: эти коэффициенты принимают значения на отрезке $[0, 1]$ и позволяют изменять значения соответствующих векторов путем их поэлементного перемножения на коэффициенты i_t , f_t и o_t при прохождении входного вектора через LSTM-ячейку (рис. 2):

$$i_t = \sigma(W_{xi}x_t + W_{hi}h_{t-1} + b_i), \quad (3)$$

$$f_t = \sigma(W_{xf}x_t + W_{hf}h_{t-1} + b_f), \quad (4)$$

$$o_t = \sigma(W_{xo}x_t + W_{ho}h_{t-1} + b_o), \quad (5)$$

$$c_t = f_t \odot c_{t-1} + i_t \odot \tanh(W_{xc}x_t + W_{hc}h_{t-1} + b_c), \quad (6)$$

$$h_t = o_t \odot \tanh(c_t), \quad (7)$$

где W_{xi} , W_{hi} , W_{xf} , W_{hf} , W_{xo} , W_{ho} , W_{xc} и W_{hc} – матрицы весов (обучаемые параметры сети); b_i , b_f , b_o и b_c – свободные члены (обучаемые параметры сети); $\odot$ – оператор поэлементного умножения.

Другой разновидностью рекуррентных нейронных сетей является более легковесная по сравнению с LSTM (с меньшим числом обучаемых параметров) модель GRU (Gated Recurrent Unit, управляемый рекуррентный блок): в ней не используется ячейка памяти c_t , фильтры входа и забывания объединены в единый фильтр обновления z_t (update gate), отвечающий за то, какая доля предыдущего скрытого состояния h_{t-1} сохраняется в оче-

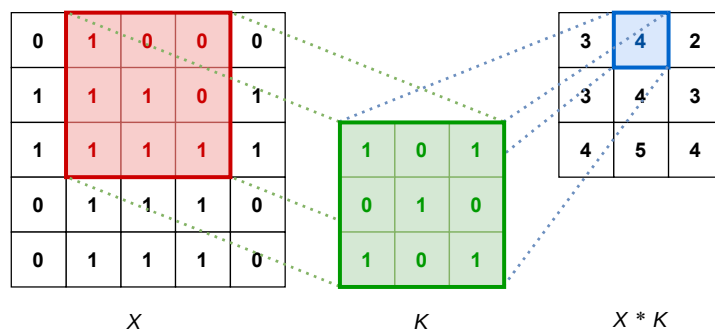


Рис. 3. Механизм свертки [20]: X – входная матрица; K – матрица-фильтр; $*$ – оператор свертки
Fig. 3. Convolution [20]: X – input matrix; K – kernel matrix; $*$ – convolution operator

редном состоянии h_t , а также добавлен фильтр сброса r_t (reset gate), определяющий долю информации h_{t-1} , которая на очередной итерации будет проигнорирована (рис. 2):

$$z_t = \sigma(W_{xz}x_t + W_{hz}h_{t-1} + b_z), \quad (8)$$

$$r_t = \sigma(W_{xr}x_t + W_{hr}h_{t-1} + b_r), \quad (9)$$

$$\tilde{h}_t = \tanh(W_{xh}x_t + r_t \odot (W_{hh}h_{t-1}) + b_h), \quad (10)$$

$$h_t = z_t \odot h_{t-1} + (1 - z_t) \odot \tilde{h}_t, \quad (11)$$

где W_{xz} , W_{hz} , W_{xr} , W_{hr} , W_{xh} и W_{hh} – матрицы весов (обучаемые параметры сети); b_z , b_r и b_h – свободные члены (обучаемые параметры сети).

Наиболее широкое применение рекуррентные нейронные сети нашли в задачах обработки естественного языка [18], когда входная последовательность нейронной сети представляет собой последовательность векторных представлений слов – эмбедингов. Тем не менее в виде вектора может быть представлено и изображение окружающей метеорологической обстановки, предоставляемое пилоту на экране бортового радиолокатора: для этого матрицу $\mathbb{R}^{m \times n}$, каждый элемент которой соответствует интенсивности пикселя навигационного дисплея, необходимо преобразовать в вектор $\mathbb{R}^{mn}$, после чего

последовательность таких векторов может быть передана на вход рекуррентной нейронной сети – элемента Seq2seq-модели – с целью получения прогноза развития грозы на заданный промежуток времени. Как отмечается в [19], очевидным недостатком такого подхода является неизбежная потеря полезной информации о взаимном расположении участков грозового очага в пространстве. Один из потенциальных путей решения описанной проблемы заключается в дополнительном использовании механизма свертки и переходе к сверточным рекуррентным нейронным сетям (ConvRNN, Convolutional RNN) [19].

Свертка представляет собой один из основных нейросетевых механизмов, предназначенный для сохранения заложенной в некоторой входной матрице X пространственной информации при прохождении X через нейронную сеть. Процесс свертки может быть представлен как создание новой матрицы $U = X * K$, получаемой в результате матричного умножения элементов исходной матрицы X на матрицу-фильтр K при последовательном «скольжении» фильтра по X слева направо, сверху вниз [20] (рис. 3).

Математически механизм свертки для входной матрицы $X \in \mathbb{R}^{H \times W}$ и фильтра $K \in \mathbb{R}^{h \times w}$ может быть описан следующим образом:

$$U[i, j] = (X * K)[i, j] = \sum_{m=0}^{h-1} \sum_{n=0}^{w-1} X[i + m, j + n] \cdot K[m, n], \quad (12)$$

где $*$ – оператор свертки; запись $U[i, j]$ соответствует элементу матрицы U , записанному в i -й строчке j -го столбца.

Таким образом, применение механизма свертки в рекуррентных нейронных сетях позволяет перейти к архитектуре ConvRNN, на вход которой в момент времени t подается матрица X_t , а матрица скрытого состояния H_t (в отличие от вектора скрытого состояния $RNNh_t$) обновляется в соответствии с законом

$$H_t = \sigma(W_{hh} * H_{t-1} + W_{xh} * X_t + b_h). \quad (13)$$

По аналогии с ConvRNN были разработаны сверточная разновидность модели LSTM – ConvLSTM – с дополнительным хранением долгосрочной информации в матрице памяти C_t [20]:

$$i_t = \sigma(W_{xi} * X_t + W_{hi} * H_{t-1} + b_i), \quad (14)$$

$$f_t = \sigma(W_{xf} * X_t + W_{hf} * H_{t-1} + b_f), \quad (15)$$

$$o_t = \sigma(W_{xo} * X_t + W_{ho} * H_{t-1} + b_o), \quad (16)$$

$$C_t = f_t \odot C_{t-1} + i_t \odot \tanh(W_{xc} * X_t + W_{hc} * H_{t-1} + b_c), \quad (17)$$

$$H_t = o_t \odot \tanh(C_t), \quad (18)$$

а также сверточная разновидность модели GRU – ConvGRU [21]:

$$z_t = \sigma(W_{xz} * X_t + W_{hz} * H_{t-1} + b_z), \quad (19)$$

$$r_t = \sigma(W_{xr} * X_t + W_{hr} * H_{t-1} + b_r), \quad (20)$$

$$\tilde{H}_t = \tanh(W_{xh} * X_t + r_t \odot (W_{hh} * H_{t-1}) + b_h), \quad (21)$$

$$H_t = z_t \odot H_{t-1} + (1 - z_t) \odot \tilde{H}_t. \quad (22)$$

В настоящей работе предпринята попытка оценки потенциала прогнозирования развития грозового очага с заблаговременностью менее 2 часов (наукастинга) как инструмента повышения ситуационной осведомленности

пилота при выполнении полета в условиях сложной метеорологической обстановки, а также реализовано сравнение рекуррентных и сверточных рекуррентных моделей прогнозирования по таким характеристикам, как точность прогноза и скорость обучения, применительно к решению задачи предсказания развития грозы.

Методы исследования

Создание моделей рекуррентных и сверточных рекуррентных нейронных сетей, их обучение и оценка качества, а также предшествующие этапы получения и подготовки данных для обучения осуществлялись с использованием языка объектно ориентированного программирования Python, а также библиотек: NumPy с поддержкой операций над многоуровневыми массивами, PyTorch для создания архитектуры нейронных сетей, их обучения и оценки качества, а также OpenCV, Rasterio и Matplotlib для предобработки и визуализации растровых изображений. Код находится в открытом доступе¹.

Для обучения моделей были использованы данные² радиолокационных метеорологических наблюдений за грозовыми очагами и сильными ливневыми осадками Финского метеорологического института (Finnish Meteorological Institute, FMI) за период с января 2021 года по июнь 2024 года включительно. Достоинства указанного источника заключаются в том, что данные находятся в открытом доступе, представлены за достаточно большой промежуток времени, а также обновляются регулярно с периодичностью в 5 мин, то есть достаточно часто для того, чтобы на их основе реализовать качественное прогнозирование развития грозовых облаков.

¹ Код для предобработки и визуализации растровых изображений [Электронный ресурс] //github.com. URL: <https://github.com/yaaadrov/WxRADNet-PyTorch> (дата обращения: 08.10.2024).

² Схема данных [Электронный ресурс] // XML-фал. URL: <http://s3-eu-west-1.amazonaws.com/fmi-opendata-radar-geotiff> (дата обращения: 08.10.2024).

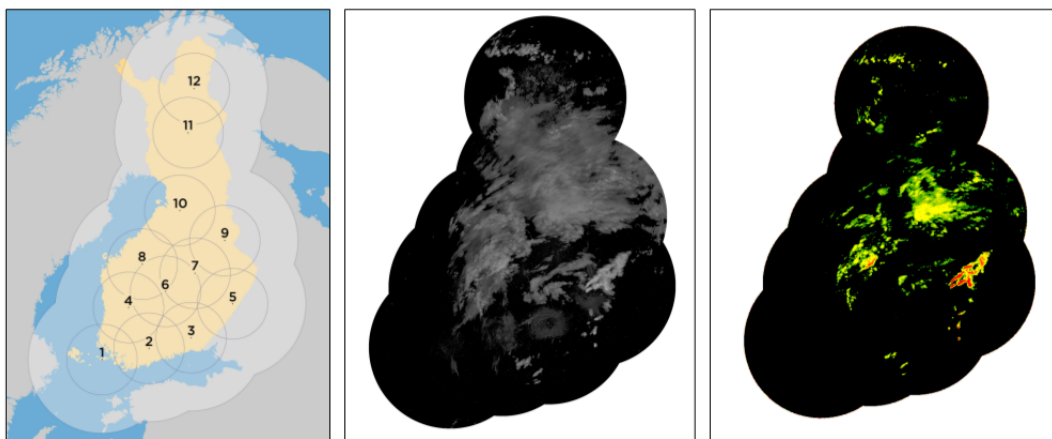


Рис. 4. Покрывание сети радаров FMI; пример полученного радиолокационного изображения; отображение полученной конфигурации грозы на экране самолетного метеолокатора

Fig. 4. FMI radar network coverage; example of the obtained radar image; display of the received thunderstorm configuration on the aircraft weather radar screen

Метеорологические наблюдения проводятся на базе сети FMI из 12 импульсно-доплеровских двухполяризационных радаров С-диапазона, покрывающих территорию Финляндии; полученные с их помощью значения радиолокационной отражаемости Z (dBZ) переводятся в значения интенсивности пикселя I (число от 0 до 255), после чего картина радиолокационной обстановки сохраняется в виде растрового черно-белого изображения формата tiff. Получить значение Z на основе интенсивности пикселя I можно по формуле $Z = 0,5 \cdot I - 32$ (рис. 4).

Современные наземные доплеровские грозовые радары позволяют обеспечить высокую достоверность получаемых с их помощью данных, а также хорошее пространственное покрытие и детализацию в радиусе до 200–250 км [22]; тем не менее недостаток таких радаров заключается в их подверженности влиянию помех, возникающих при наличии в воздухе отражающих объектов, не связанных с осадками (например, птиц). Чтобы избавиться от помех подобного рода, на этапе предобработки данных пиксели со значениями интенсивности I менее 100 (с отражаемостью Z менее 20 dBZ, что соответствует слабому дождю) отфильтровывались: значения их интенсивности заменялись на 0, однако это не приводило к потере информации о сильных ливневых осадках.

Стоит отметить, что полученные данные использовались для обучения модели лишь в исследовательских целях – для сравнения различных подходов к прогнозированию – и предобученные на этих данных модели не могут быть использованы сразу же для дальнейшего практического применения, так как при их обучении не учитывались индивидуальные характеристики конкретных самолетных радиолокаторов – их чувствительность, пороговые уровни интенсивности, разрешение, частота обновления и другие параметры, которые могут существенно повлиять на точность и актуальность прогнозов. Для реального применения предложенных в настоящей работе моделей требуется дополнительно реализовать их дообучение на данных, собранных непосредственно с бортового радиолокатора конкретного типа ВС.

Получение и предварительная обработка данных производились следующим образом.

1. Соответствующее началу очередного часа изображение в формате tiff загружалось, преобразовывалось в массив и разделялось на четыре непересекающиеся квадратные области размером 200×200 км каждая, образуя массивы размерности 256×256 пикселей (далее – $[h, w]$).

2. В качестве информативных выбирались те области, в которых пиксели с интенсивностью более 100 составляли не менее

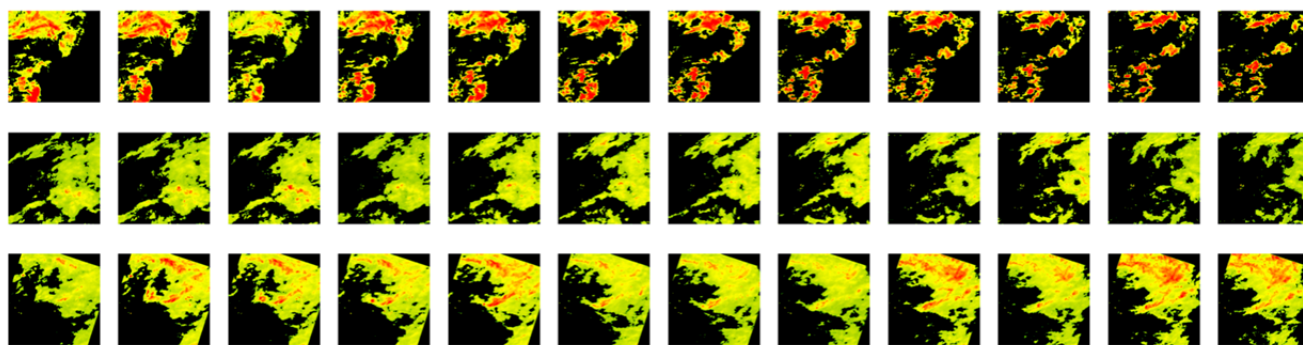


Рис. 5. Примеры часовых последовательностей из 12 изображений, включая аугментированные данные
Fig. 5. Examples of hourly sequences from 12 images including augmented data

15 % от общего числа; неинформативные области из дальнейшей обработки исключались.

3. Для каждой из полученных информативных областей загружались следующие доступные за текущий час радиолокационные изображения, образуя массив размерности $[a, h, w]$, где $a = 12$ – число изображений, полученных для информативной области за 1 час.

4. Для каждой из полученных последовательностей изображений реализовывалась аугментация данных [23]: набор обучающих данных расширялся путем создания трех синтетических последовательностей размерности $[a, h, w]$, каждая за счет поворота изображений на случайные углы, лежащие в диапазонах $(60^\circ, 120^\circ)$, $(150^\circ, 210^\circ)$ и $(240^\circ, 300^\circ)$.

5. Все информативные области за текущий час объединялись в массив размерности $[i, a, h, w]$, где i – число информативных сегментов за текущий час, после чего данный массив расширялся аналогично за счет данных за последующие часы.

В результате общее число полученных часовых последовательностей из 12 изображений с добавлением аугментированных данных составило 34 240 (рис. 5), 32 800 из которых использовались для обучения моделей и 1 440 (за июнь 2024 года) – для тестирования и сравнения моделей. Данные были использованы для обучения двух групп моделей – рекуррентных (RNN, LSTM и GRU) и сверточных рекуррентных (ConvRNN, ConvLSTM и ConvGRU) нейронных сетей.

Каждая из часовых последовательностей была разделена на две равные части по шесть последовательных изображений: первая из них (то есть первые полчаса соответствующего часа) использовалась в качестве известных входных векторов x_t , а вторая (то есть вторые полчаса каждого часа) – в качестве выходных векторов y_t , значение которых требовалось предсказать.

Для всех видов рекуррентных нейронных сетей использовалась схожая архитектура, состоящая из следующих элементов:

1) энкодера, представляющего собой две последовательные ячейки (RNN, LSTM или GRU), реализующие процесс создания и обновления вектора скрытого состояния h_t (и дополнительно c_t для LSTM) согласно уравнениям (1), (3–7) и (8–11) соответственно;

2) декодера, представляющего собой две последовательные ячейки (RNN, LSTM или GRU), за которыми следует полносвязный слой (Fully-connected, FC), реализующий преобразование вектора скрытого состояния h_t в вектор-предсказание y_t в соответствии с уравнением (2).

Особенность рекуррентных нейронных сетей заключается в том, что в качестве входной последовательности x_t они способны получать лишь вектор, поэтому каждый из двумерных входных массивов преобразовывался в вектор размерности $[h \cdot w]$; модель обучалась параллельно на батчах [24] размера 32: таким образом, в каждый момент времени t на вход модели подавался массив размерности $[b, h \cdot w]$, где b – размер батча.

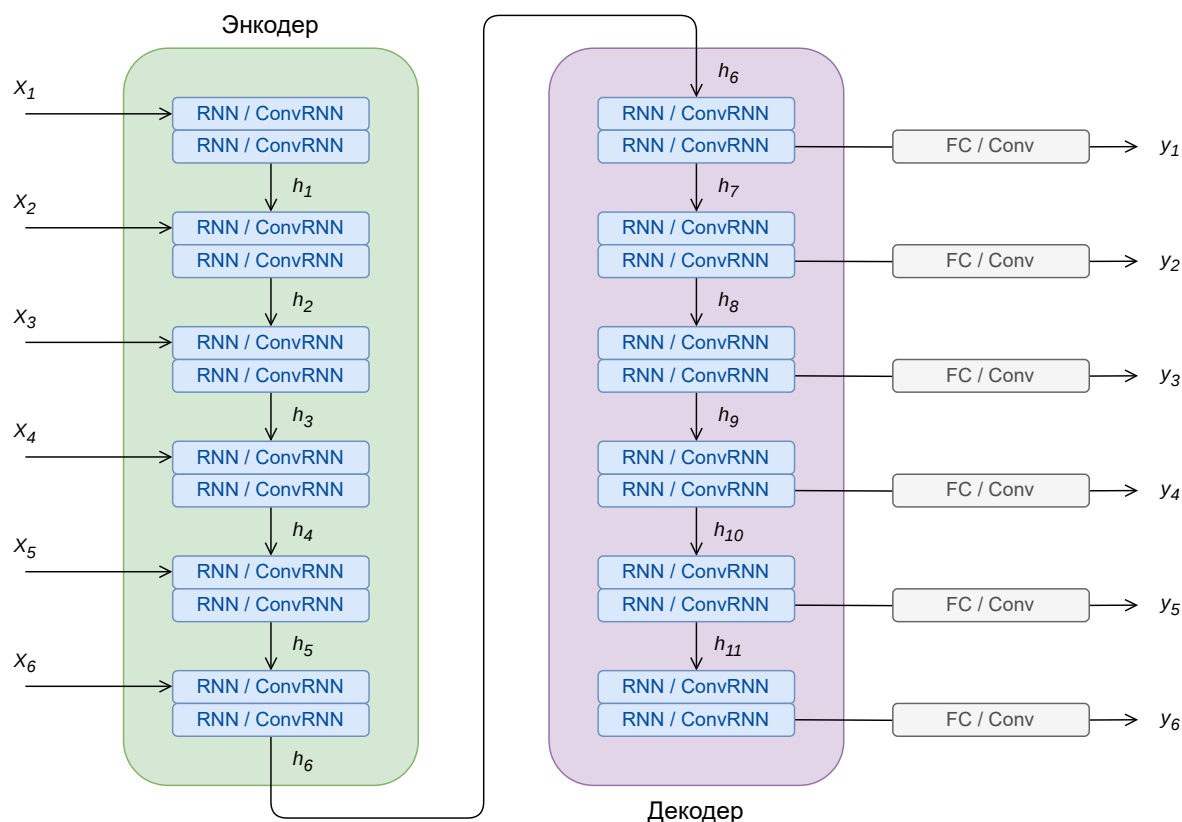


Рис. 6. Архитектура использованных сетей: *RNN* – рекуррентный слой; *ConvRNN* – сверточный рекуррентный слой; *FC* – полносвязный слой; *Conv* – сверточный слой

Fig. 6. Architecture of neural networks used: *RNN* – Recurrent Layer; *ConvRNN* – Convolutional Recurrent Layer; *FC* – Fully-connected Layer; *Conv* – Convolutional Layer

Принцип обучения рекуррентной модели заключается в следующем: энкодер последовательно получает каждый из шести входных векторов $x_1 \dots x_6$, на основе которых формируется вектор скрытого состояния h_6 ; вектор h_6 поступает на вход декодера, который в свою очередь формирует первое предсказание y_1 и новый вектор скрытого состояния h_7 (рис. 6).

Схожая архитектура использовалась и для всех видов сверточных рекуррентных сетей, за исключением следующих особенностей (рис. 6):

1) на вход сверточной рекуррентной сети поступали массивы размерности $[b, h, w]$, так как механизм свертки предназначен для обработки матриц $[h, w]$, причем в силу ограниченности вычислительных ресурсов использовался размер батча $b = 1$;

2) вместо классических рекуррентных ячеек RNN, LSTM или GRU использовались их сверточные аналоги – ConvRNN, ConvLSTM

или ConvGRU, – реализующие обновление процесса создания и обновления матрицы скрытого состояния H_t (и дополнительно C_t для LSTM) в соответствии с уравнениями (13), (14)–(18) и (19)–(22) соответственно;

3) вместо полносвязного слоя в декодере в качестве последнего использован сверточный слой (Conv) с единичным фильтром таким образом, чтобы размер выходной матрицы соответствовал требуемому значению $[h, w]$.

Обучение моделей (настройка обучаемых параметров сетей) реализовывалось с помощью градиентного спуска – методом обратного распространения ошибки во времени [25] с использованием алгоритма AdamW (Adaptive Momentum Estimation с неявным добавлением ℓ_2 -регуляризации) [26]: коэффициенты обновлялись на основе антиградиента среднеквадратичной функции ошибки (MSE, Mean Squared Error) с учетом скорости обучения (Learning

Таблица 1
Table 1

Параметры обучения рекуррентных и сверточных рекуррентных нейронных сетей
Used RNN and ConvRNN parameters

	RNN	ConvRNN
Число нейронов скрытого слоя	128	64
Число слоев	2	2
Размер батча	32	1
Скорость обучения α	0,001	0,001
Число эпох обучения	30	20
Размер фильтра свертки	–	3

Rate) α , для чего на каждой итерации алгоритма рассчитывалось значение MSE на обучающей выборке (а также дополнительно и на тестовой выборке для отслеживания динамики обучения моделей и предотвращения их переобучения [27]) по формуле

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2, \quad (23)$$

где n – общее число наблюдений, участвующих в расчете; y_i – реальное значение массива; $\hat{y}_i$ – значение, предсказанное моделью.

Для ускорения обучения моделей использовалась видеокарта GPUNVIDIA A100 с тензорными ядрами. Кроме того, во время обучения были реализованы: 1) методика уменьшения скорости обучения α на плато (при замедлении уменьшения значений MSE) [28]; 2) ранняя остановка обучения в случае, если в течение пяти последовательных эпох обучения значение MSE на тестовых данных не опускается ниже предыдущего лучшего значения; 3) обрезка градиентов (Gradient Clipping) во время обратного распространения ошибки [29] для предотвращения негативного влияния взрывных градиентов. Параметры обучения указаны в табл. 1.

Результаты исследования

В ходе обучения моделей после прохождения очередной эпохи (то есть после того, как все обучающие данные очередной раз поступили на вход модели) рассчитывались

значения MSE на обучающей и тестовой выборках; результаты обучения представлены на рис. 7.

Для большинства моделей (RNN, GRU, ConvLSTM и ConvGRU) используемого числа эпох оказалось достаточно для выхода функции потерь на плато, в то время как графики для сетей типа LSTM и ConvRNN свидетельствуют о возможности потенциального уменьшения MSE при условии дальнейшего обучения моделей. Для классических рекуррентных сетей свойственно плавное уменьшение метрики в начале обучения, за которым следуют колебания, сопровождающиеся переменным ростом ошибки на тестовой выборке, что свидетельствует о возможном выходе моделей на стадию переобучения. В то же время графики обучения сверточных рекуррентных моделей характеризуются скачкообразными изменениями функции потерь на начальных эпохах обучения, за которыми следует плавное уменьшение метрики, показывающее, что в течение рассматриваемого числа эпох модели не успевают переобучиться. Отдельного внимания заслуживает тот факт, что в отличие от традиционных RNN, LSTM и GRU для их сверточных аналогов в течение всего периода обучения значения функции потерь на тестовой выборке оказываются ниже, чем на обучающей.

Метрики качества моделей – корень среднеквадратической ошибки (RootMSE, RMSE) на тестовой выборке после обучения, – а также среднее время, затрачиваемое на одну эпоху обучения, представлены в табл. 2.

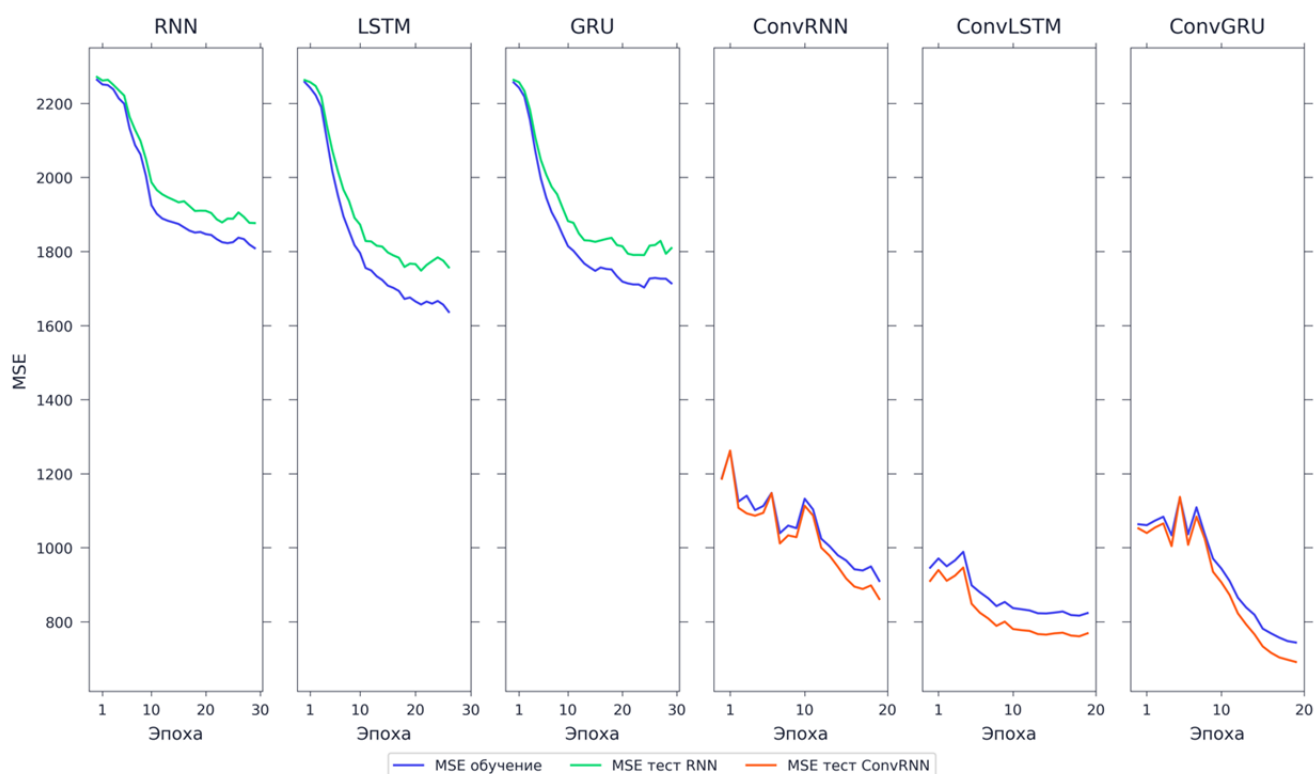


Рис. 7. Результаты обучения моделей
Fig. 7. Models' training results

Таблица 2
Table 2

Метрики качества моделей
Models' metrics

	Среднее время обучения эпохи	RMSE
Базовая модель	—	39,5244
RNN	3 мин 9 с	43,3217
LSTM	3 мин 7 с	41,8138
GRU	2 мин 53 с	42,3127
ConvRNN	17 мин 21 с	29,3511
ConvLSTM	47 мин 36 с	27,5801
ConvGRU	39 мин 32 с	26,2939

Обсуждение

В контексте решаемой задачи значение метрики RMSE можно рассматривать как среднюю ошибку определения интенсивности пикселя при прогнозировании развития грозового очага на ближайшие 30 мин на основе данных о предыдущих 30 мин с дис-

кретностью 5 мин. В качестве базы для интерпретации точности моделей было использовано значение RMSE константной модели, каждый раз предсказывающей последнюю доступную на момент предсказания (шестую) конфигурацию грозовых очагов: для такой модели получено значение RMSE, равное 39,5244, что составляет около 15,5 % максимальной интенсивности пикселя.

Среди рассмотренных моделей наихудшая точность соответствует классической RNN: значение RMSE, равное 43,3217, составляет приблизительно 17 % максимальной интенсивности пикселя, что на 9,6 % больше (хуже), чем базовое значение точности 39,5244. Лучшая из классических рекуррентных моделей (LSTM) со значением средней ошибки 41,8138 также не смогла преодолеть базовый порог RMSE. Наилучший результат продемонстрировала сверточная рекуррентная модель ConvGRU со значением RMSE, равным 26,2939, то есть около 10 % максимальной интенсивности пикселя. Здесь важно отметить, что всем моделям, использующим механизм свертки, удалось преодолеть базовое значение RMSE константной модели и показать значения на 25–30 % меньше (лучше).

Полученный результат свидетельствует о непригодности классических рекуррентных моделей для прогнозирования развития грозы. Более точное представление о причинах установленного факта, а также особенностях предсказания развития грозы каждой из моделей можно получить, рассмотрев результаты прогнозирования развития грозовых очагов для конкретного обучающего примера (рис. 8).

Рис. 8 показывает, что обычные рекуррентные модели оказываются неспособны уловить особенности распределения отдельных участков грозового очага в пространстве и, несмотря на то что определяют общую тенденцию перемещения грозы, не могут сохранить пространственную структуру данных, в результате чего особенности формы грозы теряются и участки грозового облака имеют нехарактерные для такого метеоявления пространственные очаги. Данный факт можно объяснить особенностью работы классических RNN: они были созданы для работы с одномерными массивами данных, а разворачивание двумерного изображения в вектор приводит к потере пространственных взаимосвязей пикселей, в результате чего теряется и возможность спрогнозировать точную форму грозового облака.

В то же время рис. 8 показывает, что сверточные рекуррентные нейронные сети верно

уловили тенденцию к уменьшению интенсивности рассматриваемого грозового очага, а также в общих чертах передали его перемещение налево. Данный факт можно объяснить тем, что использование в моделях ConvRNN, ConvLSTM и ConvGRU механизма свертки позволяет реализовать обработку изображений в виде двумерных массивов, извлекая из данных пространственные признаки и учитывая зависимости между соседними пикселями на всех уровнях свертки:

1) в процессе обучения параметры (веса) фильтров свертки подбираются таким образом, чтобы фильтры были способны выявлять важные локальные признаки изображения – вертикальные и горизонтальные линии, углы, криволинейные структуры и т. п.;

2) в то время как один сверточный слой захватывает простые пространственные признаки, добавление дополнительных сверток позволяет нейронной сети выявлять более высокоуровневые признаки, например контуры грозовых облаков;

3) поскольку свертка выполняется на небольших локальных областях изображения, сверточные слои учитывают главным образом локальные пространственные зависимости: это свойство позволяет сети быть инвариантной к небольшим сдвигам, то есть после смещения грозового очага сверточный слой сможет найти и идентифицировать каждый его участок на следующем изображении.

Тем не менее, несмотря на достаточно высокое качество предсказания формы грозового облака с использованием сверточных рекуррентных сетей, значения интенсивности предсказанных пикселей, очевидно, являются завышенными по сравнению с реальной картиной развития грозы; поиск решения указанного недостатка ConvRNN, ConvLSTM и ConvGRU планируется развить в дальнейших исследованиях.

Предполагаемый положительный результат применения предлагаемой технологии прогнозирования развития грозовых очагов заключается в потенциальном росте ситуационной осведомленности пилотов, выполняющих полеты в условиях грозовой деятельности и ливневых осадков, за счет представле-

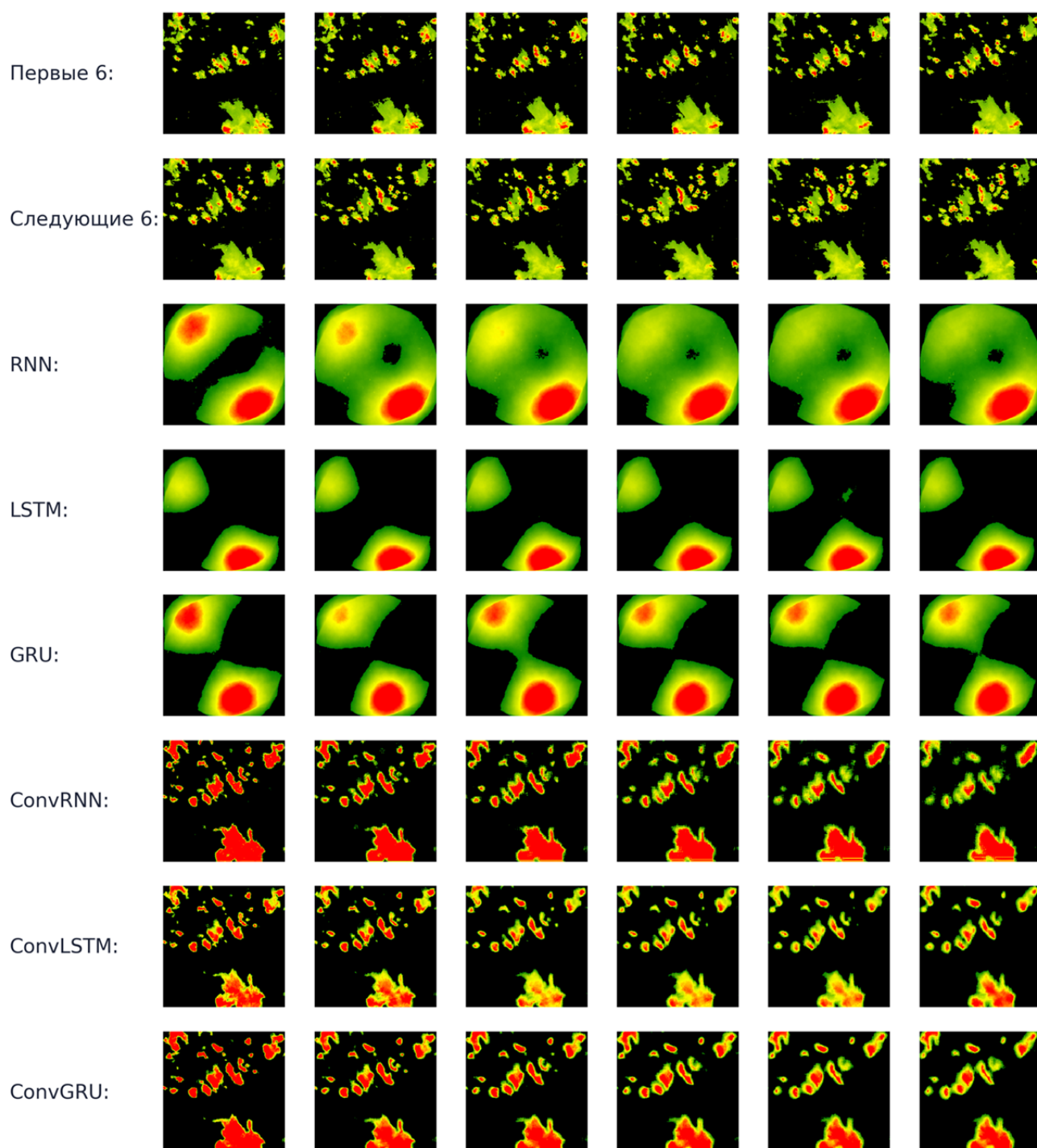


Рис. 8. Первые и последующие шесть радиолокационных изображений одной из конфигураций тестовой выборки, а также предсказания развития грозы для рассматриваемых моделей

Fig. 8. First and next six radar images of one of the test sample configurations, as well as predictions of thunderstorm development for the considered models

ния на экране навигационного дисплея прогностической информации о развитии грозового фронта.

С математической точки зрения ситуационная осведомленность *SA* (Situational

Awareness) может быть представлена как некоторая функция f переменных: 1) P_{env} – восприятия пилотом текущей обстановки (Perception of Current Environment); 2) C_{env} – комплексного понимания текущей обстанов-

ки (Comprehension of Current Environment); 3) P_{fut} – проекции текущей обстановки на ближайшее будущее; 4) H – комплексного параметра, отвечающего за вклад человеческого фактора (внимание, опыт членов экипажа, текущий уровень рабочей нагрузки и т. д.) в обеспечение ситуационной осведомленности [30]:

$$SA = f(P_{env}, C_{env}, P_{fut}, H). \quad (24)$$

Предоставление пилоту прогностической информации о развитии грозового очага мо-

жет способствовать повышению качества проекции текущего состояния окружающей среды на ближайшее будущее за счет обновления вероятностного распределения будущей метеорологической обстановки W_{fut} (Future Weather), которое теперь будет вычисляться не только на основе параметров текущей метеорологической обстановки I_{cur} (Current Information, текущая информация), но также на основе прогностической информации I_{pred} (Predictive Information, прогностическая информация), таким образом снижая уровень неопределенности:

$$\Pr(W_{fut} | I_{cur}, I_{pred}) = \frac{\Pr(I_{cur} | W_{fut}, I_{pred}) \cdot \Pr(W_{fut})}{\Pr(I_{cur})}, \quad (25)$$

где $\Pr(W_{fut} | I_{cur}, I_{pred})$ – апостериорная вероятность получить некоторую радиолокационную картину в будущем с учетом дополнительного использования прогностической информации I_{pred} , $\Pr(I_{cur} | W_{fut}, I_{pred})$ – условная вероятность наблюдать текущую радиолокационную картину, $\Pr(W_{fut})$ – предварительная вероятность получить некоторую радиолокационную картину в будущем (до получения предсказания), $\Pr(I_{cur})$ – вероятность наблюдения текущей радиолокационной картины.

Кроме того, предполагается, что предложенная прогностическая модель не только позволит оптимизировать процесс принятия пилотами решений по обходу грозовых очагов и снизить когнитивную нагрузку членов летного экипажа, но также может применяться в Байесовских моделях оценки риска [31] и сможет быть интегрирована в самолетные системы для обеспечения автоматизированного обхода грозы [32].

Заключение

Таким образом, в настоящей работе приведены результаты применения Seq2seq-моделей (нейронных сетей) для наукастинга развития грозовой деятельности с целью по-

вышения уровня ситуационной осведомленности членов летного экипажа в полете.

1. На этапе подготовки к исследованию были получены данные радиолокационных метеорологических наблюдений за грозовыми очагами и сильными ливневыми осадками Финского метеорологического института за период с января 2021 года по июнь 2024 года. Всего было получено и подготовлено 32 800 обучающих и 1 440 тестовых последовательностей по 12 радиолокационных изображений, которые могут использоваться и в дальнейших исследованиях для объективного сравнения метрик качества различных подходов к прогнозированию развития грозы.

2. Созданы и обучены рекуррентные (RNN, LSTM и GRU) и сверточные рекуррентные (ConvRNN, ConvLSTM и ConvGRU) нейронные сети, реализующие предсказание шести последовательных радиолокационных изображений на основании первых шести изображений.

3. Интерпретация предсказаний моделей, а также анализ графиков изменения функции потерь на различных эпохах обучения и сравнение моделей на основе метрики RMSE (корень среднеквадратической ошибки на тестовой выборке) показали, что классические рекуррентные модели оказались непригодны для прогнозирования развития грозы: разворачивание двумерного радиолокационного

изображения в вектор приводит к потере пространственных взаимосвязей, в результате чего теряется возможность спрогнозировать точную форму грозового облака.

4. В то же время сверточные рекуррентные модели продемонстрировали результат на 25–30 % лучше (по RMSE), чем базовая модель, в качестве предсказаний использующая последнее доступное на момент предсказания радиолокационное изображение: применение в моделях ConvRNN, ConvLSTM и ConvGRU механизма свертки позволяет реализовать обработку изображений в виде двумерных массивов, извлекая из данных пространственные признаки и учитывая зависимости между соседними пикселями на всех уровнях свертки.

5. Потенциальный положительный эффект применения предлагаемой технологии прогнозирования развития грозы заключается в возможном повышении уровня ситуационной осведомленности членов летного экипажа за счет предоставления им прогностической информации о развитии грозы на экране навигационного дисплея: предполагается, что наличие указанной информации будет способствовать более качественной реализации проекции текущей обстановки на ближайшее будущее, а также позволит оптимизировать процесс принятия пилотами решений по обходу грозовых очагов и снизить когнитивную нагрузку членов летного экипажа при выполнении полетов в сложных метеорологических условиях.

Полученные результаты предполагается развить в будущих исследованиях.

Использование в архитектурах ConvRNN, ConvLSTM и ConvGRU нескольких уровней свертки разного размера может позволить захватывать пространственные признаки на различных масштабах и, как результат, способствовать улучшению качества прогнозов.

Другим потенциальным подходом к прогнозированию развития грозы могут быть гибридные модели, объединяющие в себе подходы ConvRNN и ARIMA.

Оптимизация процесса принятия решений при обходе грозы может быть достигнута за счет интеграции предлагаемой технологии в

интеллектуальную адаптивную систему поддержки принятия экипажем ВС решений по обходу очагов грозовой деятельности, для чего требуется дополнительно разработать алгоритм определения оптимального маршрута обхода грозы на основе прогностической информации о ее развитии в ближайшее время.

Список литературы

1. **Bolstad C.A., Riley J.M.** Using goal directed task analysis with Army brigade officer teams // *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*. SAGE Publications. 2002. Vol. 46, no.3. Pp. 472–476. DOI:10.1177/154193120204600354
2. **Stanton N.A., Chambers P.R.G., Piggett J.** Situational awareness and safety // *Safety science*. 2001. Vol. 39, no. 3. Pp. 189–204. DOI: 10.1016/S0925-7535(01)00010-8
3. **Sarter N.B., Woods D.D.** Situation awareness: A critical but ill-defined phenomenon // *The International Journal of Aviation Psychology*. 1991. Vol. 1, no. 1. Pp. 45–57. DOI: 10.1207/s15327108ijap0101_4
4. **Стрелков Ю.К.** Инженерная и профессиональная психология: учеб. пособие. М.: Академия; Высшая школа, 2001. 360 с.
5. **De Gooijer J.G., Hyndman R.J.** 25 years of time series forecasting // *International Journal of Forecasting*. 2006. Vol. 22, no. 3. Pp. 443–473. DOI: 10.1016/j.ijforecast.2006.01.001
6. **Stevenson S.** A comparison of the forecasting ability of ARIMA models // *Journal of Property Investment & Finance*. 2007. Vol. 25, no. 3. Pp. 223–240. DOI: 10.1108/14635780710746902
7. **Chatfield C.** A new look at models for exponential smoothing / C. Chatfield, A.B. Koehler, J.K. Ord, R.D. Snyder // *Journal of the Royal Statistical Society: Series D (The Statistician)*. 2001. Vol. 50, no. 2. Pp. 147–159. DOI: 10.1111/1467-9884.00267
8. **Bentéjac C., Csörgő A., Martínez-Muñoz G.** A comparative analysis of gradient boosting algorithms // *Artificial Intelligence Review*. 2021. Vol. 54. Pp. 1937–1967. DOI: 10.1007/s10462-020-09896-5

9. **Faloutsos C.** Classical and contemporary approaches to big time series forecasting / C. Faloutsos, J. Gasthaus, T. Januschowski, Y. Wang // SIGMOD '19: Proceedings of the 2019 International Conference on Management of Data, 2019. Pp. 2042–2047. DOI: 10.1145/3299869.3314033
10. **Makridakis S., Spiliotis E., Assimakopoulos V.** The M4 Competition: Results, findings, conclusion and way forward // International Journal of Forecasting. 2018. Vol. 34, iss. 4. Pp. 802–808. DOI: 10.1016/j.ijforecast.2018.06.001
11. **Taieb S.B., Sorjamaa A., Bontempi G.** Multiple-output modeling for multi-step-ahead time series forecasting // Neurocomputing. 2010. Vol. 73, iss. 10–12. Pp. 1950–1957. DOI: 10.1016/j.neucom.2009.11.030
12. **Sutskever I., Vinyals O., Quoc V.L.** Sequence to sequence learning with neural networks // Proceedings of the 27th International Conference on Neural Information Processing Systems. 2014. No. 2. Pp. 3104–3112. DOI: 10.48550/arXiv.1409.3215
13. **Caterini A.L.** Recurrent neural networks / A.L. Caterini, D.E. Chang, A.L. Caterini, D.E. Chang. In book: Deep Neural Networks in a Mathematical Framework. Springer Briefs in Computer Science. Springer, Cham, 2018. Pp. 59–79. DOI: 10.1007/978-3-319-75304-1_5
14. **Rumelhart D.E., Hinton G.E., Williams R.J.** Learning representations by back-propagating errors // Nature. 1986. No. 323. Pp. 533–536. DOI: 10.1038/323533a0
15. **Rasamoelina A.D., Adjailia F., Sinčák P.** A review of activation function for artificial neural network // 2020 IEEE 18th World Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMI). Slovakia, Herlany, 2020. Pp. 281–286. DOI: 10.1109/SAMI48414.2020.9108717
16. **Toharudin T.** Employing long short-term memory and Facebook prophet model in air temperature forecasting / T. Toharudin, R.S. Pontoh, R.E. Caraka, S. Zahroh, Y. Lee Y, R.C. Chen // Communications in Statistics-Simulation and Computation. 2023. Vol. 52, iss. 2. Pp. 279–290. DOI: 10.1080/03610918.2020.1854302
17. **Schmidhuber J., Hochreiter S.** Long short-term memory // Neural Computation. 1997. Vol. 9, iss. 8. Pp. 1735–1780. DOI: 10.1162/neco.1997.9.8.1735
18. **De Mulder W., Bethard S., Moens M.F.** A survey on the application of recurrent neural networks to statistical language modeling / Computer Speech & Language. 2015. Vol. 30, iss. 1. Pp. 61–98. DOI: 10.1016/j.csl.2014.09.005
19. **Shi X.** Convolutional LSTM network: A machine learning approach for precipitation nowcasting / X. Shi, Z. Chen, H. Wang, D.Y. Yeung, W.K. Wong, W.C. Woo // NIPS'15: Proceedings of the 28th International Conference on Neural Information Processing Systems. 2015. Vol. 1. Pp. 802–810. DOI: 10.48550/arXiv.1506.04214
20. **Li Z.** A survey of convolutional neural networks: analysis, applications, and prospects / Z. Li, F. Liu, W. Yang, S. Peng, J. Zhou // IEEE transactions on neural networks and learning systems. 2021. Vol. 33, no. 12. Pp. 6999–7019. DOI: 10.1109/TNNLS.2021.3084827
21. **Ballas N.** Delving deeper into convolutional networks for learning video representations / N. Ballas, L. Yao, C.J. Pal, A. Courville [Электронный ресурс] // 4th International Conference on Learning Representations (ICLR 2016), 2016. 2 p. DOI: 10.48550/arXiv.1511.06432 (дата обращения: 08.10.2024).
22. **Mahafza B.R.** Radar systems analysis and design using MATLAB. 2nd ed. Chapman and Hall, CRC, 2005. 638 p. DOI: 10.1201/9781420057072
23. **Van Dyk D.A., Meng X.L.** The art of data augmentation // Journal of Computational and Graphical Statistics. 2001. Vol. 10, no. 1. Pp. 1–50. DOI: 10.1198/10618600152418584
24. **Masters D., Luschi C.** Revisiting small batch training for deep neural networks [Электронный ресурс] // Computer Science and Machine Learning. 2018. Pp. 1–18. DOI: 10.48550/arXiv.1804.07612 (дата обращения: 08.10.2024).
25. **Werbos P.J.** Backpropagation through time: what it does and how to do it // Proceedings of the IEEE. 1990. Vol. 78, no. 10. Pp. 1550–1560. DOI: 10.1109/5.58337

26. Llusi R. Comparison between Adam, AdaMax and Adam W optimizers to implement a weather forecast based on neural networks for the Andean city of Quito / R. Llusi, S.E. Yacoubi, A. Fontaine, P. Lupera // 2021 IEEE Fifth Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM), 2021. Pp. 1–6. DOI: 10.1109/ETCM53643.2021.9590681

27. Bejani M.M., Ghatte M. A systematic review on overfitting control in shallow and deep neural networks // Artificial Intelligence Review. 2021. Vol. 54. Pp. 6391–6438. DOI: 10.1007/s10462-021-09975-1

28. Passos D., Mishra P. A tutorial on automatic hyperparameter tuning of deep spectral modelling for regression and classification tasks [Электронный ресурс] // Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems. 2022. Vol. 223. ID: 104520. DOI: 10.1016/j.chemolab.2022.104520 (дата обращения: 08.10.2024).

29. Koloskova A., Hendrikx H., Stich S.U. Revisiting gradient clipping: Stochastic bias and tight convergence guarantees // International Conference on Machine Learning. 2023. Pp. 17343–17363. DOI: 10.48550/arXiv.2305.01588

30. Endsley M.R. Toward a theory of situation awareness in dynamic systems // Human factors. 1995. Vol. 37, no. 1. Pp. 32–64. DOI: 10.1518/001872095779049543

31. Kaikkonen L. Bayesian networks in environmental risk assessment: A review / L. Kaikkonen, T. Parviainen, M. Rahikainen, L. Uusitalo, A. Lehtikainen // Integrated environmental assessment and management. 2021. Vol. 17, no. 1. Pp. 62–78. DOI: 10.1002/ieam.4332

32. Kovalenko G.V., Yadrov I.A., Kuts K.A. Intelligent adaptive flight crew decision support system for thunderstorm avoidance // Russian Aeronautics. 2023. Vol. 66. Pp. 552–559. DOI: 10.3103/S1068799823030170

References

1. Bolstad, C.A., Riley, J.M. (2002). Using goal directed task analysis with Army brigade officer teams. In: *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual*

Meeting. SAGE Publications, vol. 46, no. 3, pp. 472–476. DOI: 10.1177/154193120204600354

2. Stanton, N.A., Chambers, P.R.G., Piggett, J. (2001). Situational awareness and safety. *Safety science*, vol. 39, no. 3, pp. 189–204. DOI: 10.1016/S0925-7535(01)00010-8

3. Sarter, N.B., Woods, D.D. (1991). Situation awareness: A critical but ill-defined phenomenon. *The International Journal of Aviation Psychology*, vol. 1, no. 1, pp. 45–57. DOI: 10.1207/s15327108ijap0101_4

4. Strelkov, Yu.K. (2001). Engineering and professional psychology: textbook. Moscow: Vysshaya shkola; Akademiya, 360 p. (in Russian)

5. De Gooijer, J.G., Hyndman, R.J. (2006). 25 years of time series forecasting. *International Journal of Forecasting*, vol. 22, no. 3, pp. 443–473. DOI: 10.1016/j.ijforecast.2006.01.001

6. Stevenson, S. (2007). A comparison of the forecasting ability of ARIMA models. *Journal of Property Investment & Finance*, vol. 25, no. 3, pp. 223–240. DOI: 10.1108/14635780710746902

7. Chatfield, C., Koehler, A.B., Ord, J.K., Snyder, R.D. (2001). A new look at models for exponential smoothing. *Journal of the Royal Statistical Society: Series D (The Statistician)*, vol. 50, no. 2, pp. 147–159. DOI: 10.1111/1467-9884.00267

8. Bentéjac, C., Csörgő, A., Martínez-Muñoz, G. (2021). A comparative analysis of gradient boosting algorithms. *Artificial Intelligence Review*, vol. 54, pp. 1937–1967. DOI: 10.1007/s10462-020-09896-5

9. Faloutsos, C., Gasthaus, J., Januschowski, T., Wang, Y. (2019). Classical and contemporary approaches to big time series forecasting. In: *SIGMOD '19: Proceedings of the 2019 International Conference on Management of Data*, pp. 2042–2047. DOI: 10.1145/3299869.3314033

10. Makridakis, S., Spiliotis, E., Assimakopoulos, V. (2018). The M4 Competition: Results, findings, conclusion and way forward. *International Journal of Forecasting*, vol. 34, issue 4, pp. 802–808. DOI: 10.1016/j.ijforecast.2018.06.001

11. Taieb, S.B., Sorjamaa, A., Bontempi, G. (2010). Multiple-output modeling for multi-step-ahead time series forecasting. *Neurocomputing*, vol. 73, issue 10–12, pp. 1950–1957. DOI: 10.1016/j.neucom.2009.11.030
12. Sutskever, I., Vinyals, O., Quoc, V.L. (2014). Sequence to sequence learning with neural networks. In: *Proceedings of the 27th International Conference on Neural Information Processing Systems*, no. 2, pp. 3104–3112. DOI: 10.48550/arXiv.1409.3215
13. Caterini, A.L., Chang, D.E., Caterini, A.L., Chang, D.E. (2018). Recurrent neural networks. In book: *Deep Neural Networks in a Mathematical Framework*, Springer Briefs in Computer Science. Springer, Cham, pp. 59–79. DOI: 10.1007/978-3-319-75304-1_5
14. Rumelhart, D.E., Hinton, G.E., Williams, R.J. (1986). Learning representations by back-propagating errors. *Nature*, no. 323, pp. 533–536. DOI: 10.1038/323533a0
15. Rasamoelina, A.D., Adjailia, F., Sinčák, P. (2020). A review of activation function for artificial neural network. In: *2020 IEEE 18th World Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMI)*, Herlany, Slovakia, pp. 281–286. DOI: 10.1109/SAMI48414.2020.9108717
16. Toharudin, T., Pontoh, R.S., Caraka, R.E., Zahroh, S., Lee, Y., Chen, R.C. (2023). Employing long short-term memory and Facebook prophet model in air temperature forecasting. *Communications in Statistics-Simulation and Computation*, vol. 52, issue 2, pp. 279–290. DOI: 10.1080/03610918.2020.1854302
17. Schmidhuber, J., Hochreiter, S. (1997). Long short-term memory. *Neural Computation*, vol. 9, issue 8, pp. 1735–1780. DOI: 10.1162/neco.1997.9.8.1735
18. De Mulder, W., Bethard, S., Moens, M. F. (2015). A survey on the application of recurrent neural networks to statistical language modeling. *Computer Speech & Language*, vol. 30, issue 1, pp. 61–98. DOI: 10.1016/j.csl.2014.09.005
19. Shi, X., Chen, Z., Wang, H., Yeung, D.Y., Wong, W.K., Woo, W.C. (2015). Convolutional LSTM network: A machine learning approach for precipitation nowcasting. In: *NIPS'15: Proceedings of the 28th International Conference on Neural Information Processing Systems*, vol. 1, pp. 802–810. DOI: 10.48550/arXiv.1506.04214
20. Li, Z., Liu, F., Yang, W., Peng, S., Zhou, J. (2021). A survey of convolutional neural networks: analysis, applications, and prospects. In: *IEEE transactions on neural networks and learning systems*, vol. 33, no. 12, pp. 6999–7019. DOI: 10.1109/TNNLS.2021.3084827
21. Ballas, N., Yao, L., Pal, C.J., Courville, A. (2016). Delving deeper into convolutional networks for learning video representations. In: *4th International Conference on Learning Representations*, 2 p. DOI: 10.48550/arXiv.1511.06432 (accessed: 08.10.2024).
22. Mahafza, B.R. (2005). Radar systems analysis and design using MATLAB, 2nd ed. Chapman and Hall, CRC, 638 p. DOI: 10.1201/9781420057072
23. Van Dyk, D.A., Meng, X.L. (2001). The art of data augmentation. *Journal of Computational and Graphical Statistics*, vol. 10, no. 1, pp. 1–50. DOI: 10.1198/10618600152418584
24. Masters, D., Luschi, C. (2018). Revisiting small batch training for deep neural networks. *Computer Science and Machine Learning*, pp. 1–18. DOI: 10.48550/arXiv.1804.07612 (accessed: 08.10.2024).
25. Werbos, P.J. (1990). Backpropagation through time: what it does and how to do it. In: *Proceedings of the IEEE*, vol. 78, no. 10, pp. 1550–1560. DOI: 10.1109/5.58337
26. Llugsí, R., Yacoubi, S.E., Fontaine, A., Lupera, P. (2021). Comparison between Adam, AdaMax and Adam W optimizers to implement a weather forecast based on neural networks for the Andean city of Quito. In: *2021 IEEE Fifth Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM)*, pp. 1–6. DOI: 10.1109/ETCM53643.2021.9590681
27. Bejani, M.M., Ghatee, M. (2021). A systematic review on overfitting control in shallow and deep neural networks. *Artificial Intelligence Review*, vol. 54. Pp. 6391–6438. DOI: 10.1007/s10462-021-09975-1
28. Passos, D., Mishra, P. (2022). A tutorial on automatic hyperparameter tuning of deep

spectral modelling for regression and classification tasks. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, no. 223. ID: 104520. DOI: 10.1016/j.chemolab.2022.104520 (accessed: 08.10.2024).

29. Koloskova, A., Hendrikx, H., Stich, S.U. (2023). Revisiting gradient clipping: Stochastic bias and tight convergence guarantees. *International Conference on Machine Learning*, pp. 17343–17363. DOI: 10.48550/arXiv.2305.01588

30. Endsley, M.R. (1995). Toward a theory of situation awareness in dynamic systems. *Human factors*, vol. 37, no. 1, pp. 32–64. DOI: 10.1518/001872095779049543

31. Kaikkonen, L., Parviainen, T., Rahikainen, M., Uusitalo, L., Lehtikainen, A. (2021). Bayesian networks in environmental risk assessment: A review. *Integrated environmental assessment and management*, vol. 17, no. 1, pp. 62–78. DOI: 10.1002/ieam.4332

32. Kovalenko, G.V., Yadrov, I.A., Kuts, K.A. (2023). Intelligent adaptive flight crew decision support system for thunderstorm avoidance. *Russian Aeronautics*, vol. 66. Pp. 552–559. DOI: 10.3103/S1068799823030170

Сведения об авторах

Коваленко Геннадий Владимирович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры летной эксплуатации и безопасности полетов в гражданской авиации СПбГУ ГА, kgvf@inbox.ru.

Ядров Илья Александрович, аспирант кафедры летной эксплуатации и безопасности полетов в гражданской авиации СПбГУ ГА, yadrov.ilya@gmail.com.

Information about the authors

Gennadiy V. Kovalenko, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Chair of Flight Operations and Flight Safety in Civil Aviation, Saint Petersburg State University of Civil Aviation named after Chief Marshal of Aviation A.A. Novikov, kgvf@inbox.ru.

Ilya A. Yadrov, Postgraduate Student of the Chair of Flight Operations and Flight Safety in Civil Aviation, Saint Petersburg State University of Civil Aviation named after Chief Marshal of Aviation A.A. Novikov, yadrov.ilya@gmail.com.

Поступила в редакцию 14.10.2024
Одобрена после рецензирования 06.11.2024
Принята в печать 23.01.2025

Received 14.10.2024
Approved after reviewing 06.11.2024
Accepted for publication 23.01.2025

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}

¹Российский университет транспорта, г. Москва, Россия

²АО «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}

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

²JSC NIAS, 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. Оценка 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		- 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		- 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	- 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	- 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-

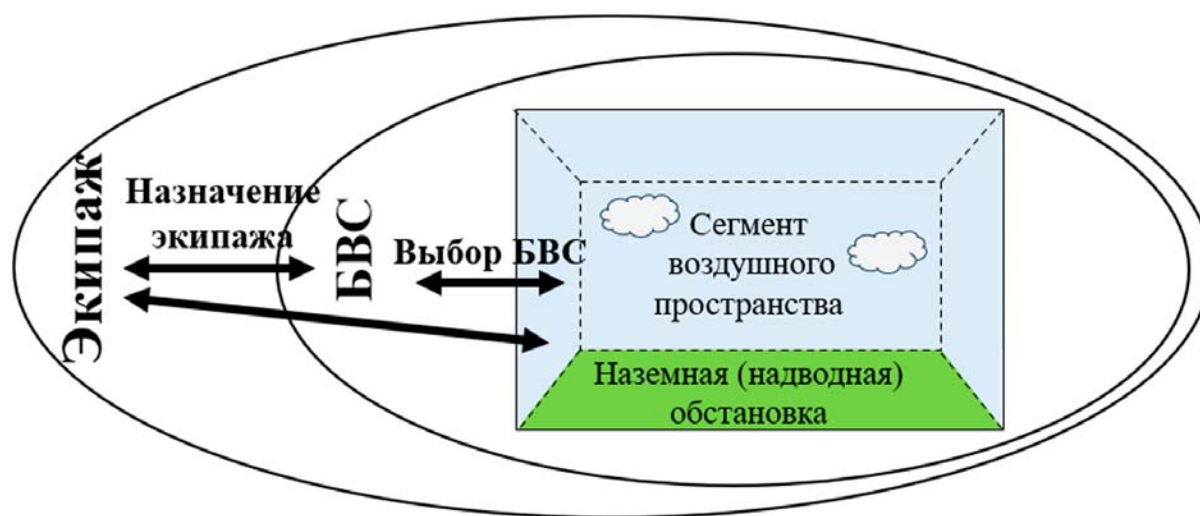


Рис. 1. Схема влияния основных аспектов оценки рисков выполнения полетного задания
Fig. 1. A diagram of the impact of the main aspects of the risk assessment of the flight task performance

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

$$I(x, y, z, t) = \Phi_{\text{ЭК}}[\Phi_{\text{БВС}}(R_{\text{вп}} \& R_{\text{ма}})], \quad (1)$$

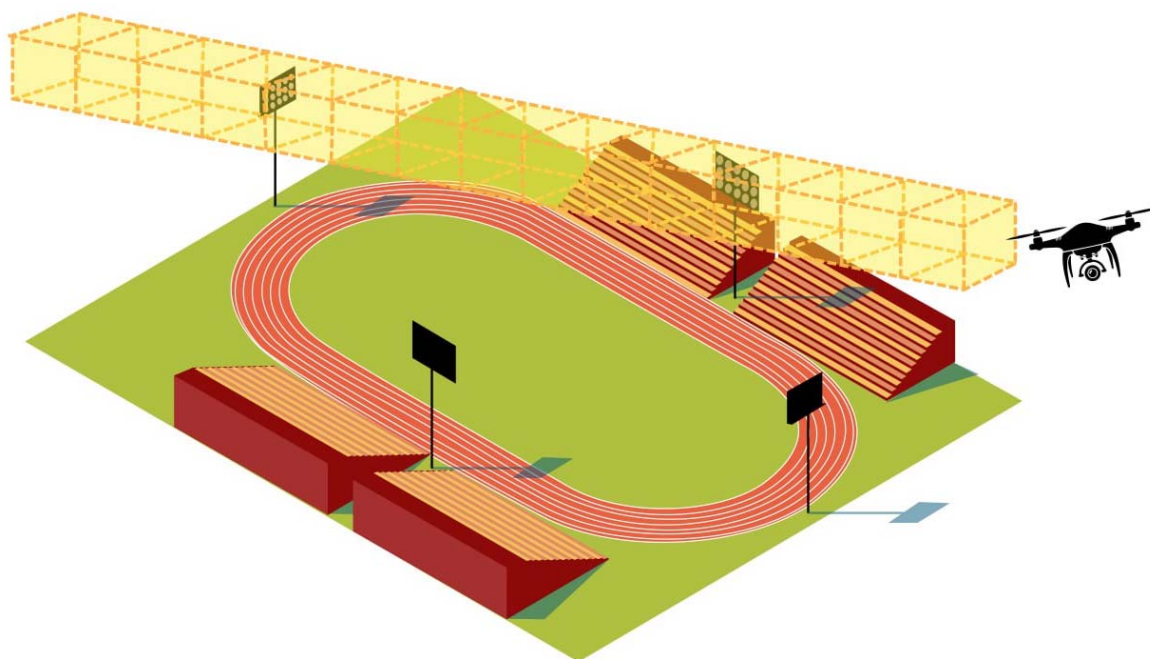


Рис. 2. Оценка рисков выполнения полета БВС
Fig. 2. Assessment of the risks of UAV flights

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-

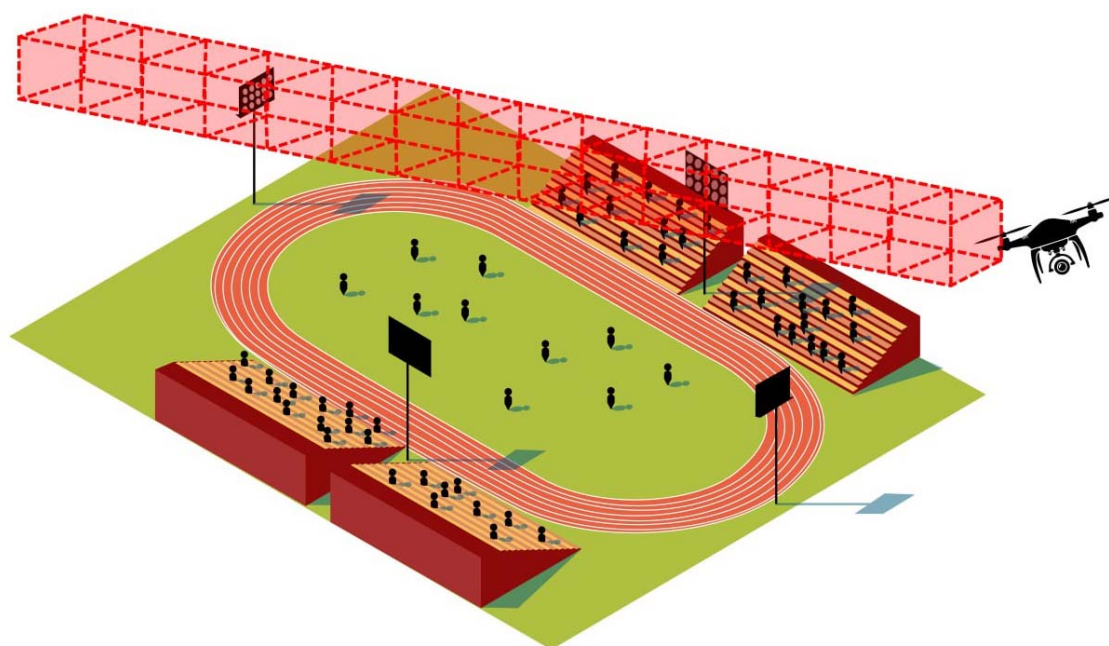


Рис. 3. Оценка риска выполнения полета БВС во время массового мероприятия
Fig. 3. Assessment of the risk of UAV flights during a mass event

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. Оценку риска в районе планируемого полета в момент времени иллюстрирует рис. 4.

Установленные эксплуатантом пороговые значения предлагается использовать для построения оптимального маршрута перемещения БВС. Оценку 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.

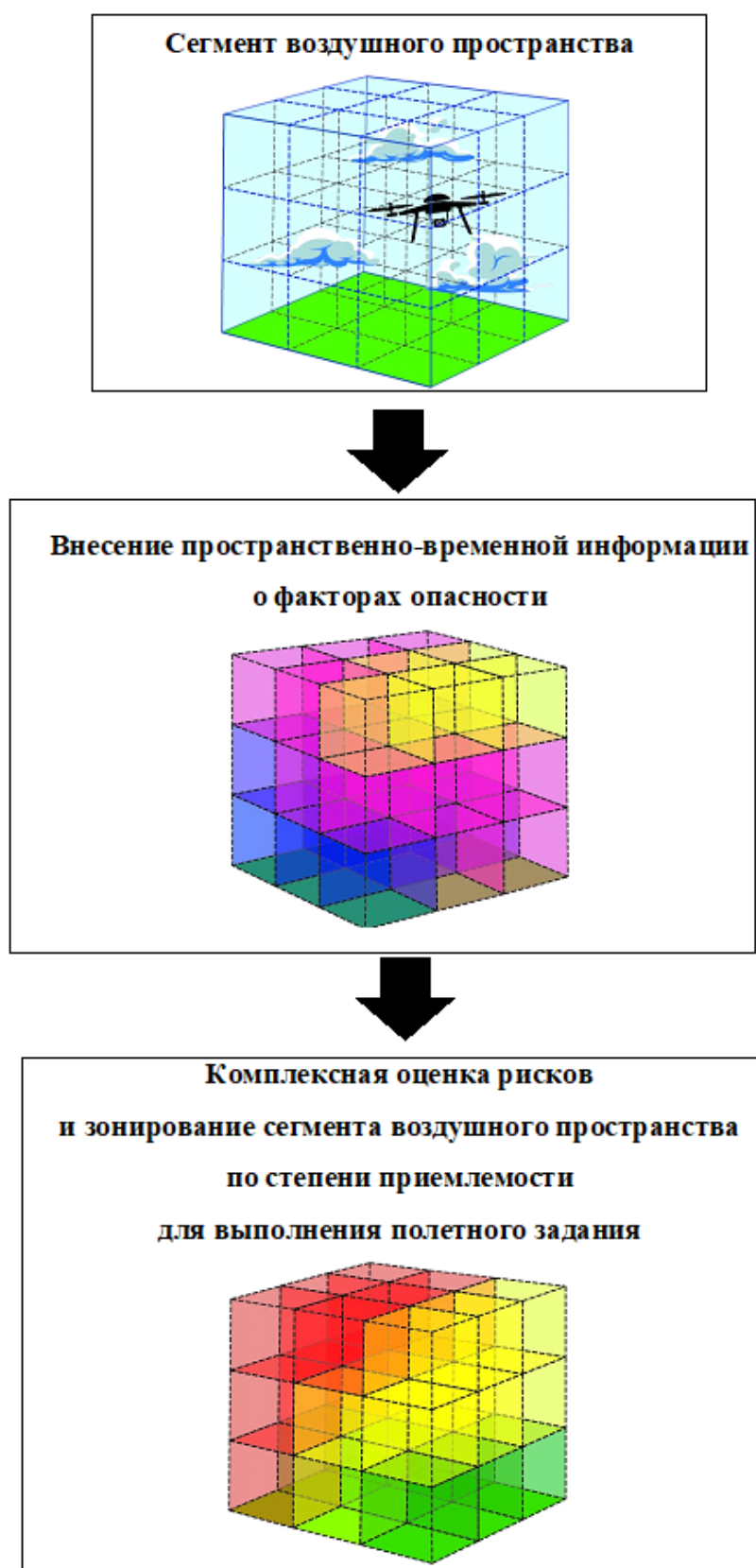


Рис. 4. Оценка рисков в районе планируемого полета в момент времени
Fig. 4. Assessment of risks in the area of the planned flight at a given time

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. **Махитко 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 авиакомпаниях 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 in-flight 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., Турыгина 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., Yelisseyev, 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

УДК 621.45.034

DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-1-53-66

Grid influence issues in the methodology of numerical modelling of non-stationary combustion processes

A.T. Savchuk¹, L.V. Moskalenko¹

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

Abstract: Estimation of reserves of combustion process stability in gas turbine engine (GTE CC) based on artificial modeling of non-stationary process (NP) excitation in the combustion chambers in temperature-pressure parameters is an actual problem in engine engineering. An increasing number of aircraft require the use of engines with high gas dynamic stability (GDS) up to 30% and more, for example, when creating power plants for vertical and short take-off and landing aircrafts, ekranoplans (ground-effect vehicles) and etc. The use of computational fluid dynamics (CFD) tools for calculating combustion flows in the combustion chamber of a gas turbine engine is currently an integral part of the design process, since a numerical study, in contrast to a full-scale experiment, requires significantly fewer material resources providing the ability to model expensive and unsafe cases of aircraft flight operation that are difficult to implement at the stage of bench tests, such as: crossing a jet distrait or a shock wave front (e.g., when an ammunition detonates) in front of the air intake of an air-jet engine, critical crosswind during takeoff leading to flow separation on the air intake cowl, vertical gusts and atmospheric turbulence, flight at high angles of attack, aircraft evolution (slip, etc.). The results of numerical simulation are decisively determined by the limitations of the applied models and simplifying assumptions for the simulated flow. There are many sources of errors in any calculation using computational gas dynamics methods: accumulated calculation errors, sensitivity to grid size, discretisation, flow extrapolation in grid interfaces of the used solver (ANSYS.Fluent), errors of turbulence models, assumptions and simplifications applied to the design, etc. This paper considers the grid effect on the problem of proving the random nature of gas oscillations in the combustion chamber of a gas turbine engine, which is essential for determining the gas dynamic stability of the engine as a whole.

Key words: computational fluid dynamics, non-stationary process, combustion chamber, grid effect.

For citation: Savchuk, A.T., Moskalenko, L.V. (2025). Grid influence issues in the methodology of numerical modelling of nonstationary combustion processes. Civil Aviation High Technologies, vol. 28, no. 1, pp. 53–66. DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-1-53-66

К вопросам сеточного влияния в методике численного моделирования нестационарных процессов горения

А.Т. Савчук¹, Л.В. Москаленко¹

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

Аннотация: Оценка запасов устойчивости процессов горения в камерах сгорания газотурбинных двигателей (КС ГТД), основанная на искусственном моделировании возбуждения нестационарных процессов (НП) в КС, в параметрах температура – давление представляет собой актуальную задачу двигателестроения. Все большее количество летательных аппаратов (ЛА) требуют применения двигателей с высокой газодинамической устойчивостью (ГДУ) вплоть до 30 % и более, например при создании силовых установок для самолетов вертикального и укороченного взлета и посадки, экранопланов и др. Применение инструментария вычислительной гидрогазодинамики (англ. CFD – Computational Fluid Dynamics) для расчета горящих течений в КС ГТД в настоящее время является неотъемлемым этапом процесса проектирования, так как проведение численного исследования, в отличие от натурного эксперимента, требует значительно меньших материальных ресурсов, предоставляющих возможности моделирования трудно реализуемых на этапе стендовых испытаний дорогостоящих и небезопасных случаев летной эксплуатации ЛА, таких как пересечение реактивной струи впереди летящего ЛА либо фронта ударной волны (например, при подрыве боеприпаса) перед воздухозаборником воздушно-реактивного двигателя (ВРД), критический боковой ветер при взлете, приводящий к срыву

потока на обечайке воздухозаборника, вертикальные порывы и турбулентность атмосферы, полет на больших углах атаки, эволюции ЛА (скольжение и др.). Результаты численного моделирования решающим образом определяются учетом ограничений применяемых моделей и упрощающих предположений для моделируемого течения. Существует множество источников ошибок в любых расчетах с использованием методов вычислительной газовой динамики: аккумулированные ошибки вычислений, чувствительность к размеру сетки, дискретизации, экстраполяции потоков в сеточных интерфейсах используемого солвера (ANSYS Fluent), ошибки моделей турбулентности, допущения и упрощения, применяемые к конструкции, и т. д. В данной работе рассмотрено сеточное влияние на задачу доказательства случайной природы колебаний газа в КС ГТД, имеющей существенное значение для определения газодинамической устойчивости двигателя в целом.

Ключевые слова: вычислительная гидрогазодинамика, нестационарный процесс, камера сгорания, сеточное влияние.

Для цитирования: Савчук А.Т., Москаленко Л.В. К вопросам сеточного влияния в методике численного моделирования нестационарных процессов горения // Научный вестник МГТУ ГА. 2025. Т. 28, № 1. С. 53–66. DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-1-53-66

Introduction

This article covers the issues of problem formulation and assumptions made on the basis of the computational model of the combustion chamber on stationary calculation modes (low throttle, cruising, maximum thrust mode), in its non-diverging burning transient solution with the required levels of basic temperature/pressure/velocity mismatches in the outlet section [1], followed by artificial excitation of a non-stationary process (NP) on the overall accuracy, as well as the required computational resources and stability of the resulting solution. Based on the results of the work, recommendations will be made to the main investigated parameters of the computational model, namely, the productive maximum size of the computational grid.

The created computational grid should satisfy the minimum criteria of solvers simulating high-gradient processes occurring in the combustion chamber, and it should be borne in mind that with an increase in the number of grid elements, the computation time increases accordingly. At the same time, as studies [2, 3] show, there is an upper limit of the grid size, when the obtained result does not depend on a further reduction in the size of computational cells.

When selecting the parameters of the mathematical model, the fundamental physical nature of the flow in the combustion chamber should be taken into account. When calculating the combustion chamber with the resulting NP, trans- and supersonic flow zones inevitably appear, the joint consideration of which with the subsonic

domain will determine the choice of parameters of the entire computational model of the transition process. A number of publications [4–9] provide recommendations and an assessment of the influence of the specified flow parameters and the calculation grid with verification of the obtained results [10–14].

As described in detail in [1, 3], the proposed methodology is multi-stage and the solution of the problem passes sequentially through the stages of stationary and non-stationary calculations. As a part of the current study, a series of non-stationary calculations of the model combustion chamber were carried out on grids of different resolutions (coarse, medium, fine) and equivalent topology and finite element quality (unstructured grid with tetrahedral finite elements generated by the standard ANSYS-Mesh toolbox using the Delano triangulation method with comparable quality of the grid elements) were preceded by a stationary calculation until a stable solution was achieved according to the criteria of achieving low root-mean-square residuals (about $1e-2$ on primitive variables) and mass imbalance of incoming and outgoing flows (no more than 2%). The actual estimates and criteria of the state of the transient process of non-stationary combustion according to the formal calculation criteria used below are described in detail in [4].

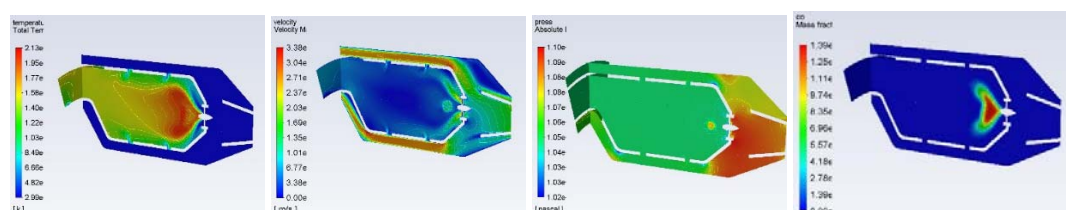


Fig. 1. From left to right: temperature, flow rate, absolute pressure, mass fraction of CO

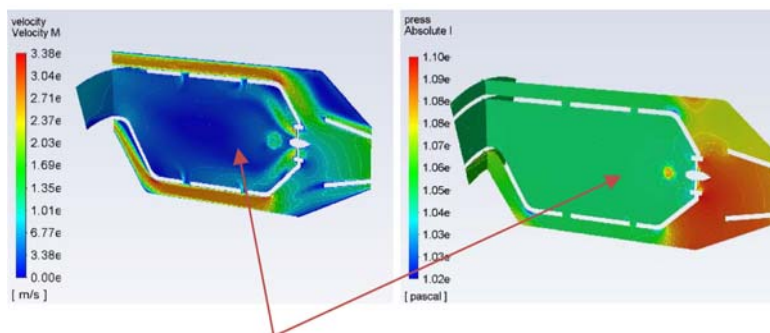


Fig. 2. Constant ignition region, velocity on the left, absolute pressure on the right

General parameters of the series of numerical experiments

The computational grid of the minimum CAD element of the combustion chamber sector is created adequate to the computational resources (the main limiting factor is the total computation time of no more than 48 hours) and to satisfy the minimum requirements and limitations of the applied ANSYS models:

- turbulence $k-\epsilon$ Standard;
- Discrete Phase Modeling (DPM) ANSYS Fluent;
- Linearized Instability Sheet Atomization (LISA);
- Non-Premixed Combustion¹;
- mechanism of chemical kinetics of combustion of “kerosene + air” fuel pair (Jet-A) [15].

If a fixed time step is used, its maximum value should not be greater than the time of passage of both the flow and its disturbance, one layer of cells in any direction. The use of an adaptive time step, implemented in ANSYS. Fluent, al-

lows automated calculation of the values of each time step, taking into account the above-mentioned limitations both in solutions for steady flow and in transient processes.

After achieving the stable result of the steady-state calculation of the combustion process of the fuel assemblies in the combustion chamber (fig. 1), under the following initial conditions, which are the same for all studied calculation grids, namely: pressure drop in the combustion chamber 0.5 atm, inlet air temperature 300 K, fuel supply 1.5 g/s (kerosene), turbulence model $k-\epsilon$ of the 2nd order of accuracy, number of inflationary wall layers 12, combustion chamber volume 0.266432 litres.

After switching the problem to a non-stationary solver with an adaptive time step at a point 10 mm downstream of the constant ignition region of the fuel assembly (a sphere with a diameter of 2.5 mm and a temperature of 4500 K) (fig. 2).

Using ANSYS software control, an artificial non-stationary region with a diameter of 5 mm was created with a temperature equal to the ignition temperature and an overpressure of 25 atm (fig. 3).

After the NP excitation (fig. 4), the calculation on grids of different resolution was continued at the same settings of the adaptive non-

¹ CFD EXPERTS Simulate the Future. (2021). Ansys Fluent Theory Guide, 1069 p. Available at: https://dl.cfdexperts.net/cfd_resources/Ansys_Documentation/Fluent/Ansys_Fluent_Theory_Guide.pdf (accessed: 25.08.2024).

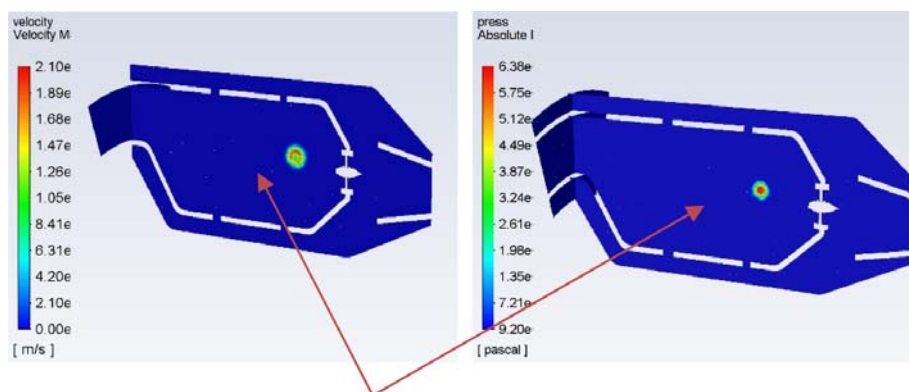


Fig. 3. Excitation region of the NP, flow velocity on the left, absolute pressure on the right

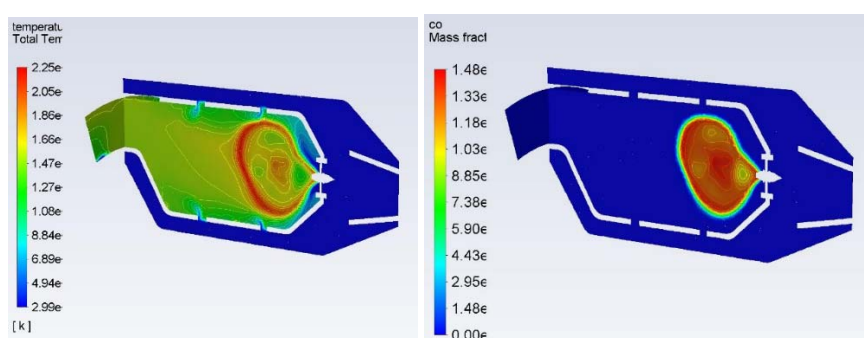


Fig. 4. Temperature after excitation of NP on the left, mass fraction of CO on the right, fine grid

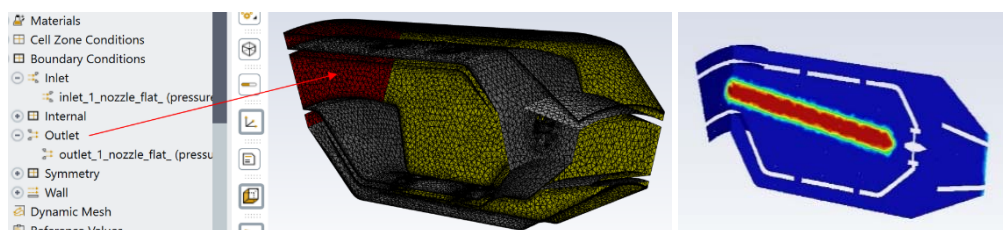


Fig. 5. Outlet section on the right, “fire path” on the left

stationary solver, either until the values close to stable by primitive variables (temperature/velocity/pressure) and mass flow rate were achieved in the outlet section of the combustion chamber Outlet, provided that there is a “fire path” (having the physical meaning of a cylindrical control volume) from the ignition zone to the geometric centre of the Outlet section (fig. 5), or until a critical (poor stall combustion termination) or non-physical result is obtained, the time step is assumed to be combined (fixed at the steady stage and adaptive at the transient stage).

According to the authors of this article, the criterion for stabilization of the burning solution should be as “inert” as possible, i.e. it should not be subject to instantaneous computational precessions in different solvers, inevitable when calculating transient processes in spatial grids, which leads to the assumption that attempts to find criteria for formal stabilization of burning solutions in the area of high gradients of primitive gas-dynamic variables (temperature, velocity, pressure) and concentration of unstable chemical components in the combustion front are unpromising. In view of the unstable nature

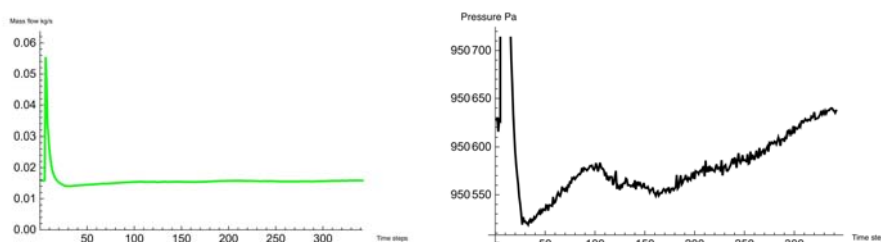


Fig. 6. Fine grid, mass flow on the left, pressure on the right

of the fuel assembly combustion process in the combustion chamber caused by the discreteness of the fuel supply modeling, which is reflected in the real combustion chamber by pressure pulsations in the fuel supply path to the injectors, the criteria for stabilization of the non-stationary calculation are proposed to be the occurrence of oscillations of the controlled parameters (primitive variables and mass flow rate) having a pronounced random nature from a specific time point of the calculation until its completion. It is proposed to determine the determination of the random nature of instability of measured variables as the values of the Pearson criterion for the average values of flow parameters (temperature, velocity, pressure, mass flow rate) in the Outlet section, under the conditions of existence of the combustion process (temperature in the “fire path” is not less than 1100 K) and restoration of engine thrust (not less than 98% of the initial value).

General parameters of generated grids

The study included a series of combustion chamber calculations on unstructured grids with tetrahedral elements of different resolutions (coarse, medium, fine) of equivalent topology and finite element quality. The grid model was built in the standard ANSYS. Fluent grid builder from the boundary layer (with the highest possible topological quality of the third layer of prismatic boundary layer elements, due to the greatest energy contribution of these layers to the formation of the turbulence pattern) with further moderate growth of finite element sizes towards the geometric centre of the computational do-

main. To determine the required grid characteristics in the near-wall regions, the Y+ criterion was determined according to the method [16] in a series of cold blowdowns of the combustion chamber for all computational grids; the number of prismatic layers in all experiments was assumed to be 12 with exponential growth of thickness.

Calculation results on a fine grid (1.16 million cells)

The linearly interpolated calculation results, namely the average integral values of mass flow rate, pressure, temperature, velocity and CO concentration in the outlet section are presented in Figures 6, 7. The solution on the fine grid did not require adaptation of the steady result for its subsequent use by the non-stationary solver, which allowed to excite the non-stationary process at the 5th iteration.

The red vertical line in Figure 8 indicates the iteration of NP excitation – iteration No. 5.

The correspondence between calculation time and time steps (iterations) is shown in Figure 9.

The calculation results show that at the time of 0.201965 s (iteration No. 325) from the start of non-stationary calculations until its completion, the calculation can be considered as having a tendency towards non-divergence, all fluctuations of primitive variables and mass flow rate are predominantly random in nature and the temperature on the entire “fire path” (fig. 10) is higher than the temperature of stable combustion of the fuel assembly.

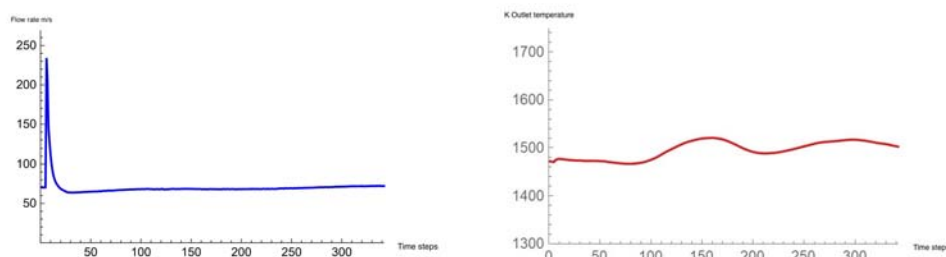


Fig. 7. Fine grid, flow rate on the left, temperature on the right

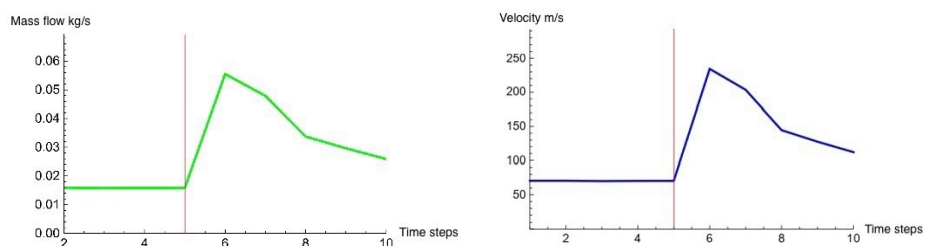


Fig. 8. Fine grid, NP excitation iteration, mass flow on the left, flow rate on the right

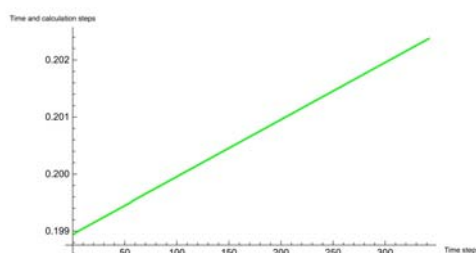


Fig. 9. Fine grid, time and calculation steps

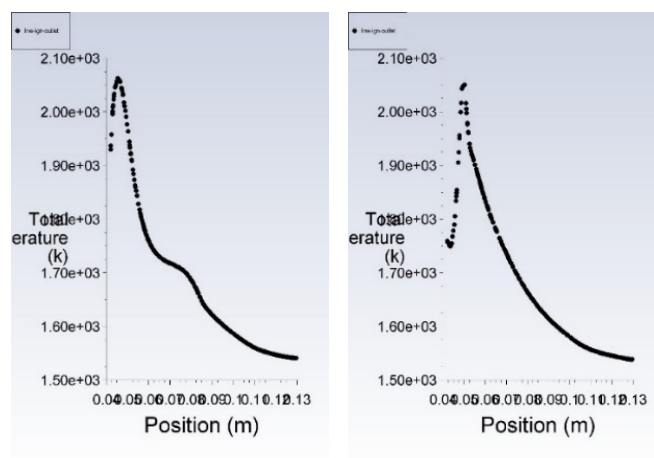


Fig. 10. Fine grid, temperature on the “fire path” iteration No. 325 on the left, iteration of the end of the calculation on the right

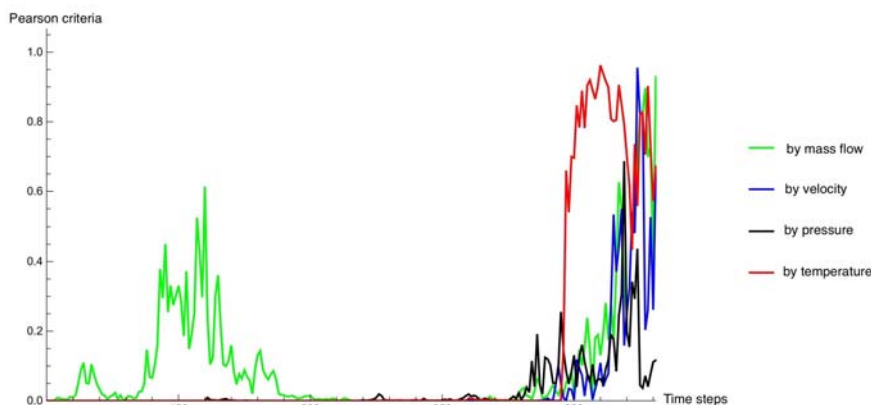


Fig. 11. Fine grid, Pearson criteria

The results of calculations on a fine grid, presented above, allow us to conclude that the process of combustion of fuel assembly combustion in the combustion chamber stabilizes within about 3×10^{-3} s and thrust recovery at the level of 99.6% of the moment preceding the NP excitation. The formal criterion for determining the iteration from which the process should be considered non-divergent is proposed to be the iteration where the value of the Pearson criterion for all observed variables in the range up to the end of the calculation minus 10 iterations (for the possibility of fundamental use of the statistical mathematical apparatus) does not fall into the region of small positive values (not less than 0.2).

Pearson's criteria for achieving output flow stability are shown in Figure 11.

Calculation results on the medium grid (668 thousand cells)

The calculation results are linearly interpolated, the average integral values of mass flow rate, pressure, temperature, velocity and CO

concentration in the outlet section are presented in Figures 12, 13. The solution on the medium grid required adaptation of the steady result for its use by the non-stationary solver (conducting a non-stationary calculation up to small fluctuations in the residuals of primitive variables at the level of 10^{-3}), the conditions for NP excitation were achieved at the 78th iteration.

The red vertical line in Figure 14 indicates the iteration of NP excitation, iteration No. 78.

The calculation shows that during the whole non-stationary calculation (715 iterations), the calculation has no formal sign of predominantly random temperature fluctuations according to the Pearson criterion (fig. 15 on the right) and mass flow rate (fig. 17), the surge in the Pearson criterion value temperature around the 700th iteration is due to the small volume of statistical sample and is not an indicator of stabilization. The temperature on the "fire path" (fig. 16) is higher than the temperature of stable combustion of the fuel assembly from the 450th iteration, but the observed intermediate data of the flow velocity abandonment (≈ 1.5 km/s) and mass flow rate after NP excitation do not allow us to consider this result acceptable.

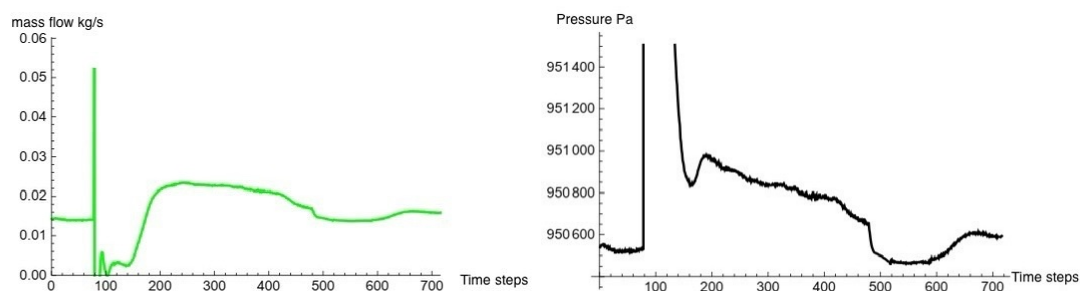


Fig. 12. Medium grid, mass flow on the left, pressure on the right

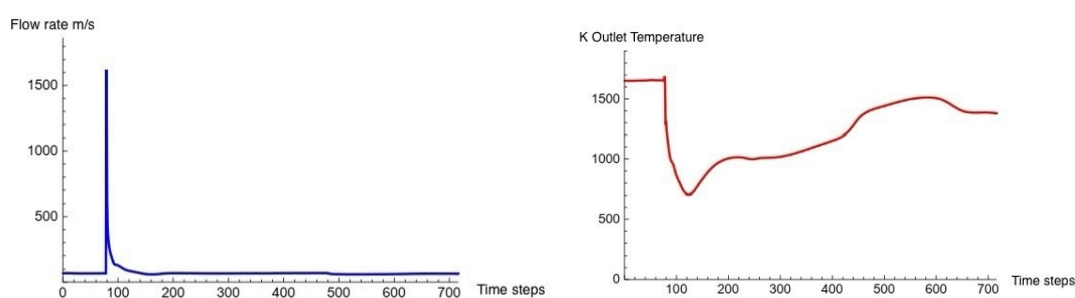


Fig. 13. Medium grid, flow rate on the left, temperature on the right

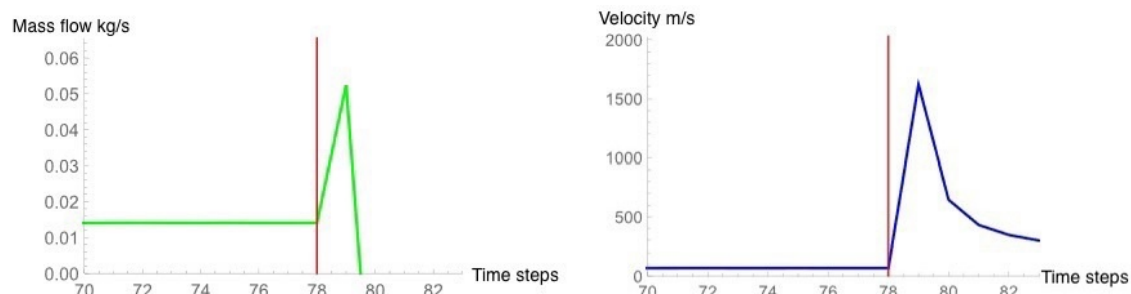


Fig. 14. Medium grid, NP excitation iteration, mass flow on the left, flow velocity on the right

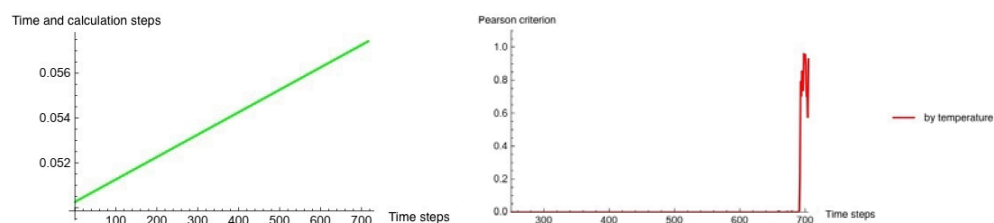


Fig. 15. Grid medium, time and calculation steps on the left, Pearson criterion on the right

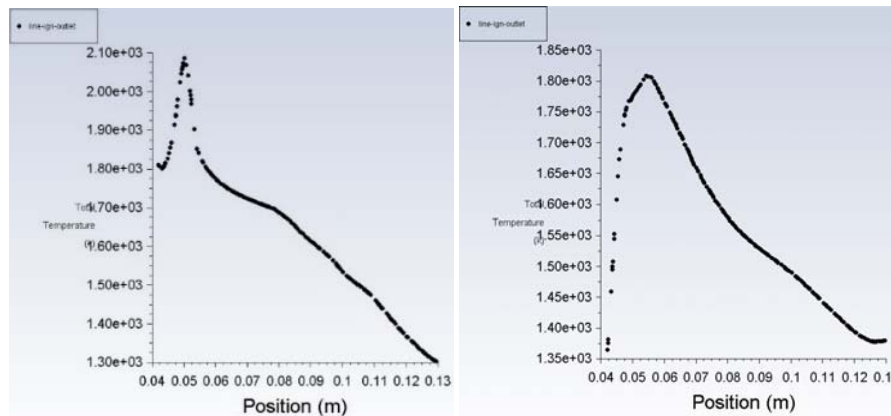


Fig. 16. Medium grid, temperature on the “fire path” iteration No. 450 on the left, iteration of the end of the calculation on the right

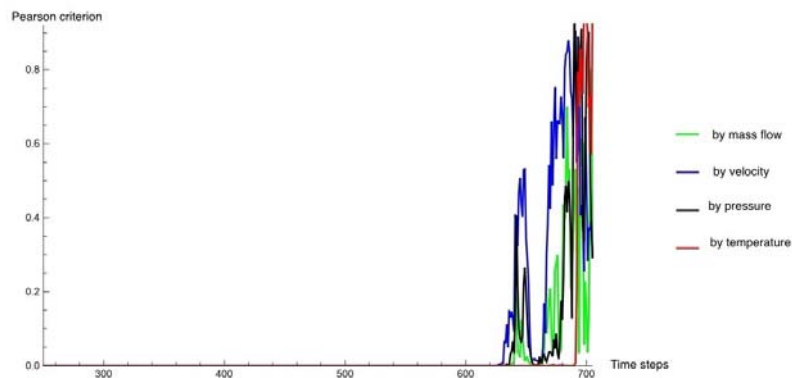


Fig. 17. Medium grid, Pearson criteria

Calculation results on coarse grid (333 thousand cells)

The calculation results are linearly interpolated, the average integral values of mass flow rate, pressure, temperature, velocity and CO concentration in the outlet section are presented in Figures 18, 19. The solution on the coarse grid required a significant adaptation of the steady result for its use by the non-stationary solver; the conditions for NP excitation were achieved at the 878th iteration.

The red vertical line in Figure 20 indicates the NP excitation iteration, iteration No. 878, the correspondence between the calculation time and calculation iterations in Figure 21.

The calculation shows that the temperature on the “fire path” (fig. 22) is lower than the combustion temperature of the fuel assembly throughout the entire non-stationary calculation, i.e. the engine does not provide thrust. The intermediate data of the flow velocity ≈ 6 km/s and mass flow rate ≈ 0.14 kg/s, with the mass of air in the combustion chamber volume = $3.261e-4$ kg, after NP excitation, as well as a significant difference in the transition point to the range of significant value of the Pearson criterion for the most inert and, as a consequence, the most delayed fixed physical quantity (temperature) relative to other variables (fig. 23) do not allow us to consider the result obtained on the coarse grid correct and physical.

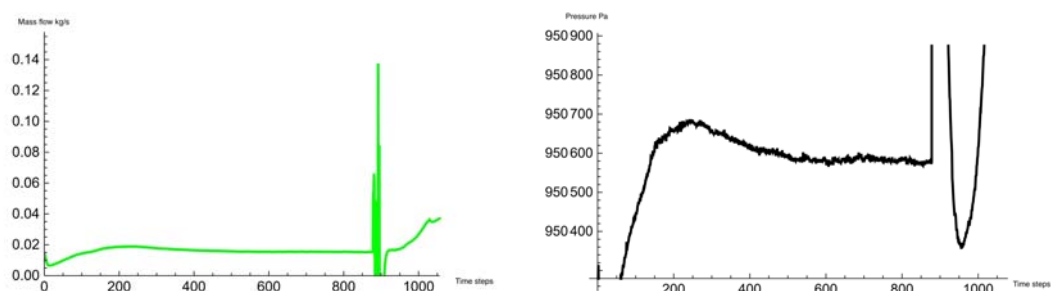


Fig. 18. Coarse grid, mass flow on the left, pressure on the right

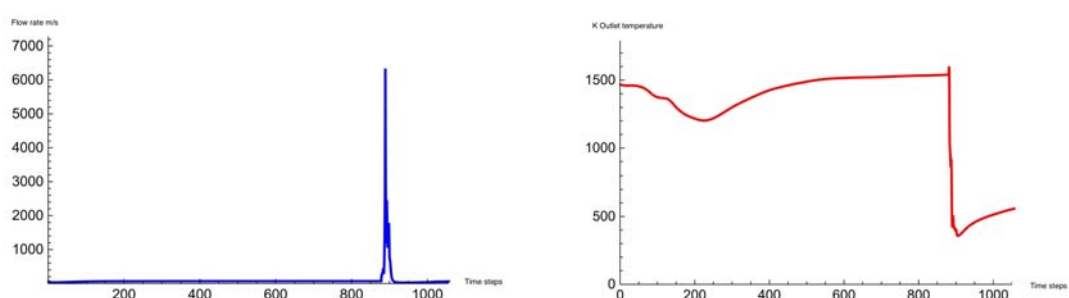


Fig. 19. Coarse grid, flow velocity on the left, temperature on the right

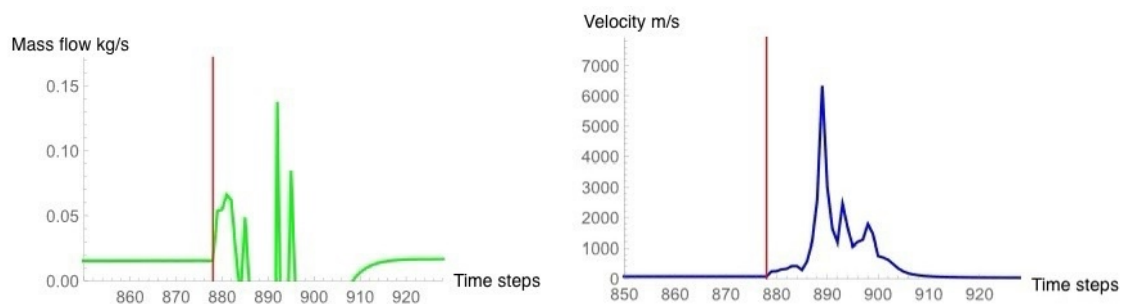


Fig. 20. Coarse grid, NP excitation iteration, mass flow on the left, flow velocity on the right

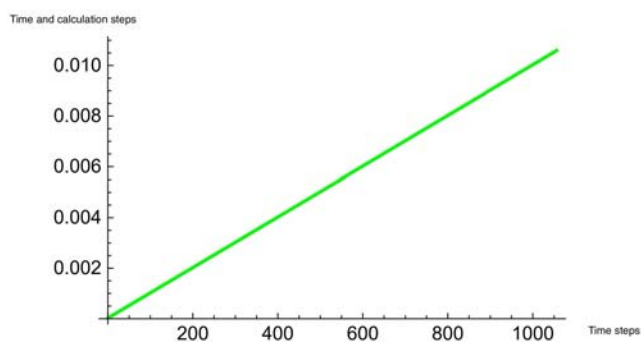


Fig. 21. Coarse grid, time and calculation steps

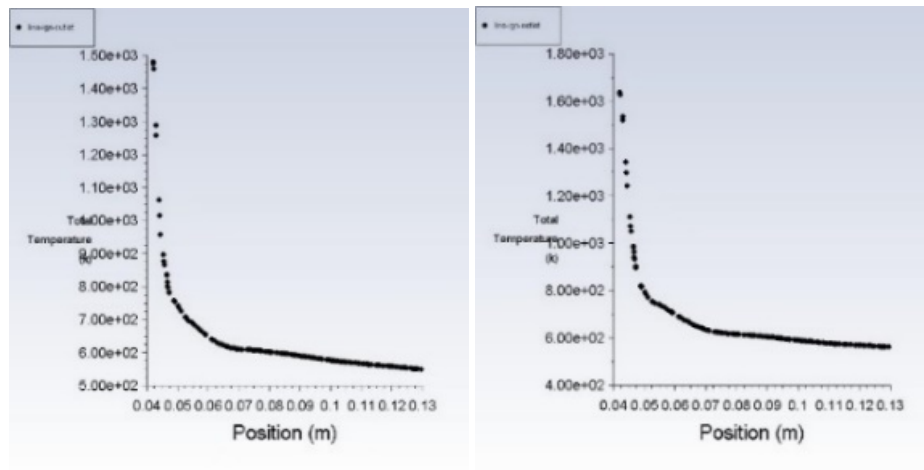


Fig. 22. Coarse grid, temperature on the “fire path” iteration No. 1000 on the left, iteration of the end of the calculation on the right

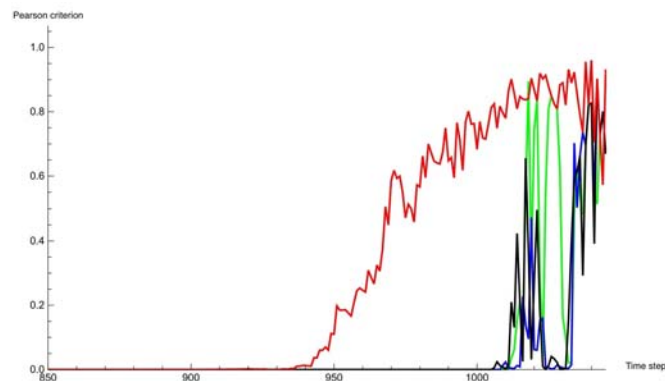


Fig. 23. Coarse grid, Pearson criteria

Discussion of results

The results of calculations on grids of different resolutions:

- fine – 1.16 million cells;
- medium – 668 thousand cells;
- coarse – 333 thousand cells

have shown the possibility of fundamentally using medium-resolution grids with obtaining significant results. Coarse-resolution grids produce non-physical results. High-resolution grids, as expected, produce results with significant computational resource costs.

The size of the computational grid for a particular problem should be determined by a series of numerical experiments with equivalent initial conditions and gradual refinement of the grid

until obtaining slightly different time points of the beginning of stabilization of the solution by the values of throws of the controlled parameters during the simulation of the entire process under the conditions specified in paragraph “General parameters of the series of numerical experiments”.

Conclusion

The currently used numerical methods, widely used for solving gas dynamics problems, allow modeling complex multiphysics processes occurring in burning gas flows. At the same time, all numerical methods have limitations related to grid sensitivity, i.e. the dependence of calculation results on the size and topology of the grid on which they are carried out. This can

lead to errors and inaccuracies in the results, especially if the grid is coarse or its topology does not correspond to the features of the problem being solved.

The Pearson criterion is one of the most common methods of testing hypotheses about the correspondence of the empirical distribution to the theoretical one. It allows assessing the degree of discrepancy between the observed and expected in accordance with the theoretical distribution.

The proposed computational technique is critically sensitive to the volume and quality of the grids used and shows results of sufficient accuracy when using fine and medium grids with acceptable time cost and using average power computing resources (19.2 GFlops).

References

1. Savchuk, A.T., Yakovlev, A.A. (2021). Method of the numerical modelling of unstationary processes in the combustion chamber of a gas turbine engine. *Journal of Physics Conference Series*, vol. 1925. ID: 012009. DOI: 10.1088/1742-6596/1925/1/012009 (accessed: 25.08.2024).
2. Le Sausse, P., Fabrie, P., Arnou, D., Clunet, F. (2013). CFD comparison with centrifugal compressor measurements on a wide operating range. In: *EPJ Web of Conferences*, vol. 45. ID: 01059. DOI: 10.1051/epjconf/20134501059 (accessed: 25.08.2024).
3. Savchuk, A.T., Yakovlev, A.A. (2020). Numerical modelling of unstationary processes in the combustion chamber of a gas turbine engine. In: *XIII Mezhdunarodnaya konferentsiya po prikladnoy matematike i mekhanike v aerokosmicheskoy otrasli (AMMAI'2020): materialy konferentsii*. Moscow: MAI, pp. 101–103. (in Russian)
4. Savchuk, A.T., Yakovlev, A.A. (2021). On the issues of numerical modeling of unsteady processes in the combustion chamber of a gas turbine engine. In: *XXII Mezhdunarodnaya konferentsiya po vychislitel'noy mekhanike i sovremennym prikladnym programmnyim sistemam (VMSPPS'2021): materialy konferentsii*. Moscow: MAI, pp. 624–626. (in Russian)
5. Mangani, L., Casartelli, E., Mauri, S. (2012). Assessment of various turbulence models in a high pressure ratio centrifugal compressor with an object oriented CFD code. *Journal of Turbomachinery*, vol. 134, no. 6. ID: 061033. DOI: 10.1115/1.4006310 (accessed: 25.08.2024).
6. Pecnik, P., Pieringer, P., Sanz, W. (2005). Numerical investigation of the secondary flow of a transonic turbine stage using various turbulence closures. In: *Proceedings of the ASME Turbo Expo 2005*, vol. 6, pp. 1185–1193. DOI: 10.1115/GT2005-68754.
7. Trébinjac, I., Kulisa, P., Bulot, N., Rochuon, N. (2009). Effect of unsteadiness on the performance of a transonic centrifugal compressor stage. *Journal of Turbomachinery*, vol. 131, no. 4. ID: 041011. DOI: 10.1115/1.3070575 (accessed: 25.08.2024).
8. Ibaraki, S., Matsuo, T., Kuma, H., Sumida, K., Suita, T. (2002). Aerodynamics of a transonic centrifugal compressor impeller. *ASME Turbo Expo 2002: Power for Land, Sea, and Air*, vol. 5, pp. 473–480. DOI: 10.1115/gt2002-30374
9. Danilishin, A.M., Kozhukhov, Y.V., Neverov, V.V., Malev, K.G., Mironov, Y.R. (2017). The task of validation of gas-dynamic characteristics of a multistage centrifugal compressor for a natural gas booster compressor station. In: *AIP Conference Proceedings*, vol. 1876. ID: 020046. DOI: 10.1063/1.4998866 (accessed: 25.08.2024).
10. Elfert, M., Weber, A., Wittrock, D., Peters, A., Voss, C., Nicke, E. (2017). Experimental and numerical verification of an optimization of a fast rotating high-performance radial compressor impeller. *Journal of Turbomachinery*, vol. 139, no. 10. ID: 101007 DOI: 10.1115/1.4036357 (accessed: 25.08.2024).
11. Zandsalimy, M., Ollivier Gooch, C.F. (2024). Mesh optimization for improved computational fluid dynamics numerical stability and convergence rate. In: *AIAA Aviation Forum and Ascend 2024*. DOI: 10.2514/6.2024-3615 (accessed: 25.08.2024).
12. Zandsalimy, M., Ollivier-Gooch, C. (2022). A novel approach to mesh optimization to stabilize unstructured finite volume simulations. *Journal of Computational Physics*,

vol. 453. ID: 110959. DOI: 10.1016/j.jcp.2022.110959 (accessed: 25.08.2024).

13. **Sharbatdar, M., Ollivier Gooch, C.F.** (2013). Eigenanalysis of truncation and discretization error on unstructured meshes. In: *21st AIAA Computational Fluid Dynamics Conference*, ID: 3089, 25 p. DOI: 10.2514/6.2013-3089 (accessed: 25.08.2024).

14. **Chen, L.** (2016). Stability analysis and stabilization of unstructured finite volume method. *A thesis Master of Applied Science*. University of British Columbia, 122 p. DOI: 10.14288/1.0300002 (accessed: 25.08.2024).

15. **Lee, C.-M., Kundu, K.** (2013). Simplified Jet-A kinetic mechanism for combustor application. *NASA Technical Memorandum 105940 AIAA-93-0021*, 13 p. Available at: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19930006315/downloads/19930006315.pdf> (accessed: 25.08.2024).

16. **Pugachev, P.V., Svoboda, D.G., Zharkovsky, A.A.** (2016). Calculation and design of blade hydraulic machines. Calculation of viscous flow in blade hydraulic machines using the ANSYS CFX: tutorial. St. Petersburg: SPbPU, 120 p. (in Russian)

Список литературы

1. **Savchuk A.T., Yakovlev A.A.** Method of the numerical modelling of unstationary processes in the combustion chamber of a gas turbine engine [Электронный ресурс] // *Journal of Physics Conference Series*. 2021. Vol. 1925. ID: 012009. DOI: 10.1088/1742-6596/1925/1/012009 (дата обращения: 25.08.2024).

2. **Le Sausse P.** CFD comparison with centrifugal compressor measurements on a wide operating range / P. Le Sausse, P. Fabrie, D. Arnou, F. Clunet [Электронный ресурс] // *EPJ Web of Conferences*, 2013. Vol. 45. ID: 01059. DOI: 10.1051/epjconf/20134501059 (дата обращения: 25.08.2024).

3. **Савчук А.Т., Яковлев А.А.** Численное моделирование нестационарных процессов камеры сгорания газотурбинного двигателя // XIII Международная конференция по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли (АММАИ'2020): мате-

риалы конференции. Алушта, 06–13 сентября 2020 г. М.: МАИ, 2020. С. 101–103.

4. **Савчук А.Т., Яковлев А.А.** К вопросам численного моделирования нестационарных процессов камеры сгорания газотурбинного двигателя // XXII Международная конференция по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2021): материалы конференции. Алушта, 04–13 сентября 2021 г. М.: МАИ, 2021. С. 624–626.

5. **Mangani L., Casartelli E., Mauri S.** Assessment of various turbulence models in a high pressure ratio centrifugal compressor with an object oriented CFD code [Электронный ресурс] // *Journal of Turbomachinery*. 2012. Vol. 134, no. 6. ID: 061033. DOI: 10.1115/1.4006310 (дата обращения: 25.08.2024).

6. **Pecnik P., Pieringer P., Sanz W.** Numerical investigation of the secondary flow of a transonic turbine stage using various turbulence closures // *Proceedings of the ASME Turbo Expo 2005*, 2005. Vol. 6. Pp. 1185–1193. DOI: 10.1115/GT2005-68754.

7. **Trébinjac I.** Effect of unsteadiness on the performance of a transonic centrifugal compressor stage / I. Trébinjac, P. Kulisa, N. Bulot, N. Rochuon [Электронный ресурс] // *Journal of Turbomachinery*. 2009. Vol. 131, no. 4. ID: 041011. DOI: 10.1115/1.3070575 (дата обращения: 25.08.2024).

8. **Ibaraki S.** Aerodynamics of a transonic centrifugal compressor impeller / S. Ibaraki, T. Matsuo, H. Kuma, K. Sumida, T. Suita // *ASME Turbo Expo 2002: Power for Land, Sea, and Air*. 2002. Vol. 5. Pp. 473–480. DOI: 10.1115/gt2002-30374

9. **Danilishin A.M.** The task of validation of gas-dynamic characteristics of a multistage centrifugal compressor for a natural gas booster compressor station / A.M. Danilishin, Y.V. Kozhukhov, V.V. Neverov, K.G. Malev, Y.R. Mironov [Электронный ресурс] // *AIP Conference Proceedings*, 2017. Vol. 1876. ID: 020046. DOI: 10.1063/1.4998866 (дата обращения: 25.08.2024).

10. **Elfert M.** Experimental and numerical verification of an optimization of a fast rotating high-performance radial compressor impeller /

M. Elfert, A. Weber, D. Wittrock, A. Peters, C. Voss, E. Nicke [Электронный ресурс] // Journal of Turbomachinery. 2017. Vol. 139, no. 10. ID: 101007 DOI: 10.1115/1.4036357 (дата обращения: 25.08.2024).

11. Zandsalimy M., Ollivier Gooch C.F. Mesh optimization for improved computational fluid dynamics numerical stability and convergence rate [Электронный ресурс] // AIAA Aviation Forum and Ascend 2024. DOI: 10.2514/6.2024-3615 (дата обращения: 25.08.2024).

12. Zandsalimy M., Ollivier-Gooch C. A novel approach to mesh optimization to stabilize unstructured finite volume simulations [Электронный ресурс] // Journal of Computational Physics. 2022. Vol. 453. ID: 110959. DOI: 10.1016/j.jcp.2022.110959 (дата обращения: 25.08.2024).

13. Sharbatdar M., Ollivier Gooch C.F. Eigenanalysis of truncation and discretization error on unstructured meshes [Электронный ресурс] // 21st AIAA Computational Fluid Dy-

namics Conference, 2013. ID: 3089. 25 p. DOI: 10.2514/6.2013-3089 (дата обращения: 25.08.2024).

14. Chen L. Stability analysis and stabilization of unstructured finite volume method [Электронный ресурс] // A thesis Master of Applied Science. University of British Columbia, 2016. 122 p. DOI: 10.14288/1.0300002 (дата обращения: 25.08.2024).

15. Lee C.-M., Kundu K. Simplified Jet-A kinetic mechanism for combustor application [Электронный ресурс] // NASA Technical Memorandum 105940 AIAA-93-0021, 1993. 13 p. URL: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19930006315/downloads/19930006315.pdf> (дата обращения: 25.08.2024).

16. Пугачев П.В., Свобода Д.Г., Жарковский А.А. Расчет и проектирование лопастных гидромашин. Расчет вязкого течения в лопастных гидромашинах с использованием пакета ANSYS CFX: учеб. пособие. СПб.: СПбПУ, 2016. 120 с.

Information about the authors

Andrey T. Savchuk, Candidate for a Scientific Degree of the Aircraft Engines Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, andrey.sav4uk@yandex.ru.

Lada V. Moskalenko, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Aircraft Engines Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, l.moskalenko@mstuca.ru.

Сведения об авторах

Савчук Андрей Тодорович, соискатель МГТУ ГА, andrey.sav4uk@yandex.ru.

Москаленко Лада Вячеславовна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры двигателей летательных аппаратов МГТУ ГА, l.moskalenko@mstuca.ru.

Поступила в редакцию 25.11.2024
Одобрена после рецензирования 16.12.2024
Принята в печать 23.01.2025

Received 25.11.2024
Approved after reviewing 16.12.2024
Accepted for publication 23.01.2025

УДК 377.169.3

DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-1-67-77

К вопросу об упражнении на диспетчерском тренажере при подготовке диспетчеров управления воздушным движением в образовательных организациях гражданской авиации

Р.А. Субботин¹

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

Аннотация: Задача совершенствования профессиональной подготовки диспетчеров управления воздушным движением (УВД) является одной из важнейших в гражданской авиации (ГА). Это обуславливается тем, что уровень профессиональной подготовки во многом определяет уровень безопасности полетов и эффективности использования воздушного пространства. Обновление и техническая модернизация систем и средств УВД требует разработки новых программ и методик подготовки диспетчеров УВД. Методика тренажерной практики на диспетчерском тренажере, являющаяся главным элементом практической подготовки диспетчеров УВД в образовательных учреждениях ГА, также требует постоянного совершенствования. В настоящей работе на основе анализа и обобщения опыта организации и проведения учебной тренажерной практики на диспетчерском тренажере в вузе исследовалось такое явление, как упражнение на диспетчерском тренажере. Были рассмотрены существенные признаки упражнения: цель, задача, аэронавигационный фон, связность с учебным процессом, тип, а также свойства: трудность, сложность упражнения. При исследовании сложности упражнения были введены понятия относительной и абсолютной сложности. Относительная сложность упражнения отражает его внешнюю сторону во взаимосвязи с его местом в структуре учебной дисциплины и в системе всех формируемых навыков. Абсолютная сложность упражнения отражает его внутреннюю структуру как взаимосвязанную совокупность требуемых для выполнения только данного упражнения навыков. Предложены аналитические зависимости для расчета относительной и абсолютной сложности с учетом соблюдения принципа одной сложности. Введены понятия практической, среднестатистической и индивидуальной трудности упражнения на диспетчерском тренажере. Предложена аналитическая зависимость для их расчета. Предложена классификация упражнения на диспетчерском тренажере по основаниям: цели выполнения упражнения, формы упражнения, решаемой в упражнении задачи, времени выполнения, степени участия инструктора-преподавателя, форме организации подыгрыша. Предложены определения понятия «тип упражнения» и, собственно, самого понятия «упражнение на диспетчерском тренажере». Полученные в работе результаты направлены на дальнейшее развитие теоретических положений подготовки диспетчеров УВД и могут быть использованы в ходе организации и проведения тренажерной практики на диспетчерском тренажере в образовательных учреждениях ГА.

Ключевые слова: подготовка диспетчеров УВД, диспетчерский тренажер, упражнение на диспетчерском тренажере, навык, цель упражнения, задача упражнения, тип упражнения, относительная и абсолютная сложность упражнения, трудность упражнения, классификация упражнений.

Для цитирования: Субботин Р.А. К вопросу об упражнении на диспетчерском тренажере при подготовке диспетчеров управления воздушным движением в образовательных организациях гражданской авиации // Научный вестник МГТУ ГА. 2025. Т. 28, № 1. С. 67–77. DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-1-67-77

On the subject of an ATC simulator exercise in the training of air traffic controllers at Civil Aviation Educational Institutions

R.A. Subbotin¹

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

Abstract: The task of improving the professional training of air traffic controllers is one of the most important in civil aviation (CA). This is due to the fact that the level of professional training largely determines the level of flight safety and the efficiency of airspace utilization. Updating and technical modernization of ATC systems and aids requires the development of new programs and

methodologies for ATCO (ATC officers) training. The methodology of simulator training on the air traffic control simulator, which is a key component of practical training for ATCO in civil aviation educational institutions, also requires continuous improvement. This study analyzes and summarizes the experience of organizing and conducting training exercises on the air traffic control simulator at a university focusing on the phenomenon of exercises on the ATC simulator. The essential features of the exercise were considered: objective, task, aeronautical background, coherence with the training process, type, as well as properties: difficulty and complexity of the exercise. In studying the complexity of the exercise, the concepts of relative and absolute complexity were introduced. The relative complexity of the exercise reflects its external aspect in relation to its place in the structure of the academic discipline and within the system of all the skills being developed. The absolute complexity of the exercise reflects its internal structure as an interconnected set of skills required exclusively for the completion of that specific exercise. Analytical dependencies are proposed for calculating the relative and absolute complexity, taking into account the principle of one complexity. The concepts of practical, average, and individual difficulty of the exercises on the air traffic control simulator are introduced. An analytical dependence for their calculation is proposed. A classification of the exercise on the air traffic control simulator is proposed based on the following criteria: the objectives of the exercise, the form of the exercise, the task being solved in the exercise, the execution time, the degree of instructor involvement, and the form of the comeback from the instructor. Definitions of the concept of the exercise type and, in fact, the very concept of the exercise on the air traffic control simulator are proposed. The results obtained in this work are aimed at further development of theoretical principles in air traffic controllers training and can be used in organizing and conducting simulator practice on the air traffic controller simulator in educational institutions of civil aviation.

Key words: air traffic controller training, air traffic control simulator, ATC simulator exercise, skill, exercise objective, exercise task, exercise type, relative and absolute exercise complexity, exercise difficulty, exercise classification.

For citation: Subbotin, R.A. (2025). On the subject of an ATC simulator exercise in the training of air traffic controllers at Civil Aviation Educational Institutions. Civil Aviation High Technologies, vol. 28, no. 1, pp. 67–77. DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-1-67-77

Введение

Центральное место в практической подготовке будущих диспетчеров управления воздушным движением (УВД) в образовательных учреждениях гражданской авиации (ГА) занимает тренажерная практика на диспетчерском тренажере. Ее цель заключается в формировании у студентов навыков применения методов управления воздушным движением [1]. Проблеме совершенствования тренажерной подготовки посвящено много исследований как в отечественной науке, так и за рубежом. В работах [2–6] рассматриваются вопросы совершенствования системы подготовки и разработки методов управления процессами профессиональной подготовки и переподготовки диспетчеров УВД. В работах [7–9] представлены подходы к построению системы формирования профессионально-мыслительной способности операторов аэронавигационных систем в образовательной организации. В работах [10, 11] предлагаются концептуальные структуры тренажерно-моделирующих комплексов нового поколения, используемых для обучения, подготовки и переподготовки диспетчеров УВД ГА. Работы [12, 13] посвящены исследованию моделей и алгоритмов поддержки принятия ре-

шений и их использованию в тренажерной подготовке специалистов УВД. Исследования [14, 15] посвящены разработке моделей подготовки операторов автоматизированных систем, в том числе и диспетчеров УВД, основанных на агентно ориентированном подходе с целью повышения эффективности обучения за счет контроля уровня знаний, умений и навыков. При этом без внимания исследователей остается такой важнейший элемент содержания тренажерной подготовки, как, собственно, упражнение на диспетчерском тренажере: его сущность, свойства, классификация, типы. Всестороннее исследование природы упражнений такого рода позволит повысить эффективность их разработки и применения в учебном процессе, а также приведет к возникновению благоприятных условий для создания новых и совершенствования существующих методов управления процессом обучения диспетчеров УВД.

Методы и методология исследования

В работе был проведен анализ руководящих документов, публикаций в научных изданиях, а также всесторонний анализ и обоб-

шение практики подготовки и выполнения упражнений на диспетчерском тренажере, выявлены существенные условия и признаки, позволившие сформулировать его определение, ввести понятия относительной и абсолютной сложности, трудности, типа упражнения на диспетчерском тренажере. Была проведена классификация упражнений на диспетчерском тренажере. Для количественного выражения сложности и трудности предложены аналитические модели.

Результаты исследования

Сущность, цели и задачи упражнения на диспетчерском тренажере

В общем случае упражнение – специально созданное учебное задание, целью которого является формирование умений и навыков, а также их дальнейшее совершенствование [16].

В педагогическом смысле упражнение – планомерно организованное повторное выполнение действия (умственного или практического) с целью его усвоения. В рамках упражнения осуществляется «уяснение содержания действия, его закрепление, обобщение и автоматизация либо одной из процедур наряду с объяснением и заучиванием, которые предшествуют упражнению и обеспечивают первоначальное уяснение содержания действия и его предварительное закрепление» [17].

Анализируя вышеприведенные определения, можно заметить, что упражнение рассматривается как форма учебного задания, по содержанию представляющее собой процесс выполнения обучающимся некоторых учебных действий. Упражнение носит практический характер обучения, развивающий первоначальное теоретическое ознакомление обучающегося с новым учебным материалом, и направлено на закрепление, обобщение и автоматизацию действий. Упражнение имеет цель и, как следствие, ориентировано на достижение конкретного результата. В процессе отработки упражнения обучающийся решает

задачу, содержащую действия (операции), выполняемые определенным способом или с использованием известных приемов. Планирование определяет место упражнения в системе последовательности других упражнений, что обуславливает нарастание сложности упражнения по мере формирования навыков и умений. Многократность выполнения типовых упражнений требуется для сохранения устойчивости формируемых навыков и умений. Упражнение разрабатывается лицом, имеющим специальную квалификацию.

Целью упражнения на диспетчерском тренажере является формирование, закрепление, восстановление или контроль какого-либо навыка или совокупности навыков и умений, необходимых диспетчеру УВД для выполнения функциональных обязанностей на рабочем месте диспетчерского пункта (сектора). Успешно сформированные навыки и умения входят в состав следующих технологических операций: прием дежурства и подготовка рабочего места; соблюдение правил и процедур управления воздушным движением; анализ и решение конфликтных ситуаций; соблюдение правил радиосвязи и фразеологии радиообмена; приоритетность, регулирование очередности, управление скоростями, векторение, эшелонирование, техника управления воздушным движением с использованием средств наблюдения и автоматизации обслуживания воздушного движения (ОВД); действия при управлении воздушным движением в особых случаях и условиях в полете¹.

Задача, решаемая в упражнении на диспетчерском тренажере, может быть универсальной и специальной. Универсальная зада-

¹ Приказ Минтранса России от 14.04.2010 № 93 (ред. от 12.08.2020) «Об утверждении Порядка функционирования непрерывной системы профессиональной подготовки, включая вопросы освидетельствования, стажировки, порядка допуска к работе, периодически повышения квалификации руководящего и диспетчерского персонала» (зарегистрировано в Минюсте России 26.08.2010 № 18264) [Электронный ресурс] // ГАРАНТ.РУ. 2020. URL: <https://base.garant.ru/199197/> (дата обращения: 28.09.2024).

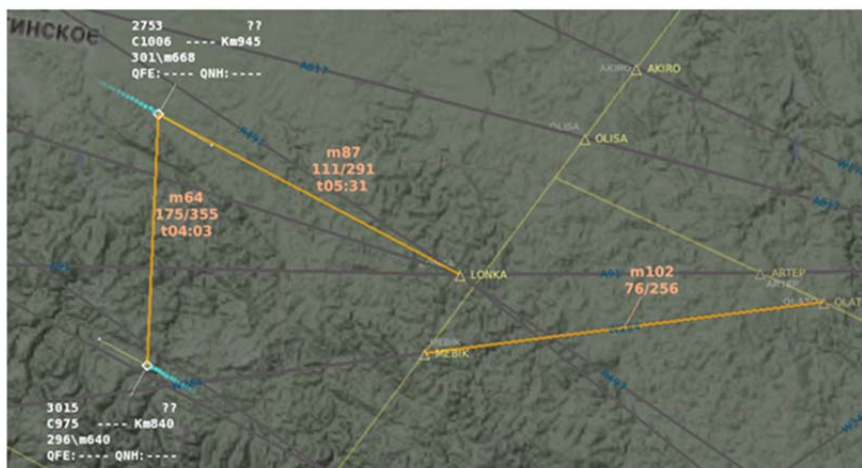


Рис. 1. Фрагмент выполнения задачи определения расстояния между двумя ВС, между двумя точками, между точкой и ВС с помощью инструмента «вектор-измеритель»

Fig. 1. Fragment of the task to determine the distance between two aircraft, between two points, between a point and an aircraft using the “vector-measuring” tool

ча – это задача общего характера, не зависящая от вида диспетчерского пункта, для которого она была разработана. Например, определение с помощью инструмента «вектор-измеритель» расстояния между двумя воздушными судами (ВС), между двумя точками, между точкой и ВС в окне воздушной обстановки является универсальной задачей. В ней формируется навык работы с инструментом «вектор-измеритель»². Фрагмент выполнения такой задачи представлен на рис. 1.

Специальная задача решается на рабочем месте диспетчера конкретного диспетчерского пункта, например диспетчерского пункта подхода, командно-диспетчерского пункта (Вышка), диспетчерского пункта круга, диспетчерского пункта системы посадки и др.

Упражнение на диспетчерском тренажере выполняется на фоне имитируемой динамически изменяющейся воздушной обстановки в заданном районе (секторе) ОВД или на площади маневрирования аэродрома (далее – аэронавигационная обстановка). В зависимо-

сти от цели упражнения и задачи, решаемой в нем, воздушная обстановка может задаваться, устанавливая требуемые значения интенсивности воздушного движения, пропускной способности элементов структуры воздушного пространства, вводя ограничения на использование воздушного пространства, изменяя метеорологическую, орнитологическую, радиоэлектронную обстановку в районе ответственности органа ОВД. Фрагмент аэронавигационной обстановки, на фоне которой выполняется упражнение «Обеспечение бокового эшелонирования между двумя ВС» [1], представлен на рис. 2.

Сложность и трудность упражнений на диспетчерском тренажере

Сложность упражнения на диспетчерском тренажере, на наш взгляд, это категория, характеризующая структуру умений и навыков, включенных в состав упражнения. Количественно сложность может быть выражена через отношение вновь формируемых навыков в данном упражнении к общему количеству навыков, содержащихся в изучаемой теме, с учетом навыков, требуемых для выполнения этого упражнения и сформированных в ходе отработки упражнений предыдущих тем учеб-

² Программное обеспечение комплекса автоматизации управления воздушным движением «Топаз ОВД». Инструкция по эксплуатации для диспетчеров УВД [Электронный ресурс] // АС УВД «ТОПАЗ», 2021. 21 с. URL: <https://lemz.ru/%D1%82%D0%BE%D0%BF%D0%B0%D0%B7-10/> (дата обращения: 28.09.2024).



Рис. 2. Фрагмент аэронавигационной обстановки, на фоне которой выполняется упражнение «Обеспечение бокового эшелонирования между двумя ВС»

Fig. 2. Fragment of the air navigation situation for which the exercise “Ensuring lateral separation between two aircraft” is performed

ной дисциплины. При этом в ходе разработки нового упражнения необходимо придерживаться принципа одной сложности. Принцип одной сложности означает, что в состав упражнения включается только один новый навык, который необходимо сформировать, а остальные навыки должны быть уже известны обучающемуся, и их требуется закрепить, тренировать или восстановить. Аналитически сложность C (от англ. complexity) упражнения на диспетчерском тренажере можно выразить с помощью следующей зависимости:

$$C_i^j = (\sum_{l=1}^j (\frac{n_k^l}{\sum_{i=1}^k s_i^l}) - 1) + \frac{n_i^j}{\sum_{i=1}^k s_i^j}, \quad (1)$$

где C_i^j – сложность i -го упражнения j -й темы в тематическом плане учебной дисциплины;

n_k^l – номер k -го конечного навыка в l -й теме;

$\sum_{i=1}^k s_i^l$ – сумма всех навыков s (от англ. skill) l -й темы;

n_i^j – номер i -го вновь формируемого навыка в j -й (текущей) теме;

$\sum_{i=1}^k s_i^j$ – сумма всех навыков j -й (текущей) темы.

Предположим, что учебная дисциплина включает две темы, в каждой из которых формируется 10 новых навыков. Без учета повторения однотипных упражнений, используя зависимость (1), можно рассчитать сложность каждого упражнения, формирую-

щего новый навык по мере последовательного изучения тем. Расчеты показывают (рис. 3), что самое простое упражнение будет иметь сложность 0,1, а самое сложное – 2,0 условных единицы.

На практике вряд ли возможно разработать такое упражнение, в которое были бы включены все ранее изученные навыки ОВД. С учетом принципа одной сложности иным способом сложность упражнения на диспетчерском тренажере можно определить как совокупность взаимосвязанных требуемых для выполнения только данного упражнения ранее сформированных навыков s_i и одного нового формируемого навыка. В аналитическом виде такую сложность упражнения можно выразить с помощью следующей зависимости:

$$C_i^j = \sum_{i=1}^k s_i + 1. \quad (2)$$

Сложность упражнения, рассчитанную с помощью зависимости (1), назовем относительной сложностью упражнения $C_{\text{относ}}^j$. Относительная сложность упражнения отражает его внешнюю сторону – связывает упражнение с его местом в структуре учебной дисциплины и в системе всех формируемых навыков. Относительную сложность необходимо учитывать при планировании тренажерной практики на диспетчерском тренажере.



Рис. 3. Изменение относительной сложности упражнения на тренажере, формирующего новый навык по мере последовательного изучения тем
Fig. 3. Change in the relative complexity of the exercise on the simulator that forms a new skill as sequential topics are studied

Сложность упражнения, рассчитанную с помощью зависимости (2), назовем абсолютной сложностью упражнения C_{iabc}^j . Абсолютная сложность упражнения не имеет четко выраженной связи со структурой учебной дисциплины, но характеризует внутреннюю структуру навыков упражнения и может быть использована при планировании индивидуальных траекторий прохождения тренажерной практики на диспетчерском тренажере для каждого обучающегося.

Моделирование сложности упражнения на диспетчерском тренажере осуществляется с учетом основных и дополнительных факторов³, характеризующих особенности ОВД в зоне ответственности диспетчерского пункта (сектора) органа ОВД, для которого разрабатывается упражнение. К основным структурным факторам относятся: средневзвешенное время нахождения воздушного судна в границах зоны ответственности диспетчер-

ского пункта (сектора) органа обслуживания воздушного движения; особенность структуры воздушного пространства зоны ответственности диспетчерского пункта (сектора) органа обслуживания воздушного движения; упорядоченность самолетопотока в границах зоны ответственности диспетчерского пункта (сектора) ОВД. К дополнительным факторам относятся: техническое оснащение диспетчерского пункта (сектора) органа ОВД; наличие полетов с переменным профилем; наличие государственной границы в зоне ответственности диспетчерского пункта (сектора) органа ОВД; отсутствие прямой связи со смежными диспетчерскими пунктами (секторами) органов ОВД; количество диспетчеров, одновременно работающих за одним пультом диспетчерского пункта (сектора) органа ОВД.

Следует особо отметить, что наибольшие затруднения при решении задач ОВД у обучающихся вызывают моделируемые элементы структуры воздушного пространства, являющиеся вероятными местами возникновения конфликтных и потенциальных конфликтных ситуаций (КС и ПКС). К ним относятся: точки схождения и пересечения маршрутов движения ВС; точки, имеющие два или более сходящихся потока с переменным профилем по-

³ Приказ Росавиации от 07.11.2012 № 757 «Об утверждении Методики определения нормативов пропускной способности диспетчерских пунктов (секторов) органов обслуживания воздушного движения» [Электронный ресурс] // ГАРАНТ.РУ. 2012. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70165526/> (дата обращения: 28.09.2024).

лета; точки, имеющие три или более сектора УВД, принимающих участие в формировании интервалов движения; количество и протяженность участков воздушных трасс двустороннего движения с переменным профилем полета; участки воздушных трасс или траекторий движения ВС, а также точки пересечения и схождения маршрутов, на которых моделируется загруженность в часы пик, достигающая порогового значения, близкого к их нормативной пропускной способности (НПС).

Трудность упражнения на диспетчерском тренажере – это показатель, характеризующий способность субъекта испытания в установленное время выполнить упражнение заданной сложности. Под субъектом испытания понимается обучающийся, группа обучающихся, опытный диспетчер УВД или группа таких диспетчеров. Время выполнения упражнения при подготовке диспетчеров УВД имеет особую важность, обусловленную спецификой работы органов ОВД.

Можно выделить практическую, среднестатистическую и индивидуальную трудность упражнения на диспетчерском тренажере.

Практическая трудность упражнения – это статистически определяемая трудность, с которой выполняют данное упражнение опытные диспетчеры УВД на протяжении заданного периода наблюдений.

Среднестатистическая трудность упражнения – это статистически определяемая трудность, с которой обучающиеся выполняют данное упражнение на протяжении заданного периода наблюдений.

Индивидуальная трудность упражнения – это трудность, определяемая по результату решения задачи упражнения одним обучающимся.

Практическая и среднестатистическая трудности упражнения должны быть статистически устойчивы. Индивидуальная трудность при положительном эффекте учебного процесса должна иметь тенденцию к уменьшению в зависимости от изменения степени сформированности необходимых для выполнения упражнения навыков до достижения статистически устойчивых значений, близких к эталонным.

Аналитически трудность упражнения на диспетчерском тренажере D (от англ. difficulty) можно выразить с помощью следующего выражения:

$$D = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{r_i^{cur}}{r_i^{std}} \right)}{n}, \quad t_{вып} \leq t_{зад}, \quad (3)$$

где n – количество оцениваемых в упражнении показателей сформированности навыков;

r^{cur} – значение показателя сформированности навыка у субъекта испытания, полученное в ходе выполнения упражнения;

r^{std} – эталонное (наилучшее) значение оцениваемого показателя формируемого навыка, которое должно учитывать требования руководящих документов по реализации процедур ОВД, статистику выполнения упражнения опытными диспетчерами УВД и определяться разработчиком упражнения;

$\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{r_i^{cur}}{r_i^{std}} \right)}{n}$ – выражает успешность выполнения упражнения;

$t_{вып} \leq t_{зад}$ – временные ограничения выполнения упражнения.

Диапазон значений D может находиться в интервале $0 \leq D \leq 1$, где близость к 0 соответствует самому легкому упражнению, а близость к 1 – самому трудному.

Классификация и типы упражнений на диспетчерском тренажере

В целях всестороннего изучения свойств упражнений на диспетчерском тренажере необходимо предложить их классификацию.

Первым основанием классификации является цель выполнения упражнения. Упражнение может быть разработано в обучающих, тренировочных и контрольных целях. Обучающая цель – формирование и закрепление навыков, необходимых для ОВД, тренировочная цель – совершенствование или восстановление навыков ОВД, контрольная цель – проведение промежуточного или итогового контроля приобретенных навыков.

По форме упражнения можно выделить индивидуальные и групповые упражнения.

По задаче, решаемой в упражнении, могут быть универсальные и специальные упражнения. Универсальные упражнения направлены на отработку навыков выполнения технологических операций ОВД, работы со средствами связи, навигации, наблюдения и функционалом автоматизированных систем управления воздушным движением. В свою очередь специальные упражнения направлены на отработку навыков выполнения функциональных обязанностей с рабочих мест: диспетчерского пункта (ДП) руления, стартового ДП, ДП подхода, командно-диспетчерского пункта, ДП круга, ДП системы посадки, ДП районного центра Единой системы организации воздушного движения, местного ДП и других ДП.

По времени выполнения упражнения могут быть с ограничением и без ограничений времени выполнения.

Возможны и другие основания классификации упражнений на диспетчерском тренажере, например по степени участия инструктора, по форме организации подыгрыша (с пилотом-человеком или пилотом – роботизированной системой).

Важной задачей организации учебной тренажерной практики на диспетчерском тренажере является разработка типовых упражнений для многократного повторения одних и тех же умственных и технологических операций с целью закрепления вновь приобретаемого или тренировки уже имеющегося навыка. В работе [18] понятие типа упражнения определяется как разновидность упражнений, обладающих набором устойчивых признаков, которые соответствуют цели и месту упражнения в процессе формирования знаний, навыков и умений. Типовых упражнений должно быть достаточное количество, чтобы не допустить эффекта привыкания, например, когда навык закрепляется путем многократного выполнения одного и того же упражнения. Типовыми упражнениями могут считаться упражнения с эквивалентными относительными и абсолютными сложностями, но разработанные на различных фонах аэрона-

вигационной обстановки и с несколько измененными условиями задачи. Относительная сложность типового упражнения будет указывать на его место в учебной дисциплине и в системе всех уже сформированных навыков. Абсолютная сложность будет указывать на внутреннюю структуру навыков упражнения, необходимых для решения поставленной в нем задачи.

Тип упражнения на диспетчерском тренажере – это признак некоторой группы упражнений, разработанных с одинаковой целью, занимающих соответствующее место в учебном процессе, отличающихся друг от друга задачей или аэронавигационной обстановкой, на фоне которой они выполняются.

Таким образом, упражнение на диспетчерском тренажере – это разработанное в соответствии с учебным планом и программами учебных дисциплин задание, выполняемое на диспетчерском тренажере на фоне моделируемой аэронавигационной обстановки в целях формирования, закрепления или восстановления навыков обслуживания (управления) воздушного движения.

Обсуждение полученных результатов и заключение

Полученные в работе результаты являются дальнейшим развитием теоретических положений подготовки диспетчеров УВД и могут быть использованы в ходе организации и проведения тренажерной практики на диспетчерском тренажере в образовательных учреждениях ГА.

За рамками данной работы остались вопросы оценивания выполнения упражнений на диспетчерском тренажере, что, по мнению автора, является сложной научной проблемой и требует самостоятельного исследования. Каждый тип упражнения по-своему уникален в сочетании цели, задач, аэронавигационного фона. Следовательно, система оценочных средств для каждого типа упражнения также должна быть уникальной, а в целях автоматизации – приведена к количественным показателям.

В работе [19] со ссылками на труды Г.Д. Кириллова, И.Я. Лернера, М.И. Махмутова, М.Н. Скаткина указывается на доказанность того, что в учебном процессе как в целом явлении цели, содержание образования, методы обучения, контроль и оценка результатов учебной деятельности взаимосвязаны и взаимообусловлены. Взаимосвязанность, взаимообусловленность и специфика процесса подготовки диспетчера УВД явно обнаруживаются при подведении итогов учебной практики на диспетчерском тренажере, когда делается вывод о готовности учащихся к решению задач ОВД. Если большая часть обучающихся успешно справилась с задачами учебной практики, то и учебный процесс в целом можно считать хорошо организованным и сбалансированным.

Список литературы

1. **Гладенков М.А.** Тренажерная практика на диспетчерском тренажере: пособие по проведению учебной практики / М.А. Гладенков, С.В. Губенко, А.Е. Коновалов, В.Б. Малыгин. М.: МГТУ ГА, 2015. 25 с.
2. **Крыжановский Г.А., Цепляев Ю.Ф.** К задаче управления процессами профессиональной подготовки авиадиспетчеров для автоматизированных систем управления воздушным движением // Автоматика и телемеханика. 1994. № 6. С. 140–153.
3. **Борисов В.Е.** Моделирование алгоритмов управления обучением в диспетчерских тренажерах // Автоматизация: проблемы, идеи, решения: сборник статей Международной научно-практической конференции. Уфа, 8 декабря 2017 г. Уфа: ОМЕГА САЙНС, 2017. С. 19–21.
4. **Кривоборский И.Ю.** Метод совершенствования системы подготовки диспетчеров управления воздушным движением к действиям в особых ситуациях // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. 2023. № 4 (41). С. 62–73.
5. **Сало Н.А., Сёдаш С.П., Кільменінов О.А.** Структура та методи інформаційно-аналітичної системи тестування та оцінювання знань диспетчерів управління повітряним рухом // Телекомунікаційні та Інформаційні Технології. 2020. № 2 (67). С. 153–162. DOI: 10.31673/2412-4338.2020.026253
6. **Çinar E., Tuncal A.** A comprehensive analysis of competency and training perspectives among air traffic controllers // Aviation. 2024. Vol. 28, no. 2. Pp. 54–63. DOI: 10.3846/aviation.2024.21501
7. **Крыжановский Г.А.** К проблеме формирования профессионально-мыслительной способности операторов аэронавигационных систем / Г.А. Крыжановский, В.В. Купин, В.А. Самойлов, И.Н. Шестаков // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. 2018. № 3 (20). С. 5–20.
8. **Крыжановский Г.А.** Единство процессов формирования профессионально-мыслительных способностей операторов аэронавигационных систем / Г.А. Крыжановский, В.В. Купин, В.А. Самойлов, И.Н. Шестаков // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. 2018. № 2 (19). С. 44–56.
9. **Крыжановский Г.А.** Когнитивный подход к первоначальной профессиональной подготовке операторов аэронавигационных систем / Г.А. Крыжановский, В.В. Купин, В.А. Самойлов, И.Н. Шестаков // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. 2021. № 4 (33). С. 69–83.
10. **Борисов В.Е., Борсоев В.А., Бондаренко А.А.** Разработка перспективных тренажеров, имеющих голосовую поддержку, с функцией автоматизации оценки навыков диспетчеров по управлению воздушным движением // Научный вестник МГТУ ГА. 2020. Т. 23, № 6. С. 8–19. DOI: 10.26467/2079-0619-2020-23-6-8-19
11. **Бестугин А.Р.** Новое поколение тренажеров для практической подготовки диспетчеров управления воздушным движением / А.Р. Бестугин, И.А. Киршина, А.Д. Филин, А.Ю. Иванов // Успехи современной науки и образования. 2017. Т. 4, № 4. С. 78–83.

12. **Мацкевич А.М.** Модели и алгоритмы поддержки принятия решений и их использование в тренажерной подготовке специалистов управления воздушным движением // Научный вестник МГТУ ГА. 2022. Т. 25, № 5. С. 25–36. DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-5-25-36

13. **Spencer D.A.** Applying artificial intelligence techniques to air traffic control automation // The Lincoln Laboratory Journal. 1989. Vol. 2, no. 3. Pp. 537–554.

14. **Лазырин М.Б.** Исследование и разработка методов планирования поведения интеллектуальных агентов в обучающих системах: дисс. ... канд. техн. наук. Тверь, 2006. 170 с.

15. **Сало Н.А., Яценко К.Г., Гогонянц С.Ю.** Модель підготовки диспетчерів управління повітряним рухом із застосуванням мультиагентного підходу // Телекомунікаційні Та Інформаційні Технології. 2020. № 1 (66). С. 68–78. DOI: 10.31673/2412-4338.2020.016878

16. **Ефремова Т.Ф.** Современный толковый словарь русского языка. М.: Астрель, 2006. 976 с.

17. **Бим-Бад Б.М.** Педагогический энциклопедический словарь. М.: Большая Российская энциклопедия, 2003. 528 с.

18. **Калинина М.С., Цыбанева В.А.** Ретроспективный анализ становления методического понятия «Упражнение» // Artium Magister. 2018. Т. 18, № 1. С. 12–19.

19. **Цейтлина Е.Ю.** Многокритериальная оценка результатов учебной деятельности учащихся в условиях перехода к личностно ориентированному обучению // Известия Российского государственного педагогического университета им. А.И. Герцена. 2008. № 60. С. 501–506.

References

1. **Gladenkov, M.A., Gubenko, S.V., Kononov, A.E., Malygin, V.B.** (2015). Simulator practice on air traffic control simulator: methodological recommendations for conducting educational practice. Moscow: MGTU GA, 25 p. (in Russian)

2. **Kryzhanovskij, G.A., Tseplyaev, Yu.F.** (1994). On professional training of dispatchers for computerized systems of air traffic control. *Avtomatika i Telemekhanika*, no. 6, pp. 140–153. (in Russian)

3. **Borisov, V.E.** (2017). Modeling of training control algorithms in air traffic control simulators. *Avtomatizatsiya: problemy, idei, resheniya: sbornik statey Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Ufa: OMEGA SCIENCES, pp. 19–21. (in Russian)

4. **Krivoborskiy, I.Ju.** (2023). A method of improving the system of training air traffic controllers to act in special situations. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta grazhdanskoy aviatsii*, no. 4 (41), pp. 62–73. (in Russian)

5. **Salo, N.A., Siedash, S.P., Kilmeninov, O.A.** (2020). Structure and methods of the information-analytical system of testing and evaluating the knowledge of air traffic controllers. *Telekommunikatsionnyye i Informatsionnyye Tekhnologii*, no. 2 (67), pp. 153–162. DOI: 10.31673/2412-4338.2020.026253 (in Ukrainian)

6. **Çinar, E., Tuncal, A.** (2024). A comprehensive analysis of competency and training perspectives among air traffic controllers. *Aviation*, vol. 28, no. 2, pp. 54–63. DOI: 10.3846/aviation.2024.21501

7. **Kryzhanovsky, G.A., Kupin, V.V., Samoilov, V.A., Shestakov, V.A.** (2018). On the problem of forming professional cognitive abilities of aeronautical system operators. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta grazhdanskoy aviatsii*, no. 3 (20), pp. 5–20. (in Russian)

8. **Kryzhanovsky, G.A., Kupin, V.V., Samoilov, V.A., Shestakov, V.A.** (2018). Unity of processes for forming professional cognitive abilities of aeronautical system operators. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta grazhdanskoy aviatsii*, no. 2 (19), pp. 44–56. (in Russian)

9. **Kryzhanovsky, G.A., Kupin, V.V., Samoilov, V.A., Shestakov, V.A.** (2021). Cognitive approach to the initial professional training of operators of aeronautical systems. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta*

grazhdanskoy aviatsii, no. 4 (33), pp. 69–83. (in Russian)

10. Borisov, V.E., Borsoev, V.A., Bondarenko, A.A. (2020). Development of promising simulators with voice support, with the function of automating the assessment of air traffic controllers' skills. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 23, no. 6, pp. 8–19. DOI: 10.26467/2079-0619-2020-23-6-8-19 (in Russian)

11. Bestugin, A.R., Kirshina, I.A., Filin, A.D., Ivanov, A.Yu. (2017). New generation of simulators for practical training of air traffic controllers. *Uspekhi sovremennoy nauki i obrazovaniya*, vol. 4, no. 4, pp. 78–83. (in Russian)

12. Matskevich, A.M. (2022). Models and algorithms for decision support and their use in simulator training of air traffic control specialists. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 25, no. 5, pp. 25–36. DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-5-25-36 (in Russian)

13. Spencer, D.A. (1989). Applying artificial intelligence techniques to air traffic control automation. *The Lincoln Laboratory Journal*, vol. 2, no. 3, pp. 537–554.

14. Lazyrin, M.B. (2006). Research and development of behavior planning methods for

intelligent agents in training systems: Cand. of Technical Sc. Thesis. Tver, 170 p. (in Russian)

15. Salo, N., Yatsenko, K., Hohoniants, S. (2020). Training model for air traffic controllers using a multi-agent approach. *Telekommunikatsionnyye i Informatsionnyye Tekhnologii*, no. 1 (66), pp. 68–78. DOI: 10.31673/2412-4338.2020.016878 (in Ukrainian)

16. Efremova, T.F. (2006). Modern explanatory dictionary of the Russian language. Moscow: Astrel, 976 p. (in Russian)

17. Bim-Bad, B.M. (2003). Pedagogical Encyclopedic Dictionary. Moscow: Bolshaya Rossiyskaya entsiklopediya, 528 p. (in Russian)

18. Kalinina, M.S., Tsybaneva, V.A. (2018). Retrospective analysis of the formation of the methodological concept “Exercise”. *Artium Magister*, vol. 18, no. 1, pp. 12–19. (in Russian)

19. Zeitlina, E.Yu. (2008). Multicriteria assessment of the results of students' educational activities in the context of the transition to personality-oriented learning. *Izvestia: Herzen University Journal of Humanities & Sciences*, no. 60, pp. 501–506. (in Russian)

Сведения об авторе

Субботин Роман Александрович, кандидат военных наук, доцент, доцент кафедры управления воздушным движением МГТУ ГА, r.subbotin@mstuca.ru.

Information about the author

Roman A. Subbotin, Candidate of Military Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Air Traffic Management Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, r.subbotin@mstuca.ru.

Поступила в редакцию 03.10.2024
Одобрена после рецензирования 25.11.2024
Принята в печать 23.01.2025

Received 03.10.2024
Approved after reviewing 25.11.2024
Accepted for publication 23.01.2025

УДК 656.13+551.588.74
DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-1-78-96

Усовершенствованная методика расчетного мониторинга выбросов парниковых газов от деятельности автомобильного и внедорожного транспорта в Российской Федерации

Ю.В. Трофименко¹, В.А. Гинзбург², А.Н. Якубович¹,
В.М. Лытов², С.В. Шелмаков¹, М.С. Зеленова²

¹Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет,
г. Москва, Россия

²Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля,
г. Москва, Россия

Аннотация: Предложена методика, позволяющая получать непротиворечивые и согласованные оценки объемов выбросов парниковых газов и газов-прекурсоров от автотранспорта и внедорожных мобильных машин и количественно оценивать их точность и неопределенность. Повышение точности оценок достигается за счет детализации исходных данных, отражающих специфику структуры национального автопарка и показателей транспортной деятельности, для чего используется широкий спектр статистических, вероятностных и экспертных методов. С использованием методики, реализованной в «Транспортной модели», возможно как восстановление временных рядов выбросов за предшествующие периоды с оценкой их точности и неопределенностей, так и выполнение сценарного моделирования в целях прогнозирования объемов выбросов в будущем. На основе методики получены количественные оценки выбросов трех видов парниковых газов и трех газов-прекурсоров от автотранспорта и внедорожных мобильных машин за период с 2010 по 2022 год, выполнено сопоставление результатов с данными Национального кадастра, впервые получены оценки выбросов для четырех категорий внедорожной техники, выполнена оценка потребления топлива и изменения численности автотранспорта всех категорий на период с 1990 по 2022 год. Сформирован информационный массив, содержащий официальные статистические данные о косвенных показателях транспортной деятельности по категориям автотранспортных средств за период с 1990 по 2022 год, с использованием методов множественной регрессии выполнено сопоставление результатов расчетов выбросов с косвенными показателями и количественно оценены точность и неопределенности этих результатов. Расчетные объемы выбросов парниковых газов при этом считались случайными величинами, для каждой из которых определялись доверительный интервал как показатель неопределенностей и медианная поправка как показатель точности. Подтверждено высокое качество результатов расчетов, выполненных на основе рассматриваемой методики.

Ключевые слова: парниковые газы, автотранспорт, прогнозирование выбросов, вероятностно-статистическое моделирование, методика расчета выбросов, показатели транспортной деятельности.

Для цитирования: Трофименко Ю.В. Усовершенствованная методика расчетного мониторинга выбросов парниковых газов от деятельности автомобильного и внедорожного транспорта в Российской Федерации / Ю.В. Трофименко, В.А. Гинзбург, А.Н. Якубович, В.М. Лытов, С.В. Шелмаков, М.С. Зеленова // Научный вестник МГТУ ГА. 2025. Т. 28, № 1. С. 78–96. DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-1-78-96

Improved methodology for the calculated monitoring of greenhouse gas emissions from the activities of road and off-road transport in the Russian Federation

Y.V. Trofimenko¹, V.A. Ginzburg², A.N. Yakubovich¹,
V.M. Lytov², S.V. Shelmakov¹, M.S. Zelenova²

¹Moscow Automobile and Road Construction State Technical University,
Moscow, Russia

²Institute of Global Climate and Ecology Named after Academician Y.A. Israel,
Moscow, Russia

Abstract: A methodology is proposed to obtain consistent and coherent estimates of greenhouse gas and precursor gas emissions from road transport and off-road vehicles and to quantify their accuracy and uncertainty. Accuracy increase of the estimates is achieved by detailing the initial data, reflecting the specific features of the national vehicle fleet structure and transport activity

indicators, for which a wide range of statistical, probabilistic and expert methods are used. Using the methodology implemented in the “Transport Model” software product, it is possible to reconstruct time series of emissions for previous periods with an assessment of their accuracy and uncertainties, as well as to perform scenario modelling in order to forecast future emissions. The methodology was used to obtain quantitative estimates of three types of greenhouse gases emissions and three precursor gases from road transport and off-road vehicles for the period of 2010 to 2022, to compare the results with National Inventory data, to produce emission estimates for four categories of off-road vehicles for the first time, and to estimate fuel consumption and changes in the number of vehicles of all categories for the period of 1990 to 2022. An information array containing official statistical data on indirect indicators of transport activity by vehicle category for the period of 1990 to 2022 was compiled, the results of the emissions calculations were compared with the indirect indicators using multiple regression methods, and the accuracy and uncertainties of these results were quantitatively assessed. The estimated greenhouse gas emissions were considered as random values for which a confidence interval was calculated as an indicator of uncertainty and a median correction as an indicator of accuracy. The high quality of the results of the calculations based on the methodology considered was confirmed.

Key words: greenhouse gases, motor transport, emission forecasting, probabilistic and statistical modeling, emission calculation methodology, transport activity indicators.

For citation: Trofimenko, Y.V., Ginzburg, V.A., Yakubovich, A.N., Lytov, V.M., Shelmakov, S.V., Zelenova, M.S. (2025). Improved methodology for the calculated monitoring of greenhouse gas emissions from the activities of road and off-road transport in the Russian Federation. Civil Aviation High Technologies, vol. 28, no. 1, pp. 78–96. DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-1-78-96

Введение

Задача достижения углеродной нейтральности, обусловленная необходимостью противодействия глобальным климатическим изменениям, требует наличия достоверных количественных оценок объемов парниковых газов (ПГ), генерируемых во всех сферах жизнедеятельности человеческого общества. Определение объемов эмиссии парниковых газов проводится расчетными методами, которые основаны на данных о показателях деятельности и удельных значениях выбросов. Этому посвящено значительное количество исследований.

Ежегодно данные о выбросах и поглощениях парниковых газов, обусловленных деятельностью человека, в целом для территории России представляются в Национальном докладе о кадастре парниковых газов¹ (далее – Национальный кадастр), который подается в секретариат Рамочной конвенции ООН об изменении климата (РКИК ООН). Существующая проблема учета выбросов ПГ от автомобильного транспорта в Национальном кадастре связана с отсутствием требуемой детализации данных о транспортной деятель-

ности автомобильного парка страны, то есть данных о численности и структуре парка автотранспортных средств (АТС), среднегодовых пробегах автомобилей, об удельных нормах расхода топлива и коэффициентах пробеговых выбросов. Выбросы от внедорожного транспорта в Национальном кадастре не выделяются в отдельную категорию источников в связи с отсутствием необходимых статистических данных о деятельности. Для уточнения расчетов и повышения чувствительности Национального кадастра к мерам по регулированию транспортной деятельности, проводимым в стране, и в отсутствии нужной статистической информации необходима национальная методика подготовки данных о деятельности автомобильного и внедорожного транспорта, позволяющая учитывать особенности российского парка для оценки выбросов парниковых газов.

Задача усовершенствования подходов к оценке выбросов парниковых газов от транспортных средств важна не только на национальном уровне, но и может быть эффективно применима для отчетности транспортных предприятий, для оценки углеродного следа перевозок и для других задач углеродной повестки.

Оценки выбросов парниковых газов по различным методикам в территориальном или отраслевом аспектах показаны, в частности, в [1–4]. Результаты сравнения трех методик расчета выбросов парниковых газов от

¹ НДК. Национальный доклад Российской Федерации о кадастре выбросов из источников и адсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990–2021 гг. М., 2023. Т. 1. 479 с.

парка автотранспортных средств (АТС) приведены в [5], где показано, что выбор способа верификации исходных данных оказывает заметное влияние на количественные оценки выбросов. Влияние структуры парка автотранспортных средств на выбросы парниковых газов рассмотрено в [6], где обоснована необходимость детализации структуры автопарка в рамках государственной статистической отчетности относительно вида используемого топлива и экологического класса. Установлено, что самостоятельно генерируемая структура автопарка приводит к погрешностям расчетных значений выбросов парниковых газов: до 4 % при настройке годовых пробегов АТС и до 30 % без настройки. Методический подход к оценке погрешностей в оценках выбросов ПГ, основанный на рассмотрении выбросов как случайных величин с дальнейшим использованием для их идентификации кривых Пирсона, предложен в [7].

Вследствие часто встречающегося недостатка прямых данных о транспортной работе особый интерес приобретает оценка объемов эмиссии парниковых газов на основе косвенных показателей, в первую очередь макроэкономических. Анализ факторов, определяющих выбросы углекислого газа от автотранспорта в странах Европы, выполнен в [8]; аналогичное исследование [9] посвящено транспортной отрасли в Китае. Математические модели, отражающие взаимосвязь между выбросами углекислого газа и несколькими экономическими и социальными параметрами, предложены в [10, 11]. Расчет объемов выбросов парниковых газов в пределах крупного города с использованием косвенных показателей экономической и транспортной деятельности с различными уровнями детальности выполнен в [12–14], где подтверждена практическая пригодность данного подхода и целесообразность использования геоинформационных технологий, практически реализованных в [15]. Аналогичные методы расчета эмиссии парниковых газов на основе макроэкономических показателей реализованы в [16, 17]. Отдельной перспективной возможностью при оценке выбросов парниковых газов является использование методов искус-

ственного интеллекта, позволяющих в отдельных случаях снижать неопределенности результатов расчета при недостатке исходных данных [18] или фиксировать в реальном времени количественные параметры транспортных потоков, обуславливающие объемы эмиссии выхлопных газов [19].

Прогнозные оценки выбросов парниковых газов на период до 2050 года получены в [20], где показано, что в ближайшей перспективе темпы декарбонизации автомобильного транспорта в России могут существенно замедлиться. Это обусловлено сохраняющимся преобладанием в структуре автопарка автомобилей с двигателями внутреннего сгорания на углеводородном топливе. Анализ влияния ужесточения топливных стандартов на сокращение выбросов парниковых газов, выполненный в [21], также подтвердил, что существенного снижения декарбонизации не ожидается – как в силу проявления сильных обратных эффектов и наращивания уровня автомобилизации населения, так и вследствие возрастания выбросов при выработке электроэнергии, используемой в транспортных средствах с нулевым уровнем выбросов.

Значительное количество неопределенностей и погрешностей, объективно присущих как расчетным моделям, так и исходным данным, закономерно снижает точность результатов расчетов объемов эмиссии парниковых газов, что может приводить к заметному искажению реальной картины влияния техногенных факторов на глобальные климатические изменения. От точности же расчетных объемов выбросов в решающей степени зависит адекватность и эффективность инженерно-технических, организационных и в конечном счете политических решений, направленных на снижение негативных эффектов от продолжающегося глобального потепления климата. Соответственно, совершенствование методик расчета эмиссии парниковых газов является актуальной задачей, решению которой применительно к автомобильному и внедорожному транспорту посвящена настоящая работа.

Методы и методология

Усовершенствованная методика расчетного мониторинга выбросов парниковых газов от деятельности автомобильного и внедорожного транспорта в Российской Федерации (далее – Методика) включает в себя четыре структурных элемента. Первым из них является процедура *распределения парка по расчетным группам* с формированием двух группировочных массивов: для автотранспортных средств и для внедорожных мобильных машин (ВММ). Процедура построения группировочного массива **НА** для АТС в общем виде может быть представлена как

$$BA(BS(\mathbf{D}, y), \mathbf{G}) \rightarrow \mathbf{НА}, \quad (1)$$

где **D** – массив данных, содержащий сведения о парке АТС России за 2010–2022 годы (реляционная база данных. Более подробно формирование реляционной базы данных по АТС было рассмотрено в [22]); *y* – год, для которого выполняется построение группировочного массива; *BS* – обобщенный оператор формирования структуры **S** автопарка для года *y*; **G** – массив официальных статистических данных о парке АТС для года *yG*; *BA* – обобщенный оператор перестроения массива **G** в соответствии со структурой **S** при сохранении основных статистических показателей (численности АТС по категориям и экологическим классам, возрастной структуры парка и т. д.).

Массив **D** основан на базах данных Автостата и ГИБДД (форма № 1-БДД), содержит сведения о пяти категориях АТС (РС – легковые автомобили, LCV – легкие коммерческие грузовики, HDT – грузовые автомобили, BUS – автобусы, MT – мототранспорт) и по полноте информации разделяется на три информационных кластера. Первый кластер (2010–2016) характеризуется укрупнением данных (относительно небольшое количество записей, в каждой из которых отражена достаточно большая численность АТС) и отсутствием записей с полностью известными классификационными признаками, что делает необходимым восстановление пропущенных

данных для каждой записи кластера. Второй кластер (2017–2019) отличается подробной детализацией данных и малым относительным количеством записей, для которых полностью или частично отсутствуют классификационные признаки. Это делает данные второго кластера наиболее подходящими для формирования структуры автопарка, в том числе методами искусственного интеллекта. Дополнительно для формирования структуры могут быть использованы и данные третьего кластера (2020–2022), содержащего сведения только о категории РС.

Всего в массиве **D** содержится 68,9 млн записей с данными о более чем 663 млн учетных единиц автотранспорта (одной физической единице АТС в каждой записи за разные годы соответствует самостоятельная логическая учетная единица). Такой значительный объем хранимой и используемой в расчетах информации делает целесообразным реализацию массива **D** в форме реляционной базы данных, в результате чего достигается сокращение объема хранимых данных, приведение данных из различных источников к единому формату, позволяющему использовать при анализе информации стандартные процедуры (в том числе SQL-запросы), а также существенное повышение быстродействия обработки информации при ее анализе и формировании структуры автопарка **S**.

Оператор формирования структуры *BS* реализует распределение АТС из массива **D** по отдельным расчетным группам на основе значений классификационных признаков в соответствии с набором predetermined правил. Для всех категорий АТС классификационными признаками являются тип используемого топлива и экологический класс. Третьим классификационным признаком для категорий РС и MT служит объем двигателя или мощность (для электрокаров), для категорий LCV, HCV и BUS – полная масса. Для категории BUS дополнительно в качестве четвертого признака используется тип кузова.

При наличии в соответствующих полях записи базы данных полного перечня значений, требуемых для количественной оценки необходимых классификационных призна-

ков, вся численность АТС, указанная в рассматриваемой записи, однозначно относится к определенной расчетной группе. При отсутствии каких-либо данных выполняется их восстановление с использованием вероятностных методов искусственного интеллекта. Эти методы не всегда приводят к однозначному результату; соответственно, и процедура формирования структуры в этом случае может приводить к распределению численности АТС по нескольким группам. Для восстановления пропущенных данных используются одинаковые для всех категорий АТС атрибутивные признаки: марка, модель и год выпуска. В отличие от классификационных атрибутивных признаков влияют на отнесение АТС к определенной расчетной группе не непосредственно, а косвенным образом, через набор образцов, признанных по совокупности имеющихся атрибутивных и классификационных признаков совпадающими с рассматриваемой АТС, и далее – через вероятности ассоциирования этой АТС с тем или иным образцом. Использование атрибутивных признаков существенно расширяет возможности корректного восстановления пропущенных данных; в отдельных случаях, когда несколько (или даже все) классификационные признаки в записи базы данных отсутствуют, только атрибутивные признаки позволяют достоверно восстанавливать данные.

Вероятностное распределение численности АТС по расчетным группам, формируемое на основе характеристической выборки, представляет собой спектральный профиль (далее – профиль), соответствующий совокупности всех известных признаков – атрибутивных и классификационных. Чем больше пропущенных признаков, тем шире размах профиля АТС, определяемый максимальной и минимальной группой, имеющих ненулевую вероятность попадания в них данной АТС. И наоборот, в случае когда все признаки известны (пропущенные данные отсутствуют), профиль АТС сосредоточен в единственной расчетной группе. Формирование профилей является частью процедуры восстановления исходных данных, влияющих на структурную модель парка АТС. При нали-

чии записи с неполными классификационными признаками выполняется построение профиля, и далее численность АТС распределяется по всем стандартным группам профиля – в соответствии с вероятностями попадания АТС в каждую из групп.

Массив официальных статистических данных **G** формируется на основе информации, ежегодно публикуемой на сайте ГИБДД (код формы 560, раздел 03). Для определения численности АТС, использующих компримированный природный газ, дополнительно учитываются статистические данные ПАО «Газпром» как более точно отражающие реальную численность автопарка на этом виде газомоторного топлива.

Оператор **ВА** выполняет перенос структуры **S** на массив **G**, в результате чего формируется группировочный массив **НА**, далее используемый в третьем структурном элементе Методики как одно из исходных данных для количественного расчета выбросов парниковых газов. При этом первично суммарная численность АТС по категориям и укрупненным группам (электромобили; АТС с гибридной силовой установкой; АТС, использующие компримированный или сжиженный природный газ и т. д.) определяется исходя из данных массива **G**; в пределах категорий АТС и укрупненных групп численность распределяется по отдельным группам в соответствии со структурой **S**. Далее, при отсутствии полного соответствия между данными из **G** и какой-либо группой **НА** соответствующая численность АТС перераспределяется в группу с наиболее близкими показателями выбросов парниковых газов или удельного расхода топлива. В завершение выполняется приведение **НА** к структуре экологических классов, зафиксированной в массиве **G**, что заключается в частичном переносе АТС из тех классов, где численность группы превышает численность из **G**, в наиболее близкие им классы с недостаточной численностью. Такой перенос осуществляется между всеми группами с соответствующими экологическими классами с соблюдением ранее достигнутого соответствия численности категорий и укрупненных групп аг-

регированным показателям общей численности по данным ГИБДД из массива **Г**. Итоговый группировочный массив **НА** включает в себя 206 расчетных групп с распределением их количества по отдельным категориям АТС: РС – 99 групп, LCV – 14 групп, HDT – 43 группы, BUS – 32 группы, МТ – 18 групп.

Группировочный массив **НМ** отражает численность внедорожных мобильных машин по четырем категориям: строительно-дорожные машины (СДМ, 234 группы), сельскохозяйственная техника и технологические машины лесопромышленных предприятий (СХЛ, 99 групп), самоходная техника горнорудной промышленности (ГРМ, 84 группы) и аэродромная техника (АМ, 54 группы). При группировке используется 5 признаков, сочетание которых определяет расчетную группу: вид топлива (2 градации: дизельное топливо, бензин), режим работы двигателя внутреннего сгорания (ДВС) (2 градации: постоянный, переменный), мощность ДВС (7 градаций, от «менее 19 кВт» до «более 560 кВт»), технологический уровень ДВС (3 градации: до EU Stage III или US Tier 3, EU Stage IV или US Tier 4, EU Stage V) и применение (количество градаций зависит от категории, например, для категории АМ предусмотрено 5 градаций: автобусы перронные, буксиры и тягачи аэродромные, погрузчики аэродромные, посадочные пандусы, прочие аэродромные). Алгоритмы формирования массива **НМ** различаются по категориям и основаны на использовании статистических, вероятностных и экспертных методов.

Вторым структурным элементом Методики является *актуализация данных* относительно пробегов АТС и норм работы ВММ разных классов, а также других расчетных параметров, используемых программой COPERT в отношении автотранспортных средств и методикой ЕМЕР/ЕЕА в отношении внедорожных мобильных машин. Среднегодовые пробеги АТС оцениваются методом OSINT с использованием данных из открытых источников. Для определения среднегодовых пробегов транспортных средств различных классов формируются матрицы, в которых оцениваются данные, начиная с

5-летнего возраста и заканчивая 20-летним возрастом каждого транспортного средства. На основе полученного массива информации для каждой возрастной подгруппы вычисляется средний кумулятивный пробег и среднегодовой пробег (делением кумулятивного пробега на возраст). По вычисленным значениям для кумулятивного пробега Z определяются аппроксимирующие полиномиальные зависимости $Z(t)$ второй степени и для среднегодового пробега – зависимости третьей степени $z(t)$. Далее производится уточнение среднегодовых пробегов АТС в расчетных группах с использованием объемов потребления разных видов топлива автомобильным транспортом. Аналогичным образом формируются зависимости годовой наработки от возраста $w(t)$ для укрупненных групп ВММ, также с последующим уточнением этих зависимостей по данным о потреблении топлива.

Третий структурный элемент Методики – *оценка выбросов* по отдельным видам парниковых газов, периодам и расчетным группам АТС и ВММ и получение суммарной оценки объемов выбросов. Для оценки выбросов от АТС используется специализированная общепризнанная компьютерная модель – программа COPERT, часть исходных данных для которой (множество расчетных групп в массиве **НА** и среднегодовые пробеги по расчетным группам) сформирована в рамках вышеописанных структурных элементов Методики. Остальные показатели, необходимые для расчетной оценки выбросов парниковых газов (удельные расходы топлива, скоростной режим, тип автомобильных дорог, прогрев автомобиля, природно-климатические факторы, доли пробегов на разных режимах движения автомобилей, коэффициенты активности АТС разных возрастных групп) принимаются по умолчанию из базы данных COPERT или устанавливаются с использованием экспертных оценок.

Алгоритм оценки расхода топлива и выбросов парниковых газов от всех категорий внедорожных мобильных машин базируется на методике третьего уровня ЕМЕР/ЕЕА (2023). Потребление топлива FC , выбросы i -го ПГ рассчитываются по формуле

$$FC(E_{GHGi}) = N \cdot HRS \cdot P \cdot LFA \cdot SFC(EFB_i) \cdot \left(1 + DFA(DFA_i) \cdot \frac{AGE}{ASL}\right) \cdot 10^{-6}, \quad (2)$$

где N – количество ВММ данной расчетной группы из группировочного массива **НМ**, ед.; HRS – средняя годовая наработка, определяемая для рассматриваемой группы по ранее сформированной зависимости $w(t)$, ч; P – средняя мощность двигателей для рассматриваемой группы, кВт; LFA – коэффициент использования мощности двигателей ВММ данной расчетной группы (вычисляется для абстрактного двигателя, работающего по наиболее характерному нагрузочному циклу, задаваемому в соответствии с действующими нормативами ГОСТ ISO 8178-4-2013); SFC – средний удельный расход топлива двигателей для рассматриваемой группы (в зависимости от вида топлива, мощности и технологической группы), г/кВт·ч; EFB_i – средний удельный выброс i -го парникового газа для рассматриваемой группы (в зависимости от вида топлива, мощности и технологической группы), г/кВт·ч; DFA – коэффициент изменения расхода топлива, выбросов i -го ПГ двигателей за средний срок службы (в зависимости от вида топлива, мощности и технологической группы); AGE – средний возраст парка для рассматриваемой группы (принимается экспертным путем исходя из существующих оценок возраста некоторых категорий и типов ВММ, а также исходя из сроков введения экологических норм в странах ЕС и США), лет; ASL – средний срок службы ВММ данной расчетной группы (в зависимости от категории, вида топлива и применения), лет.

Выбросы CO_2 для каждой расчетной группы рассчитываются по формуле

$$E_{CO2} = FC \cdot SE_{CO2}, \quad (3)$$

где SE_{CO2} – удельные выбросы CO_2 для каждого используемого вида топлива (могут использоваться данные ЕМЕР/ЕЕА или МГЭИК), (г CO_2)/(г топлива).

Четвертый структурный элемент Методики – верификация расчетных значений выбросов парниковых газов от автомобильного и внедорожного транспорта, определение ко-

личественных показателей точности и неопределенностей результатов расчетов. Процедура количественной оценки точности и неопределенности ранее полученных расчетных объемов выбросов парниковых газов и газов-прекурсоров автомобильным и внедорожным транспортом основана на следующих принципах и допущениях.

1. Отсутствие эмпирических данных об объемах выбросов как основы для прямого сравнения с результатами расчетов. Соответственно, оценка неопределенности расчетных значений выбросов возможна только при применении также расчетных (косвенных) методов путем сопоставления полученных значений выбросов со значениями, определенными альтернативными способами.

2. Использование принципа согласованности выбросов парниковых газов и газов-прекурсоров с косвенными показателями транспортной и экономической деятельности как показателя достоверности и неопределенности расчетных значений выбросов в масштабах страны.

3. Применение множественной линейной регрессии как модели, отражающей зависимости между косвенными показателями транспортной деятельности и выбросами парниковых газов и газов-прекурсоров. В ходе предварительных исследований было установлено, что значимость данной модели является достаточно высокой для всех рассматриваемых видов выбросов. Объемы выбросов, определенные по регрессионным моделям, в дальнейшем называются модельными и сопоставляются с расчетными значениями, полученными при реализации третьего структурного элемента Методики.

4. Рассмотрение неопределенностей как случайных величин, реализациями которых являются расхождения между расчетными (по методикам COPERT и ЕМЕР/ЕЕА) и модельными значениями (восстановленными по косвенным показателям). Для описания этих случайных величин привлекается вероятностно-статистический аппарат, основанный

Таблица 1
Table 1

Распределение количества доступных статистических показателей по категориям дорожной и внедорожной техники (данные Росстата), ед.
Distribution of the number of available statistical indicators by categories of road and off-road equipment (Rosstat data), units

№ п/п	Группа показателей	Количество показателей по категориям АТС и ВММ				
		АТС	ДСМ	ГРМ	СХЛ	АМ
1	Национальные экономические показатели	3	3	3	3	3
2	Отраслевые экономические показатели, включая трудовые ресурсы	–	3	5	11	–
3	Численность техники по отдельным видам	–	8	–	9	–
4	Годовое производство техники по видам	–	–	7	23	–
5	Приобретение и выбытие техники по видам (в том числе новой)	–	4	–	17	–
6	Производственная мощность и степень ее использования по видам техники	6	–	4	25	2
7	Технические характеристики парка АТС, машин и оборудования	23	–	8	6	–
8	Объемы выполненной работы (по видам работ)	2	2	–	12	14
9	Полученная и реализованная продукция	–	2	–	9	–
10	Показатели эффективности (удельные)	–	–	–	5	2
Всего по категориям		34	22	23	120	21

на методе моментов (семейство кривых Пирсона), и для сравнения корректности результатов может дополнительно использоваться нормальный закон распределения.

Источником данных по косвенным показателям транспортной деятельности является Единая межведомственная информационно-статистическая система (ЕМИСС), которая содержит официальную статистическую информацию, формируемую субъектами статистического учета в рамках Федерального плана статистических работ. Структура косвенных показателей транспортной деятельности, используемых для верификации выбросов парниковых газов, показана в табл. 1.

Формализованно процедура построения модели множественной линейной регрессии в целях верификации выбросов парниковых газов может быть представлена как

$$R[H(V, P), U, Y, q] \rightarrow \{K, C\}, \quad (4)$$

где H – оператор подготовки исходных данных; V – совокупность исходных временных

рядов по отдельным показателям, извлеченная из ЕМИСС и прочих источников; P – набор правил для обработки исходных данных, включающий пять изменяемых параметров; U – множество известных значений выбросов; Y – правила построения регрессионной модели, в том числе периоды ее построения и использования; q – критерий, определяющий качество модели; K – множество косвенных показателей транспортной деятельности, учтенных в модели (факторы регрессии); C – параметры регрессии.

При реализации процедуры построения регрессии варьируемыми величинами являются P , q и Y . Даже в предположении, что в формируемом множестве K все показатели характеризуются одинаковыми правилами, поиск оптимального значения функции $q(P, Y)$ в 9-мерном пространстве (с учетом четырех параметров Y) представляет нетривиальную вычислительную задачу, которая требует весьма значительных затрат вычислительных ресурсов и может не иметь гарантированного точного оптимального решения.

Процедура вероятностно-статистического анализа точности и неопределенностей значений выбросов парниковых газов и газов-прекурсоров включает три этапа расчета. На первом этапе выполняется фиксирование параметров построения множества регрессионных моделей, по каждой из которых далее определяется реализация случайной величины. Первыми двумя параметрами являются границы периода построения моделей (возможные значения с 1990 по 2022 год). Третий параметр – диапазон размеров модели Ω , который может составлять от 5 до 10 лет. Четвертый и пятый параметры определяют минимальный уровень качества модели, при котором она далее используется для определения значения выбросов как реализации случайной величины: скорректированный коэффициент детерминации R_A и уровень значимости регрессионной модели в целом ξ .

На втором этапе производится формирование множества реализаций случайных величин по отдельным годам. На этом шаге выполняется построение множества регрессионных моделей, у которых диапазон Ω не выходит за границы периода построения. При этом построение модели с диапазоном Ω выполняется по Ω вариантам; каждый вариант модели не учитывает данные за какой-то один год; после построения модели за «пропущенный» год определяется расхождение модельных и расчетных данных z . Для каждого варианта определяются показатели качества, и, если они соответствуют минимально допустимым значениям R_A и ξ , значение z добавляется в выборку Z_i (i – порядковый номер «пропущенного» года); в противном случае z игнорируется (выбраковывается) и в дальнейших расчетах не участвует. Как результат, после завершения второго этапа формируются выборки Z_i для каждого года в границах периода построения моделей, каждая из которых содержит различное количество реализаций случайной величины $\tilde{z}_i$.

Третий этап – определение количественных показателей точности и неопределенностей в расчетных значениях выбросов вероятностно-статистическими методами. Выявление наиболее подходящего закона распре-

деления каждой из случайных величин $\tilde{z}_i$ осуществляется из условия совпадения первых четырех моментов для выборочной совокупности Z_i и для закона распределения случайной величины, задаваемого плотностью вероятностей $f(z)$. В качестве показателя неопределенностей используется доверительный интервал $[\rho_{\min}^p; \rho_{\max}^p]$ с заданным уровнем вероятностей (обеспеченностью) p , границы которого определяются из условий

$$\int_{-\infty}^{\rho_{\min}^p} f(z)dz = \frac{1-p}{2}; \quad \int_{-\infty}^{\rho_{\max}^p} f(z)dz = \frac{1+p}{2}. \quad (5)$$

При определении границ доверительных интервалов на основе кривых Пирсона $f(z)$ возможны значения, асимметричные относительно среднего значения рассматриваемой случайной величины. Количественным показателем точности является медианное значение поправки δz , вводимое к расчетному значению выбросов:

$$\delta z = z_m - z_0, \quad (6)$$

где z_0 – расчетное значение выбросов, для которого оценивается точность и неопределенности; z_m – медианное значение выбросов, для которого

$$\int_{-\infty}^{z_m} f(z)dz = \int_{z_m}^{+\infty} f(z)dz = 0,5. \quad (7)$$

Все составные элементы Методики реализованы в «Транспортной модели», включающей следующие программные модули: «Автомобильный транспорт» (реализует первый структурный элемент Методики в части формирования группировочного массива **НА** и второй структурный элемент для вычисления дополнительных параметров, далее передаваемых в программу расчета выбросов COPERT); «Внедорожные мобильные машины» (реализует первые три структурных элемента Методики в отношении всех категорий ВММ); «Верификация» (реализует четвертый структурный элемент Методики – в целом для АТС, по отдельным категориям ВММ и по суммарным выбросам парниковых газов и

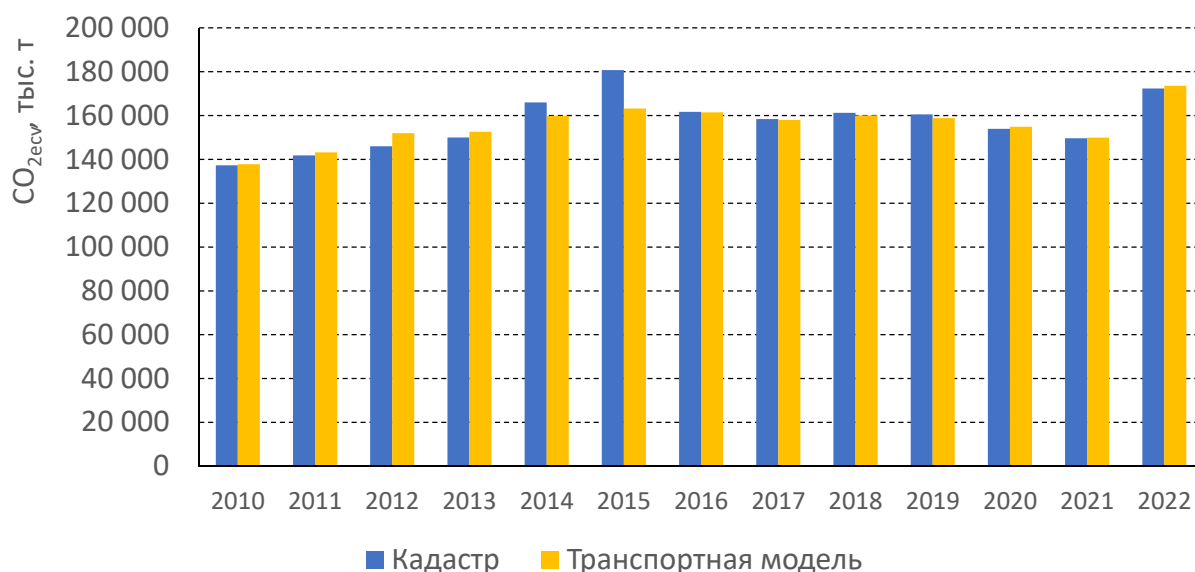


Рис. 1. Суммарные выбросы парниковых газов автомобильным транспортом, приведенные в Национальном кадастре за 2023 год и полученные по «Транспортной модели»

Fig. 1. Total greenhouse gas emissions from road transport, shown in the National Inventory for 2023 and obtained from the Transport Model

газов-прекурсоров от всех рассматриваемых видов автотранспорта); «Прогнозы» (предназначен для хранения и анализа статистической информации и расчетных данных с целью выявления зависимостей и формирования экспертного мнения). С использованием Методики возможно как восстановление временных рядов выбросов за предшествующие периоды с оценкой их точности и неопределенностей, так и выполнение сценарного прогнозирования объемов выбросов в будущем.

Результаты и обсуждение

С использованием вышеописанной Методики средствами «Транспортной модели» были сформированы группировочные массивы **НА** с 2010 по 2022 год, расчетные группы в которых соответствовали стандартным группам COPERT. В процессе расчетов выбросов были учтены национальные особенности при определении значений требуемых показателей, которые в программе COPERT принимаются по умолчанию, среди них: природно-климатические факторы; распределе-

ние пробегов транспортных средств по дорогам разных категорий; распределение кумулятивного пробега, среднесуточная интенсивность движения на автомобильных дорогах разных категорий для всех типов АТС; средняя дальность поездки автомобилей разных типов. Как результат, в соответствии с Методикой были актуализированы содержащиеся в Национальном кадастре оценки выбросов основных парниковых газов (CO_2 , CH_4 , N_2O) и газов-прекурсоров (CO , NO_x , NMVOC) в период с 2010 по 2022 год от дорожного транспорта (рис. 1).

Можно видеть, что значения суммарных выбросов парниковых газов автомобильным транспортом за этот период, приведенные в Национальном кадастре и полученные по Методике, хорошо согласуются. Средневзвешенное отклонение значений составляет 0,55 %, только в 2015 году разница достигает 9,7 %.

Сравнительный анализ расчетных значений валовых выбросов газов-прекурсоров (CO , NO_x , VOC) автомобильным транспортом по Национальному кадастру и Методике показал, что по CO значения в отдельные годы отличаются на 42...95 %. По VOC различие составляет 28,7...71,4 %. Причем как по

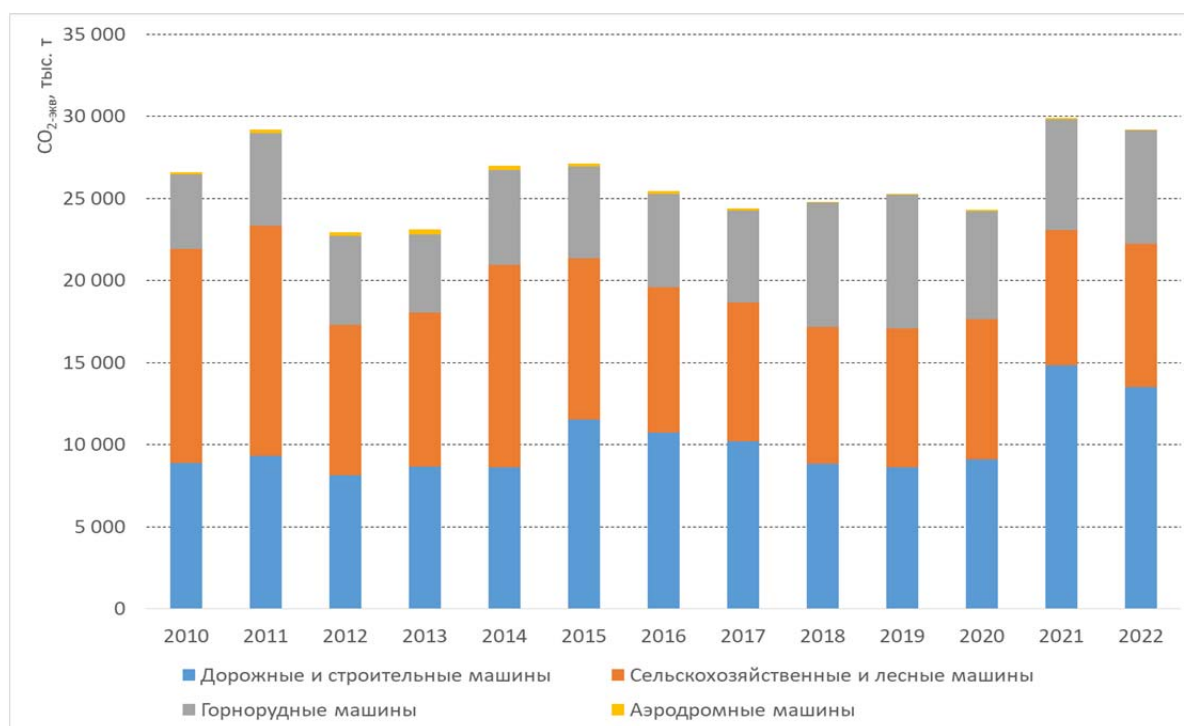


Рис. 2. Суммарные выбросы парниковых газов внедорожным транспортом по видам внедорожной техники
Fig. 2. Total greenhouse gas emissions from off-road transport by type of off-road equipment

одному, так и по второму газу по Методике значения во всех календарных годах превышают значения, приведенные в Национальном кадастре. По выбросам NO_x согласованность значений по Кадастру и Методике в период 2016–2022 годов намного лучше, максимальная разница составляет 4,6 % в 2021 году.

В соответствии с Методикой впервые была проведена количественная оценка выбросов ПГ от категории «Внедорожный транспорт», значения которых ранее в Национальном кадастре не отражались. Это позволяет как уточнить данные Национального кадастра, так и выделить вклад внедорожных машин по отраслям и оценить возможность регулирования выбросов от этих источников. Необходимо отметить, что по внедорожной мобильной технике в отличие от АТС отсутствует в открытом доступе обобщенная и систематизированная детальная информация с основными показателями и характеристиками, что обуславливает необходимость использования экспертно-аналитических методов восстановления недостающей информа-

ции о численности, характеристиках, интенсивности использования различных категорий и подкатегорий внедорожной техники на основании выявления трендов изменения показателей и их достоверного математического описания в виде устойчивых корреляционных зависимостей с показателями, используемыми для оценки выбросов парниковых газов внедорожным транспортом.

На основе информации о численности, номенклатуре внедорожной техники и других сведениях о наработке машин, содержащихся в статистических формах Росстата и в ЕМИСС, в других публичных источниках информации, нормативных и методических документах, научно-технических отчетах, результатах маркетинговых, аналитических исследований, были сформированы группировочные массивы **НМ** по отдельным годам с 2010 по 2022 год. Результаты расчета валовых выбросов ПГ и газов-прекурсоров от внедорожного транспорта представлены на рис. 2.

Основные положения и алгоритмы Методики были использованы при выполнении

Таблица 2
Table 2

Выбросы парниковых газов автомобильной техникой за период 1990–2022 годов (фрагмент)
Greenhouse gas emissions from automotive vehicles for the period 1990–2022 (fragment)

Год	Численность парка АТС, тыс. ед.	Потребление топлива, тыс. т/год	Валовые выбросы, тыс. т/год						
			CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO	VOC	NO _x	Приведенные выбросы ПГ
1990	16 802	50 690	160 280	44	4,5	8 992	1 708	1 049	162 745
1995	23 218	34 782	109 699	35	2,8	8 982	1 083	932	111 407
2000	29 052	25 905	81 507	28	2,1	8 164	773	798	82 817
2005	35 695	32 115	100 991	31	2,7	9 525	855	881	102 565
2010	43 679	43 261	136 002	32	3,3	8 838	796	784	137 789
2015	53 588	51 332	161 545	27	3,4	6 443	721	583	163 253
2020	58 550	49 055	153 388	22	3,1	4 213	519	398	154 872

Таблица 3
Table 3

Выбросы парниковых газов внедорожной техникой за период 1990–2022 годов (фрагмент)
Greenhouse gas emissions from off-road vehicles for the period 1990–2022 (fragment)

Год	Численность парка ВММ, тыс. шт.	Потребление топлива, тыс. т/год	Валовые выбросы, тыс. т/год						
			CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO	VOC	NO _x	Приведенные выбросы ПГ
1990	7 714	17 627	55 742	11	2,0	1 887	273	951	56 603
1995	7 210	11 849	37 494	14	1,3	2 253	309	587	38 222
2000	6 643	10 588	33 515	18	1,1	2 492	374	512	34 294
2005	6 329	9 043	28 609	11	1,0	1 488	231	464	29 168
2010	6 226	8 257	26 119	9,0	0,90	1 161	194	424	26 610
2015	6 133	8 440	26 685	6,3	0,94	729	145	434	27 124
2020	6 181	7 567	23 924	5,6	0,85	611	127	384	24 318

ретроспективного прогноза потребления разных видов топлива и энергии, валовых выбросов парниковых газов, а также численности рассматриваемых видов дорожных и внедорожных машин на период с 1990 по 2022 год, которые приведены в табл. 2.

В табл. 3 представлены значения численности, потребления топлива, валовых выбросов парниковых газов внедорожной техникой в этот же период.

Результаты реализации Методики в части оценки неопределенностей расчетных значений суммарных выбросов от всех рассмотренных категорий автомобильного транспорта показаны в табл. 4. Доверительные интервалы (6) были вычислены с максимальной высотой обеспеченностью 99 %; с увеличением «размаха» доверительного интервала увеличивается и неопределенность расчетного зна-

Таблица 4
Table 4

Доверительные интервалы к расчетным значениям выбросов парниковых газов и газов-прекурсоров АТС и ВММ с обеспеченностью 99 % (фрагмент)
Confidence intervals to the calculated values of the emissions of greenhouse gases and precursor gases of road and off-road mobile vehicles with 99% sufficiency (fragment)

Год	Парниковый газ, газ-прекурсор, %					
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO	VOC	NO _x
1990	–3,0 / +4,2	–1,9 / +1,5	–2,6 / +3,6	–2,1 / +0,9	–2,3 / +0,8	–2,5 / +3,3
1995	–11,3 / +14,4	–5,1 / +7,9	–6,7 / +11,1	–4,6 / +6,8	–4,4 / +6,5	–7,5 / +11,1
2000	–10,6 / +15,4	–7,6 / +7,5	–7,8 / +14,6	–4,7 / +5,1	–6,2 / +6,5	–8,5 / +14,5
2005	–4,0 / +6,2	–4,5 / +6,5	–8,9 / +9,2	–6,3 / +4,7	–4,9 / +4,8	–9,3 / +9,5
2010	–15,3 / +17,4	–18,4 / +18,5	–26,8 / +26,2	–42,4 / +40,3	–31,6 / +29,7	–35,0 / +35,7
2015	–14,0 / +12,2	–15,8 / +15,8	–20,0 / +18,8	–21,3 / +22,9	–21,8 / +22,9	–22,0 / +21,9
2020	–27,0 / +28,1	–16,8 / +23,1	–15,1 / +27,1	–40,1 / +39,8	–26,9 / +30,1	–25,2 / +31,8

Таблица 5
Table 5

Медианные значения поправок к расчетным значениям выбросов парниковых газов и газов-прекурсоров АТС и ВММ (фрагмент)
Median values of corrections to the calculated values of greenhouse gases emissions and precursor gases of road and off-road mobile vehicles (fragment)

Год	Значения поправки, %					
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO	VOC	NO _x
1990	0,58	–0,20	0,48	–0,60	–0,74	0,41
1995	1,58	1,40	2,19	1,12	1,08	1,80
2000	2,40	–0,05	3,39	0,20	0,16	2,96
2005	1,09	1,00	0,13	–0,82	–0,06	0,11
2010	1,02	0,06	–0,31	–1,02	–0,95	0,35
2015	–0,88	0,04	–0,61	0,80	0,54	–0,06
2020	0,56	3,19	6,00	–0,16	1,58	3,29

чения выбросов для соответствующего года и вида парникового газа или газа-прекурсора.

По результатам анализа медианных значений поправок к расчетным значениям выбросов парниковых газов и газов-прекурсоров ВММ и АТС (7) как главного количественного показателя точности (табл. 5) можно сделать вывод о достаточно высокой точности ранее полученных расчетных значений выбросов по Методике: за период 1990–2019 годов зафиксировано только три значения медианной поправки, превышаю-

щей 3 %, по отдельным газам (2000 год, N₂O, $\delta z = 3,39$ %; 2016 год, CO, $\delta z = -3,58$ %; 2018 год, NO_x, $\delta z = -3,08$ %). При этом отрицательные значения поправок свидетельствуют о переоценке объемов выбросов (целесообразно их уменьшение на величину поправки), а положительные значения, наоборот, отражают недооценку расчетных значений выбросов.

В целом внедорожные мобильные машины характеризуются заметно более низкой точностью и более высокими неопределенно-

стями расчетных значений выбросов газов по сравнению с автотранспортными средствами. В то же время в суммарных выбросах по всем видам газов выбросы от АТС доминируют, что существенно улучшает показатели точности и неопределенностей расчетной оценки суммарных выбросов.

При практическом использовании и интерпретации показателей точности и неопределенностей расчетных значений выбросов парниковых газов необходимо учитывать следующее. Достоверность результатов, основанных на согласованности расчетных значений выбросов парниковых газов с косвенными показателями транспортной деятельности, определяется как адекватностью расчетной модели (наличием реально существующих зависимостей между косвенными показателями и значениями выбросов по отдельным видам показателей и категориям внедорожных мобильных машин и автотранспортных средств), так и полнотой и точностью статистических данных, отражающих значения косвенных показателей транспортной деятельности в отдельные годы. По объему и качеству доступной статистической информации можно выделить четыре расчетных периода. Первый период (1990–1999) характеризуется малым количеством косвенных показателей транспортной деятельности и минимальными (по сравнению с остальными периодами) объемами фактических данных, использованных при расчете выбросов. Соответственно, показатели точности и неопределенностей за этот период являются наименее достоверными. Второй период (2000–2009) характеризуется несколько более высокой фактологической обеспеченностью расчетных значений выбросов, и показатели точности и неопределенностей для этого периода можно считать более достоверными. Третий период (2010–2019) отличается максимальной достоверностью результатов, в том числе и показателей точности и неопределенностей. Для четвертого периода (2020–2022) значимо проявляется недостаточность возможных реализаций случайных величин, возникающая вследствие малого количества доступных регрессионных моделей, что снижает достовер-

ность вероятностных оценок точности и неопределенностей.

Система государственных статистических наблюдений России за рассматриваемый период (1990–2022) не отличается достаточно полной согласованностью данных: некоторые показатели транспортной деятельности в разные годы рассчитывались как минимум по трем различным методикам. Это обстоятельство является дополнительным источником неопределенностей, не связанных непосредственно с неопределенностями расчетных значений выбросов. В рамках Методики с помощью нормирования, сглаживания и использования временного лага эти дополнительные неопределенности в максимально возможной степени были снижены и их влияние может быть признано несущественным.

Заключение

Усовершенствованная методика расчетного мониторинга выбросов парниковых газов от деятельности автомобильного и внедорожного транспорта дает возможность повышения точности и достоверности результатов при оценке объемов выбросов парниковых газов от автотранспортных средств и впервые позволяет оценить объемы выбросов от внедорожных мобильных машин. Высокая точность и достоверность результатов достигаются за счет детализации исходных данных, отражающих специфику национального парка АТС и ВММ в части его структуры, а также показателей транспортной деятельности.

Методика дает возможность получения достоверных количественных оценок точности и неопределенностей по отдельным годам, категориям АТС и ВММ, видам парниковых газов и газов-прекурсоров. Полученные в работе значения точности и неопределенностей можно считать «оценкой снизу», выполненной в условиях недостатка статистических данных.

Разработанная «Транспортная модель» формирует единую систему сбора и обработки исходной информации о функционировании автомобильного парка в детализации, необхо-

димой для достоверной оценки выбросов ПГ от автомобильного и внедорожного транспорта. Вероятностно-статистический анализ точности и неопределенности значений итоговых выбросов от автомобильного и внедорожного транспорта на основе анализа согласованности моделей множественной линейной регрессии позволяет восстановить отсутствующую или скорректировать ошибочную информацию, приведенную в формах государственных статистических наблюдений по автомобильному и внедорожному транспорту. Это позволяет проводить дополнительную верификацию данных топливной статистики и выявлять существенные отклонения в потреблении моторного топлива в отдельные годы, в которых могут содержаться ошибки. Использование разработанной методики в Национальном кадастре повышает прозрачность расчетов выбросов парниковых газов мобильными источниками и способствует лучшему пониманию основных факторов, влияющих на изменение выбросов.

Дальнейшее развитие Методики в первую очередь должно быть направлено на повышение полноты охвата и достоверности исходных статистических данных, используемых как непосредственно при расчете объемов выбросов парниковых газов, так и при оценке точности и неопределенностей результатов этих расчетов. В целом Методика, реализованная в виде «Транспортной модели», является высокоэффективным средством информационной поддержки управленческих решений в области противодействия негативным последствиям климатических изменений, обусловленных выбросами парниковых газов транспортными средствами.

В перспективе «Транспортная модель» может не ограничиваться только наземными видами транспорта, а распространяться также на воздушный, водный и железнодорожный транспорт.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках важнейшего инновационного проекта государственного значения (ВИП ГЗ) «Единая наци-

ональная система мониторинга климатически активных веществ», утвержденного распоряжением Правительства Российской Федерации от 29.10.2022 № 3240-р, в ходе реализации научно-исследовательской работы по теме «Актуализация распределения автомобильного парка России по видам топлива и экологическим классам, определения расхода топлива, средневзвешенных пробегов автотранспортных средств разных классов для автопарка Российской Федерации» по договору № 32312317348 от 17 мая 2023 года ООО «ЦТИ».

В данной работе также принимали участие сотрудники МАДИ В.И. Комков, Е.В. Шашина, Д.А. Деянов, В.А. Зорин.

Список литературы

1. **Зырянов И.В.** Оценка выбросов парниковых газов автотранспортом АК «АЛРОСА» / И.В. Зырянов, Н.Е. Кулинич, Ф.Ю. Иванов, В.А. Кожин // Горное оборудование и электромеханика. 2016. № 1 (119). С. 9–13.
2. **Шагидуллин А.Р.** Расчет выбросов парниковых газов при эксплуатации автотранспорта на территории крупных городов Республики Татарстан / А.Р. Шагидуллин, А.Р. Магдеева, А.Ф. Гилязова, Г.Ф. Амирянова, Р.А. Шагидуллина, Р.Р. Шагидуллин // Российский журнал прикладной экологии. 2016. № 2 (6). С. 22–25.
3. **Ложкина О.В., Ложкин В.Н.** Количественная оценка выбросов поллютантов и парниковых газов автотранспортом по европейской методологии COPERT, адаптированной к условиям Санкт-Петербурга // Проблемы управления рисками в техносфере. 2013. № 4 (28). С. 19–26.
4. **Двоеглазова Н.В., Чубаренко Б.В., Козлова Я.А.** Антропогенная составляющая эмиссии парниковых газов с территории Калининградской области // Гидрометеорология и экология. 2020. № 58. С. 94–110. DOI: 10.33933/2074-2762-2020-58-94-110
5. **Максимова О.В., Лытов В.М., Гинзбург В.А.** Сравнительный анализ методик расчета углеродного следа автотранспорта

в России // Контроль качества продукции. 2020. № 7. С. 44–48.

6. Трофименко Ю.В. Влияние структуры парка автотранспортных средств по виду топлива и экологическому классу на выбросы парниковых газов / Ю.В. Трофименко, В.А. Гинзбург, В.И. Комков, В.М. Лытов // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2018. Т. 15, № 6 (64). С. 898–910.

7. Якубович И.А. Погрешности в оценках объемов выбросов парниковых газов автотранспортом и способы их снижения // Проблемы технической эксплуатации и автосервиса подвижного состава автомобильного транспорта: сборник трудов 77-ой научно-методической и научно-исследовательской конференции МАДИ. Москва, 29–30 января 2019 г. М.: Техполиграфцентр, 2019. С. 127–130.

8. Amin A., Altinoz B., Dogan E. Analyzing the determinants of carbon emissions from transportation in European countries: the role of renewable energy and urbanization // Clean Technologies and Environmental Policy. 2020. Vol. 22. Pp. 1725–1734. DOI: 10.1007/s10098-020-01910-2

9. Liang Y. Factors affecting transportation sector CO₂ emissions growth in China: an LMDI decomposition analysis / Y. Liang, D. Niu, H. Wang, Y. Li [Электронный ресурс] // Sustainability. 2017. Vol. 9, iss. 10. ID: 1730. DOI: 10.3390/su9101730 (дата обращения: 19.07.2024).

10. Mishalani R.G. Modeling the relationships among urban passenger travel carbon dioxide emissions, transportation demand and supply, population density, and proxy policy variables / R.G. Mishalani, P.K. Goel, A.M. Westra, A.J. Landgraf // Transportation Research. Part D. Transport Environment. 2014. Vol. 33. Pp. 146–154. DOI: 10.1016/j.trd.2014.08.010

11. Шестаков Н.И. Методы расчета углеродного следа объектов дорожно-строительного комплекса / Н.И. Шестаков, Д.К. Таргонский, Н.С. Аргат, Б.А. Моргоев // Экология урбанизированных территорий. 2024. № 1. С. 76–81. DOI: 10.24412/1816-1863-2024-1-76-81

12. Дехнич В.С. Моделирование объемов выбросов парниковых газов в городах с использованием данных различной детальности // ИнтерКарто. ИнтерГИС. 2020. Т. 26, № 1. С. 257–270. DOI: 10.35595/2414-9179-2020-1-26-257-270

13. Ибрагимова Н.А., Косякова А.А., Тайсаринова А.С. Оценка загрязнения воздуха в Алматы с использованием косвенных методов // Новости науки Казахстана. 2017. № 2. С. 175–188.

14. Вохмин Д.М., Козин Е.С. Основы мониторинга углеродного следа транспортных потоков крупных городов // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. 2024. № 6. С. 11–17. DOI: 10.36535/0236-1914-2024-06-2

15. Якубович А.Н., Якубович И.А. Использование геоинформационных технологий при анализе и прогнозировании экологического состояния территорий дорожной сети // В мире научных открытий. 2015. № 6 (66). С. 52–63. DOI: 10.12731/wsd-2015-6-5

16. Sarkodie S.A. Environmental sustainability assessment using dynamic autoregressive-distributed lag simulations nexus between greenhouse gas emissions, biomass energy, food and economic growth / S.A. Sarkodie, V. Strežov, H. Weldekidan, E.F. Asamoah, P.A. Owusu, I.N.Y. Doyi // Science of the Total Environment. 2019. Vol. 668. Pp. 318–332. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.02.432

17. Nasreen S., Saidi S., Ozturk I. Assessing links between energy consumption, freight transport, and economic growth: evidence from dynamic simultaneous equation models // Environmental Science and Pollution Research. 2018. Vol. 25. Pp. 16825–16841. DOI: 10.1007/s11356-018-1760-5

18. Тунакова Ю.А. Нейросетевой расчет концентраций диоксида углерода / Ю.А. Тунакова, С.В. Новикова, А.Р. Шагидуллин, В.С. Валиев // Южно-Сибирский научный вестник. 2021. № 6. С. 18–23. DOI: 10.25699/SSSB.2021.40.6.050

19. Шепелев В.Д. Влияние пропускной способности регулируемых пересечений на количество выхлопных газов от автотранспорта / В.Д. Шепелев, А.И. Глушков, О.С. Фа-

дина, В.Е. Кутузова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Экономика и менеджмент. 2023. Т. 17, № 1. С. 168–178. DOI: 10.14529/em230116

20. Трофименко Ю.В., Комков В.И. Актуализированный прогноз численности, структуры автомобильного парка России по типу энергоустановок и выбросов парниковых газов до 2050 года // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2023. Т. 20, № 3. С. 350–361. DOI: 10.26518/2071-7296-2023-20-3-350-361

21. Иосифов В.В. Стандарты топливной эффективности как инструмент достижения целей климатической политики: анализ результативности // Экономический вестник ИПУ РАН. 2021. Т. 2, № 1. С. 40–52. DOI: 10.25728/econbull.2021.1.4-iosifov

22. Trofimenko Y.V., Yakubovich A.N., Lytov V.M. Development of approaches to updated database on the vehicle fleet of various countries for assessing gross greenhouse gas emissions // 2023 Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex (TIRVED). Moscow, 2023. Pp. 1–5. DOI: 10.1109/TIRVED58506.2023.10332670

References

1. Zyryanov, I.V., Kulinich, N.E., Ivanov, F.Y., Kozhin, V.A. (2016). Assessment of greenhouse gas emissions by motor transport of “Alrosa”. *Mining Equipment and Electromechanics*, no. 1 (119), pp. 9–13. (in Russian)

2. Shagidullin, A.R., Magdeeva, A.R., Gilyazova, A.F., Amiryanova, G.F., Shagidullina, R.A., Shagidullin, R.R. (2016). Calculation of greenhouse gas emissions during operation of motor vehicles in the big cities of the republic of Tatarstan. *Russian Journal of Applied Ecology*, no. 2 (6), pp. 22–25. (in Russian)

3. Lozhkina, O.V., Lozhkin, V.N. (2013). Quantitative estimation of road transport pollutants and green house gases by means of the European methodology copert adapted to the conditions of Saint-Petersburg. *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere*, no. 4, pp. 19–26. (in Russian)

4. Dvoeglazova, N.V., Chubarenko, B.V., Kozlova, Y.A. (2020). Anthropogenic component of greenhouse gas emissions from the territory of the Kaliningrad region. *Hydrometeorology and ecology*, no. 58, pp. 94–110. DOI: 10.33933/2074-2762-2020-58-94-110 (in Russian)

5. Maksimova, O.V., Lytov, V.M., Ginzburg, V.A. (2020). A comparative analysis of methods for calculating the carbon footprint of vehicles in Russia. *Product quality control*, no. 7, pp. 44–48. (in Russian)

6. Trofimenko, Yu.V., Ginzburg, V.A., Komkov, V.I., Lytov, V.M. (2018). Influence of the motor vehicle parking structure by fuel type and ecological class on greenhouse gas emissions. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, vol. 15, no. 6 (64), pp. 898–910. (in Russian)

7. Yakubovich, I.A. (2019). Errors in estimates of greenhouse gas emissions from motor vehicles and ways to reduce them. In: *Problemy tekhnicheskoy ekspluatatsii i avtoservisa podvizhnogo sostava avtomobilnogo transporta: sbornik trudov 77-oy nauchno-metodicheskoy i nauchno-issledovatel'skoy konferentsii MADI*. Moscow: Tekhpolograftsentr, pp. 127–130. (in Russian)

8. Amin, A., Altinoz, B., Dogan, E. (2020). Analyzing the determinants of carbon emissions from transportation in European countries: the role of renewable energy and urbanization. *Clean Technologies and Environmental Policy*, vol. 22, pp. 1725–1734. DOI: 10.1007/s10098-020-01910-2

9. Liang, Y., Niu, D., Wang, H., Li, Y. (2017). Factors affecting transportation sector CO₂ emissions growth in China: an LMDI decomposition analysis. *Sustainability*, vol. 9, issue 10. ID: 1730. DOI: 10.3390/su9101730 (accessed: 19.07.2024).

10. Mishalani, R.G., Goel, P.K., Westra, A.M., Landgraf, A.J. (2014). Modeling the relationships among urban passenger travel carbon dioxide emissions, transportation demand and supply, population density, and proxy policy variables. *Transportation Research. Part D. Transport Environment*, vol. 33, pp. 146–154. DOI: 10.1016/j.trd.2014.08.010

11. Shestakov, N.I., Targonskij, D.K., Argat, N.S., Morgoev, B.A. (2024). Methods for calculating the carbon footprint of road construction facilities. *Ekologiya urbanizirovannykh territoriy*, no. 1, pp. 76–81. DOI: 10.24412/1816-1863-2024-1-76-81 (in Russian)

12. Dekhnich, V.S. (2020). Modeling volumes emissions of greenhouse gas in cities using data with various details. *InterCarto. InterGis*, vol. 26, no. 1, pp. 257–270. DOI: 10.35595/2414-9179-2020-1-26-257-270 (in Russian)

13. Ibragimova, N.A., Kosyakova, A.A., Tajsarinova, A.S. (2017). Assessment of air pollution in Almaty using indirect methods. *Novosti nauki Kazakhstana*, no. 2, pp. 175–188. (in Russian)

14. Vohmin, D.M., Kozin, E.S. (2024). Basics of monitoring the carbon footprint of traffic flows in large cities. *Transport: Science, Equipment, Management. Scientific Information Collection*, no. 6, pp. 11–17. DOI: 10.36535/0236-1914-2024-06-2 (in Russian)

15. Yakubovich, A.N., Yakubovich, I.A. (2015). Use of geographic information technologies for the analysis and prediction of environmental status of the road network. *V mire nauchnykh otkrytiy*, no. 6 (66), pp. 52–63. DOI: 10.12731/wsd-2015-6-5 (in Russian)

16. Sarkodie, S.A., Strezov, V., Weldekidan, H., Asamoah, E.F., Owusu, P.A., Doyi, I.N.Y. (2019). Environmental sustainability assessment using dynamic autoregressive-distributed lag simulations nexus between greenhouse gas emissions, biomass energy, food and economic growth. *Science of the Total Environment*, vol. 668, pp. 318–332. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.02.432

17. Nasreen, S., Saidi, S., Ozturk, I. (2018). Assessing links between energy con-

sumption, freight transport, and economic growth: evidence from dynamic simultaneous equation models. *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 25, pp. 16825–16841. DOI: 10.1007/s11356-018-1760-5

18. Tunakova, Y.A., Novikova, S.V., Shagidullin, A.R., Valiev, V.S. (2021). Neural network calculation of carbon dioxide concentrations. *South-Siberian Scientific Bulletin*, no. 6, pp. 18–23. DOI: 10.25699/SSSB.2021.40.6.050 (in Russian)

19. Shepelev, V.D., Glushkov, A.I., Fadina, O.S., Kutuzova, V.E. (2023). Influence of the capacity of regulated crossings on the quantity of exhaust gases from vehicles. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Economics and Management*, vol. 17, no. 1, pp. 168–178. DOI: 10.14529/em230116 (in Russian)

20. Trofimenko, J.V., Komkov, V.I. (2023). Updated number forecast, Russian car fleet structures by type of power plants and greenhouse gas emissions until 2050. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, vol. 20, no. 3, pp. 350–361. DOI: 10.26518/2071-7296-2023-20-3-350-361 (in Russian)

21. Iosifov, V.V. (2021). Fuel efficiency standards as a tool for achieving climate policy goals: performance analysis. *Economic Bulletin of ICS RAS*, vol. 2, no. 1, pp. 40–52. DOI: 10.25728/econbull.2021.1.4-iosifov (in Russian)

22. Trofimenko, Y.V., Yakubovich, A.N., Lytov, V.M. (2023). Development of approaches to updated database on the vehicle fleet of various countries for assessing gross greenhouse gas emissions. In: *2023 Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex (TIRVED)*. Moscow, pp. 1–5. DOI: 10.1109/TIRVED58506.2023.10332670

Сведения об авторах

Трофименко Юрий Васильевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой техносферной безопасности Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ), uwtrofimenko@mail.ru.

Гинзбург Вероника Александровна, кандидат географических наук, заместитель директора Института глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля (ИГКЭ), veronika.ginzburg@gmail.com.

Якубович Анатолий Николаевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры техносферной безопасности Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ), 54081@mail.ru.

Лытов Владислав Михайлович, научный сотрудник отдела исследования процессов стабилизации глобального климата Института глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля (ИГКЭ), vladislav.lytoff@gmail.com.

Шелмаков Сергей Вячеславович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры техносферной безопасности Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ), shelwood@yandex.ru.

Зеленова Мария Сергеевна, кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник Института глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля (ИГКЭ), mszelenova@gmail.com.

Information about the authors

Yurij V. Trofimenko, Doctor of Technical Sciences, Professor, The Head of the Technosphere Safety Chair, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), ywtrofimenko@mail.ru.

Veronika A. Ginzburg, Candidate of Geographical Sciences, Deputy Director of the Institute of Global Climate and Ecology Named after Academician Y.A. Izrael (IGCE), veronika.ginzburg@gmail.com.

Anatolij N. Yakubovich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Technosphere Safety Chair, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), 54081@mail.ru.

Vladislav M. Lytov, Researcher at the Department of Global Climate Stabilization Research, Institute of Global Climate and Ecology Named after Academician Y.A. Izrael (IGCE), vladislav.lytoff@gmail.com.

Sergej V. Shelmakov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Technosphere Safety Chair, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), shelwood@yandex.ru.

Mariya S. Zelenova, Candidate of Geographical Sciences, Leading Researcher, Institute of Global Climate and Ecology Named after Academician Y.A. Izrael (IGCE).

Поступила в редакцию	01.11.2024	Received	01.11.2024
Одобрена после рецензирования	02.12.2024	Approved after reviewing	02.12.2024
Принята в печать	23.01.2025	Accepted for publication	23.01.2025

ББК 05
Н 34
Св. план 2025

Научный Вестник МГТУ ГА
Том 28, № 01, 2025
Civil Aviation High TECHNOLOGIES
Vol. 28, No. 01, 2025

Свидетельство о регистрации в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) ПИ № ФС77-47989 от 27 декабря 2011 г.

Оформить подписку на печатную версию журнала можно на сайте Объединенного каталога «Пресса России» www.pressa-rf.ru. Подписной индекс 84254.

Подписано в печать2025.

Печать цифровая

Формат 60×90/8

11,88 усл. печ. л.

Заказ № 1065 / ...

Тираж 50 экз.

Московский государственный технический университет ГА
125993, Москва, Кронштадтский бульвар, д. 20
Изготовлено в ИД Академии имени Н. Е. Жуковского
125167, Москва, 8-го Марта 4-я ул., дом 6А
Тел.: (495) 973-45-68
E-mail: artpress@mail.ru

© Московский государственный
технический университет ГА, 2025