

Том 27, № 03, 2024

ISSN 2079-0619

e-ISSN 2542-0119

Научный Вестник МГТУ ГА



Civil Aviation High TECHNOLOGIES

Vol. 27, No. 03, 2024

Издается с 1998 г.

Москва
2024

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;

Vacily 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;

Акинишин 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. Hodakovskiy, 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

Vasiliev O.V., Boyarenko E.S., Savelyev A.N., Gorbachev N.V. Analysis of informativeness of features of classification of dangerous weather events based on radar observation results	8
Воробьев А.В., Леликов А.М., Стрый В.В. Методика аппроксимации трехмерных поверхностей в целях синтеза алгоритмов предотвращения столкновения летательных аппаратов с препятствиями	23
Киселев М.А., Калюжный Ю.С., Карпов А.В., Бородин С.Ф. Исследования по перестроению маршрута в процессе полета воздушного судна	35
Хоанг Куан Н.Н., Нечаев В.Н. Предложения по проектированию организации воздушного пространства секторов ОВД районного диспетчерского центра Хошмина с целью повышения его пропускной способности	50
Obraztsov R.A., Sharov V.D. Analysis of a balanced safety performance indicator as a key element of operational controlling in the ATS organization	67

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Желанников А.И. Вихревая безопасность при полете на заданном эшелоне	81
--	----

CONTENTS

TRANSPORTATION SYSTEMS

Vasiliev O.V., Boyarenko E.S., Savelyev A.N., Gorbachev N.V.

Analysis of informativeness of features of classification of dangerous weather events based on radar observation results 8

Vorobyev A.V., Lelikov A.M., Stryy V.V.

The technique for approximation of three-dimensional surfaces in order to synthesize algorithms for preventing collisions of aircraft with obstacles 23

Kiselev M.A., Kalyuzhny Y.S., Karpov A.V., Borodkin S.F.

Studies on in-flight aircraft rerouting 35

Hoang Quan N.N., Nechaev V.N.

Proposals for designing the airspace management of the ATM sectors of the Ho Chi Minh City Area Control Centre to increase its capacity 50

Obraztsov R.A., Sharov V.D.

Analysis of a balanced safety performance indicator as a key element of operational controlling in the ATS organization 67

MECHANICAL ENGINEERING

Zhelannikov A.I.

Vortex safety when flying at an assigned flight level 81

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 551.501.81

DOI: 10.26467/2079-0619-2024-27-3-8-22

Analysis of informativeness of features of classification of dangerous weather events based on radar observation results

O.V. Vasiliev¹, E.S. Boyarenko¹, A.N. Savelyev², N.V. Gorbachev²

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

²*Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia*

The article was prepared within the framework of the project № 23-29-00450 granted by the Russian Science Foundation

Abstract: One of the crucial factors affecting the safety and regularity of state and civil aviation flights is the meteorological situation. The European territory of Russia is most characterized by dangerous meteorological phenomena associated with cumulonimbus clouds: shower, thunderstorms, hail, accompanied by high atmospheric turbulence. Currently, meteorological radar stations are an indispensable source of information about the weather situation for air transport. The criteria for the classification of meteorological phenomena used in modern radar stations are formed for each event separately and are based on knowledge only about the altitude distribution of radar reflectivity and air temperature, despite the fact that radar data assess the wind characteristics of the atmosphere. It is shown that optimization of the classification criteria for the mentioned meteorological phenomena should be realized by generalization of the criteria and their construction in accordance with the theory of statistical hypothesis distinction, as well as by additional use of information on atmospheric turbulence. Based on the analysis of radar signals reflected from the meteorological events of shower, thunderstorm, and hail, probability distributions of reflectivity and specific dissipation rate of turbulent energy were obtained. Statistical analysis of probability distribution densities was carried out for: the maximum value of reflectivity Z_{max} , its dependence on height $H(Z_{max})$, as well as the maximum specific dissipation rate of turbulent energy EDR_{max} and the value $H(EDR_{max})$. The classification criterion based on the maximum probability functional was chosen to determine the structure of classification algorithms and decision rules. At the same time under the acceptable confidence is accepted the value of the probability of correct classification not lower than 0.8. For the accepted criterion the decision thresholds are constructed and the complete matrices of classification probabilities are calculated. The results of calculations showed that the worst informativeness in the classification of dangerous meteorological events of cumulonimbus cloudiness have parameters $H(Z_{max})$, $H(EDR_{max})$. Parameters Z_{max} , EDR_{max} have greater separating ability, but even for them the confidence of classification is unacceptable. In the article to increase the confidence of classification the joint use of features in the form of multivariate probability distribution densities of information parameters was applied. The best results are achieved when three $p(Z_{max}, H(Z_{max}), EDR_{max})$ and four $p(Z_{max}, H(Z_{max}), EDR_{max}, H(EDR_{max}))$ features are used. In the probability matrices for these cases, the maximum and acceptable at 0.8 level of probabilities of correct classification are achieved. Thus, the expansion of the feature space due to atmospheric turbulence is justified in the problem under consideration. These results will be refined with increasing observation time and will vary for different climatic zones. In general, the decision thresholds for classifying dangerous meteorological events of cumulonimbus cloudiness should be adaptive.

Key words: weather radar, dangerous weather phenomena, classification of weather phenomena, pattern recognition, feature separation function, Bayesian approach, decision threshold.

For citation: Vasiliev, O.V., Boyarenko, E.S., Savelyev, A.N., Gorbachev, N.V. (2024). Analysis of informativeness of features of classification of dangerous weather events based on radar observation results. Civil Aviation High Technologies, vol. 27, no. 3, pp. 8–22. DOI: 10.26467/2079-0619-2024-27-3-8-22

Анализ информативности признаков классификации опасных метеоявлений по результатам радиолокационных наблюдений

О.В. Васильев¹, Э.С. Бояренко¹, А.Н. Савельев², Н.В. Горбачев²

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

²Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
г. Москва, Россия

Статья подготовлена в рамках поддержанного грантом Российского научного фонда проекта
№ 23-29-00450

Аннотация: Одним из решающих факторов, влияющих на безопасность и регулярность полетов государственной и гражданской авиации, является метеорологическая обстановка. Для Европейской территории России наиболее характерны опасные метеорологические явления, связанные с кучево-дождевой облачностью: ливень, гроза, град, сопровождающиеся высокой турбулентностью атмосферы. В настоящее время метеорологические радиолокационные станции являются незаменимым источником информации о метеообстановке для воздушного транспорта. Критерии классификации опасных метеоявлений, используемые в современных РЛС, сформированы для каждого явления отдельно и основаны на знаниях лишь о высотном распределении радиолокационной отражаемости и температуры воздуха, несмотря на то, что данные РЛС оценивают ветровые характеристики атмосферы. Показано, что оптимизация критериев классификации указанных метеоявлений должна быть реализована путем обобщения критериев и их построения в соответствии с теорией различения статистических гипотез, а также дополнительным использованием информации о турбулентности атмосферы. На основании анализа радиолокационных сигналов, отраженных от метеоявлений ливень, гроза, град, были получены вероятностные распределения отражаемости и удельной скорости диссипации турбулентной энергии. Проведен статистический анализ плотностей распределения вероятностей для максимального значения отражаемости Z_{max} , ее зависимости от высоты $H(Z_{max})$, а также максимума удельной скорости диссипации турбулентной энергии EDR_{max} и величины $H(EDR_{max})$. Для определения структуры алгоритмов классификации и правил принятия решений был выбран критерий классификации, основанный на максимуме функционала правдоподобия. При этом под приемлемой достоверностью принято значение вероятности правильной классификации не ниже 0,8. Для принятого критерия построены пороги принятия решений и вычислены полные матрицы вероятностей классификации. Результаты вычислений показали, что наихудшую информативность при классификации опасных метеоявлений кучево-дождевой облачности имеют признаки $H(Z_{max})$, $H(EDR_{max})$. Большей разделяющей способностью обладают признаки Z_{max} , EDR_{max} , однако и для них достоверность классификации неприемлема. В статье для повышения достоверности классификации было применено совместное использование признаков в виде многомерных плотностей распределения вероятностей информационных параметров. Наилучшие результаты достигаются при использовании трех $p(Z_{max}, H(Z_{max}), EDR_{max})$ и четырех $p(Z_{max}, H(Z_{max}), EDR_{max}, H(EDR_{max}))$ признаков. В матрицах вероятностей для этих случаев достигнуты максимальные и приемлемые на уровне 0,8 значения вероятностей правильной классификации. Таким образом, в рассматриваемой задаче расширение признакового пространства за счет турбулентности атмосферы является оправданным. Данные результаты будут уточняться при увеличении времени наблюдения и варьироваться для различных климатических зон. В общем случае пороги принятия решений при классификации опасных метеоявлений кучево-дождевой облачности должны быть адаптивными.

Ключевые слова: метеорологический радиолокатор, опасные метеорологические явления, классификация метеорологических явлений, распознавание образов, разделяющая функция признаков, байесовский подход, пороги принятия решений.

Для цитирования: Васильев О.В. Анализ информативности признаков классификации опасных метеоявлений по результатам радиолокационных наблюдений / О.В. Васильев, Э.С. Бояренко, А.Н. Савельев, Н.В. Горбачев // Научный Вестник МГТУ ГА. 2024. Т. 27, № 3. С. 8–22. DOI: 10.26467/2079-0619-2024-27-3-8-22

Introduction

One of the contributing factors affecting the safety and regularity of state and civil aviation

flights is the meteorological situation. The European territory of Russia is most characterized by dangerous meteorological phenomena associated with cumulonimbus clouds: shower, thunderstorms, hail, accompanied by high atmospheric

turbulence¹ [1, 2]. The given dangerous meteorological phenomena pose threat for both takeoff and landing and flight performance, unlike conventional precipitation, wind and clouds². Besides that, dangerous meteorological phenomena associated with cumulonimbus clouds, containing water in different phase conditions as a radar reflector, are available for meteorological radar stations surveillance³.

Currently, meteorological radar stations are an indispensable source of information about the weather situation for air transport.⁴ Now there are two domestic meteorological radar stations in the Russian Federation: DMR-S [3–5] and MR-NZ “Monocle” [6,7] with C and X ranges respectively, completely meeting the current requirements. The given meteorological radars operate using the pulse-doppler principle, also allow to estimate the wind characteristics of the atmosphere, such as vector velocity field, turbulence presence and value, on condition clutter return is available. The mentioned atmospheric factors may be used as highly informative signs of dangerous meteorological phenomena associated with cumulonimbus clouds.

The criteria for the classification of meteorological phenomena were formed in accordance with guidance documents⁵ [8]. At the same time all criteria used in modern radar stations are formed for each event separately and are based on knowledge only about the altitude distribution of radar clutter return and air temperature, despite the fact that radar data assess the wind characteristics of the atmosphere quite exactly.

Optimization of the classification criteria for the mentioned meteorological phenomena should be implemented by:

- generalization of the criteria and their construction in accordance with the theory of statistical hypothesis distinction [9–14];
- additional use of information on atmospheric turbulence.

Task for classification criteria optimization is specified in [15], parametrical description for maximum clutter return and turbulence distribution densities by values and altitudes is formed.

The paper continues the aimed research.

Problem statement

Classification problem of weather phenomena associated with cumulonimbus clouds is to solve the following mutual issues basing on radar observations:

- forming the classification alphabet, in this case these are: “shower-thunderstorm-hail”;
- choosing the sign space of the maximum value of reflectivity Z_{max} , as well as the maximum specific dissipation rate of turbulent energy EDR_{max} , its dependence on height $H(Z_{max})$, and the value $H(EDR_{max})$;
- forming of sign probability description with data parameters $p(Z_{max}/\omega_i)$, $p(EDR_{max}/\omega_i)$, $p(H(Z_{max})/\omega_i)$, $p(H(EDR_{max})/\omega_i)$, where $i \in \{l, gz, gd\}$ probability distribution densities;
- choosing the statistical criteria of dangerous weather phenomena associated with classification for decision making threshold values, basing on data quality and classification veracity required.

The iterative sequence of problems is to correct signs and criteria in order to reach veracity required.

There is a probability sign description in [13]. Distributions close to Gaussian ones: lognormal, Weibull, Riley, Riley-Rice, β -distribution were observed to estimate the empiric datum meeting the theoretical ones. For probability density distributions $p(Z_{max}/\omega_i)$, $p(EDR_{max}/\omega_i)$, $p(H(Z_{max})/\omega_i)$, $p(H(EDR_{max})/\omega_i)$, where $i \in \{l, gz, gd\}$, different Pearson χ^2 agreement criteria hypothesis testing for 0.01 relevance level has shown experi-

¹ The federal service for hydrometeorology and environmental monitoring third estimation report on climate change and its consequences on territory of the Russian Federation. General summary. (2022). St. Petersburg: Knowledge-intensive technologies, 124 p. (in Russian)

² Ministry of transport order “on federal aviation rules establishment “The Russian Federation civil aircraft flight preparation and performance”, no. 128 dated July 31 2001. *GARANT.RU*. Available at: <https://base.garant.ru/196235/> (accessed: 19.11.2023).

³ Ministry of Transport Order “On Federal Aviation Rules Establishment “Meteorological data provision for aircraft flight performance”, no. 60 dated March 3 2014. *GARANT.RU*. Available at: <https://base.garant.ru/196235/> (accessed: 19.11.2023).

⁴ The Russian Federation armed forces meteorological service guidance, (AFMSG – 95). (1995), 92 p. (in Russian)

⁵ Observation and data use guidance with non-automatic DMR-1, DMR-2 and DMR-5 radars. (1993). SPb.: Hydrometeopublish 350 p. (in Russian)

Table 1

Rice distribution parameters for rain shower, thunderstorms and hail

Parameter	Shower	Thunderstorm	Hail
	H(Zmax)		
ME-mean	$\mu = 2$	$\mu = 3.5$	$\mu = 4$
SD	$\sigma_x = 2.5$	$\sigma_x = 3$	$\sigma_x = 4$
	H(EDRmax)		
ME-mean	$\mu = 2$	$\mu = 3$	$\mu = 4$
SD	$\sigma_x = 2.5$	$\sigma_x = 4$	$\sigma_x = 4.5$
	Zmax		
ME-mean	$\mu = 22$	$\mu = 29$	$\mu = 42$
SD	$\sigma_x = 7$	$\sigma_x = 8$	$\sigma_x = 10$
	EDRmax		
ME-mean	$\mu = 0.2$	$\mu = 0.5$	$\mu = 0.61$
SD	$\sigma_x = 0.2$	$\sigma_x = 0.12$	$\sigma_x = 0.08$

mental relative frequencies maximally meeting the general Riley-Rice distribution

$$p(x_i, \mu_i, \sigma_i) = \frac{x_i}{\sigma_i^2} \exp\left(\frac{-(x_i^2 + \mu_i^2)}{2\sigma_i^2}\right) I_0\left(\frac{x_i \mu_i}{\sigma_i^2}\right), \quad (1)$$

where $I_0(z)$ is a modified Bessel function of the first kind and zero-order. μ and σ parameters are strictly not the mathematical expectation mean (ME) and standard deviation (SD), nevertheless they express respectively the distribution form. There are μ and σ values for maximum reflectibility and turbulence, along with their altitude distribution for rain shower, thunderstorms and hail basing on experimental studies in Table 1. The given table is essentially a parametrical dangerous weather phenomena associated with cumulonimbus clouds “rain shower-thunderstorm-hail” sign classification description.

Let us take the obvious assumption: in case of reliable radar observance range data absence and justified loss matrix while taking mistakeable decisions the relative sign x distribution densities while ω_i $p(x/\omega_i)$ weather phenomenon observation, where $i \in \{\text{shower}, \text{tstorm}, \text{hail}\}$. The given statistics allows decision making based on the maximum-probability criterion to meet $\omega = i$, which is chosen.

$$p(x/\omega_i) > p(x/\omega_k) \text{ for all } k \neq i. \quad (2)$$

Sufficient statistics for conditions adopted define the optimal decision structure and data proceeding approach [16–18].

“Other event” class is to be included in the alphabet whole forming the whole event group in case of strict classification problem statement. In the given statement the weather phenomenon “rain shower” is the lowest by its danger and essentially not threatening neither by precipitation intensity, nor by cumulonimbus clouds with continuous precipitation (“rain shower”), along with “tornado” which is higher by danger, nevertheless, not frequent for European part of Russia temperate latitudes. The latter defines integration limits while calculating respective decision-making probabilities, like it will be further shown [19].

Besides that, let us take an assumption about sign independence, which will significantly simplify problem solution without considerably influencing its result.

Thus, let us define vocabulary classification signs information value and their impact on decision-making reliability for assumptions and limits taken. At the same time let us take the right classification probability value not less than 0.8 as an appropriate reliability.

Analysis of dangerous weather phenomena associated with cumulonimbus clouds signs information value

Maximum plausibility criterion (2) forms alternative threshold i, k ; $i \neq k$ considering (1) as an equation

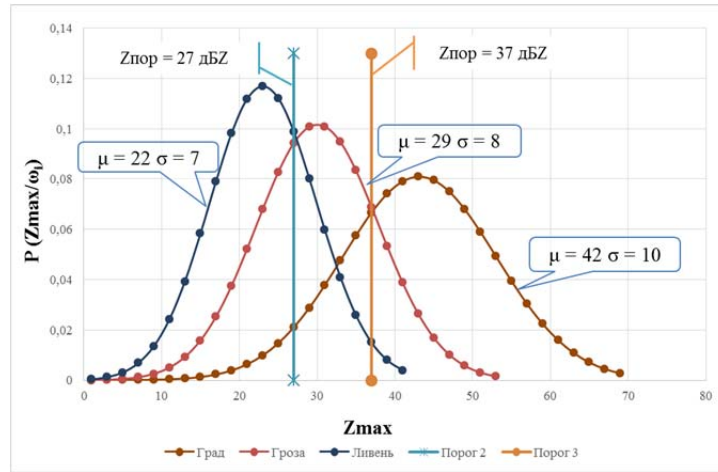


Fig. 1. Decision thresholds for the Zmax parameter

$$h_{\text{пор}}(i, k) = \frac{x}{\sigma_i^2} e^{-\frac{x^2 + \mu_i^2}{2\sigma_i^2}} I_0\left(\frac{x\mu_i}{\sigma_i^2}\right) - \frac{x}{\sigma_k^2} e^{-\frac{x^2 + \mu_k^2}{2\sigma_k^2}} I_0\left(\frac{x\mu_k}{\sigma_k^2}\right) = 0. \quad (3)$$

Forming a threshold pair $h_{sh,tstorm}(Z_{max}) = 27.4 \text{ dBZ}$, $h_{sh,tstorm}(Z_{max}) = 37.2 \text{ dBZ}$ is the example of the pdf pair of equation solved $p(Z_{max}/\omega_i)$, at $i \in \{sh, tstorm, hail\}$.

The full matrix of classification probabilities [9] can be formed for any x sign for Zmax, EDRmax, H(Zmax), H(EDRmax) multitude

$$P(x) = \begin{vmatrix} P_{shsh}(x) & P_{shtstorm}(x) & P_{shtstormhail}(x) \\ P_{tstormsh}(x) & P_{tstormtstorm}(x) & P_{tstormhail}(x) \\ P_{hailsh}(x) & P_{hailtstorm}(x) & P_{hailhail}(x) \end{vmatrix}, \quad (4)$$

which elements are calculated as

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{sh,sh}(x) = \int_0^{h_{sh,tstorm}(x)} p(x, sh) dx; \\ P_{sh,tstorm}(x) = \int_{h_{sh,tstorm}(x)}^{h_{tstorm,hail}(x)} p(x, sh) dx; \\ P_{sh,hail}(x) = \int_{h_{tstorm,hail}(x)}^{\infty} p(x, sh) dx; \\ P_{tstorm,sh}(x) = \int_0^{h_{sh,tstorm}(x)} p(x, tstorm) dx; \\ P_{tstorm,tstorm}(x) = \int_{h_{sh,tstorm}(x)}^{h_{tstorm,hail}(x)} p(x, tstorm) dx; \\ P_{tstorm,hail}(x) = \int_{h_{tstorm,hail}(x)}^{\infty} p(x, tstorm) dx; \\ P_{hail,sh}(x) = \int_0^{h_{sh,tstorm}(x)} p(x, tstorm) dx; \\ P_{hail,sh}(x) = \int_{h_{sh,tstorm}(x)}^{h_{tstorm,hail}(x)} p(x, hail) dx; \\ P_{hail,hail}(x) = \int_{h_{tstorm,hail}(x)}^{\infty} p(x, hail) dx, \end{array} \right. \quad (5)$$

where diagonal elements define right decision-making veracity.

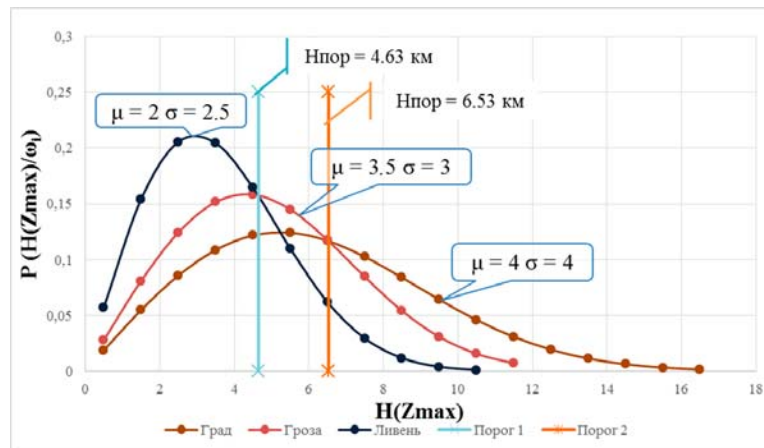


Fig. 2. Decision thresholds for parameter $H(Z_{max})$

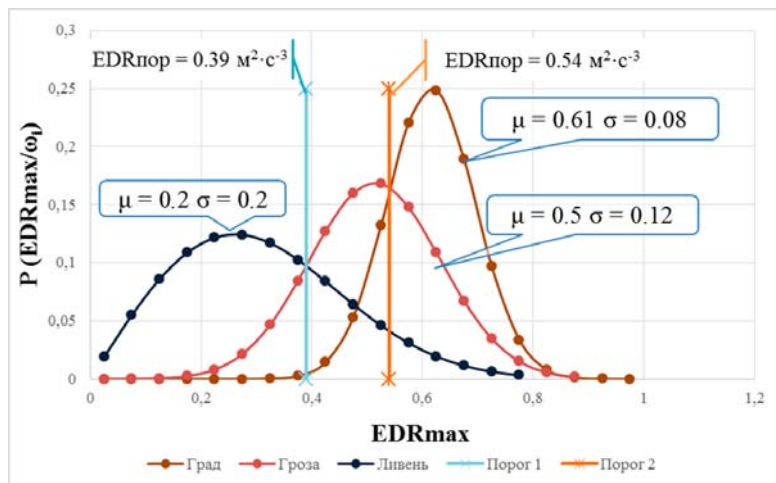


Fig. 3. Decision thresholds for the EDR_{max} parameter

Using 0 and ∞ as integrity limits is not totally correct, nevertheless analysis of dangerous weather phenomena associated with cumulonimbus clouds signs information value problem statement allows it.

For case in Figure 1 there is

$$P(Z_{max}) = \begin{bmatrix} \mathbf{0.715} & 0.263 & 0.022 \\ 0.347 & \mathbf{0.463} & 0.19 \\ 0.05 & 0.218 & \mathbf{0.732} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

In (6) there are high probabilities of mixing up in case of non-sufficient right classification values, especially in terms of thunderstorm. For $H(Z_{max})$ (fig. 2) decision making thresholds

have the values $h_{sh,tstorm}(H(Z_{max})) = 4.63 \text{ km}$; $h_{tstorm,hail}(H(Z_{max})) = 6.53 \text{ km}$.

High curve overlapping square is expressed in inappropriate classification matrix values, each in its own quality.

$$P(H(Z_{max})) = \begin{bmatrix} \mathbf{0.759} & 0.153 & 0.088 \\ 0.518 & \mathbf{0.205} & 0.277 \\ 0.374 & 0.177 & \mathbf{0.449} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Almost the same can be seen for $H(EDR_{max})$ where the thresholds have the values $h_{sh,tstorm}(H(EDR_{max})) = 5.09 \text{ km}$; $h_{tstorm,hail}(H(EDR_{max})) = 6.89 \text{ km}$

$$P(H(EDRmax)) = \begin{vmatrix} \mathbf{0.791} & 0.156 & 0.053 \\ 0.463 & \mathbf{0.220} & 0.317 \\ 0.359 & 0.208 & \mathbf{0.433} \end{vmatrix}. (8)$$

The situation for $EDRmax$ (fig.3), thresholds are $h_{sh,tstorm}(EDRmax) = 0.39 m^2 s^{-3}$, $h_{tstorm,hail}H(EDRmax) = 0.54 m^2 s^{-3}$ is hardly ever better. In case of a thunderstorm the plausibility of decision is unacceptable.

$$P(EDRmax) = \begin{vmatrix} \mathbf{0.712} & 0.205 & 0.083 \\ 0.146 & \mathbf{0.440} & 0.414 \\ 0.002 & 0.170 & \mathbf{0.828} \end{vmatrix}. (9)$$

Thus, $H(Zmax)$, $H(EDRmax)$ signs possess the worst informative value in terms of dangerous weather phenomena associated with cumulonimbus clouds classification. $Zmax$, $EDRmax$ signs present more dividing abilities, nevertheless thunderstorm classification reliability is also inappropriate for them.

$$p(x_1, \mu_1, \sigma_1, x_2, \mu_2, \sigma_2, \dots, x_n, \mu_n, \sigma_n) = \prod_{i=1}^n p(x_i, \mu_i, \sigma_i), (10)$$

where $p(x_i, \mu_i, \sigma_i)$ is (1).

There are two-dimensional distribution densities $p(Zmax, H(Zmax)/\omega_i)$ and $p(EDRmax, H(EDRmax)/\omega_i)$ respectively in Figures 4 and 5.

Estimation of dangerous weather phenomena associated with cumulonimbus clouds classification in multidimensional sign space

The recognition theory is an obvious solution of the problem occurred [9, 20]. Joint use of signs, for instance, as multidimensional random data parameters $Zmax$, $EDRmax$, $H(Zmax)$, $H(EDRmax)$ [21] distribution densities is necessary in the given class alphabet in order to increase weather phenomena classification reliability. For the assumption about sign statistical independence their probability distribution density n looks like

Thresholds for two-dimensional cases by numerical method [18, 22] are planes, crossing each other in Figures 6 and 7, presented as curves.

The respective probability matrixes look like

$$P(Zmax, H(Zmax)) = \begin{vmatrix} \mathbf{0.753} & 0.243 & 0.004 \\ 0.320 & \mathbf{0.505} & 0.175 \\ 0.040 & 0.216 & \mathbf{0.744} \end{vmatrix}, (11)$$

$$P(EDRmax, H(EDRmax)) = \begin{vmatrix} \mathbf{0.761} & 0.175 & 0.064 \\ 0.146 & \mathbf{0.463} & 0.391 \\ 0.003 & 0.181 & \mathbf{0.816} \end{vmatrix}. (12)$$

For the most informatively valuable $Zmax$ and $EDRmax$ signs matrix is equal to

$$P(Zmax, EDRmax) = \begin{vmatrix} \mathbf{0.769} & 0.161 & 0.070 \\ 0.141 & \mathbf{0.683} & 0.176 \\ 0.031 & 0.159 & \mathbf{0.810} \end{vmatrix}. (13)$$

Matrix (13) predictably presents the best classification reliability markers. Let us analyze the increase of this marker with the given problem dimension increase. Thus,

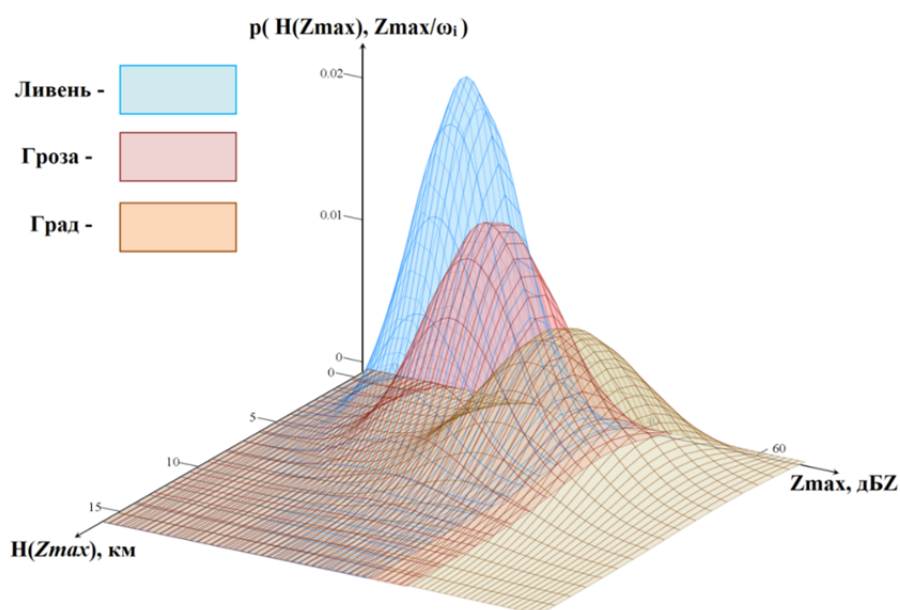


Fig. 4. Surface of the two-dimensional probability density of the radar reflectivity

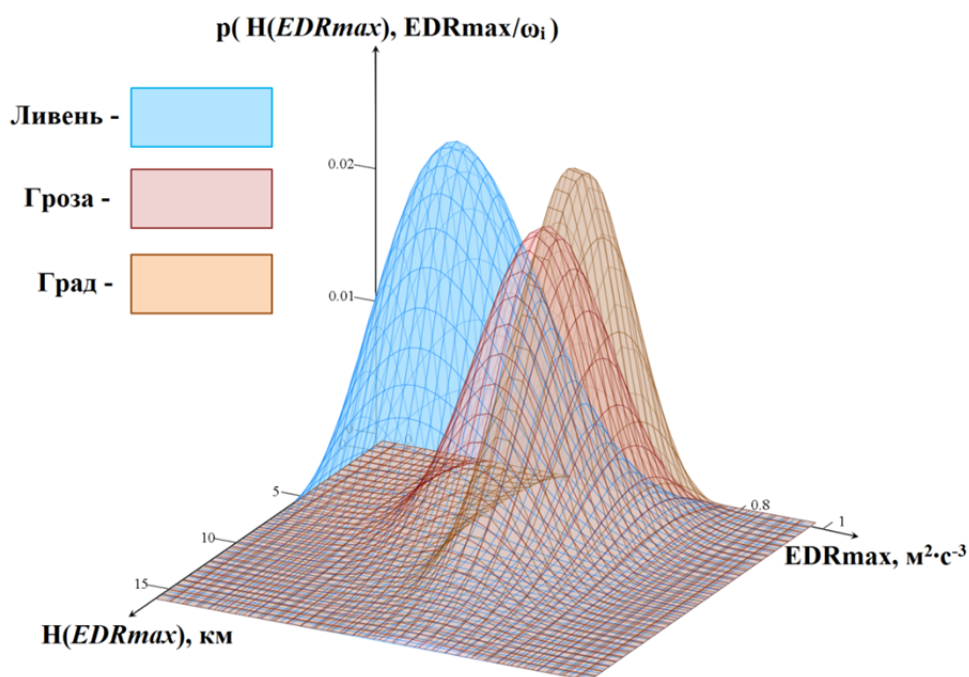


Fig. 5. Surface of the two-dimensional EDR probability density

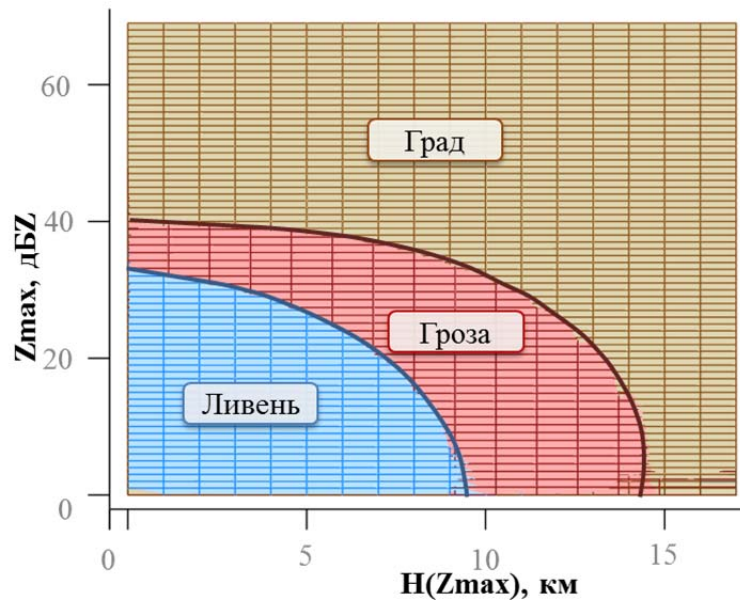


Fig. 6. Projection of the dividing plane onto the horizontal plane for $p(H(Z_{\max}), Z_{\max}/\omega_i)$

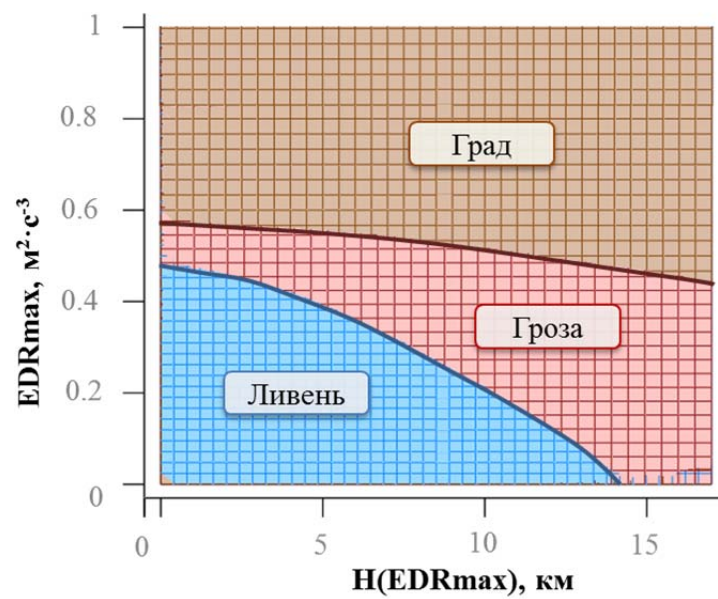


Fig. 7. Projection of the dividing plane onto the horizontal plane for $p(H(EDR_{\max}), EDR_{\max}/\omega_i)$

$$P(Z_{\max}, H(Z_{\max}), H(EDR_{\max})) = \begin{vmatrix} \mathbf{0.809} & 0.174 & 0.017 \\ 0.231 & \mathbf{0.553} & 0.216 \\ 0.075 & 0.173 & \mathbf{0.752} \end{vmatrix}, \quad (14)$$

$$P(EDR_{\max}, H(EDR_{\max}), H(Z_{\max})) = \begin{vmatrix} \mathbf{0.788} & 0.146 & 0.066 \\ 0.251 & \mathbf{0.497} & 0.252 \\ 0.049 & 0.144 & \mathbf{0.807} \end{vmatrix}, \quad (15)$$

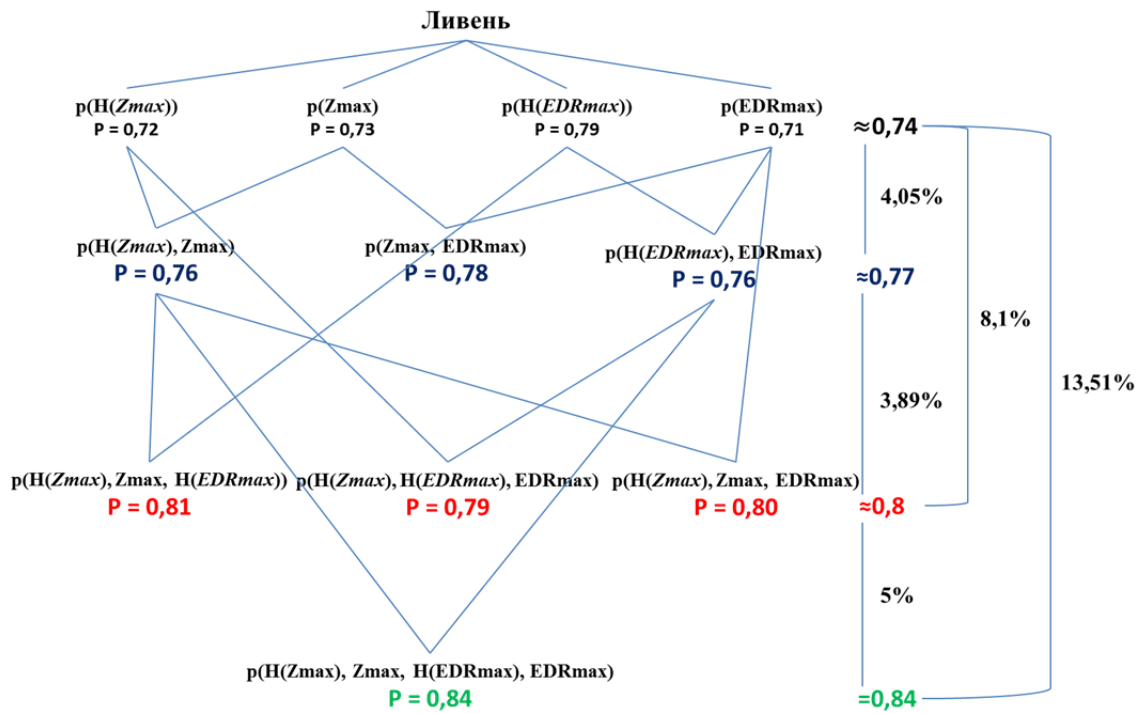


Fig. 8. Relative increase in plausibility of heavy shower classification with increasing number of features

$$P(Zmax, H(Zmax), EDRmax) = \begin{bmatrix} \mathbf{0.800} & 0.195 & 0.005 \\ 0.162 & \mathbf{0.691} & 0.147 \\ 0.024 & 0.159 & \mathbf{0.817} \end{bmatrix}. \quad (16)$$

And then

$$P(Zmax, H(Zmax), EDRmax, H(EDRmax)) = \begin{bmatrix} \mathbf{0.839} & 0.138 & 0.023 \\ 0.145 & \mathbf{0.701} & 0.154 \\ 0.022 & 0.157 & \mathbf{0.821} \end{bmatrix}. \quad (17)$$

Probability matrix (17) has predictably reached the maximum correct classification probability values. Only the plausibility of thunderstorm classification is below the required level. However, in case of practical implementation the threshold $h_{sh,tstorm}$ may be slightly lowered, considering the greater hazard of the thunderstorm, or both thresholds $h_{sh,tstorm}$ and $h_{sh,tstorm}$ and C to equalize the plausibility for all classes.

There are sums and probability right classification increase for rain shower, thunderstorm and hail respectively with different nomenclature and number of signs in Figures 8, 9, 10. In case of rain shower increase from one-dimensional problem to four-dimensional one was only

13.5 %. Almost appropriate reliabilities for rain shower occurred already in two-dimensional variants. The whole increase for thunderstorm was 100%. Nevertheless, the appropriate classification reliability is not reached even in a four-dimensional variant. Zmax и EDRmax signs possess the most informational value. The given parameter distribution by altitudes is correlated and by this reason is less informative. The percent sum of decision-making reliability increase in “one- to two dimensional” problem interchange is 30.22 %, “one- to three-dimensional” – 34.6 %, “one- to four-dimensional” – 49.3 %. This confirms that the sign space in this case is necessary considering the “dimension curse” [9].

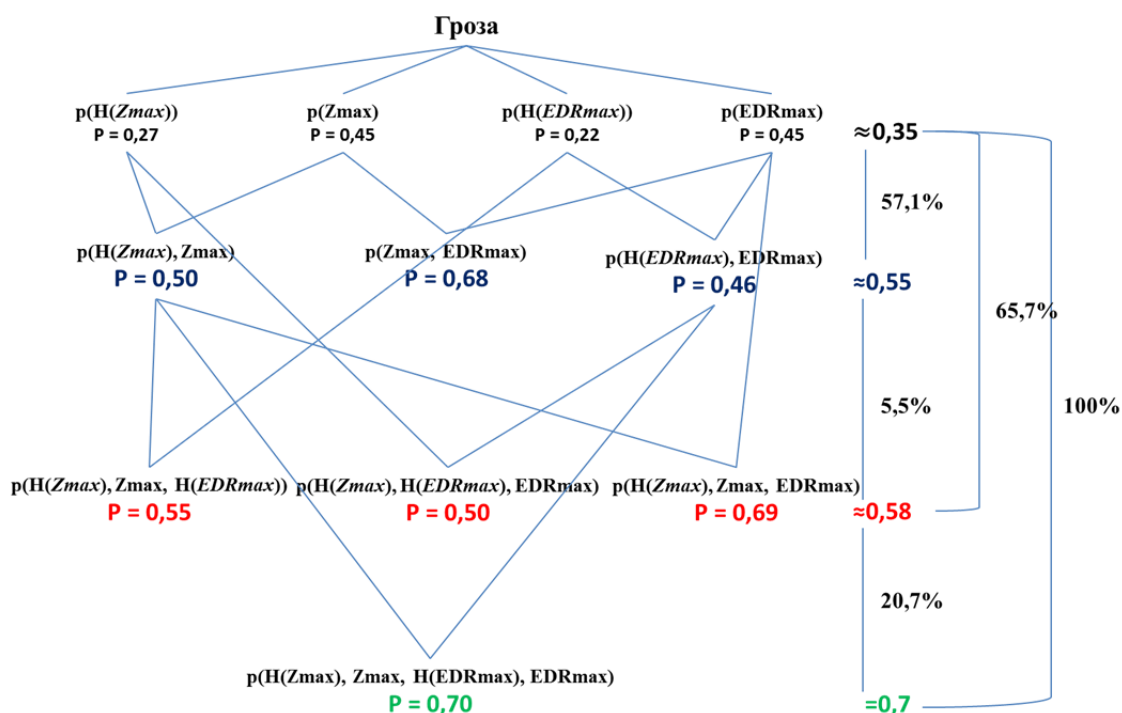


Fig. 9. Relative increase in plausibility of thunderstorm classification with increasing number of features

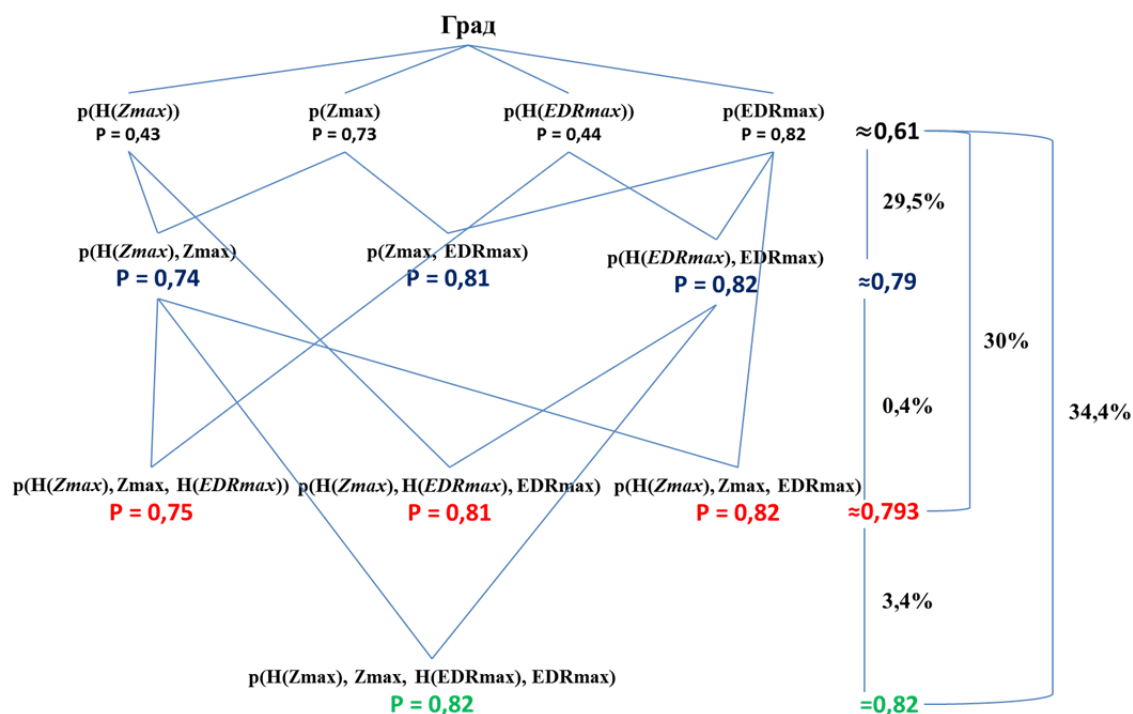


Fig. 10. Relative increase in plausibility of hail classification with increasing number of features

Conclusion

It is shown that maximum plausibility criterion is the most productive for dangerous weather phenomena associated with cumulonimbus clouds classification problem in case there is no reliable data or respective loss matrix. Decision making thresholds are calculated and full probability classification matrixes are formed for one-, two-, three- and four-dimensional sign spaces for the criterion taken.

Results analysis has shown that $H(Z_{max})$, $H(EDR_{max})$ signs are the least informatively valuable in dangerous weather phenomena associated with cumulonimbus clouds classification. Z_{max} , EDR_{max} possess the more dividing ability. Thus, sign space expansion due to atmosphere turbulence is justified in the given problem. The percent sum of decision-making reliability increase in “one- to two dimensional” problem interchange is 30.22%, “one- to three-dimensional” – 34.6%, “one- to four-dimensional” – 49.3%. The best results are obtained while using three $p(Z_{max}, H(Z_{max}), EDR_{max})$ and four

$p(Z_{max}, H(Z_{max}), EDR_{max}, H(EDR_{max}))$ signs. Maximum and appropriate (up to 0.8) right classification probability values are calculated for these cases in probability matrixes. Thunderstorm classification veracity is insignificantly lower. However, in case of practical implementation the threshold $h_{sh, tstorm}$ may be slightly lowered, considering the greater hazard of the thunderstorm, or both thresholds $h_{sh, tstorm}$ and $h_{sh, tstorm}$ and C to equalize the plausibility for all classes.

The given results are based on observations in Upper Volga region for one summer period. They will obviously be refined during a longer observation period and vary for different climate zones. The authors are currently researching and estimating the dangerous weather phenomena associated with cumulonimbus clouds statistic characteristics variability for different European part of Russia meteorological zones during a number of summer periods. The paper is being prepared for publication. In general decision making thresholds for dangerous weather phenomena

associated with cumulonimbus clouds classification should be adaptive and will be formed automatically in the foreseen future.

References

1. **Pozdnyakova, V.A.** (2010). Practical aviation meteorology. Ekaterinburg: Uralskiy UTTs GA, 113 p. (in Russian)
2. **Shakina, N.P., Ivanova, A.R.** (2016). Forecasting meteorological conditions for aviation: Tutorial. Moscow: Triada LTD, 312 p. (in Russian)
3. **Diadiuchenko, V.N., Vylegzhanin, I.S., Pavliukov, Iu.B.** (2014). Doppler radars in Russia. *Nauka v Rossii*, no. 1, pp. 23–27. (in Russian)
4. **Mazurov, G.I., Akselevich, V.I.** (2020). The use of information obtained with the help of DMRL-S in meteorology. *Radiofizika, fotonika i issledovaniye svoistv veshchestva: tezisy dokladov I Rossiiskoy nauchnoy konferentsii*. Omsk: Omskiy nauchno-issledovatel'skiy institut priborostroyeniya, pp. 83–84. (in Russian)
5. **Zhukov, V.Iu., Shchukin, G.G.** (2014). The state and prospects of the network of Doppler meteorological radars. *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 2, pp. 92–100. (in Russian)
6. **Galaeva, K.I., Bolelov, E.A., Guberman, I.B., Eschenko, A.A., Daletskiy, S.V.** (2018). Justification of tasks, solved by near-airfield meteorological radar complex. *Scientific Bulletin of the State Scientific Research Institute of Civil Aviation (GosNII GA)*, no. 20 (331), pp. 74–81. (in Russian)
7. **Vasiliev, O., Bolelov, E., Galaeva, K., Gevak, N., Zyabkin, S., Kolesnikov, E., Peshko, A., Sinitsyn, I.** (2021). The design and operation features of the near-airfield zone weather radar complex “Monocle”. In: *2021 XVIII Technical Scientific Conference on Aviation Dedicated to the Memory of N.E. Zhukovsky (TSCZh)*, pp. 64–72. DOI: 10.1109/TSCZh53346.2021.9628352
8. **Basov, I.A., Dmitrieva, O.A., Dorofeev, E.V. et al.** (2013). Methodological guidelines for the production of meteorological radar

observations on the DMRL-S on the Roshydromet network for the purpose of storm warning and meteorological support of aviation. St. Petersburg: FGBU "GGO im. A.I. Voyeykova", 137 p. (in Russian)

9. **Duda, R.O., Hart, P.E.** (1973). Pattern classification and scene analysis. New York: Jon Wiley & Sons, 512 p.

10. **Chaban, L.N.** (2016). Methods and algorithms of pattern recognition in automated decryption of remote sensing data: Tutorial. Moscow: MIIGA i K, 94 p. (in Russian)

11. **Fomin, Ya.A.** (2012). Pattern recognition: Theory and applications. 2nd ed. Moscow: FAZIS, 429 p. (in Russian)

12. **Sosulin, Yu.G., Kostrov, V.V., Parshin, Yu.N.** (2014). Evaluation and correlation signal processing and interference compensation. Moscow: Radiotekhnika, 632 p. (in Russian)

13. **Bishop, C.M.** (2006). Pattern recognition and machine learning. New York: Springer, 778 p. DOI: 10.1007/978-0-387-45528-0

14. **Webb, A.R., Copsey, K.D., Cawley, G.** (2011). Statistical pattern recognition. 3rd ed. New York: Wiley, 672 p.

15. **Vasiliev, O.V., Boyarenko, E.S., Galaeva, K.I.** (2023). Substantiation of source data on the parametric algorithms for the classification of weather hazards. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 26, no. 6, pp. 8–21. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-6-8-21

16. **Gelgor, A.L., Gorlov, A.I., Popov, E.A.** (2013). The general theory of communication. Testing statistical hypotheses. Estimation of parameters. Optimal signal reception: Tutorial. St. Petersburg: Izd-vo Politekhn. un-ta, 227 p. (in Russian)

17. **Kremer, N.Sh.** (2004). Probability theory and Mathematical statistics. 2nd ed., pererab. i dop. Moscow: YuNITY-DANA, 573 p. (in Russian)

18. **Tou, J.T., Gonzalez, R.C.** (1974). Pattern recognition principles. London: Addison-Wesley, 377 p.

19. **Venttsel, E.S.** (1969). Probability Theory. 4th ed. Moscow: Nauka, 576 p. (in Russian)

20. **Miasnikov, V.V.** (2023). Pattern recognition and machine learning. Basic approaches: Tutorial. Samara: Izd-vo Samarskogo universitetata, 196 p. (in Russian)

21. **Rozov, A.K.** (2016). Optimal statistical solutions. 2nd ed., pererab. i dop. St. Petersburg: Politekhnik, 261 p. (in Russian)

22. **Ruban, A.I.** (2004). Methods of data analysis: Tutorial. 2nd ed., ispr. i dop. Krasnoyarsk: IPTs KGTU, 319 p. (in Russian)

Список литературы

1. **Позднякова В.А.** Практическая авиационная метеорология. Екатеринбург: Уральский УТЦ ГА, 2010. 113 с.

2. **Шакина Н.П., Иванова А.Р.** Прогнозирование метеорологических условий для авиации: учеб. пособие. М.: Триада ЛТД, 2016. 312 с.

3. **Дядюченко В.Н., Вылегжанин И.С., Павлюков Ю.Б.** Доплеровские радиолокаторы в России // Наука в России. 2014. № 1. С. 23–27.

4. **Мазуров Г.И., Акселевич В.И.** Использование информации, получаемой с помощью ДМРЛ-с в метеорологии // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества: тезисы докладов I Российской научной конференции, Омск, 6–8 октября 2020 года. Омск: Омский научно-исследовательский институт приборостроения, 2020. С. 83–84.

5. **Жуков В.Ю., Щукин Г.Г.** Состояние и перспективы сети доплеровских метеорологических радиолокаторов // Метеорология и гидрология. 2014. № 2. С. 92–100.

6. **Галаева К.И.** Обоснование задач, решаемых метеорологическим радиолокационным комплексом ближней аэродромной зоны / К.И. Галаева, Э.А. Болелов, И.Б. Губерман, А.А. Ещенко, С.В. Далецкий // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2018. № 20 (331). С. 74–81.

7. **Vasiliev O.** The design and operation features of the near-airfield zone weather radar complex "Monocle" / O. Vasiliev, E. Bolelov, K. Galaeva, N. Gevak, S. Zyabkin, E. Kolesnikov, A. Peshko, I. Sinitsyn // 2021 XVIII Technical Scientific Conference on Aviation Dedicated to the Memory of N.Ye. Zhukovsky (TSCZh), 2021. Pp. 64–72. DOI: 10.1109/TSCZh53346.2021.9628352

8. Басов И.А., Дмитриева О.А., Дорофеев Е.В. и др. Методические указания по производству метеорологических радиолокационных наблюдений на ДМРЛ-С на сети Росгидромета в целях штормоповещения и метеобеспечения авиации. СПб.: ФГБУ «ГГО им. А.И. Воейкова», 2013. 137 с.

9. Дуда Р., Харт П. Распознавание образов и анализ сцен / Пер. с англ. Г.Г. Вайнштейна и А.М. Васьковского, под ред. В.Л. Стефанюка. М.: Мир, 1976. 511 с.

10. Чабан Л.Н. Методы и алгоритмы распознавания образов в автоматизированном дешифрировании данных дистанционного зондирования: учеб. пособие. М.: МИИГАиК, 2016. 94 с.

11. Фомин Я.А. Распознавание образов: теория и применения. 2-е изд. М.: ФАЗИС, 2012. 429 с.

12. Сосулин Ю.Г., Костров В.В., Паршин Ю.Н. Оценочно-корреляционная обработка сигналов и компенсация помех. М.: Радиотехника, 2014. 632 с.

13. Bishop C.M. Pattern recognition and machine learning. New York: Springer, 2006. 778 p. DOI: 10.1007/978-0-387-45528-0

14. Webb A.R., Copsey K.D., Cawley G. Statistical pattern recognition. 3rd ed. New York: Wiley, 2011. 672 p.

15. Васильев О.В., Бояренко Э.С., Галаева К.И. Обоснование исходных данных

параметрических алгоритмов классификации опасных метеоявлений // Научный Вестник МГТУ ГА. 2023. Т. 26, № 6. С. 8–21. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-6-8-21

16. Гельгор А.Л., Горлов А.И., Попов Е.А. Общая теория связи. Проверка статистических гипотез. Оценивание параметров. Оптимальный прием сигналов: учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. 227 с.

17. Кремер Н.Ш. Теория вероятностей и математическая статистика. 2-е изд., перераб. и доп. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2004. 573 с.

18. Ту Д., Гонсалес Р. Принципы распознавания образов: пер с англ. М.: Мир, 1978. 411 с.

19. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. 4-е изд. М.: Наука, 1969. 576 с.

20. Мясников В.В. Распознавание образов и машинное обучение. Основные подходы: учеб. пособие. Самара: Изд-во Самар. ун-та, 2023. 196 с.

21. Розов А.К. Оптимальные статистические решения. 2-е изд., перераб. и доп. СПб.: Политехника, 2016. 261 с.

22. Рубан А.И. Методы анализа данных: учеб. пособие. 2-е изд., испр. и доп. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2004. 319 с.

Information about the authors

Oleg V. Vasiliev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Technical Maintenance of Radio Electronic Equipment of Air Transport Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, vas_ov@mail.ru.

Elvira S. Boyarenko, Postgraduate Student of the Technical Maintenance of Radio Electronic Equipment of Air Transport Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, boyarenko.elvira@mail.ru.

Alexey N. Savelyev, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Radioelectronic Devices and Systems, Bauman Moscow State Technical University, savelyev.an@bmstu.ru.

Nikita V. Gorbachev, Student of the Radio Engineering Faculty, Bauman Moscow State Technical University, gorbachevnn@student.bmstu.ru.

Сведения об авторах

Васильев Олег Валерьевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технической эксплуатации радиоэлектронного оборудования воздушного транспорта МГТУ ГА, vas_ov@mail.ru.

Бояренко Эльвира Сергеевна, аспирант кафедры технической эксплуатации радиоэлектронного оборудования воздушного транспорта МГТУ ГА, boyarenko.elvira@mail.ru.

Савельев Алексей Николаевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры радиоэлектронных устройств и систем МГТУ им. Н.Э. Баумана, savelyev.an@bmstu.ru.

Горбачев Никита Владимирович, студент радиотехнического факультета МГТУ им. Н.Э. Баумана, gorbachevvn@student.bmstu.ru.

Поступила в редакцию	22.01.2024	Received	22.01.2024
Одобрена после рецензирования	22.03.2024	Approved after reviewing	22.03.2024
Принята в печать	23.05.2024	Accepted for publication	23.05.2024

УДК 629.7.067.8

DOI: 10.26467/2079-0619-2024-27-3-23-34

Методика аппроксимации трехмерных поверхностей в целях синтеза алгоритмов предотвращения столкновения летательных аппаратов с препятствиями

А.В. Воробьев¹, А.М. Леликов¹, В.В. Стрый²

¹Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем,
г. Москва, Россия

²Московский государственный технический университет гражданской авиации,
г. Москва, Россия

Аннотация: В работе положено начало практическому применению алгоритмов увода летательных аппаратов от трехмерных поверхностей ограничения, представляющих собой комбинацию рельефа местности и искусственных препятствий. Проведен анализ событий, приводящих к авиационным происшествиям, и осуществлено сравнение бортовых систем предварительного уведомления экипажей воздушных судов о столкновении с естественными или искусственными препятствиями. Показано, что такие системы являются недостаточными вследствие своего пассивно-рекомендательного характера выдачи предупреждений. Поставлен вопрос о необходимости реализации активной автоматической системы предотвращения столкновений с пространственными препятствиями. В целях применения имеющихся алгоритмов увода летательных аппаратов от пространственных поверхностей ограничения разработана методика аппроксимации трехмерных поверхностей (препятствий), заданных на цифровой карте местности в виде дискретных отсчетов высоты с определенным шагом на координатной сетке. В качестве аппроксимирующей препятствие непрерывной поверхности второго порядка выбран параболоид вращения, и определены его характеристические параметры. Для определения характеристических параметров параболоида предложены к использованию алгоритм определения пересечения трехмерной поверхности и плоскости, основанный на принципе определения пересечения треугольников в пространстве, а также метод выбора точки перегиба рельефа местности, основанный на определении значения градиента высоты рельефа местности. Приведено построение аппроксимирующего параболоида на примере естественного препятствия в виде горного массива. При синтезе алгоритмов предотвращения столкновения летательных аппаратов с препятствиями отмечена необходимость учета не только параметров поверхностей ограничения и динамических характеристик летательных аппаратов, но и точностных характеристик источников данных об их положении. Показаны перспективные направления применения разработанной методики.

Ключевые слова: безопасность полетов, предотвращение столкновений, увод с опасной высоты, цифровая карта местности, аппроксимация, трехмерная поверхность, алгоритмы.

Для цитирования: Воробьев А.В., Леликов А.М., Стрый В.В. Методика аппроксимации трехмерных поверхностей в целях синтеза алгоритмов предотвращения столкновения летательных аппаратов с препятствиями // Научный Вестник МГТУ ГА. 2024. Т. 27, № 3. С. 23–34. DOI: 10.26467/2079-0619-2024-27-3-23-34

The technique for approximation of three-dimensional surfaces in order to synthesize algorithms for preventing aircraft collisions with obstacles

A.V. Vorobyev¹, A.M. Lelikov¹, V.V. Stryi²

¹State Scientific Research Institute of Aviation Systems, Moscow, Russia

²Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia

Abstract: The work marks the beginning of the practical application of algorithms for making the aircraft recovery maneuver from three-dimensional constraint surfaces, which are a combination of terrain and artificial obstacles. An analysis of events leading to aviation accidents was carried out, and a comparison of on-board systems for preliminary notification of aircraft crews about

collisions with natural or artificial obstacles was made. It is shown that such systems are insufficient due to their passive-recommendatory nature of issuing warnings. A question has been raised about the need to implement an active automatic collision avoidance system with spatial obstacles. In order to apply existing algorithms for the aircraft recovery maneuver from spatial constraint surfaces, a technique has been developed for approximating three-dimensional surfaces (obstacles) specified on a digital terrain map in the form of discrete height readings with a certain step on a coordinate grid. A paraboloid of revolution was chosen as a continuous 2nd order surface approximating the obstacle, and its characteristic parameters were determined. To determine the characteristic parameters of the paraboloid, an algorithm for determining the intersection of a three-dimensional surface and a plane, based on the principle of determining the intersection of triangles in space, as well as a method for selecting the inflection point of the terrain, based on determining the value of the terrain height gradient, are proposed for use. The construction of an approximating paraboloid using the example of a natural obstacle in the form of a mountain range is given. When synthesizing algorithms for preventing collisions of aircraft with obstacles, the need to take into account not only the parameters of the constraint surfaces and dynamic characteristics of aircraft, but also the accuracy characteristics of data sources about their position is noted. Promising application areas of the developed methodology are shown.

Key words: flight safety, collision avoidance, aircraft recovery maneuver, digital terrain map, approximation, three-dimensional surface, algorithms.

For citation: Vorobyev, A.V., Lelikov, A.M., Stryy, V.V. (2024). The technique for approximation of three-dimensional surfaces in order to synthesize algorithms for preventing aircraft collisions with obstacles. Civil Aviation High Technologies, vol. 27, no. 3, pp. 23–34. DOI: 10.26467/2079-0619-2024-27-3-23–34

Введение

Согласно данным отчетов Межгосударственного авиационного комитета (МАК) о состоянии безопасности полетов в гражданской авиации государств – участников Соглашения о гражданской авиации и об использовании воздушного пространства¹ количество столкновений воздушных судов (ВС) с различными препятствиями в управляемом полете достаточно велико. Так, за период с 2001 по 2018 г. 17 % событий, приводящих к авиационным происшествиям (АП), и 16 % событий, приводящих к катастрофам, с самолетами коммерческой авиации в Российской Федерации приходилось на столкновение с земной поверхностью или препятствиями в управляемом полете [1]. В 2020 г. целых 7 % от общего количества АП приходилось на столкновения с проводами и опорами линий электропередачи (ЛЭП). А уже в 2022 г., очевидно вследствие недостаточного изучения района полетов, отвлечения внимания и недостаточной осмотрительности экипажей ВС, это число достигло более 15 % от общего количества АП.

Для уменьшения количества АП, входящих, согласно Международной организации гражданской авиации (ИКАО), в класс столкновений исправного ВС с земной поверхностью (CFIT – Controlled Flight Into Terrain), были созданы бортовые системы предварительного уведомления экипажей ВС о столкновении с естественными или искусственными препятствиями. Одной из таких систем стала GPWS (Ground Proximity Warning System), которая с конца 1970-х годов использовалась на большинстве ВС, осуществляющих коммерческие перевозки. Сигналы GPWS формируются исходя из оценки истинной высоты полета, определяемой по радиовысотомеру, вертикальной скорости, положения ВС относительно глиссады, а также положения шасси и механизации крыла. Очевидно, что при наличии различных препятствий по курсу ВС GPWS может быть крайне неэффективна, так как времени от момента срабатывания сигнализации до столкновения бывает недостаточно для уклонения от препятствия.

Для оповещения экипажей ВС о препятствиях по курсу были разработаны системы оповещения, включающие базы данных рельефа местности и искусственных препятствий. Данные системы относят к системам TAWS (Terrain Awareness And Warning System). К системам TAWS относят и системы

¹ Отчеты Межгосударственного авиационного комитета о состоянии безопасности полетов в гражданской авиации [Электронный ресурс] // mak-iac.org. URL: <https://mak-iac.org/rassledovaniya/bezopasnost-poletov/> (дата обращения: 02.06.2023).

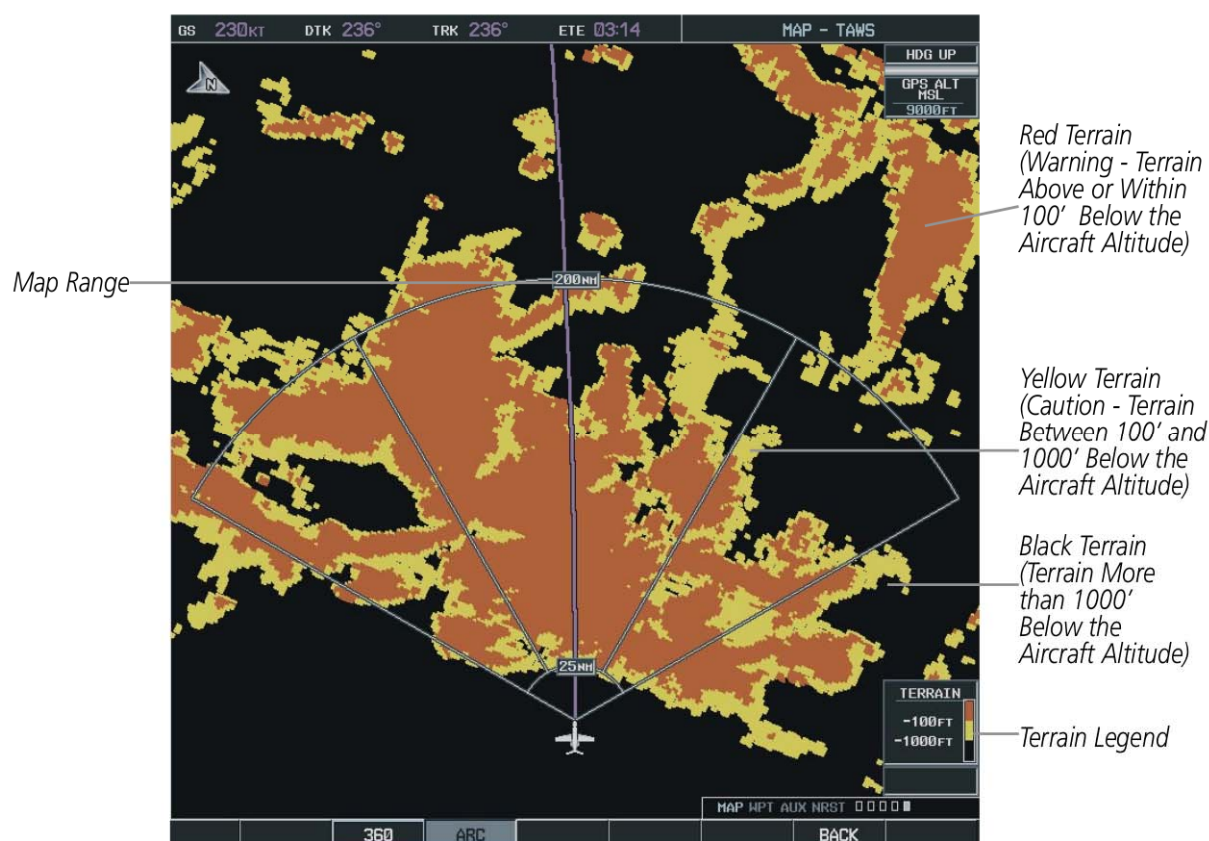


Рис. 1. Отображение рельефа местности на навигационном дисплее Cessna Citation Mustang
Fig. 1. Terrain view on the Cessna Citation Mustang navigation display

EGPWS (Enhanced GPWS)², являющиеся следующим поколением GPWS. Главным отличием системы EGPWS от GPWS является функция FLTA (Forward Looking Terrain Avoidance), то есть функция оценки угрозы столкновения с препятствиями по курсу полета. Обновляемая база данных, входящая в состав EGPWS, включает информацию о препятствиях вокруг основных аэродромов и данные о рельефе местности в регионе полетов. Информация из базы данных, при использовании соответствующего режима, выводится на навигационные дисплеи в кабине экипажа ВС³ (рис. 1).

² Honeywell MK VI & MK VIII EGPWS Pilot Guide [Электронный ресурс] // SKYbrary. May 2004. 60 p. URL: <https://skybrary.aero/sites/default/files/bookshelf/3365.pdf> (дата обращения: 02.06.2023).

³ Garmin G1000 Pilot's Guide for the Cessna Citation Mustang [Электронный ресурс] // static.garmin.com. May 2007. 508 p. URL: https://static.garmin.com/pumac/G1000:CessnaMustang_PilotsGuide.pdf (дата обращения: 02.06.2023).

При наличии на борту ВС систем типа TAWS, а также своевременных и правильных действий со стороны экипажа обеспечивается достаточно безопасное расхождение с естественными или искусственными препятствиями. Однако возможность внезапного отключения части функциональности EGPWS, например, такой как получение данных о рельефе местности или получение данных о положении шасси или механизации крыла, может привести к аварийным или катастрофическим ситуациям. Так, отключение получения данных о рельефе местности привело к катастрофе самолета Sukhoi Superjet 100 9 мая 2012 г. в Индонезии. Экипаж выполнял визуальный демонстрационный полет на малой высоте в горной местности в незнакомом для себя районе и столкнулся со склоном горы Салак. Погибли все 45 человек, находившихся на борту.

Помимо естественных (горные массивы, опасные явления погоды и т. п.) и искус-

ственных (высотные здания, линии электропередач и т. п.) в качестве препятствий следует учитывать и различные зоны ограниченных полетов (в том числе зоны противовоздушной обороны, области разлета осколков боеприпасов и т. п.).

Таким образом, системы типа TAWS хоть и могут оценивать вероятность столкновения с земной поверхностью и другими естественными или искусственными препятствиями, но из-за большого влияния человеческого фактора во многих ситуациях являются недостаточными вследствие своего пассивно-рекомендательного характера выдачи предупреждений.

Постановка задачи

При достаточно большом количестве АП, причиной которых являлось столкновение с земной поверхностью или препятствиями в управляемом полете, остается открытым вопрос о том, почему производители ВС, оснащенных системами дистанционного и автоматического управления (СДУ, САУ), в том числе адаптивными и прогнозирующими [2], потенциально имеющими выходы на рулевые приводы и достаточно мощные вычислительные системы, включающие в себя модули подробных цифровых карт местности (ЦКМ) и обширное количество датчиков (бесплатформенные инерциальные навигационные системы – БИНС, приемники глобальных навигационных спутниковых систем – ГНСС и т. п.), до сих пор ограничиваются в основном предупреждениями о приближении к поверхности и начали реализовывать логические последовательности и алгоритмы предотвращения столкновений с пространственными препятствиями относительно недавно⁴ [3, 4].

В работах [5, 6] рассмотрены алгоритмы увода летательных аппаратов (ЛА) в том числе от различных препятствий. Фундаментальной основой данных алгоритмов являют-

ся уравнения пространственных поверхностей ограничения, однако конкретные методики расчета параметров этих уравнений не проработаны.

Для практического применения алгоритмов увода ЛА от пространственных поверхностей ограничения следует учитывать особенности задания рельефа местности и различных препятствий на ЦКМ, которые чаще всего задаются в виде дискретных отсчетов высоты с определенным шагом на координатной сетке⁵, т. е. не могут быть использованы напрямую в алгоритме увода вследствие своей дискретной природы.

Таким образом, необходимо разработать методику аппроксимации трехмерных поверхностей (препятствий), заданных на ЦКМ, обеспечивающую корректную и в то же время приемлемую по быстродействию работу указанных выше алгоритмов.

В качестве примера возьмем естественное препятствие в виде горного массива (рис. 2) и аппроксимируем его уравнением непрерывной поверхности 2-го порядка (высота $H_{ЦКМ}$ на рис. 2 указана в метрах согласно системе координат WGS84/EGM96):

$$\varphi(x, y, z) = 0. \quad (1)$$

Выбор непрерывной поверхности 2-го порядка (1) в качестве аппроксимирующей поверхности обусловлен в том числе и тем, что при работе алгоритма увода ЛА должен совершать маневры по непрерывной траектории, которая должна быть физически реализуема и не приводить ЛА к критическим режимам полета. Данная траектория, согласно алгоритму увода [5], располагается в некоторой плоскости U , содержащей нормаль N_K к аппроксимирующей поверхности в точке T , получаемой пересечением линии вектора скорости самолета с этой поверхностью. При включении в работу алгоритма увода ЛА изменяет свое положение в пространстве, соответственно, изменяется и положение точки T

⁴ Automatic Ground Collision Avoidance System (Auto GCAS) [Электронный ресурс] // lockheedmartin. URL: <https://www.lockheedmartin.com/en-us/products/autogcas.html> (дата обращения: 01.11.2023).

⁵ Shuttle Radar Topography Mission website [Электронный ресурс] // NASA. URL: <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/> (дата обращения: 01.11.2023).

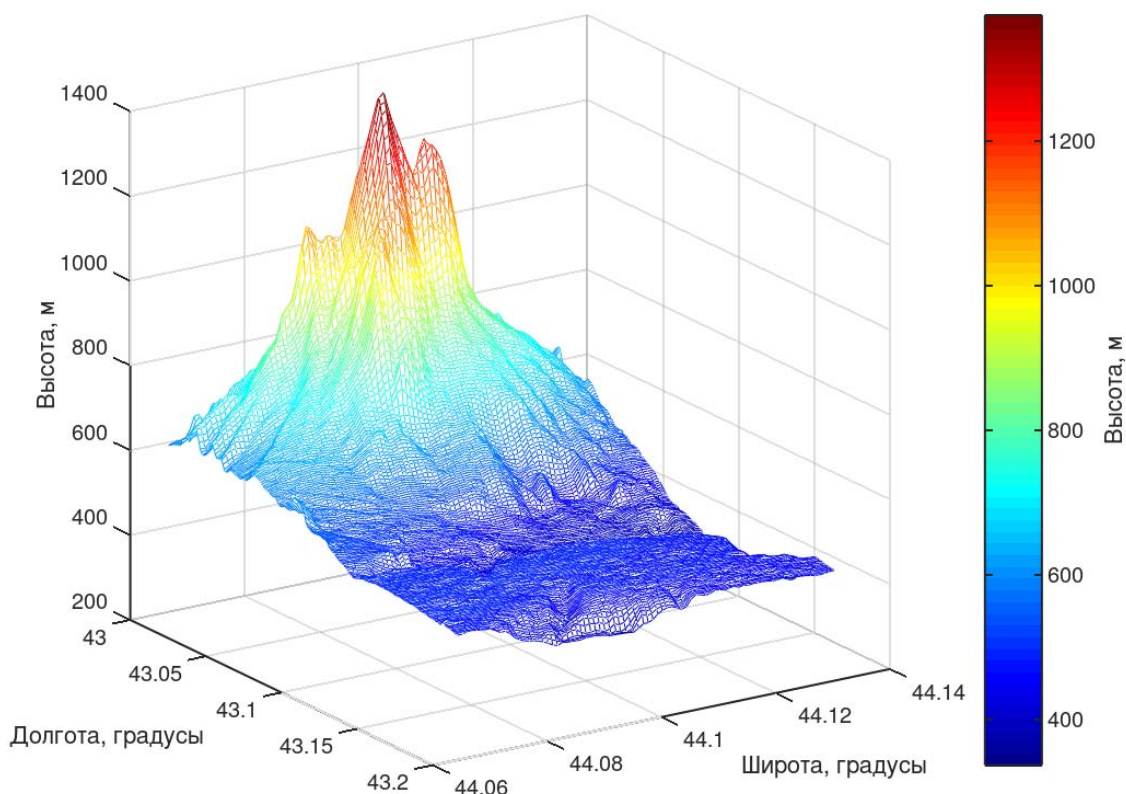


Рис. 2. Пример изображения горного массива на цифровой карте местности
Fig. 2. Example of the mountain range view on the digital terrain map

на поверхности ограничения. Вследствие изменения положения точки T изменяются и параметры ориентации в пространстве плоскостей U и K , где плоскость K – это плоскость, касательная к поверхности ограничения в точке T .

Применение поверхностей 1-го порядка в качестве аппроксимирующих допустимо для равнинного рельефа, а принципиальная возможность применения поверхностей 3-го порядка требует дальнейшей проработки.

Таким образом, исходя из требования к изменению параметров ориентации в пространстве плоскостей U и K , а именно возможности непрерывного построения касательной плоскости K , то есть непрерывному изменению первой производной аппроксимирующей функции [7], выбор поверхности 2-го порядка в качестве аппроксимирующей поверхности является оптимальным по сравнению с поверхностями 1-го и 3-го порядка

для рассматриваемого в данном примере горного рельефа местности.

Методика аппроксимации трехмерных поверхностей

В качестве аппроксимирующей трехмерную поверхность (препятствие) непрерывной поверхности 2-го порядка возьмем параболоид вращения и определим координаты его вершины, а также параметры его основания. Для этого находим максимальную ближайшую высоту рельефа местности в упреждаемой зоне (рис. 3). Эта точка и будет вершиной P_0 параболоида.

На рис. 3 ЛА находится в точке A , отрезок AB обозначает направление вектора скорости ЛА, а точка B обозначает место пересечения вектора скорости ЛА и рельефа местности.

В качестве точки P_1 , определяющей параметры основания параболоида (то есть его высоту и радиус), берем ближайшую к ЛА

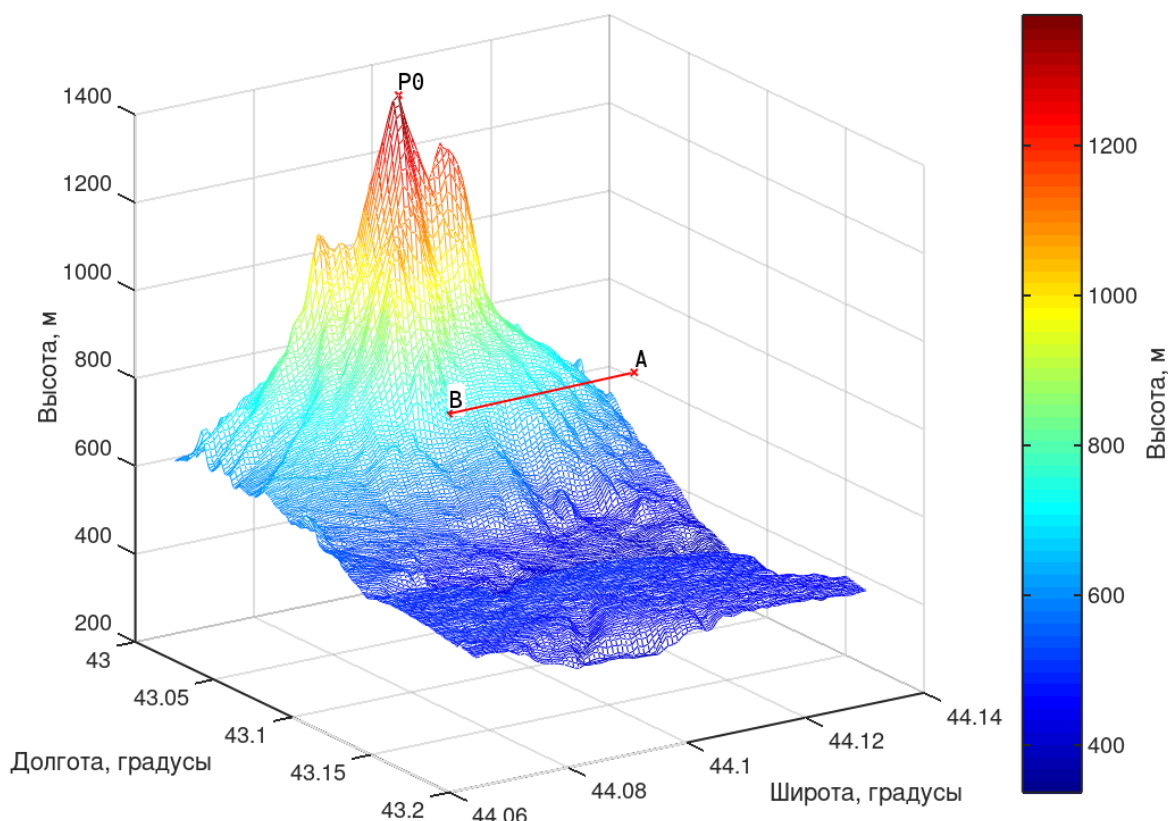


Рис. 3. К определению координат вершины P_0 параболоида
Fig. 3. Determining the coordinates of the paraboloid vertex P_0

точку перегиба рельефа местности, у которой значение градиента высоты равно, например, 10. Для этого, используя алгоритм Томаса Меллера [8], построим срез высоты рельефа местности вертикальной плоскостью (рис. 4 и 5), в которой лежит вектор скорости ЛА.

Конкретное значение величины градиента высоты, при котором происходит определение координат точки P_1 , выбирается динамически, исходя из маневренных возможностей ЛА и параметров включения системы увода ЛА от препятствия в работу.

График значения градиента высоты рельефа местности представлен на рис. 6.

Построим требуемый аппроксимирующий параболоид в условной системе координат ENH исходя из известных параметров точек P_0 и P_1 . Для построения параболоида найдем его коэффициенты a и b . Коэффициенты эллиптического параболоида a и b – это положительные параметры, характеризующие па-

раболоиды, причем для эллиптического параболоида $a \geq b$, а для параболоида вращения $a = b$ [9].

Каноническое уравнение эллиптического параболоида, «развернутого» основанием вниз:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = -2z. \quad (2)$$

Для параболоида вращения:

$$a = b. \quad (3)$$

Соответственно:

$$\frac{x^2}{b^2} + \frac{y^2}{b^2} = -2z. \quad (4)$$

Домножив обе части уравнения (4) на b^2 , получим

$$x^2 + y^2 = -2b^2z. \quad (5)$$

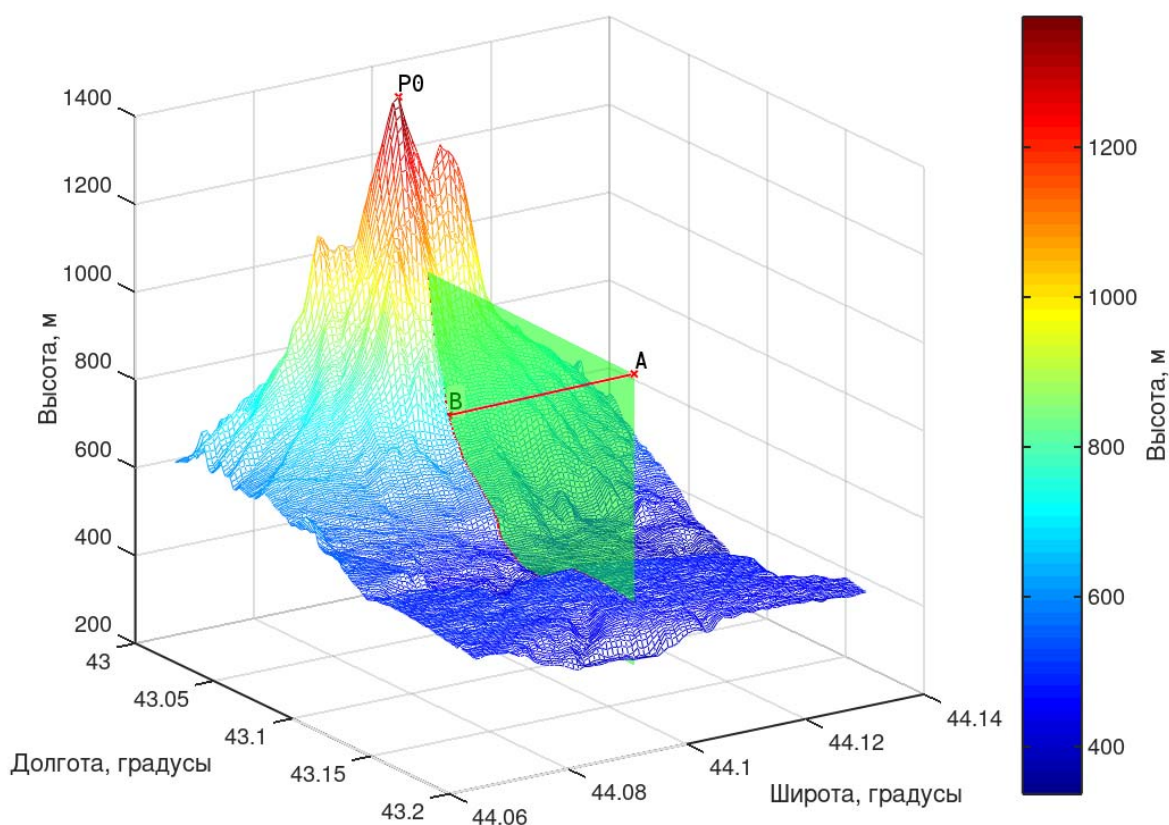


Рис. 4. Плоскость, в которой лежит вектор скорости ЛА
Fig. 4. The plane in which the aircraft velocity vector lies

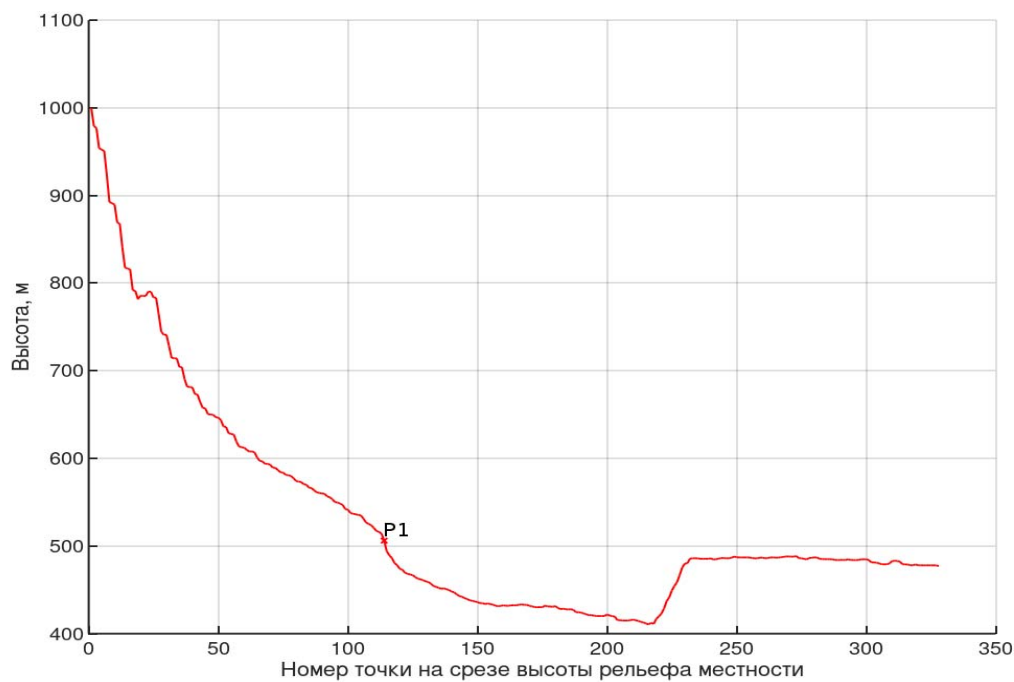


Рис. 5. Срез высоты рельефа местности
Fig. 5. Terrain elevation section

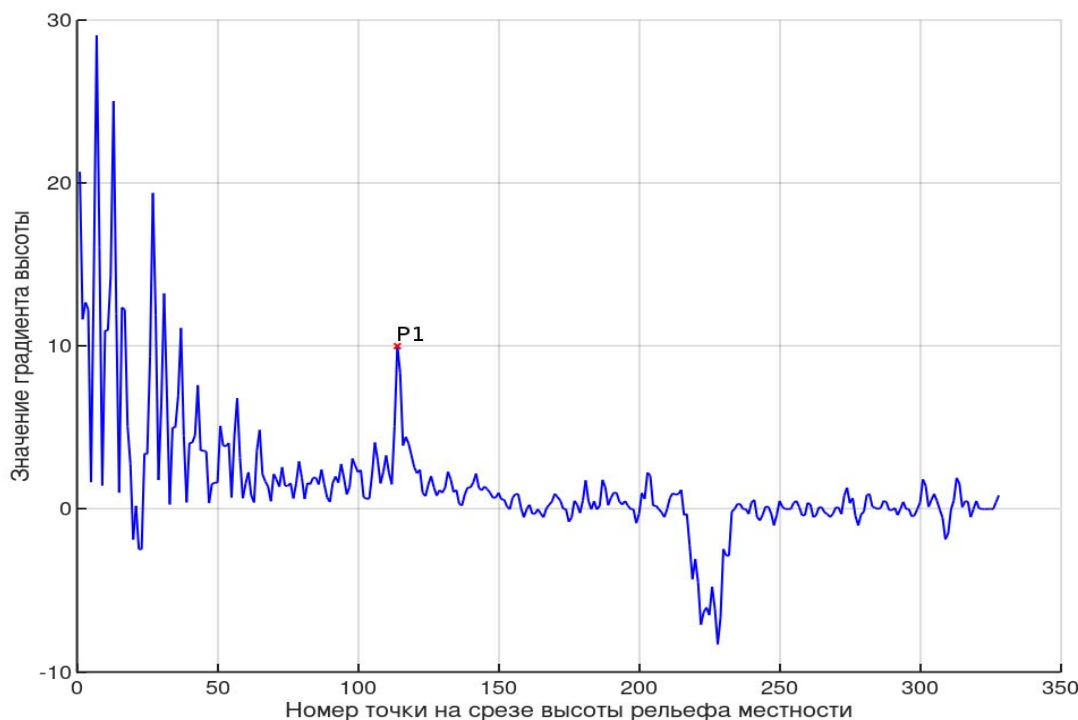


Рис. 6. График значения градиента высоты рельефа местности
Fig. 6. Graph of the terrain elevation gradient value

Так как вершина параболоида находится в точке P_0 с координатами P_{0E} , P_{0N} и P_{0H} , то уравнение (5) будет выглядеть так:

$$(x - P_{0E})^2 + (y - P_{0N})^2 = -2b^2(z - P_{0H}). \quad (6)$$

Из уравнения (6) следует, что коэффициент b равен

$$b = \sqrt{\frac{(x - P_{0E})^2 + (y - P_{0N})^2}{-2(z - P_{0H})}} \quad (7)$$

или

$$b = \sqrt{\frac{(x - P_{0E})^2 + (y - P_{0N})^2}{2(P_{0H} - z)}}. \quad (8)$$

Для вычисления значения коэффициента b подставим в уравнение (8) значения координат точки P_1 , лежащей на параболоиде. В качестве такой точки возьмем точку, лежащую в плоскости основания параболоида и находящуюся в точке пересечения окружности радиусом R_0 с плоскостью EOH , где O – точка начала координат системы координат

нат ENH . Координатами одной из таких точек будут, очевидно, следующие:

$$\begin{aligned} P_{1E} &= P_{0E} - R_0; \\ P_{1N} &= P_{0N}; \\ P_{1H} &= H_0. \end{aligned}$$

Тогда

$$b = \sqrt{\frac{(P_{0E} - R_0 - P_{0E})^2 + (P_{0N} - P_{0N})^2}{2(P_{0H} - H_0)}}.$$

То есть

$$b = \sqrt{\frac{R_0^2}{2(P_{0H} - H_0)}}. \quad (9)$$

Представим уравнение (6) в виде $z = f(x, y)$ и подставим в него значение коэффициента b :

$$z = \frac{(x - P_{0E})^2 + (y - P_{0N})^2}{-2b^2} + P_{0H};$$

$$z = \frac{(x - P_{0E})^2 + (y - P_{0N})^2}{-2 \left(\sqrt{\frac{R_0^2}{2(P_{0H} - H_0)}} \right)^2} + P_{0H};$$

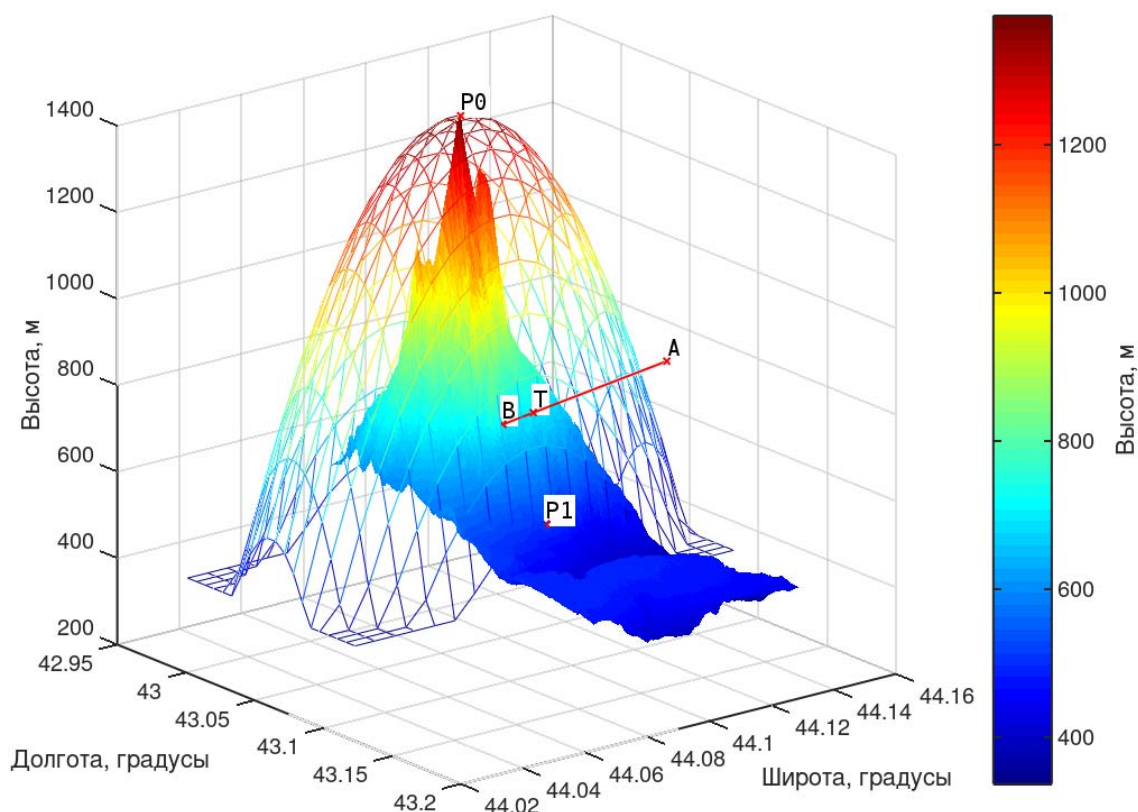


Рис. 7. Поверхность ограничения
Fig. 7. Constraint surface

$$z = \frac{(x-P_{0E})^2 + (y-P_{0N})^2}{\frac{-R_0^2}{P_{0H}-H_0}} + P_{0H};$$

$$z = P_{0H} - \frac{((x-P_{0E})^2 + (y-P_{0N})^2)(P_{0H}-H_0)}{R_0^2}. \quad (10)$$

Уравнение (10) и есть искомое уравнение параболоида вращения с учетом коэффициентов a и b .

Так как нижняя граница поверхности ограничения должна совпадать с реальным рельефом поверхности земли, включая препятствия, ограничим уравнение (10) снизу высотой $H_{ЦКМ}$ согласно цифровой карте местности:

$$\begin{cases} z = P_{0H} - \frac{((x-P_{0E})^2 + (y-P_{0N})^2)(P_{0H}-H_0)}{R_0^2} \\ z \geq H_{ЦКМ} \end{cases}. \quad (11)$$

Изображение системы уравнений (11) в трехмерном пространстве показано на рис. 7, где нижняя граница $H_{ЦКМ}$ поверхности ограничения показана условно.

Точка T на рис. 7 является точкой пересечения поверхности ограничения и вектора скорости ЛА и может определяться аналогично точке B по алгоритму Томаса Меллера и Бена Трамбора [10] или для «бортовой» реализации при помощи точного аналитического решения системы уравнений поверхности (11) и прямой AB , содержащей вектор скорости ЛА.

Заключение

Показанная в данной работе методика аппроксимации трехмерных поверхностей позволяет осуществить переход от дискретного представления цифровой карты местности к математически точному описанию препят-

ствий, пригодному к использованию в бортовых алгоритмах увода ЛА от пространственных поверхностей ограничения.

Однако стоит заметить, что при разработке и реализации алгоритмов предотвращения столкновений с пространственными препятствиями важно учитывать не только параметры поверхностей ограничения и динамические характеристики самолета, но и точностные характеристики источников данных о положении самолета, таких как БИНС и приемники ГНСС [11].

Аппроксимацию трехмерных поверхностей (препятствий), согласно описанной в данной работе методике, при отсутствии достаточных вычислительных возможностей на борту ЛА можно производить и на земле при подготовке полетного задания в соответствующей автоматизированной системе. Для снижения объема пространственных данных как на борту ЛА, так и при работе с ЦКМ на земле стоит предусмотреть возможность их сжатия [12].

Данная методика может быть использована в алгоритмическом обеспечении адаптивных систем предотвращения столкновения с рельефом (АСПСР) [13], а также в специализированных бортовых алгоритмах, обеспечивающих оперативное перестроение маршрута полета ЛА [14, 15].

Авторы выражают благодарность А.Н. Акимову, В.В. Воробьеву и М.А. Киселеву за помощь в подготовке статьи.

Список литературы

1. Воробьев В.В., Беляцкая А.П., Суполка А.А. Методика устранения отклонений воздушного судна при предпосадочном снижении для предотвращения происшествий категории CFIT // Научный Вестник МГТУ ГА. 2020. Т. 23, № 4. С. 33–44. DOI: 10.26467/2079-0619-2020-23-4-33-44
2. Буков В.Н. Адаптивные прогнозирующие системы управления полетом. М.: Наука, 1987. 232 с.
3. Sorokowski P. Small UAV automatic ground collision avoidance system design considerations and flight test results / P. Sorokowski, M. Skoog, S. Burrows, S. Thomas [Электронный ресурс] // NASA. 2015. URL: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20150014106> (дата обращения: 15.08.2023).
4. Suplisson A.W. Optimal recovery trajectories for automatic ground collision avoidance systems (Auto GCAS) [Электронный ресурс] // Theses and Dissertations. 2015. URL: <https://scholar.afit.edu/etd/183> (дата обращения: 15.08.2023).
5. Акимов А.Н., Воробьев В.В. Методика и алгоритмы увода летательного аппарата от пространственной поверхности ограничения // Автоматика и телемеханика. 2001. № 7. С. 18–25.
6. Акимов А.Н. Особенности проектирования легких боевых и учебно-тренировочных самолетов / А.Н. Акимов, В.В. Воробьев, О.Ф. Демченко, Н.Н. Долженков, А.И. Матвеев, В.А. Подобедов. М.: Машиностроение – Полет, 2005. 368 с.
7. Виноградов И.М. Элементы высшей математики. Аналитическая геометрия. Дифференциальное исчисление, основы теории чисел: учебник для вузов. М.: Высшая школа, 1999. 511 с.
8. Möller T. A fast triangle-triangle intersection test // Journal of Graphics Tools. 1997. Vol. 2, iss. 2. Pp. 25–30. DOI: 10.1080/10867651.1997.10487472
9. Мурашкина Т.И., Королев Е.А., Егоров А.Ю. Особенности методики преподавания темы «Парабола и параболоид» в курсах математики и инженерной графики [Электронный ресурс] // Научно-методический электронный журнал «Концепт». 2017. № V11. С. 43–52. DOI: 10.24422/MCITO.2017.V11.8137 (дата обращения: 15.08.2023).
10. Möller T., Trumbore B. Fast, minimum storage ray-triangle intersection // Journal of Graphics Tools. 1997. Vol. 2, iss. 1. Pp. 21–28. DOI: 10.1080/10867651.1997.10487468
11. Бабич О.А. Обработка информации в навигационных комплексах. М.: Машиностроение, 1991. 512 с.

12. **Inanc M.** Compressing terrain elevation datasets [Электронный ресурс] // Rensselaer Theses and Dissertations Online Collection. 2008. URL: <https://hdl.handle.net/20.500.13015/539> (дата обращения: 15.08.2023).

13. **Акимов А.Н., Волошин В.А., Су-пряга А.А.** Алгоритмическое обеспечение адаптивной системы предотвращения столкновения с рельефом (АСПСР) // Научный Вестник МГТУ ГА. 2022. Т. 25, № 6. С. 8–22. DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-6-8-22

14. **Киселев М.А.** Анализ существующих подходов к перестроению маршрута полета воздушного судна в процессе его выполнения / М.А. Киселев, Ю.С. Калужный, А.В. Карпов, Ю.В. Петров // Научный Вестник МГТУ ГА. 2023. Т. 26, № 3. С. 53–65. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-3-53-65

15. **Vajda P., Maris J.** A systematic approach to developing paths towards airborne vehicle autonomy [Электронный ресурс] // NASA. 2021. URL: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20210019878> (дата обращения: 15.08.2023).

References

1. **Vorobyev, V.V., Beliatskaya, A.P., Supolka, A.A.** (2020). Methodic aspects of aircraft glide slope correction for prevention of cfit category accidents during pre-landing descent. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 23, no. 4, pp. 33–44. DOI: 10.26467/2079-0619-2020-23-4-33-44 (in Russian)

2. **Bukov, V.N.** (1987). Adaptive predictive flight control systems. Moscow: Nauka, 232 p. (in Russian)

3. **Sorokowski, P., Skoog, M., Burrows, S., Thomas, S.** (2015). Small UAV automatic ground collision avoidance system design considerations and flight test results. Available at: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20150014106> (accessed: 15.08.2023).

4. **Suplisson, A.W.** (2015). Optimal recovery trajectories for automatic ground collision avoidance systems (Auto GCAS). *Theses and Dissertations*. Available at: <https://scholar.ait.edu/etd/183> (accessed: 15.08.2023).

5. **Akimov, A.N., Vorob'ev, V.V.** (2001). A method and algorithms for veering a flying apparatus from the spatial constraint surface. *Automation and Remote Control*, vol. 62, no. 7, pp. 1042–1048.

6. **Akimov, A.N., Vorobyev, V.V., Demchenko, O.F., Dolzhenkov, N.N., Matveev, A.I., Podobedov, V.A.** (2005). Features of the designing light combat and training aircrafts. Moscow: Mashinostroyeniye – Polet, 368 p. (in Russian)

7. **Vinogradov, I.M.** (1999). Elements of higher mathematics. Analytical geometry. Differential calculus, fundamentals of number theory. Textbook for universities. Moscow: Vysshaya shkola, 511 p. (in Russian)

8. **Möller, T.** (1997). A fast triangle-triangle intersection test. *Journal of Graphics Tools*, vol. 2, issue 2, pp. 25–30. DOI: 10.1080/10867651.1997.10487472

9. **Murashkina, T.I., Korolev, E.A., Egorov, A.Yu.** (2017). Features of the methodology for teaching the topic “Parabola and paraboloid” in mathematics and engineering graphics courses. *Nauchno-metodicheskiy elektronnyy zhurnal “Kontsept”*, no. V11, pp. 43–52. DOI: 10.24422/MCITO.2017.V11.8137 (accessed: 15.08.2023). (in Russian)

10. **Möller, T., Trumbore, B.** (1997). Fast, minimum storage ray-triangle intersection. *Journal of Graphics Tools*, vol. 2, issue 1, pp. 21–28. DOI: 10.1080/10867651.1997.10487468

11. **Babich, O.A.** (1991). Information processing in navigation complexes. Moscow: Mashinostroyeniye, 512 p. (in Russian)

12. **Inanc, M.** (2008). Compressing terrain elevation datasets. *Rensselaer Theses and Dissertations Online Collection*. Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.13015/539> (accessed: 15.08.2023).

13. **Akimov, A.N., Voloshin, V.A., Supryga, A.A.** (2022). Algorithmic support of the adaptive system of controlled flight into terrain avoidance (CFITA). *Civil Aviation High Technologies*, vol. 25, no. 6, pp. 8–22. DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-6-8-22 (in Russian)

14. **Kiselev, M.A., Kalyuzhny, Yu.S., Karpov, A.V., Petrov, Yu.V.** (2023). Analysis

of the existing approaches to in-flight aircraft rerouting. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 26, no. 3, pp. 53–65. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-3-53-65. (in Russian)

15. Paul, V., John, M. (2021). A systematic approach to developing paths towards airborne

vehicle autonomy. *NASA*. Available at: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20210019878> (accessed: 15.08.2023).

Сведения об авторах

Воробьев Алексей Витальевич, ведущий инженер ФАУ «ГосНИИАС», vorobev_av@gosniias.ru.

Леликов Алексей Максимович, техник ФАУ «ГосНИИАС», lelikov_am@gosniias.ru.

Стрый Владимир Васильевич, аспирант кафедры аэродинамики, конструкции и прочности летательных аппаратов МГТУ ГА, xeonerix@gmail.com.

Information about the authors

Aleksey V. Vorobyev, Leading Engineer, State Scientific Research Institute of Aviation Systems, vorobev_av@gosniias.ru.

Aleksey M. Lelikov, Technician, State Scientific Research Institute of Aviation Systems, lelikov_am@gosniias.ru.

Vladimir V. Stryy, Postgraduate Student of the Aerodynamics, Design and Aircraft Strength Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, xeonerix@gmail.com.

Поступила в редакцию
Одобрена после рецензирования
Принята в печать

11.01.2024
26.01.2024
23.05.2024

Received
Approved after reviewing
Accepted for publication

11.01.2024
26.01.2024
23.05.2024

УДК.629.7.067.8

DOI: 10.26467/2079-0619-2024-27-3-35-49

Исследования по перестроению маршрута в процессе полета воздушного судна

М.А. Киселев^{1,2}, Ю.С. Калюжный², А.В. Карпов²,
С.Ф. Бородин¹

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

²Федеральное автономное учреждение «Государственный
научно-исследовательский институт авиационных систем», г. Москва, Россия

Аннотация: Публикацией данной статьи авторы продолжают исследования в части разработки и апробации методики перестроения маршрута воздушного судна в процессе его выполнения, начатые в ранее опубликованных статьях в «Научном Вестнике МГТУ ГА». В данной статье приводятся результаты исследования в части расширения возможностей методики от реконфигурации маршрута полета для гипотетического воздушного судна и препятствий в горизонтальной плоскости, которые были продемонстрированы ранее, до перестроения маршрута полета как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскости для двух различных типов препятствий: 1) наземного естественного или искусственного (гора, опора ЛЭП и т. п.); 2) воздушного (грозового фронта, запретная область полета и т. п.) и их сочетания на примере полета по маршруту вертолета типа Ми-8 с использованием реальной цифровой карты местности. Напомним, что, как было отмечено ранее, большое количество авиационных происшествий связано с потерей управления в полете, а также со столкновением с землей в управляемом полете (категории LOC-I, CFIT, LALT). В результате расследования данных авиационных происшествий выявлено, что зачастую указанные авиационные происшествия обусловлены необходимостью быстрого изменения маршрута полета вследствие выявления на пути следования воздушного судна препятствий, например грозового фронта. При определении альтернативных маршрутов облета возникшего препятствия, а также в процессе реализации выбранного маршрута облета экипаж совершает ошибки ввиду повышенной психофизиологической нагрузки и дефицита времени. Предлагаемая авторами методика и алгоритмы позволяют оценить безопасность исходного маршрута, рассчитать варианты альтернативных маршрутов облета обнаруженных в процессе полета препятствий, проверить их на реализуемость с учетом летно-технических характеристик воздушного судна, ограничений на управляющие параметры, а также выбрать среди найденных маршрутов облета оптимальный с точки зрения какого-либо критерия, например исходя из минимизации увеличения протяженности маршрута полета, сокращения дополнительных затрат топлива, времени, необходимого на реализацию нового маршрута полета и т. д.

Ключевые слова: маршрут полета, облет препятствий, безопасность полета, синтез управления, ограничение на управление, топливная эффективность.

Для цитирования: Киселев М.А. Исследования по перестроению маршрута в процессе полета воздушного судна / М.А. Киселев, Ю.С. Калюжный, А.В. Карпов, С.Ф. Бородин // Научный Вестник МГТУ ГА. 2024. Т. 27, № 3. С. 35–49. DOI: 10.26467/2079-0619-2024-27-3-35-49

Studies on in-flight aircraft rerouting

M.A. Kiselev^{1,2}, Y.S. Kalyuzhny², A.V. Karpov², S.F. Borodkin¹

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

²FAO "State Research Institute of Aviation Systems", Moscow, Russia

Abstract: With the publication of this article, the authors continue the research on the development and testing of a methodology for in-flight aircraft rerouting which have begun in previously published articles in the Civil Aviation High Technologies of the Moscow State Technical University of Civil Aviation. This article presents the results of the study in terms of developing the potentials of the methodology from reconfiguring a route of a hypothetical aircraft and obstacles in the horizontal plane, which were

previously demonstrated, prior to rerouting in both the horizontal and vertical planes for two different types of obstacles: 1) ground natural or artificial (mountain, power line support, etc.); 2) air (squall line, prohibited flight area, etc.) and their combinations using an example of a Mi-8 helicopter flight on route using a real digital map of the terrain. As mentioned above, a large amount of aviation accidents is associated with the loss of control in-flight, as well as the collision with terrain in a controlled flight (categories LOC-I, CFIT, LALT). As a result of the investigation of the aviation accidents, it was found that these accidents are often caused by the requirement to reroute quickly due to obstacles, for example, a squall line. When determining alternatives to avoid an obstacle, as well as while implementing the selected route for avoiding action, the crew makes errors due to the increased psychophysiological load and lack of time. The methodology and the algorithms, proposed by the authors, make it possible to assess the safety of an original route, estimate options for alternatives to avoid around obstacles detected in-flight, check them for feasibility, taking into account aircraft performance, flight envelope, and also select the optimal route from the view of some criterion, for example, based on minimizing the route length increase, reducing additional fuel consumption, the time required to implement a new route of flight, etc.

Key words: route, obstacle avoidance, flight safety, control synthesis, flight envelope, fuel efficiency.

For citation: Kiselev, M.A., Kalyuzhny, Y.S., Karpov, A.V., Borodkin, S.F. (2024). Studies on in-flight aircraft rerouting. Civil Aviation High Technologies, vol. 27, no. 3, pp. 35–49. DOI: 10.26467/2079-0619-2024-27-3-35-49

Введение

Данная работа представляет собой логическое развитие ранее опубликованной статьи [1], и потому мы предоставляем некоторое краткое повторение информации из предыдущей работы в части актуальности исследований и ключевых положений методики, с тем чтобы облегчить понимание содержания данной статьи без необходимости обращения к предыдущим текстам.

Из статистики авиационных происшествий за период с 2011 по 2020 год¹ в Российской Федерации следует, что при выполнении полетов наибольшее количество авиационных происшествий связано со следующими группами событий:

- столкновение с препятствиями при полете на малой высоте (LALT);
- потеря управления в полете (LOC-I);
- столкновение с землей в управляемом полете (CFIT);
- попадание в приборные метеоусловия, к которым экипаж не допущен (UIMC);
- попадание в зону сильной грозовой деятельности (WSTRW).

Общая статистика авиационных происшествий/катастроф по коммерческой авиации и авиации общего назначения приведена в табл. 1.

Из приведенных выше данных очевидна актуальность создания инструмента оперативного, в том числе и в процессе полета, автоматического перестроения маршрута полета, интегрированного в систему самолето-вождения воздушного судна и обеспечивающего:

1) формирование нескольких альтернативных маршрутов [2], позволяющих облететь препятствия в виде наземных естественных [3], искусственных объектов [4, 5] или грозового фронта [6] на безопасном расстоянии в автоматическом или в директорном режимах с учетом летно-технических характеристик воздушного судна;

2) выявление оптимальных с точки зрения заданных критериев [7] (минимальное боковое отклонение, дополнительные затраты времени, топлива относительно исходного маршрута полета и т. п.) маршрутов облета.

Данный инструмент должен способствовать исключению ошибок экипажа, возникающих из-за повышенной психофизиологической нагрузки [8, 9] и дефицита времени [10] при выборе альтернативного маршрута полета в случае возникновения препятствия во время полета.

¹ Анализ состояния безопасности полетов в гражданской авиации Российской Федерации в 2020 году. Управление инспекции по безопасности полетов [Электронный ресурс] // ФАВТ, 2021. 97 с. URL: https://aviaforum.ams3.cdn.digitaloceanspaces.com/data/attachment-files/2021/04/1598384_a3450354b90aa72fe5588472bb4eedfc.pdf (дата обращения: 20.12.2023).

Таблица 1
Table 1

Данные об авиационных происшествиях в Российской Федерации за 2011–2020 гг.
Data on aviation accidents in the Russian Federation for 2011–2020

	коммерческая авиация, %		авиация общего назначения, %	
	самолеты	вертолеты	самолеты	вертолеты
Столкновение с препятствиями при полете на малой высоте (LALT)	–/–	–/3,3	10/11	11,2/10,7
Потеря управления в полете (LOC-I)	18/–	17,4/13,3	44/22	14,1/17,4
Столкновение с землей в управляемом полете (CFIT)	9/16,7	43,5/13,3	6,4/4,2	24/13
Попадание в приборные метеоусловия, к которым экипаж не допущен (UIMC)	4,5/5,6	–/–	–/–	–/–
Попадание в зону сильной грозовой деятельности (WSTRW)	–/5,6	–/–	–/–	–/–

Постановка задачи

Исходные данные:

1) маршрут полета в виде координат точек маршрута $X_i(x_{gi}, y_{gi}, z_{gi})$ в нормальной земной системе координат [11]:

- начальной X_0 ;
- промежуточных (поворотных) $X_1, X_2, \dots, X_{n-1}$;
- конечной X_n ;

2) ограничение по минимальной высоте полета над поверхностью Земли (в расчетах принято 100 м);

3) допустимое отклонение от маршрута полета (в расчетах принято 200 м);

4) препятствия (наземные, в виде грозового фронта, запретной зоны полетов) в виде массива координат точек их ограничивающих поверхностей $X_{пр1}, \dots, X_{прm}$.

5) карта местности типа SRTM (Shuttle Radar Topography Mission)² с разрешением 30 м (рис. 1);

6) воздушное судно типа Ми-8 со следующими характеристиками и ограничениями [12]:

- эксплуатационный диапазон изменения нормальной перегрузки $-0,5 \dots 2,5$;
- эксплуатационный диапазон изменения угла крена $-30 \dots 30^\circ$;
- максимальная скорость изменения перегрузки не более 1 ед/с;
- максимальная скорость полета по маршруту 240 км/ч;
- минимальная скорость горизонтального полета 70 км/ч;
- допустимый диапазон крена $-30 \dots 30^\circ$;
- максимальная скорость изменения крена 24 градуса/с.

Необходимо:

1) оценить безопасность исходного маршрута полета исходя из минимально допустимого расстояния между маршрутом полета и препятствием в процессе полета и, если исходный маршрут полета не безопасен, рассчитать альтернативные безопасные маршруты полета из начальной в конечную точку маршрута;

2) определить возможные скорости полета по альтернативным безопасным маршрутам;

3) выбрать альтернативный безопасный маршрут, оптимальный по установленному критерию.

² SRTM Database [Электронный ресурс] // dwtkns.com. URL: <https://dwtkns.com/srtm30m/> (дата обращения: 20.12.2023).

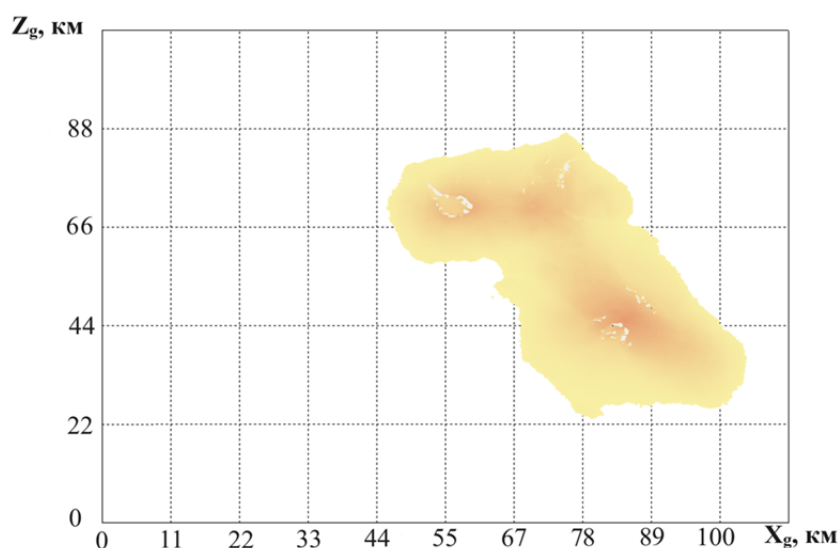


Рис. 1. Цифровая карта местности
Fig. 1. The digital map of the terrain

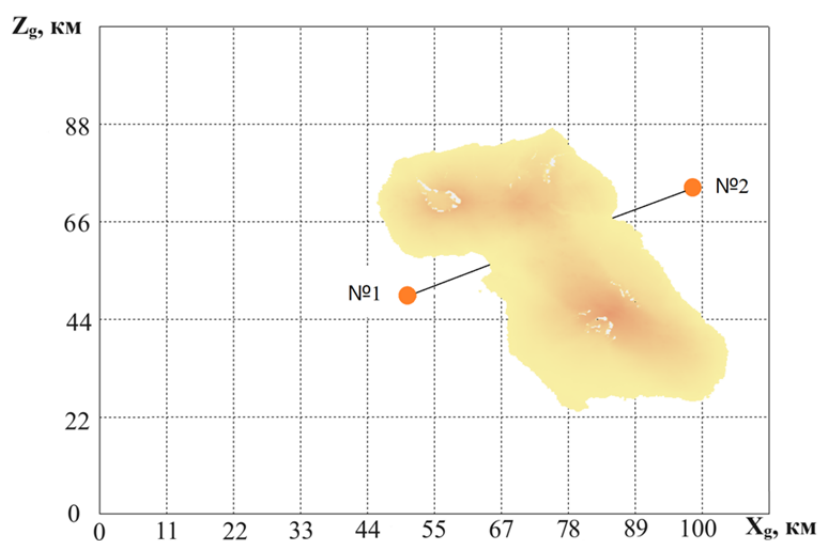


Рис. 2. Маршрут полета на цифровой карте местности в горизонтальной плоскости
Fig. 2. The route on a digital terrain map in a horizontal plane

Выше дана общая формулировка задачи исследования. Далее представлено содержание начальных и конечных условий пяти решаемых задач.

Задача 1: построить маршрут облета препятствия в горизонтальной плоскости для случая, когда исходный маршрут полета задан двумя точками (рис. 2), высота полета 300 м, критерий оптимальности – минимальное время полета по маршруту.

Задача 2: построить маршрут облета препятствия в вертикальной плоскости для случая, когда исходный маршрут полета задан двумя точками (рис. 3), исходная высота полета 300 м, критерий оптимальности – минимальное время полета по маршруту.

Задача 3: построить маршрут облета в горизонтальной плоскости грозового фронта, представленного в виде нескольких многоугольников, расположенных друг над другом

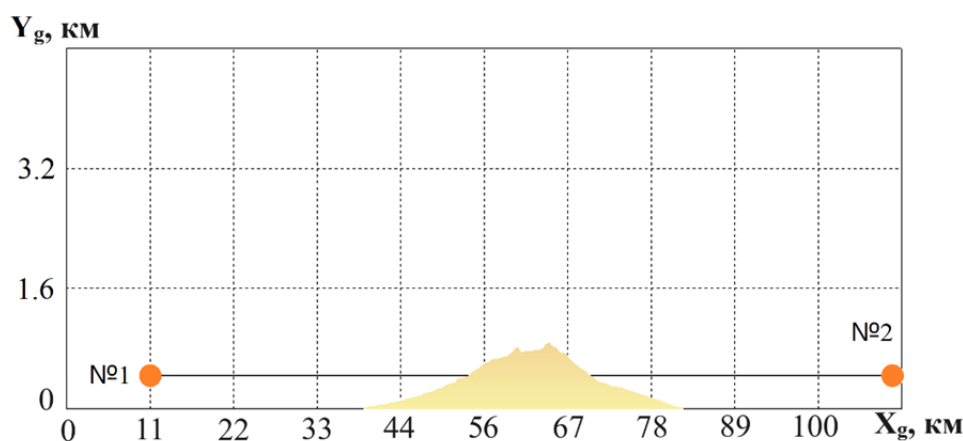


Рис. 3. Маршрут полета на цифровой карте местности в вертикальной плоскости
Fig. 3. The route on a digital terrain map in a vertical plane

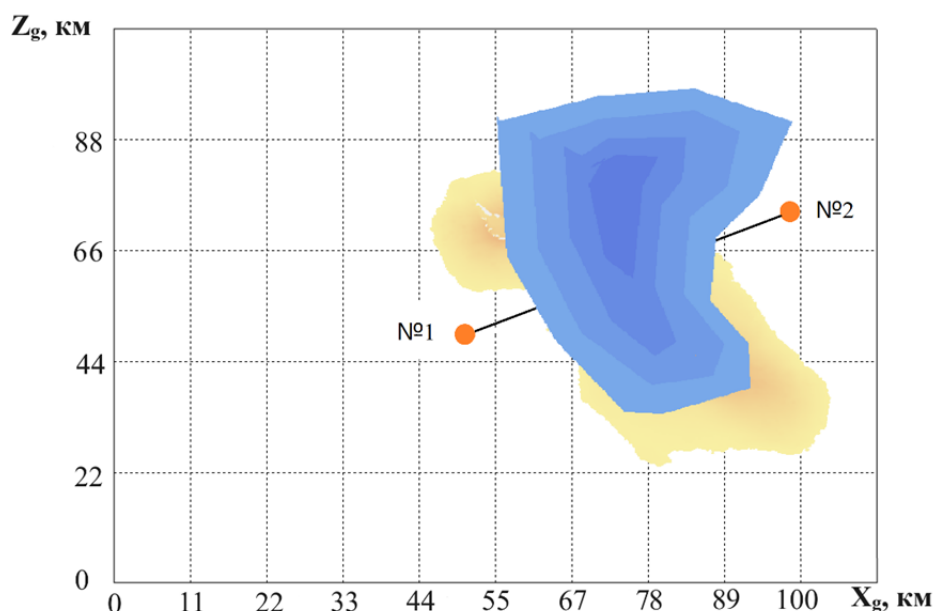


Рис. 4. Маршрут на цифровой карте местности в горизонтальной плоскости с грозовым фронтом на высотах 2000...4000 м

Fig. 4. The route on a digital terrain map in a horizontal plane with a squall line at altitudes of 2000...4000 meters

на высотах 2000...4000 м для случая, когда исходный маршрут полета задан двумя точками (рис. 4), исходная высота полета 2500 м, критерий – минимальное время полета по маршруту.

Задача 4: построить маршрут облета в вертикальной плоскости грозового фронта, представленного в виде нескольких многоугольников, расположенных друг над другом на высотах 2000...4000 м, для случая, когда исходный маршрут полета задан двумя точ-

ками (рис. 5), исходная высота полета 2500 м, критерий оптимальности – минимальное время полета по маршруту.

Задача 5: построить маршрут облета в горизонтальной плоскости грозового фронта, представленного в виде нескольких многоугольников, расположенных друг над другом на высотах 1600...3500 м, для случая, когда исходный маршрут полета задан двумя точками (рис. 6), исходная высота полета 2000 м, нижний край грозового фронта касается зем-

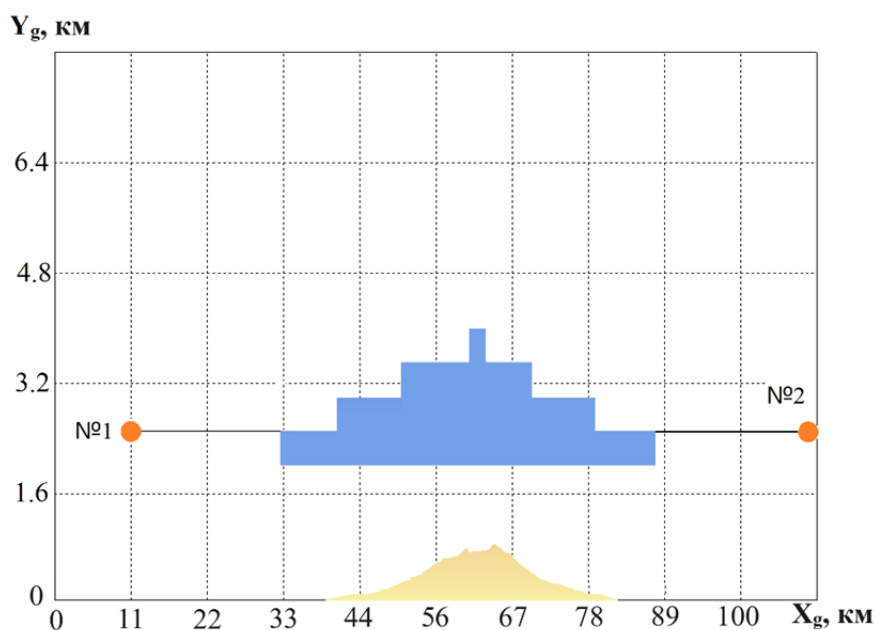


Рис. 5. Маршрут на цифровой карте местности в вертикальной плоскости с грозовым фронтом на высотах 2000...4000 м

Fig. 5. The route on a digital terrain map in a vertical plane with a squall line at altitudes of 2000...4000 meters

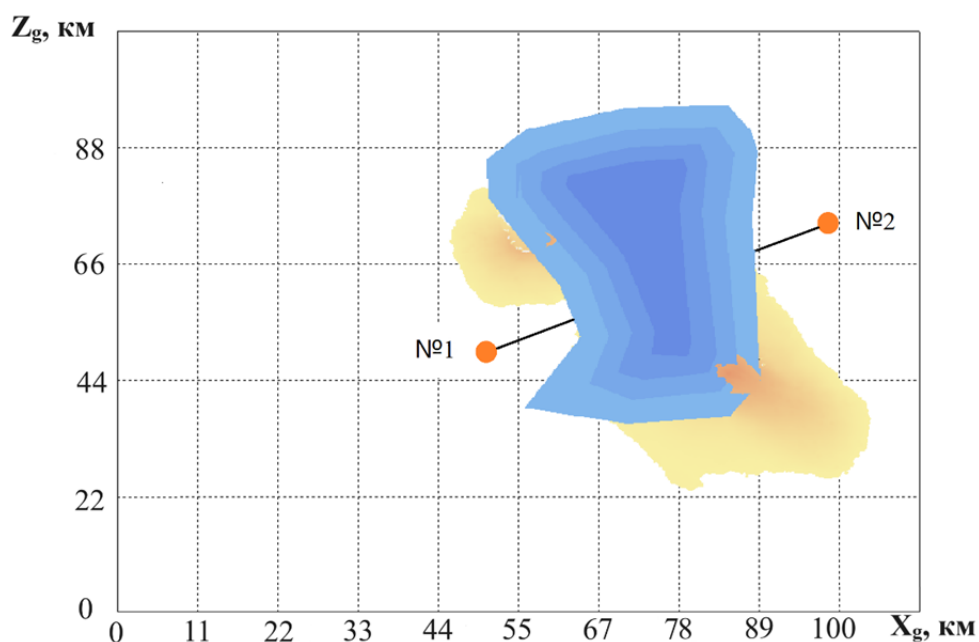


Рис. 6. Маршрут на цифровой карте местности в горизонтальной плоскости с грозовым фронтом на высотах 1600...3500 м

Fig. 6. The route on a digital terrain map in a horizontal plane with a squall line at altitudes of 1600...3500 meters

ной поверхности. Критерий оптимальности – минимальное время полета по маршруту.

Задача 6: построить маршрут облета в вертикальной плоскости грозового фронта, представленного в виде нескольких многоуголь-

ников, расположенных друг над другом на высотах 1600...3500 м для случая, когда исходный маршрут полета задан двумя точками (рис. 7), исходная высота полета 2000 м, нижний край грозового фронта местами каса-

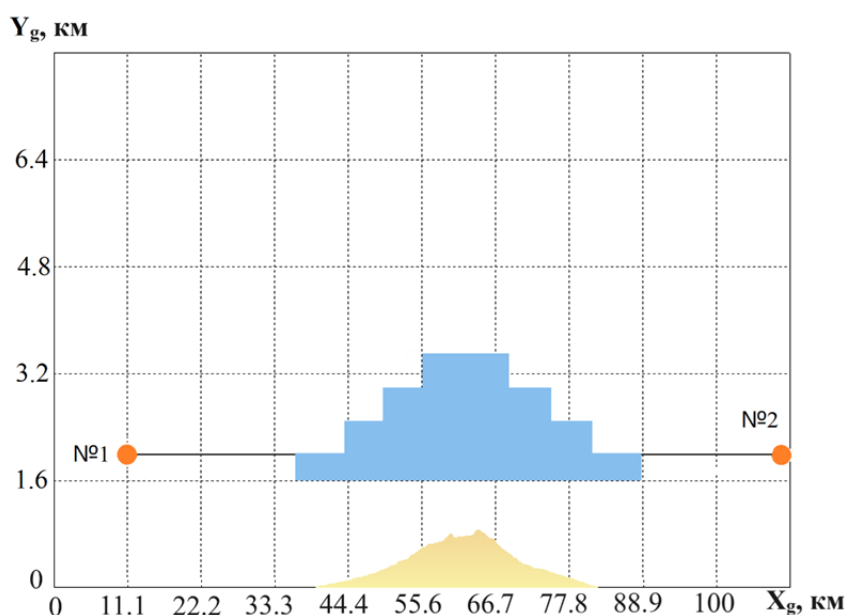


Рис. 7. Маршрут на цифровой карте местности в вертикальной плоскости с грозовым фронтом на высотах 1600...3500 м

Fig. 7. The route on a digital terrain map in a vertical plane with a squall line at altitudes of 1600...3500 meters

ется земной поверхности (рис. 6). Критерий оптимальности – минимальное время полета по маршруту.

Методология исследования

Методика перестроения маршрута воздушного судна в процессе его выполнения предполагает определенную последовательность действий:

- 1) оценку исходного маршрута полета на безопасность;
- 2) оценку реализуемости маршрута;
- 3) расчет альтернативных безопасных маршрутов полета;
- 4) выбор оптимального маршрута на основе установленного пилотом критерия [7];
- 5) согласование маршрута с диспетчером, ответственным за управление воздушным движением [13];
- 6) реализацию выбранного маршрута в автоматическом режиме или в директорном режиме [14].

Содержание методики подробно рассмотрено в [1].

Результаты исследований

Задача 1. Результаты решения задачи 1 в виде альтернативных безопасных маршрутов облета препятствия в горизонтальной плоскости представлены на рис. 8.

Альтернативные безопасные маршруты облета препятствий в горизонтальной плоскости имеют следующие характеристики:

- 1) маршрут 1 (выделен желтым цветом):
 - длина маршрута 80 544 м;
 - безопасная скорость полета по маршруту 79...240 км/ч (ограничения скорости полета изменяются по длине маршрута и определяются его текущей кривизной);
 - максимальное боковое отклонение от маршрута составило 172 м;
 - время прохождения маршрута 1 377 с;
- 2) маршрут 2 (выделен красным цветом):
 - длина маршрута 99 258 м;
 - максимальная безопасная скорость полета по маршруту 240 км/ч (совпадает с максимальной разрешенной скоростью полета воздушного судна);
 - максимальное боковое отклонение от маршрута составило 172 м;

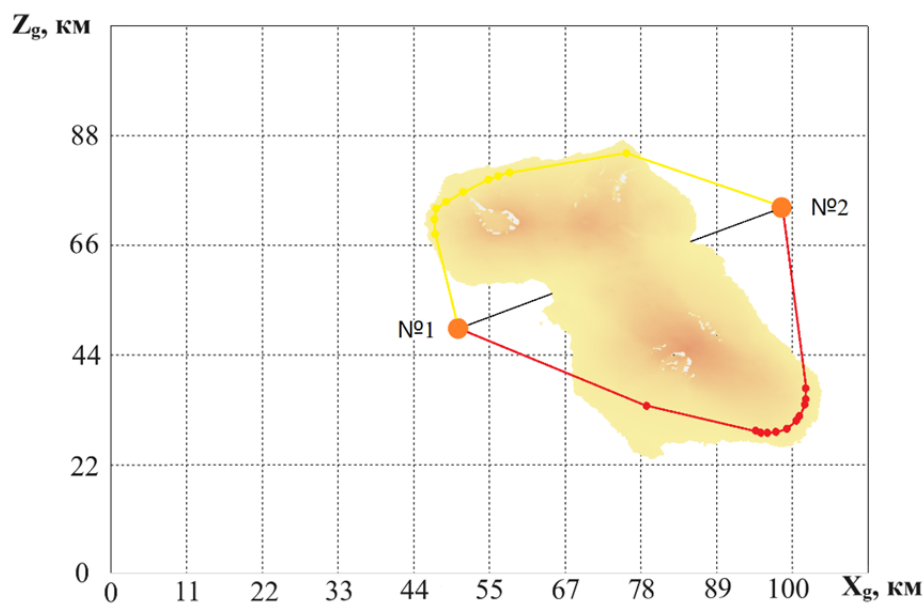


Рис. 8. Альтернативный маршрут полета на цифровой карте местности в горизонтальной плоскости
Fig. 8. The alternative on a digital terrain map in a horizontal plane

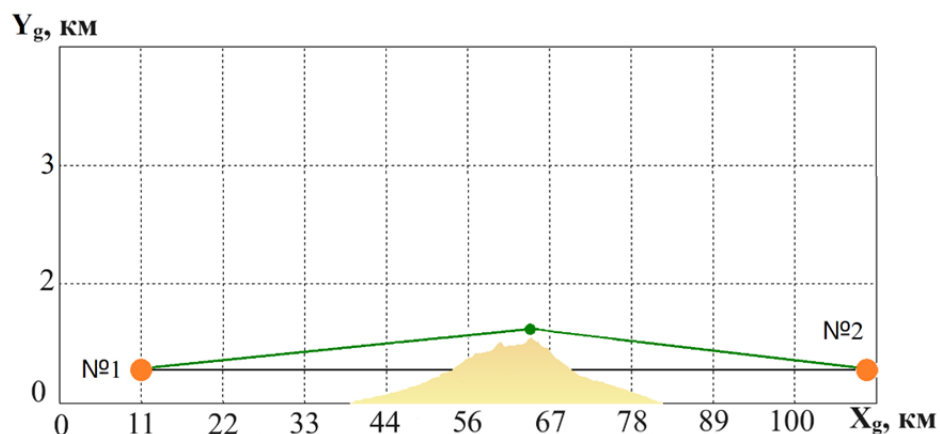


Рис. 9. Альтернативный маршрут полета на цифровой карте местности в вертикальной плоскости
Fig. 9. The alternative on a digital terrain map in a vertical plane

- время прохождения маршрута 1 489 с.

Задача 2. Результаты решения задачи 2 в виде альтернативного безопасного маршрута облета препятствия в вертикальной плоскости представлены на рис. 9.

Альтернативный безопасный маршрут облета препятствий в вертикальной плоскости имеет следующие характеристики:

- длина маршрута 53 559 м;
- безопасная скорость полета по маршруту 215...240 км/ч (ограничения скорости по-

лета изменяются по длине маршрута и определяются его текущей кривизной);

- максимальное боковое отклонение от маршрута составило 1 м;
- время прохождения маршрута 804 с.

Задача 3. Результаты решения задачи 3 в виде альтернативных безопасных маршрутов облета грозового фронта в горизонтальной плоскости представлены на рис. 10.

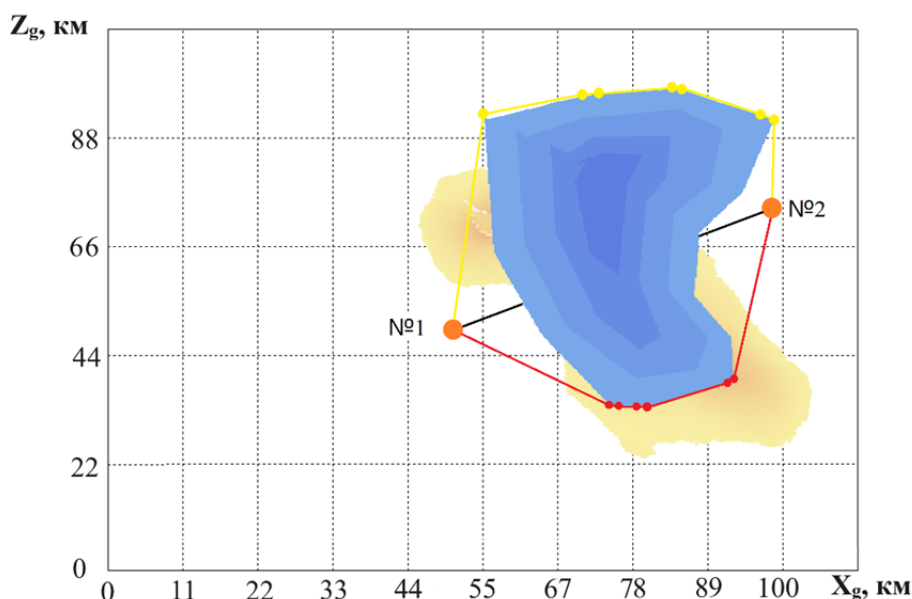


Рис. 10. Альтернативные маршруты полета на цифровой карте местности в горизонтальной плоскости при облете грозового фронта

Fig. 10. The alternatives on a digital terrain map in a horizontal plane while avoiding a squall line

Альтернативные безопасные маршруты облета грозового фронта в горизонтальной плоскости имеют следующие характеристики:

1) маршрут 1 (обозначен желтым цветом):

- длина маршрута 107 360 м;
- безопасная скорость полета по маршруту 99...240 км/ч (ограничения скорости полета изменяются по длине маршрута и определяются его текущей кривизной);
- время прохождения маршрута 1 824 с;
- максимальное боковое отклонение от маршрута составило 197 м. Отметим, что в случае ослабления требований к точности выдерживания маршрута время прохождения маршрута можно уменьшить. Например, при увеличении допустимого отклонения от маршрута до 700 м время полета уменьшится до 1 620 с;

2) маршрут 2 (обозначен красным цветом):

- длина маршрута 83 439 м;
- безопасная скорость полета по маршруту 134...240 км/ч (ограничения скорости полета изменяются по длине маршрута и определяются его текущей кривизной);

- максимальное боковое отклонение от маршрута составило 79 м;
- время прохождения маршрута 1 681 с;
- при увеличении допустимого отклонения от маршрута до 600 м время полета уменьшится до 1 254 с.

Задача 4. Результаты решения задачи 4 в виде альтернативного безопасного маршрута облета грозового фронта в вертикальной плоскости представлены на рис. 11.

Альтернативные безопасные маршруты облета грозового фронта в горизонтальной плоскости имеют следующие характеристики:

1) маршрут 1 (обозначен зеленым цветом):

- длина маршрута 53 559 м;
- безопасная скорость полета по маршруту 240 км/ч (совпадает с максимальной разрешенной скоростью полета воздушного судна);
- максимальное боковое отклонение от маршрута составило 1 м;
- время прохождения маршрута 804 с;

2) маршрут 2 (обозначен коричневым цветом):

- длина маршрута 53 656 м;

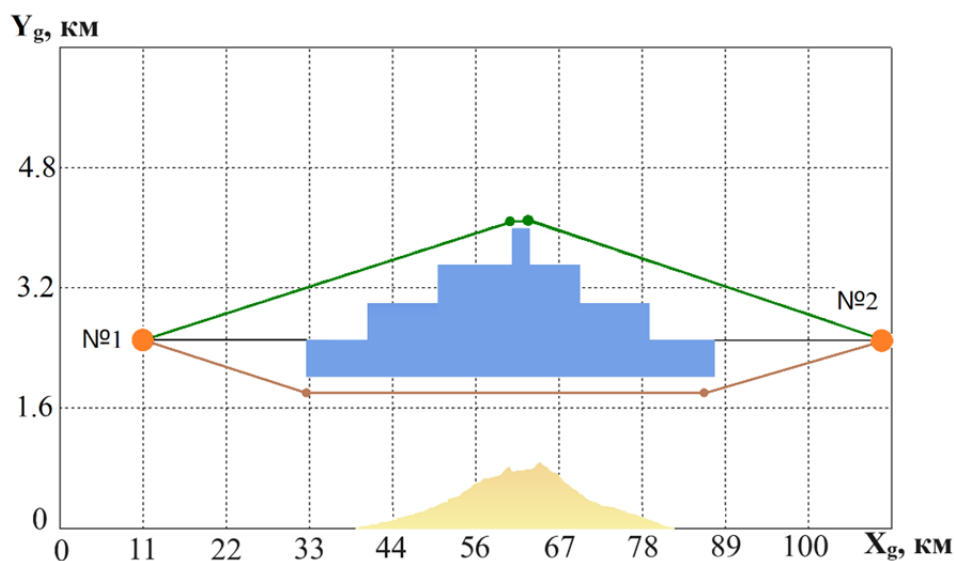


Рис. 11. Альтернативные маршруты полета на цифровой карте местности в вертикальной плоскости при облете грозового фронта на высотах 2000...4000 м

Fig. 11. The alternatives on a digital terrain map in a vertical plane while avoiding a squall line at altitudes of 2000...4000 meters

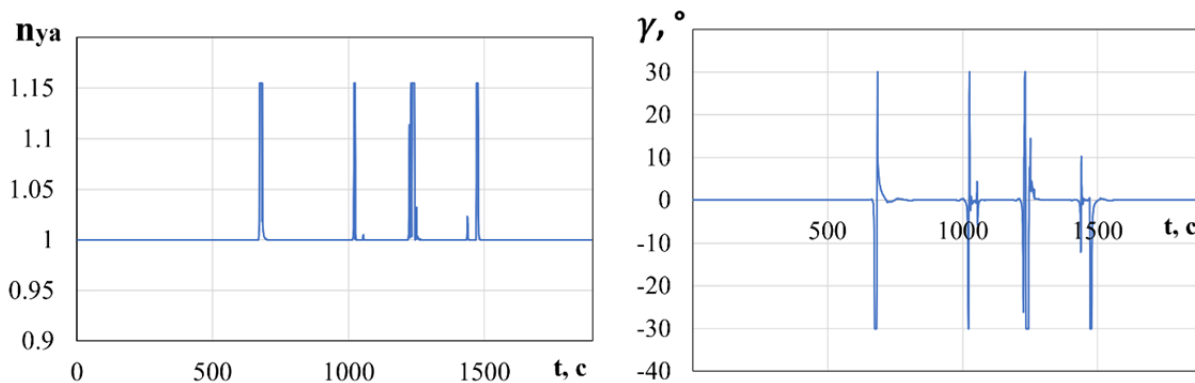


Рис. 12. График изменения нормальной перегрузки и угла крена при облете грозового фронта

Fig. 12. The graph of changes in normal overload and a bank angle while avoiding a squall line

- безопасная скорость полета по маршруту 240 км/ч (совпадает с максимальной разрешенной скоростью полета воздушного судна);
- максимальное боковое отклонение от маршрута составило 2 м;
- время прохождения маршрута 805 с.

Управляющие параметры, необходимые для реализации маршрута 1, представлены на рис. 12.

Задача 5. Результаты решения задачи 5 в виде альтернативных безопасных маршрутов облета грозового фронта в горизонтальной плоскости представлены на рис. 13.

Альтернативные безопасные маршруты облета грозового фронта в горизонтальной плоскости имеют следующие характеристики:

- 1) маршрут 1 (обозначен желтым цветом):

- длина маршрута 98 618 м;
- безопасная скорость полета по маршруту 119...240 км/ч (ограничения скорости полета изменяются по длине маршрута и определяются его текущей кривизной);
- максимальное боковое отклонение от маршрута составило 193 м;
- время прохождения маршрута 1 548 с;

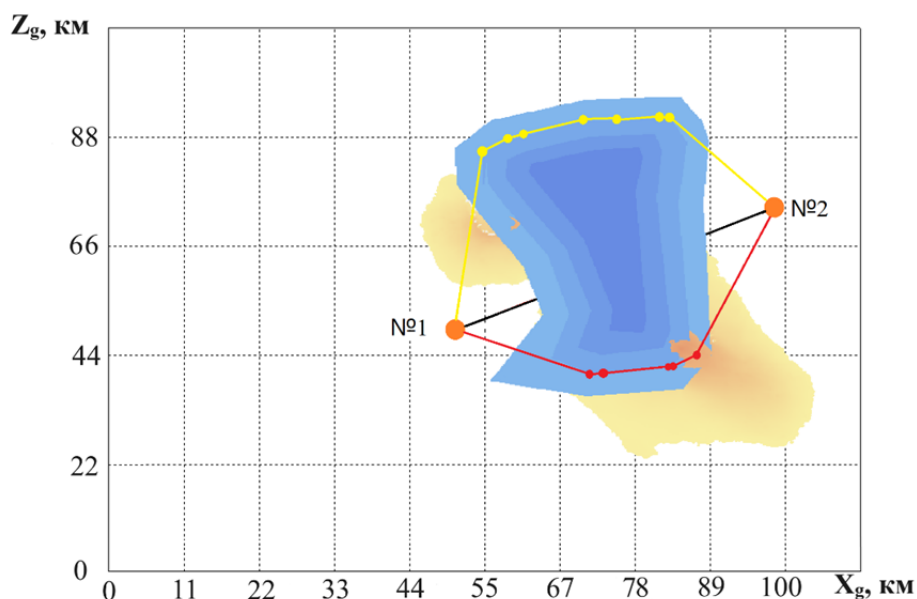


Рис. 13. Альтернативные маршруты полета на цифровой лог-карте местности в горизонтальной плоскости при облете грозового фронта на высотах 1600...3500 м

Fig. 13. The alternatives on a digital log map of the terrain in a horizontal plane while avoiding a squall line at altitudes of 1600...3500 meters

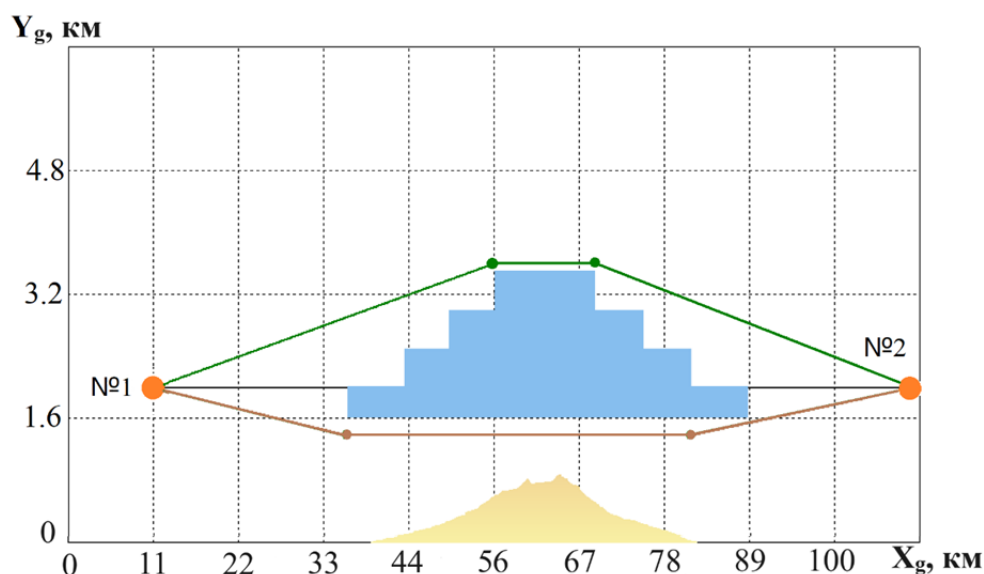


Рис. 14. Альтернативные маршруты полета на цифровой карте местности в вертикальной плоскости при облете грозового фронта на высотах 1600...3500 м

Fig. 14. The alternatives on a digital terrain map in a vertical plane while avoiding a squall line at altitudes of 1600...3500 meters

2) маршрут 2 (обозначен красным цветом):

- длина маршрута 70 803 м;
- безопасная скорость полета по маршруту 119...240 км/ч (ограничения скорости полета изменяются по длине маршрута и определяются его текущей кривизной);

- максимальное боковое отклонение от маршрута составило 180 м;
- время прохождения маршрута 1 453 с.

Задача 6. Результаты решения задачи 6 в виде альтернативных безопасных маршрутов облета грозового фронта в вертикальной плоскости представлены на рис. 14.

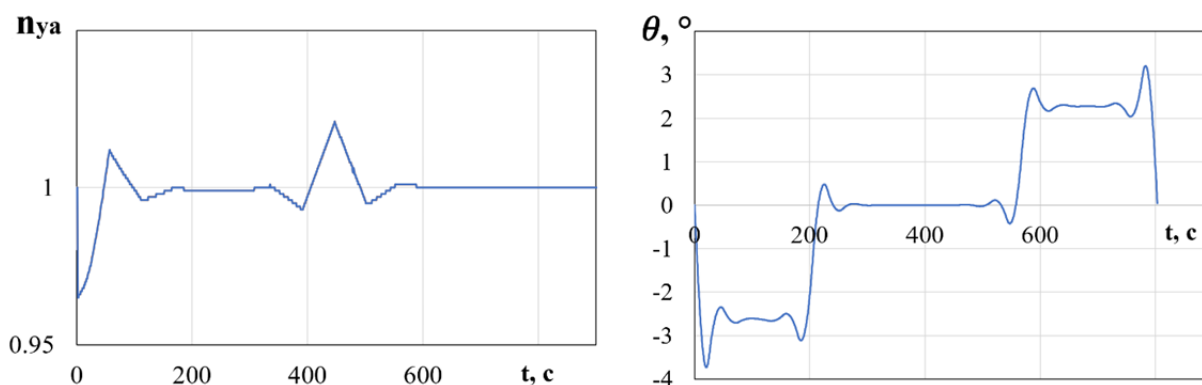


Рис. 15. График изменения нормальной перегрузки и угла наклона траектории при облете грозового фронта
Fig. 15. The graph of change in normal load factor and a flight path angle while avoiding a squall line

Альтернативные безопасные маршруты облета грозового фронта в вертикальной плоскости имеют следующие характеристики:

1) маршрут 1 (обозначен зеленым цветом):

- длина маршрута 53 559 м;
- безопасная скорость полета по маршруту 240 км/ч (совпадает с максимальной разрешенной скоростью полета воздушного судна);
- максимальное боковое отклонение от маршрута составило 1 м;
- время прохождения маршрута 804 с;

2) маршрут 2 (обозначен коричневым цветом):

- длина маршрута 53 656 м;
- безопасная скорость полета по маршруту 240 км/ч (совпадает с максимальной разрешенной скоростью полета воздушного судна);
- максимальное боковое отклонение от маршрута составило 2 м;
- время прохождения маршрута 805 с.

Управляющие параметры, необходимые для реализации маршрута 2, представлены на рис. 15.

Обсуждение результатов

Как следует из представленных выше результатов, алгоритм показал свою работоспособность при перестроении маршрута полета:

- в горизонтальной плоскости;

- в вертикальной плоскости;
- для случаев облета:
- естественных наземных препятствий;
- воздушных препятствий типа грозового фронта.

В частности, из представленного на рис. 6 и 7 грозового фронта и естественных наземных препятствий в виде рельефа местности, найденных альтернативных безопасных маршрутов полета, представленных на рис. 14, видно, что алгоритм работоспособен в том числе и в случае, когда для пролета имеется замкнутый «туннель», образованный земной поверхностью и поверхностью грозового фронта.

Исходя из результатов расчетов, приведенных в задаче 2, можно сделать вывод о том, что с точки зрения минимальной протяженности и времени прохождения в горизонтальной плоскости оптимальным является маршрут 1 (рис. 8), но при этом боковое отклонение от маршрута на нем составляет 175 м. Маршрут 2 имеет большую длину и требует больше времени на прохождение, но боковое отклонение в этом случае составляет всего 18 м. Альтернативный безопасный маршрут полета в вертикальной плоскости № 1 (рис. 9) по сравнению с маршрутами в горизонтальной плоскости выигрывает как по длине, так и по времени прохождения за счет более простой конфигурации (две прямые с одной поворотной точкой на маршруте), что позволяет достигать максимально разрешенную для используемого воздушного судна скорость полета маршрута. Аналогич-

ный вывод о преимуществе маршрутов облета в вертикальной плоскости по сравнению с маршрутами облета в горизонтальной плоскости можно сделать и исходя из результатов решения задач 3 и 4.

Выводы

В статье рассмотрено дальнейшее развитие ранее предложенного алгоритма, обеспечивающего на основе данных о текущем маршруте полета, координатах препятствий оценку безопасности реализуемого маршрута полета, расчет множества альтернативных безопасных и реализуемых данным воздушным судном маршрутов полета с выделением оптимального по выбранному критерию маршрута облета препятствий. В данном исследовании рассмотрено применение алгоритма для расчета вариантов облета препятствий в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Исследования проводились на основе реальной цифровой карты местности. Представленные в статье результаты решения тестовых задач показали работоспособность алгоритма для прокладки нового маршрута полета в случае появления наземного и (или) воздушного препятствия.

Список литературы

1. Киселев М.А. Методика перестроения маршрута полета воздушного судна в процессе его выполнения / М.А. Киселев, Ю.С. Калюжный, А.В. Карпов, С.Ф. Бородин // Научный Вестник МГТУ ГА. 2023. Т. 26, № 6. С. 33–46. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-6-33-46
2. Altun A.T., Hasanzade M., Saldiran E. et al. AMU-LED cranfield flight trials for demonstrating the advanced air mobility concept [Электронный ресурс] // Aerospace. 2023. Vol. 10, iss. 9. ID: 775. DOI: 10.3390/aerospace10090775 (дата обращения: 09.09.2023).
3. Stevenson G. Testing the helicopter obstacle avoidance system / G. Stevenson, H.R. Verdun, P.H. Stern, W. Koechner // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering, 1995. Pp. 93–103. DOI: 10.1117/12.212025
4. Kahana A. Obstacle-avoidance displays for helicopter operations: spatial versus guidance symbologies // Journal of Aerospace Computing, Information and Communication. 2015. Vol. 12, no. 7. Pp. 455–466. DOI: 10.2514/1.I010306
5. Yang X., Wei P. Autonomous free flight operations in urban air mobility with computational guidance and collision avoidance // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2021. Vol. 22, no. 9. Pp. 5962–5975. DOI: 10.1109/TITS.2020.3048360
6. Богаткин О.Г. Основы авиационной метеорологии: учебник. СПб.: РГГМУ, 2009. 339 с.
7. Левицкий С.В., Левицкая Е.В. Методика оценки транспортной эффективности магистрального пассажирского самолета // Научный Вестник МГТУ ГА. 2014. № 205. С. 99–106.
8. Горбунов В.В. Особенности изменения некоторых психофизиологических показателей летчика при различных режимах труда и отдыха в длительных полетах // Медицина труда и промышленная экология. 2009. № 5. С. 5–9.
9. Лысаков Н.Д. Психологические аспекты человеческого фактора в авиации // Вестник университета. 2014. № 2. С. 250–253.
10. Шумилов И.С. Авиационные происшествия. Причины возникновения и возможности предотвращения. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 384 с.
11. Левицкий С.В., Свиридов Н.А. Динамика полета: учебник для вузов. М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008. 527 с.
12. Володко А.М. Основы аэродинамики и динамики полета вертолета. М.: Транспорт, 1988. 342 с.
13. Ahrenhold N. Enabling green approaches by FMS-AMAN coordination / N. Ahrenhold, I. Stasicka, R. Abdellaoui, T. Mühlhausen, M.-M. Temme [Электронный ресурс] // Aerospace. 2023. Vol. 10, iss. 3. P. 278. DOI: 10.3390/aerospace10030278/ (дата обращения: 04.01.2023).
14. Eger T.W. Operational requirements for helicopter operations low-level in degraded vis-

ual environment [Электронный ресурс] // Proceedings-SPEI. The International Society for Optical Engineering. 2013. Vol. 8737. DOI: 10.1117/12.2015311 (дата обращения: 09.09.2023).

References

1. Kiselev, M.A., Kalyuzhny, Y.S., Karpov, A.V., Borodkin, S.F. (2023). Methodology for plotting the flight planned route change of the aircraft in flight. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 26, no. 6, pp. 33–46. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-6-33-46
2. Altun, A.T., Hasanzade, M., Saldiran, E. et al. (2023). AMU-LED cranfield flight trials for demonstrating the advanced air mobility concept. *Aerospace*, vol. 10, issue 9, ID: 775. DOI: 10.3390/aerospace10090775 (accessed: 09.09.2023).
3. Stevenson, G., Verdun, H.R., Stern, P.H., Koechner, W. (1995). Testing the helicopter obstacle avoidance system. In: *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, pp. 93–103. DOI: 10.1117/12.212025
4. Kahana, A. (2015). Obstacle-avoidance displays for helicopter operations: spatial versus guidance symbologies. *Journal of Aerospace Computing, Information and Communication*, vol. 12, no. 7, pp. 455–466. DOI: 10.2514/1.1010306
5. Yang, X., Wei, P. (2021). Autonomous free flight operations in urban air mobility with computational guidance and collision avoidance. In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 22, no. 9, pp. 5962–5975. DOI: 10.1109/TITS.2020.3048360

6. Bogatkin, O.G. (2009). Fundamentals of aviation meteorology: Textbook. St. Petersburg: RGGMU, 339 p. (in Russian)

7. Levickiy, S.V., Levickaya, E.V. (2014). The methods of assessment of transportation efficiency of a passenger aircraft. *Nauchnyy Vestnik MGTU GA*, no. 205, pp. 99–106. (in Russian)

8. Gorbunov, V.V. (2009). Peculiarities of some psycho-physiologic parameters change in pilots experiencing variable work and rest modes in long flights. *Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya*, no. 5, pp. 5–9. (in Russian)

9. Lyssakov, N.D. (2014). Psychological aspects of human factor in aviation. *Vestnik Universiteta*, no. 2, pp. 250–253. (in Russian)

10. Shumilov, I.S. (2006). Aviation incidents. Causes and prevention options. Moscow: MGTU im. N.E. Bauman, 384 p. (in Russian)

11. Levitskiy, S.V., Sviridov, N.A. (2008). Flight dynamics: Textbook for Universities. Moscow: VVIA im. prof. N.Ye. Zhukovskogo, 527 p. (in Russian)

12. Volodko, A.M. (1988). Fundamentals of aerodynamics and helicopter flight dynamics. Moscow: Transport, 342 p. (in Russian)

13. Ahrenhold, N., Stasicka, I., Abdel-laoui, R., Mühlhausen, T., Temme, M.-M. (2023). Enabling green approaches by FMS-AMAN coordination. *Aerospace*, vol. 10, issue 3, p. 278. DOI: 10.3390/aerospace10030278/ (accessed: 04.01.2023).

14. Eger, T.W. (2013). Operational requirements for helicopter operations low-level in degraded visual environment. In: *Proceedings-SPEI. The International Society for Optical Engineering*, vol. 8737. DOI: 10.1117/12.2015311 (accessed: 09.09.2023).

Сведения об авторах

Киселев Михаил Анатольевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой аэродинамики конструкции и прочности летательных аппаратов МГТУ ГА, m.kiselev@mstuca.aero.

Калюжный Юрий Сергеевич, ведущий инженер ФАУ «ГосНИИАС», yury.kalyuzhny@gmail.com.

Карпов Андрей Викторович, ведущий инженер ФАУ «ГосНИИАС», ya.karanvik@gmail.com.

Бородкин Сергей Филиппович, кандидат технических наук, доцент кафедры аэродинамики конструкции и прочности летательных аппаратов МГТУ ГА, s.borodkin@mstuca.aero.

Information about the authors

Mikhail A. Kiselev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Aerodynamics, Design and Strength of Aircraft Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, m.kiselev@mstuca.aero.

Yury S. Kalyuzhny, Lead Engineer of the State Research Institute of Aviation Systems, yury.kalyuzhny@gmail.com.

Andrey V. Karpov, Lead Engineer of the State Research Institute of Aviation Systems, ya.karanvik@gmail.com.

Sergey F. Borodkin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Aerodynamics, Design and Strength of Aircraft Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, s.borodkin@mstuca.aero.

Поступила в редакцию	26.12.2023	Received	26.12.2023
Одобрена после рецензирования	30.01.2024	Approved after reviewing	30.01.2024
Принята в печать	23.05.2024	Accepted for publication	23.05.2024

УДК 621.396.96

DOI: 10.26467/2079-0619-2024-27-3-50-66

Предложения по проектированию организации воздушного пространства секторов ОВД районного диспетчерского центра Хошимина с целью повышения его пропускной способности

Нгуен Нгок Хоанг Куан^{1,2}, В.Н. Нечаев¹

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

²Вьетнамская авиационная академия, г. Хошимин, Вьетнам

Аннотация: По оценкам Международной ассоциации воздушного транспорта (IATA), Вьетнам входит в число стран с быстрым развитием гражданской авиации (ГА). Данное развитие является положительным знаком для повышения роли и положения ГА Вьетнама в мировой ГА, но в то же время увеличение полетов воздушных судов (ВС) создает проблемы в области обеспечения безопасности полетов, увеличивает нагрузку на воздушное пространство (ВП) и аэропорты, а также загрязняет окружающую среду. ВП Хошимина – одно из крупнейших и наиболее загруженных в Юго-Восточной Азии. Каждый год тысячи рейсов вылетают, прилетают и пересекают ВП Хошимина. Кроме того, деятельность авиации в ВП Хошимина становится все более сложной (она включает деятельность государственной авиации, ГА и авиации общего назначения), что требует постоянного совершенствования организации воздушного пространства (ОрВП). ОрВП в свою очередь требует определенной гибкости и быстрого реагирования на сложности, возникающие в ВП. Одной из важных составляющих ВП Хошимина является ВП районного диспетчерского центра (РДЦ). В настоящее время структура ВП РДЦ Хошимина, разделенного на шесть секторов, демонстрирует признаки перегруженности, что ведет к увеличению рабочей нагрузки авиадиспетчеров. Поэтому перераспределение ВП РДЦ Хошимина крайне необходимо. В связи с этим авторы статьи рассматривают вопрос разделения ВП РДЦ Хошимина на восемь секторов и предложения, необходимые для его реализации. По мнению авторов, перераспределение ВП будет способствовать повышению качества организации воздушного движения (ОрВД), увеличению пропускной способности (ПС) ВП и снижению рабочей нагрузки авиадиспетчеров.

Ключевые слова: воздушное пространство, воздушное пространство районного диспетчерского центра Хошимина, организация воздушного движения, сектор, авиадиспетчер, полетная деятельность, пропускная способность воздушное пространство, гражданская авиация.

Для цитирования: Хоанг Куан Н.Н., Нечаев В.Н. Предложения по проектированию организации воздушного пространства секторов ОВД районного диспетчерского центра Хошимина с целью повышения его пропускной способности // Научный Вестник МГТУ ГА. 2024. Т. 27, № 3. С. 50–66. DOI: 10.26467/2079-0619-2024-27-3-50-66

Proposals for designing the airspace management of the ATM sectors of the Ho Chi Minh City Area Control Center to increase its capacity

Nguyen Ngoc Hoang Quan^{1,2}, V.N. Nechaev¹

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

²Vietnam Aviation Academy, Ho Chi Minh City, Viet Nam

Abstract: According to the International Air Transport Association (IATA), Vietnam is among the countries with the rapid development of civil aviation (CA). This development is a positive sign to enhance the role and position of Vietnam civil aviation in the civil aviation community. But at the same time, the increase in flight operations poses challenges to flight safety, increases the load on airspace and airports, and pollutes the environment. The Ho Chi Minh City (HCM) airspace is one of the largest and busiest airspace in Southeast Asia. Every year, thousands of flights depart, arrive, and cross the HCM (VVTG) airspace. In addition, aviation operations in the HCM airspace are becoming increasingly complex (they include activity of state aviation, civil and general aviation), which requires the continuous improvement of airspace management. Airspace management, in turn, requires a certain flexibility and a quick response to difficulties arising in the airspace. One of the important components of the HCM airspace

is the airspace of the HCM Area Control Centre (ACC¹ airspace). At present, the structure of the HCM ACC airspace, which is divided into 6 sectors, shows signs of congestion, which leads to an increase in the workload of air traffic controllers (ATC). Therefore, the HCM ACC airspace redesign is imperative. In this regard, the authors of the article consider the issue of dividing the HCM ACC airspace into 8 sectors and the proposals which are necessary for its implementation. According to the authors, the HCM airspace redesign will contribute to improving air traffic management (ATM) quality, increasing airspace capacity, and reducing ATC workload.

Key words: airspace, HCM ACC airspace, air traffic management, sector, air traffic controller, flight operation, airspace capacity, civil aviation.

For citation: Hoang Quan, N.N., Nechaev, V.N. (2024). Proposals for designing the airspace management of the ATM sectors of the Ho Chi Minh City Area Control Center to increase its capacity. Civil Aviation High Technologies, vol. 27, no. 3, pp. 50–66. DOI: 10.26467/2079-0619-2024-27-3-50-66

Введение

Согласно отчету Управления гражданской авиации Вьетнама², авиационный рынок Вьетнама в 2023 году восстановился после воздействия пандемии COVID-19. Общий пассажиропоток за 9 месяцев через аэропорты составил 89 млн пассажиров, что на 20 % больше, чем за аналогичный период 2022 года. Число иностранных пассажиров достигло 23,7 млн, что на 266,8 % больше по сравнению с аналогичным периодом 2022 года. Общий объем грузоперевозок через аэропорты Вьетнама составил 887,5 тыс. т, из них: международных: 637 тыс. т, внутренний объем: 250,4 тыс. т.

На рынке внутренних авиаперевозок Вьетнама действуют 5 крупных авиакомпаний, выполняющих полеты почти по 70 внутренним маршрутам с более чем 650 рейсами в день. Что касается международных авиаперевозок, то 64 иностранные авиакомпании и 5 вьетнамских выполняют полеты по 169 международным маршрутам, соединяющим Вьетнам с 28 странами и территориями. Среди них 10 с наибольшим количеством пассажиров, перевезенных во Вьетнам, включая Корею, Таиланд, Тайвань, Японию, Китай, Сингапур, Малайзию, Гонконг, Австралию и Индию.

¹ ACC – Area Control Center.

² Sản lượng hành khách thông qua các cảng hàng không trên cả nước trong 9 tháng đầu năm tăng 20 % so với cùng kỳ năm trước [Электронный ресурс] // CAAV. URL: [https://caa.gov.vn/hoat-dong-nganh/san-luong-hanh-khach-thong-qua-cac-cang-hang-khong-tren-ca-nuoc-trong-9-thang-dau-nam-tang-20-so-voi-cung-ky-nam-truoc-20230925141432841.htm](https://caa.gov.vn/hoat-dong-nganh/san-luong-hanh-khach-thong-qua-cac-cang-hang-khong-tren-ca-nuoc-trong-9-thang-dau-nam-tang-20-so-voi-cung-ky-nam-truoc) (дата обращения: 11.05.2023).

При вышеуказанных темпах роста авиaperевозок во многих аэропортах и воздушном пространстве (ВП) Вьетнама прогнозируются признаки перегруженности ВП, особенно ВП районного диспетчерского центра (РДЦ) Хошимина. Исходя из этого необходимо своевременно адаптироваться к темпам роста применения гражданской авиации (ГА), все более разнообразному и сложному характеру ее деятельности, обеспечить безопасность полетов и эффективность использования ВП, таким образом, реорганизация ВП РДЦ Хошимина становится все более актуальной и необходимой.

Организационная структура и секторизация ВП РДЦ Хошимина³

ВП РДЦ Хошимина в настоящее время включает 6 секторов (рис. 1) со следующими границами.

Вертикальная граница ВП

От поверхности земли (воды) до неограниченной высоты, за исключением зон маневрирования (ТМА (терминальная зона маневрирования (*Terminal Control Area*)) Тан Сон Нхат (ТСН), ТМА Дананг, ТМА Камрань и Диспетчерская зона (*TWR* – аэродромный диспетчерский пункт (*Tower (Aerodrome Control)*)) в ВП РДЦ Хошимина.

Горизонтальная граница ВП

Координаты границы ВП РДЦ Хошимина представлены в табл. 1.

³ Aeronautical information publication of Vietnam.

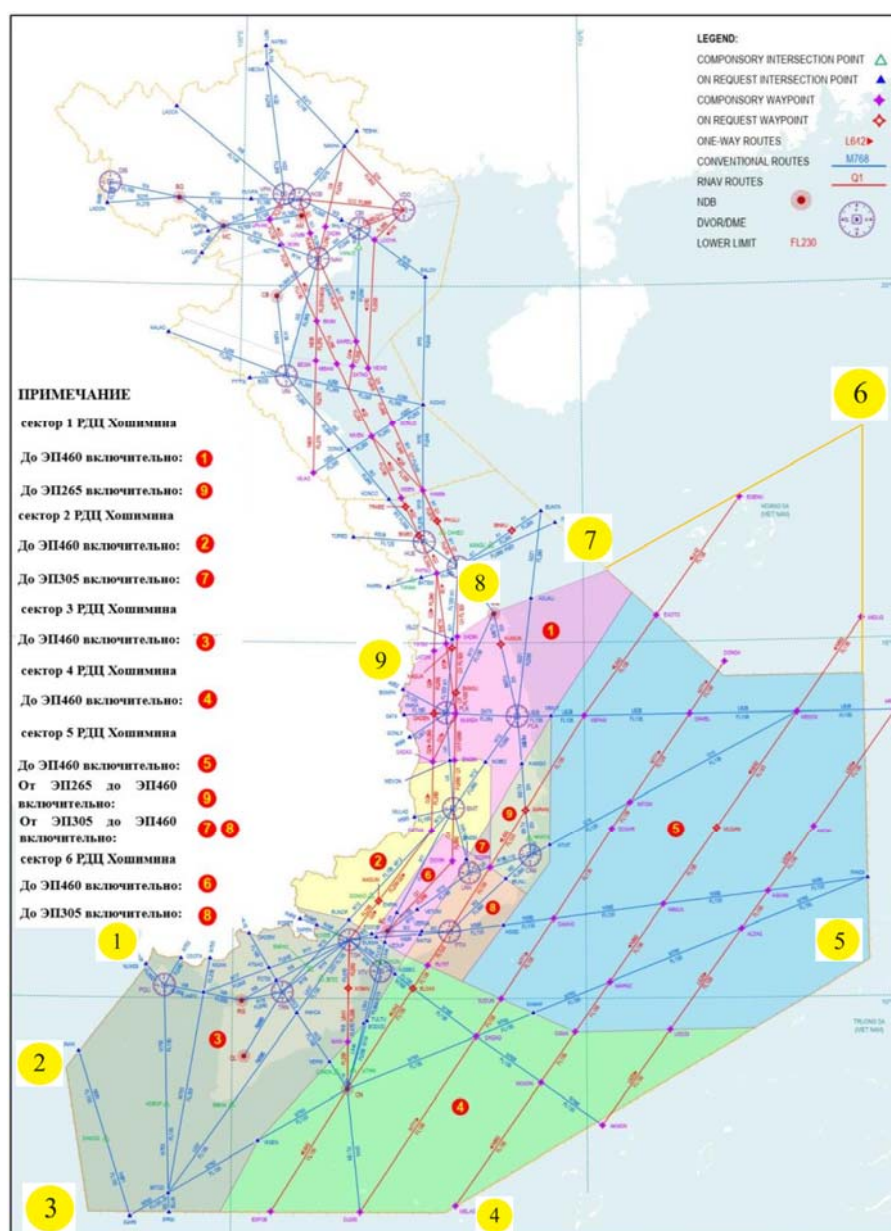


Рис. 1. Шесть секторов и границы ВП РДЦ Хошимина⁴
Fig. 1. The HCM ACC airspace boundaries and 6 sectors⁴

Текущая ситуация использования ВП РДЦ Хошимина

В добавлении II-С ИКАО Doc 9971⁴ приводится пример упрощенной методики определения пропускной способности (ПС) сектора в РДЦ. Указанная методика основана на

процессе, разработанном Федеральным авиационным управлением (ФАУ) для установления ПС сектора. ПС сектора определяется с использованием данных о среднем времени полетов в секторе в минутах с 7:00 до 19:00 с понедельника по пятницу в течение любого 15-минутного периода времени. ПС секторов ВП РДЦ Хошимина на основе данной методики представлена в табл. 2.

Однако оптимальная ПС будет корректироваться в зависимости от сложности сектора. Сложность сектора зависит от многих

⁴ Doc 9971: Руководство по совместной организации потоков воздушного движения (ОПВД), добавление II-С. 3-е изд. // ИКАО, 2018. 62 с.

Таблица 1
Table 1

Координаты границы ВП РДЦ Хошимина
Coordinates of the HCM ACC airspace
boundaries

Точка	Долгота – Широта
1	10°22'00" с. ш. – 103°44'00" в. д.
2	09°00'00" с. ш. – 102°40'00" в. д.
3	07°00'00" с. ш. – 103°00'00" в. д.
4	07°00'00" с. ш. – 108°00'00" в. д.
5	10°30'00" с. ш. – 114°00'00" в. д.
6	16°40'00" с. ш. – 114°00'00" в. д.
7	16°00'12" с. ш. – 110°20'43" в. д.
8	15°24'44" с. ш. – 108°42'16" в. д.
9	14°41'10" с. ш. – 107°33'24" в. д.

факторов, таких как плотность трафика, сложность маршрутов ОВД, объем ВП (в вертикальной и горизонтальной плоскостях), типы CNS (*Communications, Navigation, Surveillance* – связь, навигация, наблюдение), полеты государственной авиации и т. д.

По данным статистики, в РДЦ Хошимина с 22 по 24 июля 2023 г. в часы пик в секторах 1, 2, 3, 5 и 6 ВП было перегружено, особенно критично в секторах 1, 3 и 5. Так, в секторе 1 количество воздушных судов (ВС), входящих в пиковые часы, достигло 105–125 % оптимального значения ПС (табл. 2), особенно в период с 10:30 до 11:00 23 июля, когда количество ВС достигает 126,67 % оптимального значения ПС. Аналогичным образом в секторах 3 и 5 количество ВС достигло 105–122 % оптимального значения ПС. Максимум был достигнут в секторе 3 на временном интервале с 11:30 до 11:45 23 июля и в секторе 5 на временном интервале с 10:45 до 11:00 и с 11:30 до 11:45 23 июля – 122,22 % (подробности – рис. 2). Сектор 1 и 3 представляют собой связующие секторы между странами Юга (Сингапур, Малайзия и т. д.) и странами Севера (Китай, Россия и т. д.), а сектор 5 – между странами Запада (Таиланд, Камбоджа и т. д.) и странами Востока (Япония, Корея и т. д.). В Азиатско-Тихоокеанском регионе высокий уровень перегрузки в этих секторах приводит к задержкам и стагнации авиационной активности, что сказывается на экономическом развитии региона.

Таблица 2
Table 2

ПС сектора в ВП АСС Хошимина
(упрощенная методика)
Sector capacity of the HCM ACC airspace
(simplified methodology)

Сектор	Среднее время полета в секторе	Оптимальное значение ПС в секторе за 15 минут
1	09	15
2	12	18
3	12	18
4	16	18
5	20	18
6	09	15

В праздничные дни количество ВС, как правило, увеличивается, а вероятность перегруженности секторов возрастает. Например, за 7 дней лунного нового, 2023 г. (20–26 января) общее количество взлетающих и прибывающих ВС в аэропортах Вьетнама достигло 13 657 (в то время как средний показатель за 7 дней июля 2023 г. составлял всего около 8 тыс. взлетно-посадочных операций). При большом количестве ВС и высокой плотности воздушного движения диспетчеры в процессе осуществления управления воздушным движением (УВД) в ВП РДЦ Хошимина имеют высокий уровень загруженности, близкий к предельно допустимым значениям, что приводит к возникновению стрессовых ситуаций.

Кроме того, в секторах 3 и 5 периодически возникают случаи перегрузки радиосвязи VHF (*VHF* – очень высокие частоты – частоты от 30 до 300 МГц и соответственно метровые – от 1 до 10 м – радиоволны⁵), что затрудняет обеспечение безопасности, эффективности и непрерывности ОВД. Согласно методу оценки Eurocontrol⁶ порог рабочей

⁵ Словарь терминов радиосвязи для настройки параметров и программирования радиостанций и меню рации [Электронный ресурс] // Комбат. URL: <https://combat-center.ru/blog/detail/glossariy-terminy-radiosvyazi/> (дата обращения: 11.05.2023).

⁶ Евроконтроль, Пессимистичная оценка потенциала сектора, 2003.

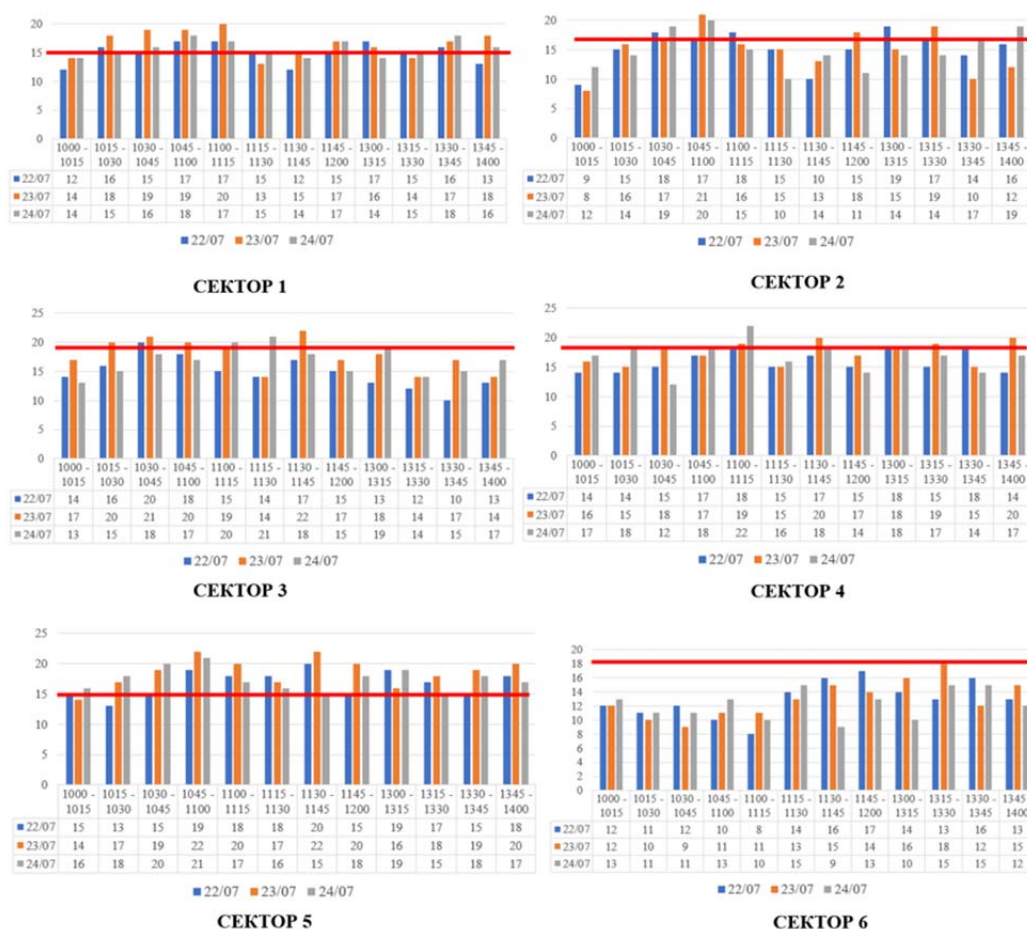


Рис. 2. Плотность воздушного движения в секторах РДЦ Хошимина с 22 по 24 июля 2023 г.
Fig. 2. Air traffic density in the sectors of the HCM ACC from July 22, 2023 to July 24, 2023

нагрузки (workload threshold) – это процент времени, потраченный на ведение радиосвязи диспетчером в час. Эта рабочая нагрузка определяется для каждого рабочего места диспетчера.

Например, 1 июня 2023 г. в секторе 3 диспетчер радиолокационного контроля / диспетчер процедурного контроля превысили порог времени использования VHF (рис. 3). В периоды времени 02:00, 03:00, 04:00, 05:00, 06:00, 07:00 UTC, особенно в 06:00 UTC, диспетчеру радиолокационного контроля приходится вести радиообмен с экипажами ВС 51 минуту в течение часа для осуществления УВД, включая время выдачи разрешения и указаний, у диспетчера есть всего 9 минут на то, чтобы анализировать обстановку и принимать решения в нестандартных ситуациях, если таковые возникают.

Аналогично в секторе 5, хотя порог рабочей нагрузки в нем меньше, есть некоторые временные рамки, которые превышают допустимый порог. Например, в 02:00 UTC диспетчеру радиолокационного контроля пришлось вести радиообмен 48 минут в течение часа.

Кроме того, ИКАО прокомментировала рост перегруженности некоторых маршрутов ОВД и ВП в Азиатско-Тихоокеанском регионе в целом и во Вьетнаме в частности^{7,8}, а также дала рекомендации по организации и перепроектированию ВП. Поэтому перепроектирование ОрВП является насущной необходимостью.

⁷ Каталог маршрутов ОВД Азиатско-Тихоокеанского региона. Версия 21.2 // ИКАО, 2022. 56 с.

⁸ Азиатско-Тихоокеанский региональный план авиационной безопасности на 2023–2025 гг // ИКАО, 2022. 120 с.

Таблица 3
Table 3

Порог рабочей нагрузки⁷
Workload threshold⁷

Порог, % Threshold, %	Интерпретация Interpretation	Записанное рабочее время в течение 1 часа, мин Recorded Working Time during 1 hour
70 или выше	Перегрузка Overload	42+
54–69	Тяжелая нагрузка Heavy load	32–41
30–53	Средняя нагрузка Medium load	18–31
18–29	Легкая нагрузка Light load	11–17
0–17	Очень легкая нагрузка Very light load	0–10

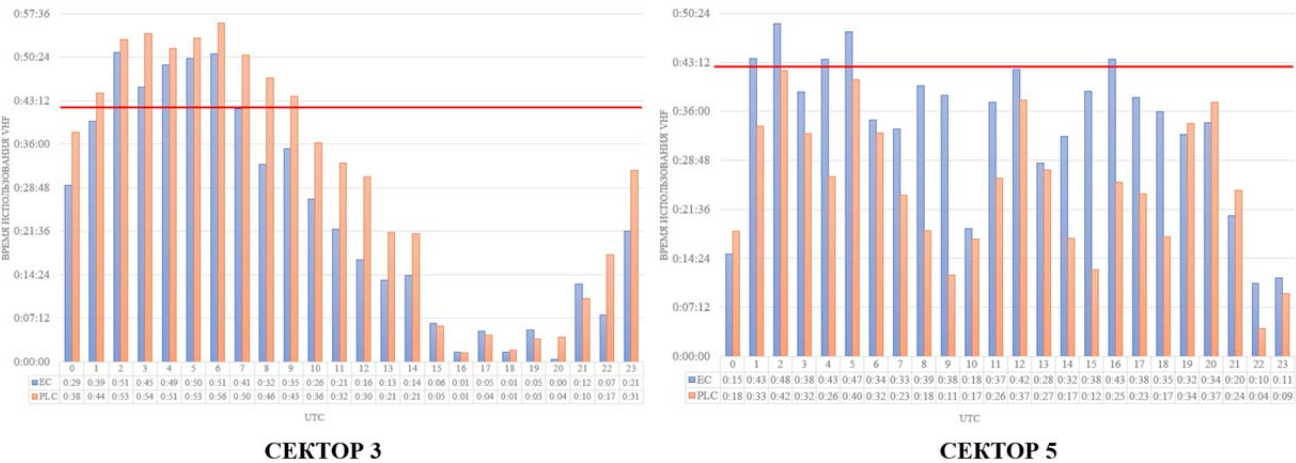


Рис. 3. Время использования VHF на позиции диспетчер радиолокационного контроля / диспетчер процедурного контроля сектор 3 и 5 1 июня 2023 г.
Fig. 3. VHF usage time at a Radar Controller position / Procedural Air Traffic Controller position, sector 3 and 5 on June 1, 2023

В настоящее время в мире проведено множество исследований по реорганизации ВП с целью оптимизации ПС и применения передовых алгоритмических моделей [1–9]. Кроме того, проводятся исследования по оптимизации маршрутов ОВД [10–14]. Однако во Вьетнаме в этих двух областях исследования почти не проводились, за исключением нескольких исследований авторов и их коллег [15–18]. Поэтому с целью повышения ПС, оптимизации ВП Вьетнама, предотвращения

перегруженности ВП Хошимина авторы планируют провести исследования по двум вышеуказанным направлениям.

Методы и методология исследования

Методы и методология исследования, использованные авторами в статье:

- статистический метод (сбор, обобщение и обработка информации и данных о коли-

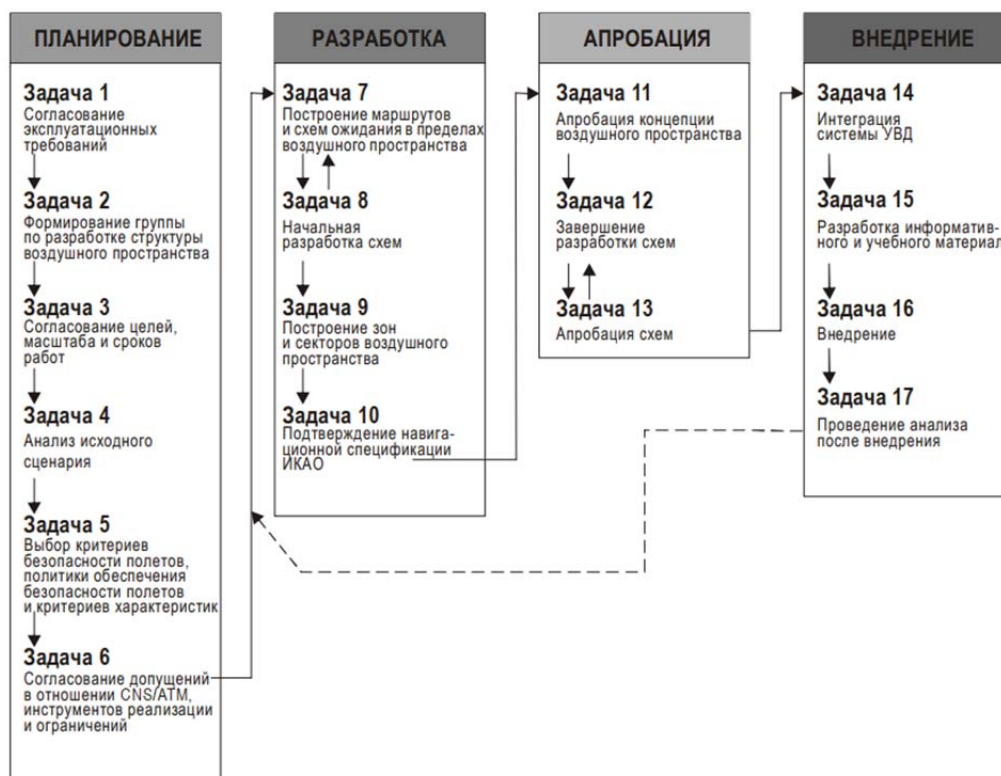


Рис. 4. Процесс разработки и внедрения концепции воздушного пространства
Fig. 4. Airspace concept development and implementation process

честве рейсов, выполняемых в ВП Хошимина);

- аналитический метод (анализ и оценка информации и документов для выявления проблем и теоретических основ как основы решения проблем);
- логический метод (основан на логических правилах и принципах рассуждать и делать выводы на основе доступной информации).

Результаты исследования и их описание

Общий процесс проектирования организации воздушного пространства

Согласно рекомендациям ИКАО, содержащимся в Doc 9992⁹, процесс проектирова-

ния и реализации воздушного пространства можно разделить на четыре этапа: планирование, проектирование, тестирование и реализация. Эти четыре этапа состоят из 17 отдельных шагов. Проектирование организации воздушного пространства часто инициируется в связи с возникающими эксплуатационными требованиями с целью повышения безопасности, ПС и эффективности эксплуатации, снижения воздействия на окружающую среду и т. д. (рис. 4).

Кроме того, по мнению М. Горбенко [1], некоторые показатели оценки эффективности ОрВП можно рассматривать при проектировании, например:

- показатель δ неортодромичности маршрутов движения для потоков ВС в зоне УВД;
- показатель Q общего расхода авиационного топлива всеми ВС в зоне УВД в течение анализируемого периода времени (месяца пик);
- показатель E ожидаемого количества потенциальных конфликтных ситуаций (ПКС) в точках схождения и пересечения маршру-

⁹ Doc 9992: Руководство по использованию навигации, основанной на характеристиках (PBN), при построении воздушного пространства // ИКАО, 2013. 56 с.

рутов в часы пик в зоне УВД с разбивкой по секторам УВД;

- показатель CR риска столкновений ВС (в единицах катастроф на летный час) в зоне УВД в целом и на отдельных элементах ВП (смежные эшелоны полета, параллельные маршруты, точки пересечения маршрутов и т. п.);
- показатель η общего количества секторов в анализируемой зоне УВД, при котором ОВД возможно без нарушения установленных нормативов ПС секторов УВД в часы пик;
- показатель N загруженности секторов УВД по количеству ВС одновременно на управлении в часы пик.

В качестве дополнительных показателей эффективности ОрВП при сравнении альтернативных вариантов ОрВП могут применяться:

- общее количество точек схождения и пересечения маршрутов движения ВС;
- количество точек, имеющих два или более сходящихся потоков с переменным профилем полета;
- количество точек, имеющих три или более секторов УВД, принимающих участие в формировании интервалов движения;
- количество и протяженность участков воздушных трасс двустороннего движения с переменным профилем полета;
- количество участков воздушных трасс или траекторий движения ВС, а также точек пересечения и схождения маршрутов, загруженность которых ВС в часы пик достигает порогового значения, близкого к их ПС;
- удельное количество точек пересечения и схождения маршрутов, в которых, по оценкам экспертов, сложность работы диспетчера в часы пик достигает уровня, когда при формировании интервалов расхождения ВС возникает угроза принятия решения о назначении неуставленного маршрута или неуставленной высоты (промежуточной между эшелонами полета (ЭП)).

После учета перечисленных выше факторов и оценки текущего состояния ВП

секторов ОВД РДЦ Хошимина авторы вносят предложения по проектированию рассматриваемого ВП с целью повышения его ПС.

Преимущества и недостатки существующих шести секторов в ВП РДЦ Хошимина

Сектор 2 и 6

В настоящее время сектор 2 в основном обслуживает исходящие потоки ВС, а сектор 6 обслуживает ВС, прибывающие в аэропорт ТСН. Такое разделение дает ряд преимуществ:

- сокращение времени радиообмена между авиадиспетчерами и пилотами;
- увеличение ПС ВП и взлетно-посадочной полосы (ВПП) аэропорта ТСН;
- оказание помощи ВС для выполнения оптимальных рабочих траекторий, прогнозирование методов захода на посадку и посадки, что повышает безопасность и эффективность выполнения полетов, устранение перегруженности аэропорта ТСН.

ОрВП секторов 2 и 6 сталкиваются с некоторыми конкретными недостатками, а именно:

- выполнение полетов государственной авиации на аэродромах Бьенхоа и Фанранг влияет на полеты в секторах 2 и 6;
- граница сектора 5 (верхний ЭП) и сектора 6 (нижний ЭП) является ЭП305, что усложняет координацию действий между диспетчерами этих секторов;
- ВП сектора 2 Буонметхуот (БМТ) достаточно напряженное, потому что в нем пересекаются 10 маршрутов ОВД, ВС часто меняют эшелон, поэтому нагрузка на авиадиспетчеров здесь очень высокая (рис. 5);



Рис. 5. Точка БМТ – место проведения сложной авиационной деятельности

Fig. 5. BMT point – the location for complex aviation operations

- возникновение потенциальных конфликтов с другими секторами ввиду ограничений в ВП и устаревших систем управления, что может привести к снижению безопасности полетов.

Сектор 1 и 5

Для сектора 1

Применение RNAV 5 на двух параллельных основных маршрутах (Q1–Q2) способствует увеличению ПС ВП сектора 1, обеспечивая безопасность, скоординированность и эффективность использования воздушного пространства (ИВП).



Рис. 6. Направления движения ВС в секторе 1 и 5 часто конфликтуют

Fig. 6. Aircraft movement direction in sectors 1 and 5 frequently conflict

В секторе 1 ВС, выполняющие полет с севера на юг, меняющие ЭП, могут вступить в

конфликт с другими ВС, выполняющими полеты с востока и северо-востока, которые снижаются для выполнения посадки в аэропорт Камрань. Например, прибывающее в аэропорт Камрань ВС снижается с ЭП320 или ЭП360 по маршруту ОВД L642 до ЭП100. В то же время ВС, прибывающие в другие аэропорты от маршрута N500 до точки DAMVO, также используют четные ЭП. В результате часто возникают ПКС между ВС (рис. 6).

Для сектора 5

Граница сектора 5 (верхний ЭП) и сектора 2 (нижний ЭП) является ЭП305 (расположенный между секторами 1, 2 и 6 (рис. 7)), что усложняет координацию действий между диспетчерами этих секторов.

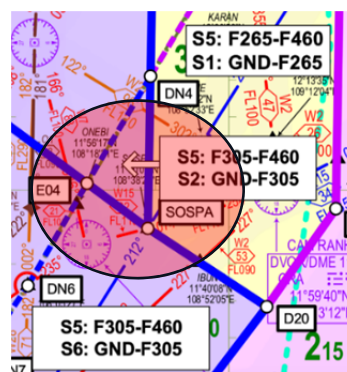


Рис. 7. Треугольная зона, затрудняющая координацию между секторами 1, 2 и 6

Fig. 7. This triangle area hinders the coordination between sectors 1, 2 and 6

Объем ВП сектора 5 составляет почти 40 % ВП Хошимина, поэтому у него относительно высокая ПС. В этом секторе применяется RNP10, что упрощает ОВД. Однако из-за обширной территории и удаленности от берега ИВП подвержено влиянию сложных метеорологических условий, ограниченной обзорности систем наблюдения ОВД и нестабильности работы навигационного оборудования.

Сектор 3 и 4

Для сектора 3

Объем ВП сектора 3 составляет около 20 % ВП Хошимина, в котором осуществля-

ется УВД ВС, вылетающими и прибывающими из шести внутренних аэропортов (ТСН, Кантхо, Ратьзя, Фукуок, Камау и Коншон) и РПИ Куала-Лумпур, Сингапур, Пномпень. В часы пик рабочая нагрузка на диспетчера УВД всегда высока.

В секторе 3 точка BITOD может считаться «горячей» точкой (рис. 8). Она является пересечением многих маршрутов ОВД, таких как L637, M765, M755, M753. ВС, которые следуют по этим маршрутам, могут вылетать или прибывать в аэропорты сектора или выполнять транзитные полеты в соседние страны, поэтому нагрузка на авиадиспетчеров в этом секторе всегда велика.

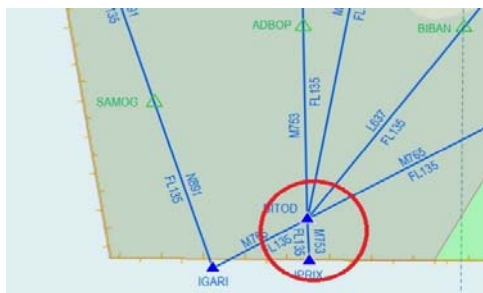


Рис. 8. Точка BITOD – точка с высокой плотностью воздушного движения в секторе 3

Fig. 8. Point BITOD – the high air traffic density point in sector 3

Многие аэропорты расположены близко друг к другу (аэропорты ТСН, Кантхо и Рать-

зя), что повышает вероятность возникновения ПКС при изменении ЭП ВС при выполнении взлетно-посадочных операций.

Предложения по разделению и реорганизации секторов в ВП РДЦ Хошимина

Перераспределение ВП секторов 3, 4 и создание сектора 7 в ВП РДЦ Хошимина Вариант 1

Сектор 7 будет отвечать за ВП, которое будет иметь форму, показанную на рис. 9.

Боковая граница будет представлять собой замкнутую ломаную линию, соединяющую точки: D15 – RUNOP – D18 – D19 – D25 – D26 – D27 – RG – D28 – вдоль границы ВП Хошимина и Пномпеня – D15.

Вертикальная граница будет распространяться от поверхности земли (воды) до ЭП255 включительно, исключая ВП ТМА ТСН и ВП TWR аэропортов в секторе.

После вышеуказанного разделения сектор 7 будет иметь границу, охватывающую все ВП аэропортов ТСН, Кан Тхо, Ратьзя, Ка Мау и Кон Сон (не включая ВП TWR вышеуказанных аэропортов). Это означает, что ответственность за УВД на низком ЭП255 (где ВС будут выполнять маневр перед по-

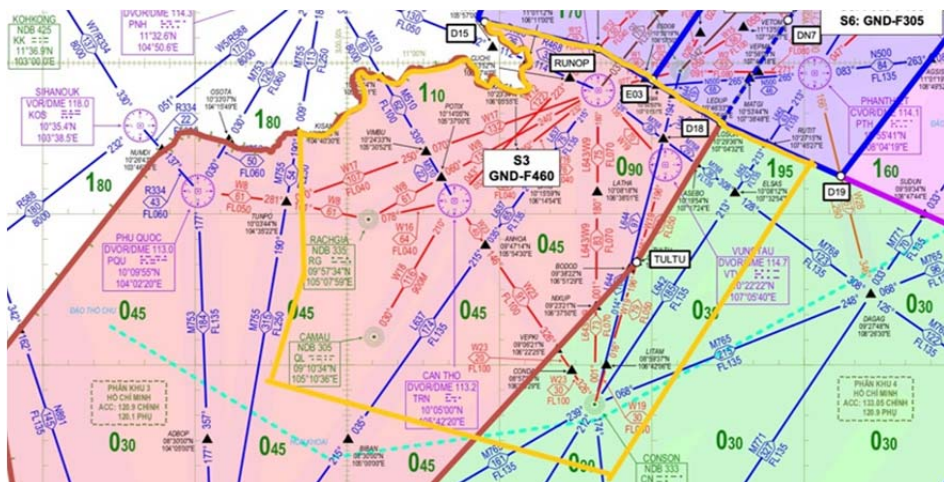


Рис. 9. План создания сектора 7 путем продольного разделения сектора 3 (желтой линией выделена граница ВП сектора 7)

Fig. 9. Plan for creating sector 7 by longitudinal dividing sector 3 (the yellow line marks the airspace boundary of sector 7)

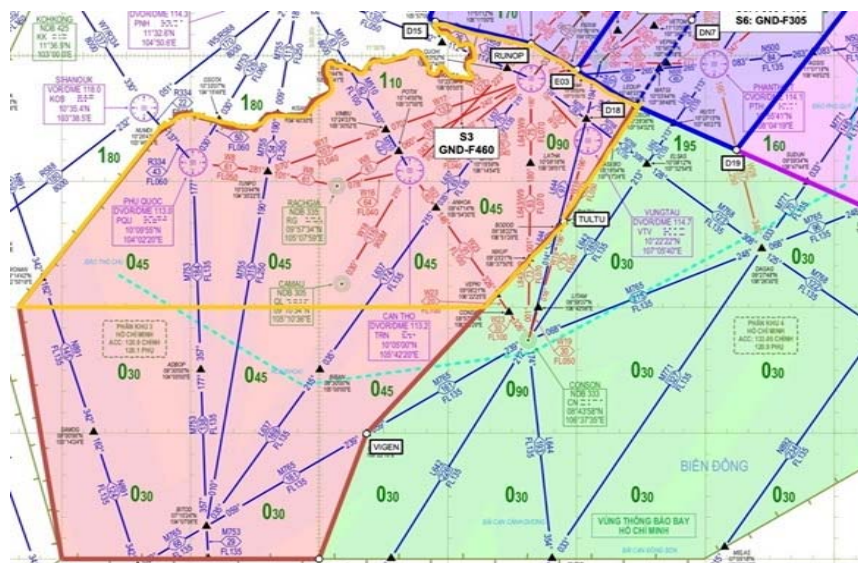


Рис. 10. План создания сектора 7 путем горизонтального разделения сектора 3 (желтой линией выделена граница ВП сектора 7)

Fig. 10. Plan for creating sector 7 by lateral dividing sector 3 (the yellow line marks the airspace boundary of sector 7)

садкой и после взлета) будет передана диспетчеру сектора 7, что снизит нагрузку на существующий сектор 3. В это время авиадиспетчеры сектора 3 будут контролировать:

- ВС, снижающие ЭП, чтобы приблизиться к аэропортам в этом секторе (в частности, ВП вокруг аэропорта Фукуок и в районе точки пересечения воздушных трасс ВТОД (рис. 8)), после чего ответственность за управление будет передана диспетчеру сектора 7;
- ВС, следующие транзитом по маршрутам ОВД в секторе.

ВП сектора 4, после перераспределения и создания сектора 7, будет разделено на два соответствующих относительно небольших ВП следующим образом:

- часть ВП сектора 7 авиадиспетчеры сектора 4 будут контролировать на низких ЭП (от ЭП255 до ЭП460 включительно);
- остальное ВП авиадиспетчеры сектора 4 будут контролировать от земли (воды) до ЭП460 включительно.

Вариант 2

Второй вариант деления будет выполняться горизонтально, а не продольно, как в первом варианте. Сектор 7 будет включать ВП вокруг аэропортов ТСН, Фу Куок и Кан

Тхо (рис. 10). Диспетчеры сектора 3 будут отвечать за ОВД в ВП, включая два основных района, которые бывают часто перегружены: ВП вокруг аэропорта Кон Сон и в районе точки пересечения воздушных трасс ВТОД.

Целью данного варианта ОрВП является выделение авиадиспетчеров сектора 7 для ОВД на низких ЭП, где ВС выполняют маневры для захода на посадку и после взлета в аэропортах сектора. Авиадиспетчеры сектора 3 будут отвечать за ОВД в зонах подхода и ВС, следующие транзитом по маршрутам ОВД в секторе, поэтому рабочая нагрузка будет распределяться относительно поровну между авиадиспетчерами этих секторов. В результате ВП сектора 7 будет распространяться от ЭП255 и ниже, а остальное ВП от ЭП255 и выше будет относиться к сектору 3.

При этом варианте ВП сектора 4 не изменится, однако авиадиспетчерам сектора 4 необходимо будет обратить внимание на координацию действий с авиадиспетчерами сектора 3 и вновь создаваемого сектора 7.

Перераспределение ВП сектора 5 и создание сектора 8 в ВП РДЦ Хошимина

Сектор 5 ВП РДЦ Хошимина имеет большую площадь, поэтому нагрузка на авиадис-



Рис. 11. План создания сектора 8 (красной линией выделена граница ВП сектора 8)
Fig. 11. Plan for creating sector 8 (the red line marks the airspace boundary of sector 8)

петчеров в этом секторе повышенная, что приводит к снижению эффективности ОВД. Кроме того, в выходные дни или вечерние часы в секторе 5 наблюдается высокая плотность воздушного движения, поэтому, по мнению авторов, разделение этого сектора на два меньших сектора повысит ПС ВП. В ближайшее время планируется реорганизовать сектор 5 ВП РДЦ Хошимина и сформировать сектор 8 в следующих целях:

- повысить эффективность ОрВП и уменьшить загруженность диспетчеров;
- увеличить ПС ВПП аэропорта ТСН;
- повысить качество ОВД в районном диспетчерском центре Хошимина.

В настоящее время сектор 5 имеет три основных потока воздушного движения, окончанием которых является посадка ВС в аэропортах ТСН и Камрань. Эти ВС выполняют полеты по маршрутам L642, Q15, N892. Для снижения нагрузки на диспетчеров, работающих в секторе 5, сектор 8 планируется реорганизовать, и в результате диспетчеры этого сектора будут отвечать за выполнение полетов ВС от эшелона ЭП255 и ниже с целью выполнения взлетно-посадочных операций в аэропортах ТСН и Камране. Граница вновь создаваемого сектора отображена на рис. 11. Целью сектора 8 является управление мало-высотными ВС, работающими на низком ЭП. Сектор 5 будет контролировать ВС с ЭП255

и выше в ВП ответственности сектора 8. За оставшуюся часть ВП будет нести полную ответственность сектор 5 от поверхности земли (воды) до ЭП460.

Результаты оценки варианта 1

Группа по исследованию ВП Вьетнама обратилась в Научно-исследовательский институт управления воздушным движением (Сингапур, ATMRI) для совместного исследования с использованием программы Fast-Time Simulation study¹⁰ с целью оценки предложенного варианта 1.

Для измерения показателей рабочей нагрузки данные полетов (1–7 июня 2019 г. и 1–7 декабря 2019 г.) были использованы для моделирования потока воздушного движения в модели AirTop¹¹ по умолчанию «Общей рабочей нагрузки диспетчера УВД». По этим показателям было проведено сравнение двух ОрВП: нынешней ОрВП «Базовый уровень» (действующие секторы 3 и 4) и новой ОрВП «Тестовый уровень» (предлагаемые секторы 3, 4 и 7). Результаты измерений показы-

¹⁰ Fast time simulation [Электронный ресурс] // NLR. URL: <https://www.nlr.org/capabilities/fast-time-simulation/#tab-id-1> (дата обращения: 11.05.2023).

¹¹ AirTop – одна из двух платформ, используемых в программе Fast-Time Simulation study (Имитационное исследование в ускоренном режиме) ATMRI для оценки ПС ВП.

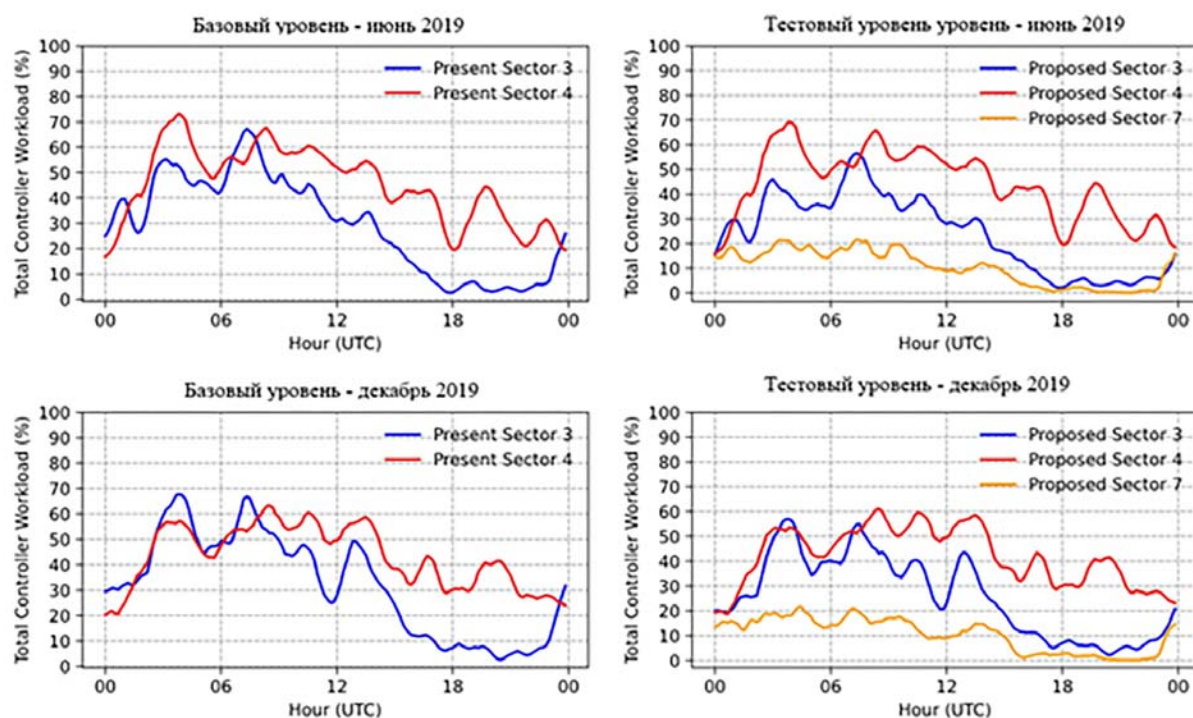


Рис. 12. Результаты оценки варианта 1 по модели Fast-Time Simulation study
Fig. 12. Evaluation results for variant 1 using the “Fast-Time Simulation study” model

вают, что количество операций передачи управления ВС между смежными секторами возросло:

- от базового уровня (в среднем 91 раз в день за июнь, 89 раз за декабрь);
- в текстовом уровне (в среднем 240 раз в день в июне, 203 раза в декабре).

Несмотря на увеличение операций передачи управления, общая рабочая нагрузка диспетчера УВД (с учетом дополнительной рабочей нагрузки, связанной с операциями передачи управления) была уменьшена на тестовом уровне, так что рабочая нагрузка диспетчера УВД для предлагаемого сектора 3 меньше, чем для существующего сектора 3, а для предлагаемого сектора 4 меньше действующего сектора 4 (рис. 12).

Также примечательно, что прибытие в среднем 91 рейса в день (в июне) или 89 рейсов (в декабре) в ТМА ТСН из этих южных секторов (Сингапура, Малайзии и т. д.) полностью переместится из действующего сектора 3 в предлагаемый сектор 7. В случае перегрузки при прибытии ВС в аэропорт ТСН диспетчерская смена сможет передать часть

рабочей нагрузки действующего сектора 3 на предлагаемый сектор 7. Диспетчеры УВД секторов 3, 4 и 7 этого варианта будут иметь больше времени для выполнения других задач (например, таких как: планирование изменения ЭП ВС, раннее обнаружение ПКС и т. д.). В результате ОВД в районе аэропортов и ВП региона, по мнению авторов, позволит обеспечить требуемую ПС и необходимый уровень безопасности полетов.

Недостатки и будущие направления исследований

Однако предложенные варианты секторизации основаны на фактических результатах нынешнего применения сектора 6 и в настоящем на практике они не были реализованы, поэтому оценка эффективности предлагаемого варианта практически не доказана. В будущем авторы планируют разработать и оценить результаты с помощью программы компьютерного моделирования для подтверждения эффективности вариантов.

Заключение

В статье авторами представлен новый вариант деления ВП РДЦ Хошимина путем реорганизации секторов 3, 4, 5 и формирования новых секторов 7 и 8. Этот вариант дает ряд преимуществ, таких как сокращение рабочей нагрузки авиадиспетчеров; повышение безопасности полетов; снижение перегруженности рассматриваемого ВП; снижение времени радиосвязи между авиадиспетчерами и пилотами; повышение ПС при пролете через ВП РДЦ Хошимина; повышение ПС ВПП аэропортов РДЦ Хошимина; улучшение координации между диспетчерами ВП РДЦ Хошимина и другими граничащими органами ОВД.

Помимо преимуществ, предлагаемые варианты создания новых секторов, безусловно, имеют некоторые недостатки, такие как увеличение количества авиадиспетчеров в смене; дополнительное время на подготовку новых авиадиспетчеров; повышение требований к инфраструктуре и технологиям.

Однако вышеуказанные недостатки относительно невелики и могут быть легко преодолены с течением времени, но в результате появятся такие преимущества, как увеличение ПС ВП, повышение безопасности полетов, устранение дисбаланса между секторами и устранение перегруженности ВП.

Таким образом, с быстрым развитием гражданской авиации во Вьетнаме неизбежной тенденцией является разработка программ по улучшению возможностей ОрВД и ВП с целью повышения ПС и оптимизации ВП. Развитие системы ОрВД будет способствовать повышению потенциала отрасли ГА в соответствии с ориентацией развития транспорта на период 2020–2030 гг. во Вьетнаме¹².

¹² Решение 318/QĐ-TTg об утверждении Стратегии развития транспортных услуг до 2020 года с перспективой до 2030 года. Постановления Премьер-министра № 355/QĐ-TTg от 25 февраля 2013 года.

Список литературы

1. **Горбенко В.М.** Методика автоматизированного проектирования организации воздушного пространства в регионе ОВД. М.: Госкорпорация по ОрВД, 2008. 55 с.
2. **Воробьев В.В., Харламов А.С.** Алгоритм предтактического планирования использования ВП // Научный Вестник МГТУ ГА. 2015. № 218. С. 135–141.
3. **Liang H., Zhang S., Kong J.** Study on characteristics and invulnerability of airspace sector network using complex network theory [Электронный ресурс] // Aerospace. 2023. Vol. 10, iss. 225. DOI: 10.3390/aerospace10030225 (дата обращения: 11.05.2023).
4. **Lee U.-J.** Airspace designs and operations for uas traffic management at low altitude / U.-J. Lee, S.-J. Ahn, D.-Y. Choi, S.-M. Chin, D.-S. Jang [Электронный ресурс] // Aerospace. 2023. Vol. 10, iss. 9. DOI: 10.3390/aerospace10090737 (дата обращения: 11.05.2023).
5. **Mykoniatis G.** Air traffic restructuring with airstreams / G. Mykoniatis, S. Moyo, I. Davidson, R. Lima de Carvalho, D. Dohy, F. Mora-Camino // 11th Triennial Symposium on Transportation Analysis conference (TRISTAN XI). Mauritius Island, 19–25 June, 2022. 4 p.
6. **Hirabayashi H., Brown M., Takeichi N.** Feasibility study of free route airspace over the north pacific [Электронный ресурс] // Journal of air transportation. 2022. Vol. 30, no. 2. DOI: 10.2514/1.D0291 (дата обращения: 11.05.2023).
7. **William G.C., Casey L.D., Jeremy C.S.** Effect of airspace characteristics on urban air mobility airspace capacity [Электронный ресурс] // AIAA – Session: Simulation for Air Traffic Management I. USA, 23–27 January 2023. DOI: 10.2514/6.2023-0545 (дата обращения: 11.05.2023).
8. **Arife A.M.** The evaluation of Istanbul airspace design from the perspective of complexity and safety [Электронный ресурс] // Journal of Air Transport Management. 2021. Vol. 97. DOI: 10.2514/6.2023-0545 (дата обращения: 11.05.2023).

9. **Gonzalo M., Laura C., Miquel A.P.** (2023). A STAM model based on spatiotemporal airspace sector interdependencies to minimize tactical flow management regulations [Электронный ресурс] // *Aerospace*. 2023. Vol. 10, iss. 10. DOI: 10.3390/aerospace10100847 (дата обращения: 11.05.2023).

10. **Künne J.-R., Strauss A.K.** The value of flexible flight-to-route assignments in pre-tactical air traffic management // *Transportation Research Part B: Methodological*. 2022. Vol. 160. Pp. 76–96. DOI: 10.1016/j.trb.2022.04.004

11. **Judith R.** Long range air traffic flow management with flight-specific flight performance / R. Judith, E. Asadi, D. Lubig, M. Schultz, H. Fricke // *Future Transportation*. 2022. Vol. 2. Pp. 310–327. DOI: 10.3390/futuretransp2020017

12. **Emani M.** Optimization of a route network in Dakar airspace: surface navigation / M. Emani, A. Coulibaly, S. Diagne, A. Haouba, A. Mby // *American Journal of Operations Research*. 2022. Vol. 12, no. 2. Pp. 64–81. DOI: 10.4236/ajor.2022.122004

13. **Марусин В.С.** Алгоритмы оптимизации маршрута полета летательного аппарата / В.С. Марусин, О.П. Пономарев, О.Г. Столяров, О.П. Темеров // *Вестник Концерна ВКО «Алмаз–Антей»*. 2019. № 1 (28). С. 98–104.

14. **Chen Yu.** General real-time three-dimensional multi-aircraft conflict resolution method using multi-agent reinforcement learning / Yu. Chen, Ya. Xu, L. Yang, M. Hu [Электронный ресурс] // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2023. Vol. 157. DOI: 10.1016/j.trc.2023.104367 (дата обращения: 11.05.2023).

15. **Neretin E.S., Phuong N.T.L., Quan N.N.H.** An analysis of human interaction and weather effects on aircraft trajectory prediction via artificial intelligence // XIX Technical Scientific Conference on Aviation Dedicated to the Memory of N.E. Zhukovsky (TSCZh). Russian Federation, Moscow, 2022. Pp. 85–89. DOI: 10.1109/TSCZh55469.2022.9802458

16. **Neretin E.S., Nguyen P., Nguyen M.** Using data-driven approach in 4D trajectory prediction: a comparison of learning-based models // *Proceedings of 10th International Confer-*

ence on Recent Advances in Civil Aviation, 2022. Pp. 125–133. DOI: 10.1007/978-981-19-3788-0_11

17. **Nguyen, N.H.Q., Luong, C.H., Truong, H.H.** Plan for reducing ATS Congestion in sectors in ACC HCM airspace // *Journal of the Vietnam Aviation Academy*. 2019. Pp. 40–45.

18. **Седиков Т.О., Комарова Д.М., Нечаев В.Н.** Проблемы развития CNS/ATM // *Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества: сборник тезисов докладов Международной научно-технической конференции, посвященной 100-летию отечественной гражданской авиации*. Москва, 18–19 мая 2023 г. М.: ИД Академии имени Н.Е. Жуковского, 2023. С. 469–470.

References

1. **Gorbenko, V.M.** (2008). Methodology for computer-aided design of airspace in the ATS region. Moscow: Goskorporatsiya po OrVD, 55 p. (in Russian)

2. **Orobiev, V.V., Kharlamov, A.S.** (2015). Algorithm for pre-tactical planning of airspace use. *Nauchnyy Vestnik MGTU GA*, no. 218, pp. 135–141. (in Russian)

3. **Liang, H., Zhang, S., Kong, J.** (2023). Study on characteristics and invulnerability of airspace sector network using complex network theory. *Aerospace*, vol. 10, issue 225. DOI: 10.3390/aerospace10030225 (accessed: 11.05.2023).

4. **Lee, U.-J., Ahn, S.-J., Choi, D.-Y., Chin, S.-M., Jang, D.-S.** (2023). Airspace designs and operations for uas traffic management at low altitude. *Aerospace*, vol. 10, issue 9. DOI: 10.3390/aerospace10090737 (accessed: 11.05.2023).

5. **Mykoniatis, G., Moyo, S., Davidson, I., Lima de Carvalho, R., Dohy, D., Mora-Camino, F.** (2022). Air traffic restructuring with airstreams. In: *11th Triennial Symposium on Transportation Analysis conference (TRISTAN XI)*. Mauritius Island, June 19–25, 4 p.

6. **Hirabayashi, H., Brown, M., Takeichi, N.** (2022). Feasibility study of free route airspace over the north pacific. *Journal of air*

transportation, vol. 30, no. 2. DOI: 10.2514/1.D0291 (accessed: 11.05.2023).

7. William, G.C., Casey, L.D., Jeremy, C.S. (2023). Effect of airspace characteristics on urban air mobility airspace capacity. In: *AIAA – Session: Simulation for Air Traffic Management I*. DOI: 10.2514/6.2023-0545 (accessed: 11.05.2023).

8. Arife, A.M. (2021). The evaluation of Istanbul airspace design from the perspective of complexity and safety. *Journal of Air Transport Management*, vol. 97. DOI: 10.2514/6.2023-0545 (accessed: 11.05.2023).

9. Gonzalo, M., Laura, C., Miquel, A.P. (2023). A STAM model based on spatiotemporal airspace sector interdependencies to minimize tactical flow management regulations. *Aerospace*, vol. 10, issue 10. DOI: 10.3390/aerospace10100847 (accessed: 11.05.2023).

10. Künnen, J.-R., Strauss, A.K. (2022). The value of flexible flight-to-route assignments in pre-tactical air traffic management. *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 160, pp. 76–96. DOI: 10.1016/j.trb.2022.04.004

11. Rosenow, J., Asadi, E., Lubig, D., Schultz, M., Fricke, H. (2022). Long range air traffic flow management with flight-specific flight performance. *Future Transportation*, vol. 2, pp. 310–327. DOI: 10.3390/futuretransp2020017

12. Emani, M., Coulibaly, A., Diagne, S., Haouba, A., Mby, A. (2022). Optimization of a route network in Dakar airspace: surface navigation. *American Journal of Operations Research*, vol. 12, no. 2, pp. 64–81. DOI: 10.4236/ajor.2022.122004

13. Marusin, V.S., Ponomarev, O.P., Stolyarov, O.G., Temerov, O.P. (2019). Algorithms for optimizing the aircraft flight route. *Vestnik*

Kontserna VKO “Almaz–Antey”, no. 1 (28), pp. 98–104. (in Russian)

14. Chen, Yu., Xu, Ya., Yang, L., Hu, M. (2023). General real-time three-dimensional multi-aircraft conflict resolution method using multi-agent reinforcement learning. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 157. DOI: 10.1016/j.trc.2023.104367 (accessed: 11.05.2023).

15. Neretin, E.S., Phuong, N.T.L., Quan, N.N.H. (2022). An analysis of human interaction and weather effects on aircraft trajectory prediction via artificial intelligence. In: *XIX Technical Scientific Conference on Aviation Dedicated to the Memory of N.E. Zhukovsky (TSCZh)*. Moscow, pp. 85–89. DOI: 10.1109/TSCZh55469.2022.9802458

16. Neretin, E.S., Nguyen, P., Nguyen, M. (2022). Using data-driven approach in 4D trajectory prediction: a comparison of learning-based models. In: *Proceedings of 10th International Conference on Recent Advances in Civil Aviation*, pp. 125–133. DOI: 10.1007/978-981-19-3788-0_11

17. Nguyen, N.H.Q., Luong, C.H., Truong, H.H. (2019). Plan for reducing ATS Congestion in sectors in ACC HCM airspace. *Journal of the Vietnam Aviation Academy*, pp. 40–45.

18. Sedikov, T.O., Komarova, D.M., Nechaev, V.N. (2023). Problems of CNS/ATM development. In: *Grazhdanskaya aviatsiya na sovremennom etape razvitiya nauki, tekhniki i obshchestva: sbornik tezisov dokladov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchennoy 100-letiyu otechestvennoy grazhdanskoy aviatsii*. Moscow: ID Akademii imeni N.Ye. Zhukovskogo, pp. 469–470. (in Russian)

Сведения об авторах

Нгуен Нгок Хоанг Куан, магистр, заведующий кафедрой, помощник по процедурам FPL и полетный диспетчер Вьетнамской авиационной академии, аспирант МГТУ ГА, quannnh@mail.ru.

Нечаев Владимир Николаевич, кандидат исторических наук, доцент, заведующий кафедрой управления воздушным движением МГТУ ГА, v.nechaev@mstuca.aero.

Information about the authors

Nguyen Ngoc Hoang Quan, Master, the Head of the Chair, Assistant on the FPL Procedures, Flight Dispatcher, Vietnam Aviation Academy, Postgraduate Student at the Moscow State Technical University of Civil Aviation, quannnh@mail.ru.

Vladimir N. Nechaev, Candidate of Historical Sciences, Associate Professor, the Head of the Air Traffic Management Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, v.nechaev@mstuca.aero.

Поступила в редакцию	11.11.2023	Received	11.11.2023
Одобрена после рецензирования	08.02.2024	Approved after reviewing	08.02.2024
Принята в печать	23.05.2024	Accepted for publication	23.05.2024

УДК 629.735.33:004.021

DOI: 10.26467/2079-0619-2024-27-3-67-80

Analysis of a balanced safety performance indicator as a key element of operational controlling in the ATS organization

R.A. Obratsov¹, V.D. Sharov²

¹*Central Interregional Territorial Administration of Air Transport of the Central Areas of the Federal Air Transport Agency, Ministry of Transport of the Russian Federation, Moscow, Russia*

²*Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia*

Abstract: Controlling is considered as a versatile modern focus of management. It is widespread in various fields of human activity but has not found direct application in civil aviation yet. Meanwhile, any aviation organization is subject to the general laws of management, therefore, controlling can and should find its application in the management of an aviation organization. Due to the particular importance of safety management considerations, controlling, as a management concept that allows you to control processes rather than results, fits seamlessly into the procedures of safety management systems (SMS) of aviation service providers. In particular, the development and monitoring of safety performance indicators (SPI) can be considered as a key element of operational controlling. In the SMS, the procedure to deal with the SPI, in conjunction with the risks mitigation procedure for safety, is an essential component of the entire system. To ensure the effectiveness of this procedure in the Air Traffic Service (ATS) organization, it is necessary to develop a balanced overall SPI. As the analysis showed, the indicators applicable in ATS organizations are focused on considering only incidents of the same “weight” and do not objectively reflect a level of safety assurance at ATS and its dynamics. The article presents a variant of developing a revised balanced indicator, which considers less significant deviations from the proper ATS system operation, errors and violations of personnel. The indicator was developed on the basis of the expert survey of ATS specialists. Monitoring and predicting of indicators are also important tasks of operational controlling. These problems can be solved by various methods, the applicability and comparative effectiveness of some of them are discussed in this article. All calculations are based on real data of one of the major ATS organizations of the Russian Federation.

Key words: operational controlling, air traffic service, aviation safety, expert assessments, predicting.

For citation: Obratsov, R.A., Sharov, V.D. (2024). Analysis of a balanced safety performance indicator as a key element of operational controlling in the ATS organization. Civil Aviation High Technologies, vol. 27, no. 3, pp. 67–80. DOI: 10.26467/2079-0619-2024-27-3-67-80

Анализ сбалансированного показателя безопасности полетов как ключевой элемент оперативного контроллинга в организации по ОВД

Р.А. Образцов¹, В.Д. Шаров²

¹*Центральное межрегиональное территориальное управление воздушного транспорта Центральных районов Федерального агентства воздушного транспорта. Министерство транспорта Российской Федерации, г. Москва, Россия*

²*Московский государственный технический университет гражданской авиации, г. Москва, Россия*

Аннотация: Контроллинг рассматривается как универсальное современное направление менеджмента. Он широко распространен в различных областях человеческой деятельности, но в гражданской авиации пока не нашел прямого применения. Между тем любое авиапредприятие подчиняется общим законам управления, следовательно, контроллинг может и должен найти свое место в управлении авиационной организацией. Ввиду особой важности для авиации

вопросов управления безопасностью полетов контроллинг как концепция менеджмента, позволяющая контролировать процессы, а не результаты, органично вписывается в процедуры систем управления безопасностью полетов (СУБП) поставщиков авиационных услуг. В частности, разработка и мониторинг показателей эффективности обеспечения безопасности полетов (SPI) может рассматриваться как ключевой элемент оперативного контроллинга. В СУБП процедура работы с SPI, наряду с процедурой управления рисками для безопасности полетов, является важнейшим компонентом всей системы. Для обеспечения эффективности этой процедуры в организации по обслуживанию воздушного движения (ОВД) необходимо разработать сбалансированный общий SPI. Как показал анализ, применяемые в организациях по ОВД показатели ориентированы на учет только инцидентов, причем с одинаковым «весом», и не отражают объективно уровень обеспечения безопасности полетов при ОВД и его динамику. В статье представлен вариант разработки нового сбалансированного показателя, который учитывает и менее значимые отклонения от нормального функционирования системы ОВД, ошибки и нарушения персонала. Показатель разработан на основе экспертного опроса специалистов по ОВД. Мониторинг показателей и их прогнозирование также являются важными задачами оперативного контроллинга. Эти задачи могут решаться различными методами, применимость и сравнительная эффективность некоторых из них обсуждаются в данной статье. Все расчеты выполнены на основе реальных данных одной из крупных организаций по ОВД Российской Федерации.

Ключевые слова: оперативный контроллинг, обслуживание воздушного движения, безопасность полетов, экспертные оценки, прогнозирование.

Для цитирования: Образцов Р.А., Шаров В.Д. Анализ сбалансированного показателя безопасности полетов как ключевой элемент оперативного контроллинга в организации по ОВД // Научный Вестник МГТУ ГА. 2024. Т. 27, № 3. С. 67–80. DOI: 10.26467/2079-0619-2024-27-3-67-80

Introduction

Controlling represents a modern advanced theoretical and practical focus of management which stipulates setting up an integrated system to facilitate the organization management aimed at coordinating the interaction of management systems and control of their effectiveness. A brief definition by the economists of repute E.A. Gomonko, T.F. Tarasova is given in [1]: “**controlling** is a unified management system of the process to achieve objectives and entity performance”.

If at the onset, controlling was interpreted as a system of entity profit management [2], then in the modern sense, the term comprises risk-management, quality management, the information support system, management of a set of main indicators and a system of implementation of the decisions made. A concept of controlling has been used in the western science and management practice since the 19th century. However, in Russia, it has not gone mainstream since it is associated with the term “control”. A word “controlling” derives from the English verb *to control*, but this verb has other meanings such as to manage, monitor, track, configure, regulate. The difference of controlling from control by [3] is as follows: **Control** is monitoring perfor-

mance upon expiration of the term. **Controlling** is a management concept that allows us to supervise processes rather than performance, helps to define a phase of the process where a disruption event took place, obtain feedback, and make adjustments in due time.

According to Professor A.I. Orlov [4], currently, controlling principles are, in fact, applied quite on a large scale. The issues of controlling were considered, at least, in 40% of the reports at the International Conferences of the Russian Academy of Sciences of the Institute of Control Sciences “Management of the Evolution of Large-Scale Systems”, which have been held since 2013. The authors [5] assert that successfully developing global major companies have pursued the concept of controlling for a long time, even though do not use this term.

The literature on the different aspects of controlling is extensive. The Scientific and Educational Center “Controlling and Managerial Innovations” works in the Bauman Moscow State Technical University under the charge of Professor S.G. Fal’ko and Professor A.I. Orlov <http://cmi.bmstu.ru>.

According to [4], **strategic controlling** is developing objectives and focal points in the light of the medium and long term, proposing ways to attain objectives and solve problems (principle “do the proper thing”). **Operational**

controlling deals with timely arrangements within a limited span of time to eliminate deviations of actual indicators from planned ones and fulfils a short-term prediction (principle “do the thing in a right way”).

Management of an aviation entity obeys the objective management laws, which means the controlling concept is implemented in its activity.

1. Application of controlling methods in aviation organization safety management

In various branches of production, controlling examples of different safety aspects can be encountered.

A concept “risk-controlling”, integrating risk management into all fields and processes of management, is formulated in the entity policy of risk management [6].

The controlling methods are employed in the industrial safety management. The article [7] proposes the system of operational controlling indicators of safety in the oil and gas company. It encompasses an analysis of incidents, costs on preventive measures to avoid accidents and incidents, penalty sums, occupational health service. The point assessment of an indicator and their summation to form an overall coefficient is stipulated.

The article [8] proposes to include issues to ensure economic, transport, technological, and informational safety for the defense industry enterprise into controlling.

Safety management is an integral part of a general process of the aviation organization management and implemented by the Safety Management System (SMS). Let us specify the article [9] as an example of embedding safety issues into the system of controlling. The author, speaking about “the key elements of the airline risk-controlling”, includes them as components into the system of safety performance. However, without being familiar with the SMS principles, he includes such elements as “drawing up a list of abusive passengers” as well as “expansion of a number of partners as part of code-sharing” into the system.

Issues of ensuring security (protection from unlawful interference) are also important for an operator. Moreover, as stated above, controlling incorporates the quality control system as well. Hence, within the framework of the controlling concept, setting up of the integrated system of safety management, which encompasses the SMS, the quality management system, as well as the systems of security and occupational safety management, can be implemented. It complies with the best practices in Civil Aviation and will allow for the allocation of the aviation organization resources to be optimized.

For an aviation organization, the structure of controlling as an integrated system of management, considering a general scheme from [10, 11], can be represented in the form in Figure 1. The SMS elements that fit seamlessly into this structure are highlighted.

An assessment and monitoring of the Safety Performance Indicators (SPIs) is one of the two major SMS constituents. The development of a balanced SPI and its monitoring are substantial considerations of operational aviation organization controlling including ATS organization. The development of the prediction technique for safety performance is also of interest for operational controlling.

2. Forming a balanced Safety Performance Indicator in an Air Traffic Service organization

Confirmation that the safety of the aviation organization is maintained at an acceptable level is ensured by the implementation of component 3 of SMS called “Safety assurance”.

Element 3.1 Safety performance monitoring and measurement is the core of this component.

The given analysis showed that relative indicators of flying hours per one aviation incident and the number of aviation incidents per 100000 flight hours are used to assess safety performance at the level of the State ATM Corporation and its branches. For this purpose, major aviation incidents, which are considerably more serious in terms of severity, are not emphasized from a total number of aviation incidents. Con-



Fig. 1. The general structure of controlling in an aviation organization

установление целей – establishing targets; планирование и управленческий учет – planning and managerial accounting; управление и обмен информацией – data management and sharing; риск-менеджмент – risk-management; контроллинг – controlling; выработка рекомендаций – issuing recommendations; анализ отклонений – analysis of deviations; управление качеством – management of quality; контроль – control; мониторинг показателей – indicator monitoring; стратегические риски – strategic risks; экономические риски – economic risks; финансовые риски – financial risks; риски производственной безопасности – risks for industrial safety; риски для безопасности полетов – risks for aviation safety; риски для авиационной безопасности – risks for air security; риски информационной безопасности – risks for data security; экологические риски – ecological risks; экономические показатели – economic indicators; показатели производственной безопасности – indicators of industrial safety; показатели авиационной безопасности – air security indicators; показатели безопасности полетов – aviation safety indicators; показатели информационной безопасности – data security indicators; показатели экологической безопасности – indicators of ecological safety

sidering all aviation incidents with the equal weight, while calculating the SPI, distorts an idea about the safety level. On the other hand, if aviation incidents are not available over the reporting period, the SPI will amount to zero in an entity which formally indicates an ideal status quo with safety performance. But, at the same time, the same organization can have quite a considerable number of discrepancies according to objective control data and/or findings during Rostransnadzor. The data is not considered at all

in the currently applicable SPI of the SMS organization.

A similar problem in the SMS of other air entities is resolved by the introduction of additional SPIs. For example, the air entities (Aeroflot, S7, etc.) use “an integral indicator” developed by the Chair of Aviation Safety of the Moscow Civil Engineering Institute (currently the Moscow State Technical University of Civil Aviation) [12] in the 80s last century. While calculating an integral indicator, not only aviation events (aircraft occurrences, aviation incidents, and work-related incidents)

can be interpreted as the term “event”, but also precursors, i.e., facts affecting safety performance but not having a status of an aviation event. The indicator is based on an event attributed to one of the “problematic situations” which can be acceptable for an aviation organization but interpreted with difficulty for an ATS organization.

Another example of such an indicator is the indicator of “a based-risk event” (EBR), proposed by the International Group ARMS [13]. This method assesses each event similar to an aviation incident or a precursor. It is adopted based on expert answers to two questions:

1. How close were we to an aviation accident?
2. What damage would occur while developing an event?

Answers are processed using a special matrix to obtain a quantitative assessment of the indicator “classifier of event risk” (ERC) in conditional units from 0 to 2500. The method is employed in the air entities SAS, Finnair, etc.

A simplified variant of an assessment, focused on not significant events, is proposed by S.A. Tolstykh [14] to use aerodrome operators in the SMS. The calculation of “a coefficient of risk for deviations and events” (KPOS) is carried out under a formula

$$KPOC_i = \frac{0,25n_C + n_B + 2n_A}{N_i}, \quad (1)$$

where $KPOC_i$ – the SPI in the i -period (month, week);

n_A , n_B and n_C – the number of events by risk categories (A, B, C).

But in the formula (1), the ratio between weights is expressed as 1:4:8, such proportions can be applied only for insignificant and medium incidents by severity.

Thus, the indicators under consideration cannot be recommended as a balanced SPI for an ATS organization.

On the assumption of the conducted research of the existing structure of deviations from regulations, violations, and events under ATS, it is proposed to introduce a 4th level indicator $K_{БП-1}$ as the balanced SPI per 10000 served flights over k -th span of time:

$$K_{БП-k} = \frac{C_1n_1 + C_2n_2 + C_3n_3 + C_4n_4}{N_k} \times 10000, \quad (2)$$

where n_1 , n_2 , n_3 , n_4 – the number of recorded events in an organization over k -th span of time by groups of severity (gr. 1 – minimum severity, gr. 4 – maximum one);

C_1 , C_2 , C_3 , C_4 – the weight coefficients for deviations and events of the group (tab. 1).

Fitting of weight coefficients using the Delphi method

Fitting of weight coefficients in the formula (2) is carried out based on the expert survey. In order to solve a problem, an expert survey, developed in the late 1950s in the USA [14, 15], was executed using the Delphi method. A unique feature of the method is that experts make assessments irrespective of each other in the first phase, hereafter, each expert gets familiar with group assessment results, and another round of assessing is executed. The recommendations concerning the procedure by the Delphi method are stated in the Russian National Standard¹, and voluminous relevant literature is provided. There is no theoretical substantiation of the method, but it is largely used to formulate expert opinions while solving complex formalizable problems.

In conformity with the principles of the method, a group of 10 experts was set up in the preliminary phase, maintaining confidentiality. Questionnaires were drawn up, and the first round of the survey was conducted. In the second phase, the evaluation was carried out. In the first phase, the most considerable discrepancies occurred among experts 3, 4 and 6 for minimum significance, and among experts 3 and 5 for deviations. Experts referred to insufficiently clear understanding of the problem. During another survey, experts 3, 4 and 6 proposed amendments, and these assessments were recognized ultimate (tab. 2).

¹ The State Standard R -58771-2019. (2020). Risk management. Risk assessment technologies. Moscow: Standartinform, 90 p. (in Russian)

Table 1

Criteria for assigning deviations and events to severity groups

№	Severity	Examples	C
1	Minimum	Insignificant deviations in the ATC work from the technology or from the radiotelephony phraseology, insubstantial errors while transmitting information to a flight crew under inspections or FDR/CVR data. Radio communication equipment, navigation aids failures, monitoring with the timely changeover switching for backup. Complaints of flight crews about the radio communication equipment operation which have not caused flight plan updating or the go-around procedure	C ₁
2	Medium	Crude ATC errors in the technology of work or in the radiotelephony phraseology which have not caused an aviation event but recorded as a potential traffic conflict by FDR/CVR data corrected by a flight crew or the adjacent en-route control. Radio communication equipment, navigation aids failures and monitoring which complicated the ATC work or the flight crew work (according to flight crew reports) but not attributed to an aviation event	C ₂
3	Hazardous	Aviation incidents. Separation violation and near-miss not attributed to serious incidents. Radio communication equipment, navigation aids failures and monitoring not attributed to serious incidents	C ₃
4	Critical	Serious aviation incidents. Hazardous proximity of aircraft. Radio communication equipment, navigation aids failures and monitoring attributed to serious incidents	C ₄

Table 2

The results of expert assessments of weight coefficients

Expert	Expert assessments				Σ	Assessment summarizing to the unified scale				Σ
	C _{i1}	C _{i2}	C _{i3}	C _{i4}		C _{i1-s}	C _{i2-s}	C _{i3-s}	C _{i4-s}	
1	1	4	7	12	24	0.04	0.17	0.29	0.50	1.00
2	1	5	10	15	31	0.03	0.16	0.32	0.48	1.00
3	1	4	6	12	23	0.04	0.17	0.26	0.52	1.00
4	1	3	6	10	20	0.05	0.15	0.30	0.50	1.00
5	1	3	4	6	14	0.07	0.21	0.29	0.43	1.00
6	2	6	10	15	33	0.06	0.18	0.30	0.45	1.00
7	1	5	8	10	24	0.04	0.21	0.33	0.42	1.00
8	1	3	6	10	20	0.05	0.15	0.30	0.50	1.00
9	1	4	8	10	23	0.04	0.17	0.35	0.43	1.00
10	1	3	7	10	21	0.05	0.14	0.33	0.48	1.00
Average values MO(C _{jM})						0.048	0.172	0.308	0.472	
Normalized averages C _{jN}						1.000	3.573	6.384	9.781	
Weight coefficients C _j						1	4	6	10	
Mean-root-square deviations						0.011	0.024	0.026	0.036	
Variation coefficients						0.228	0.139	0.085	0.076	

Expert coordination was assessed by a coefficient of variation as good. Transferring of the original expert point assessments C_{ij} to the assessments in the unified scale C_{ij-s} were conducted using the formula

$$C_{ij-s} = \frac{C_{ij}}{\sum_{j=1}^4 C_{ij}}.$$

Normalized average values C_{jN} of each weight were calculated:

$$C_{jN} = \frac{C_{jM}}{C_{1-s}},$$

where C_{jM} – the average value of weight in the unified scale for the j -th coefficient,

$C_{1-s} = 0,048$ – the weight value for the coefficient C_1 in the unified scale.

Plugging findings into the formula (1), we will derive a final formula to calculate the SPI for an ATS organization.

$$K_{\text{БП-}k} = \frac{n_1 + 4n_2 + 6n_3 + 10n_4}{N_k} \times 10000. \quad (3)$$

According to the formula (3), calculations $K_{\text{БП-}k}$ must be made in an ATS organization every month individually for the ATS (air traffic controllers) as well as for the service of radio-technical support (for engineers and technicians) and shown on a screen.

3. Methods of SPI monitoring during operative controlling in an ATS organization

An analysis of deviations in the management system is one of the most major objectives of operative controlling [5]. While monitoring the process of varying controlled values, deviations from planned values are revealed. In this case, it is necessary to decide if these deviations are within tolerance or their availability cannot be neglected, and the correction is required. It is fully referred to the SPI.

The following basic types of monitoring are used:

- direct monitoring of an indicator;
- methods of a simple and weighted moving average;
- method of Shewhart checklists and cumulative sums.

While direct monitoring and monitoring by means of a moving average, a targeted level (Safety Performance Target (SPT) and two threshold levels (triggers), calculated by data from previous years in accordance with the methodology recommended by the ICAO in the Safety Management Manual the 3^d edition², considering the amendment, recommended by our article [16] are distributed on the screen.

The diagram of direct monitoring shows the excess of triggers but has a sawtooth view and is not sufficiently informative to identify tendencies. For the purpose of smoothing temporal series, **the methods of moving average** [17], which can be used for the SPI, are successfully employed. During a span of smoothing the 1 quarter (3 months) calculation of the indicator for the r -th month for a moving average K_C^i is conducted according to the formula:

$$K_C^r = \frac{w_{r-2}K_{\text{БП}}^{r-2} + w_{r-1}K_{\text{БП}}^{r-1} + w_r K_{\text{БП}}^r}{3},$$

where $K_{\text{БП}}^{r-2}$, $K_{\text{БП}}^{r-1}$ and $K_{\text{БП}}^r$ – the indicators over 3 previous months;

w_{i-2}, w_{i-1}, w_i – the weight coefficients, in addition, $w_{r-2} + w_{r-1} + w_r = 3$.

For a simple average $w_{r-2} = w_{r-1} = w_r = 1$, and for a weighted one, they are selected so that recent events could be considered to a greater extent than remote by time.

Table 2 gives actual data of one of the ATS organizations of the Russian Federation over 2023, Figure 2 demonstrates the diagrams of direct monitoring $K_{\text{БП}}$ as well as a simple and weighted moving average ($w_{r-2} = 0.75$, $w_{r-1} = 1$, $w_r = 1.25$) by data.

The moving average methods make it possible to obtain a detailed picture of variation $K_{\text{БП}}$, particularly under its abrupt fluctuations. Each value represents a mean indicator over a period

² Doc. 9859: Safety Management Manual (SMM) (2013). 3 rd ed. ICAO, 318p.

Table 3

Data from one of the ATS organizations for 2023

Level of the events	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.
1	0	3	0	1	9	6	8	23	0	0	0	14
2	12	15	13	22	25	20	16	15	22	17	21	14
3	0	1	0	1	2	1	1	3	0	0	0	2
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Served aircraft	43747	38947	44589	45522	51739	55954	59558	61342	61897	57930	55890	46122
Aviation safety co-efficient	10.97	17.72	11.66	20.87	23.39	16.44	13.10	16.47	14.22	11.74	15.03	17.78
S	-1.93	2.89	1.65	9.62	20.11	23.65	23.84	27.41	28.73	27.57	29.69	34.57

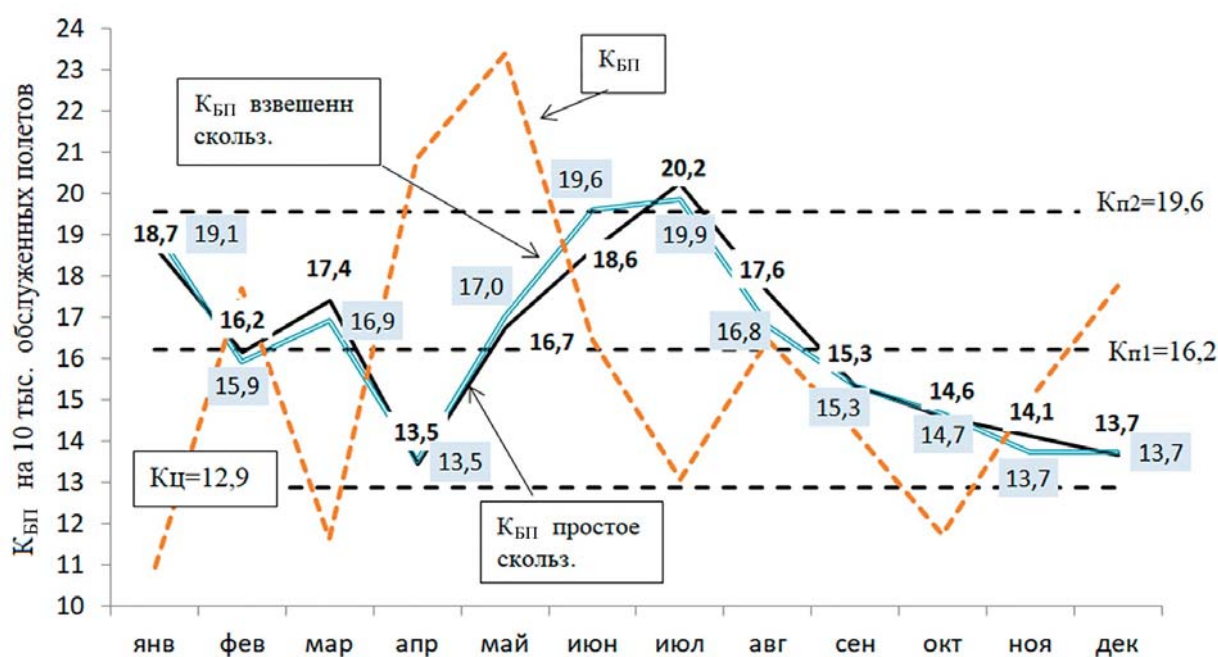


Fig. 2. Monitoring the SPI of the ATS organization in 2023 by various methods

of smoothing. The method of a simple and weighted moving average is employed in some airlines for monitoring various safety performance indicators [18].

The methods of Shewhart checklists and the checklists of cumulative sums [19] are massively used to reveal deviations of product parameters

from their target values in controlling of industrial enterprises. In the airline management, there is also experience of applying checklists [4] while solving problems of one of the controlling types.

The most appropriate for problems of the SPI assessment is the “**cumsum method**”, founded

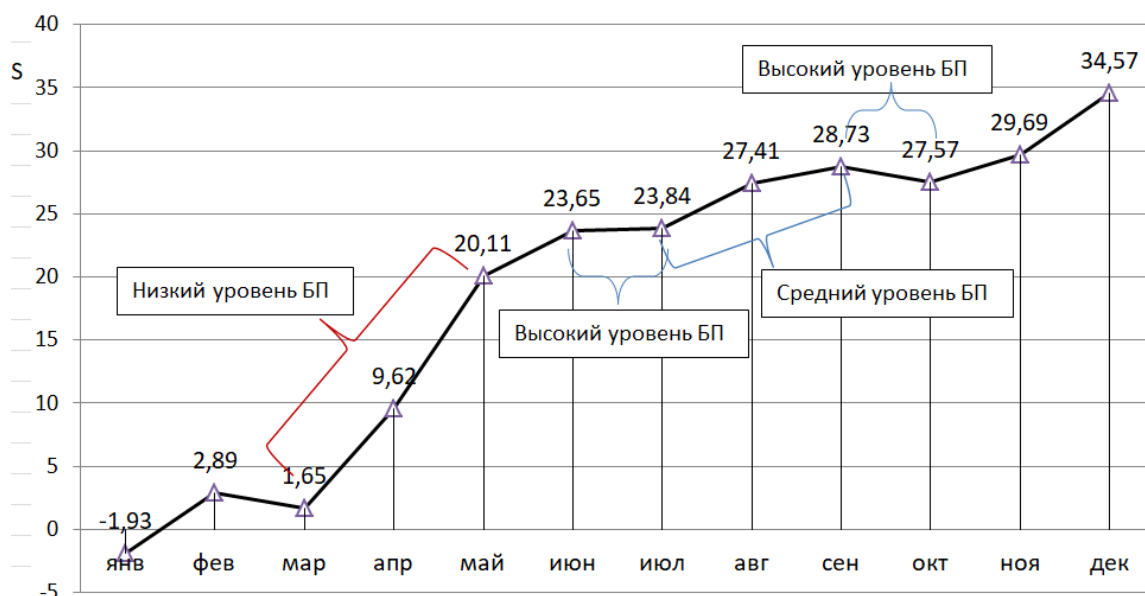


Fig. 3. A map of the cumulative amounts of the $K_{БП}$ indicator of one of the ATS organizations in 2023
высокий уровень БП – the high level of aviation safety; низкий уровень БП – the low level of aviation safety; средний уровень БП – the medium level of aviation safety

on considering cumulative sums, recommended by the State Standard R ISO 7870-4-2013³.

The formula of calculating cumulative sums in conformity with [19] in agreed notations is represented as:

$$S_r = \sum_{i=1}^r (K_i - K_u) = S_{r-1} + (K_r - K_u). \quad (4)$$

The diagram in Figure 3 is built according to data from Table 2 based on the calculations under the formula (4). The graph shows variations of a level of safety performance respectively the standard-compliant level, which is relevant to 0. The method is more illustrative under an array of data and frequent observations.

For a quantitative assessment of worsening the indicator, the State Standard recommends establishing special patterns, but they are acceptable to assess imbalance in the technological process or discrepancy of product quality, when the assessed parameter variation is less than 10%.

Moreover, these patterns respond to deviations from a target downwards, which would mean “too high level of safety performance” for $K_{БП}$. Thereafter, the patterns are not relevant for the SPI, and an inclination of a graph curve may be a criterion. Similarly, to imbalance, when an inclination reaches 45° and greater, it is regarded that a process is out of control, and troubleshooting is required. When deviations are accidental at small angles, adjustment is sufficient. When the graph line is horizontal or has a negative inclination, the SPT is maintained, at least.

4. Prediction of the SPI

Prediction of the SPI in aviation activity has always been of great importance, which is also a controlling problem. Let us consider two prediction methods: the method founded on exponential data smoothing and the Holt’s method.

The method of exponential smoothing is employed to form a prediction for a single period ahead. The formula to employ the method from [20] in the agreed notation:

$$K_{r+1}^n = \alpha K_r^\phi + (1 - \alpha)U, \quad (5)$$

³ The State Standard R ISO 7870-4-2013 Statistical Methods (2013). Checklists. Ch. 4. Checklists of cumulative sums. Moscow: Standartinform, 52 p. (in Russian)

Table 4

Actual data for 2022 and predicted values ($K_{\text{БП}}$) in 2023

	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.
K_r^ϕ	19.09	14.70	16.27	13.52	13.61	17.76	5.50	13.90	10.32	18.68	14.00	23.52
Actual data and the prediction for 2023. MAPE = 20,67%												
K_r^ϕ	10.97	17.72	11.66	20.87	23.39	16.44	13.10	16.47	14.22	11.74	15.03	17.78
K_r^π	16.48	14.22	15.33	14.36	15.80	16.48	15.74	15.28	15.66	15.39	15.03	15.30
ε_r	0.50	0.20	0.32	0.31	0.32	0.00	0.20	0.07	0.10	0.31	0.00	0.14

K_r^ϕ – the actual value of the indicator; K_{r+1}^π – the predicted value of the indicator; ε_r – the error

where K_{r+1}^π – the predicted value of the indicator;

K_r^ϕ – the actual value of the indicator over the previous period;

α – the smoothing parameter;

U – the exponentially weighted average.

[20] recommends calculating the parameter $\alpha = \frac{2}{n+1}$, where n – the number of observations within a smoothing range. Let us conduct the prediction $K_{\text{БП}}$ for each month of 2023 taking into consideration data over 12 months of 2022. Therefore, while calculating the prediction by months of 2023, α will change from $\alpha = \frac{2}{12+1} = 0.167$ to $\alpha = \frac{2}{24+1} = 0.008$.

The parameter U is calculated as an average value of the previous period of observation, i.e., while calculating the prediction by months of 2023, U will also change from average over 12 months of 2022, when predicting $K_{\text{БП}}$ for January 2023, to average over 23 months, when predicting $K_{\text{БП}}$ for December 2023. Calculation data is summarized in Table 4. Each line calculates relative operational margins of the prediction $\varepsilon_r = \left| \frac{K_r^\phi - K_r^\pi}{K_r^\phi} \right|$, which are used to calculate an average operational margin MAPE (*Mean Absolute Percentage Error* [21]):

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon_r \cdot 100. \quad (6)$$

The prediction by [20] is considered excellent under $10\% > MAPE$, good under $10\% < MAPE < 20\%$ and satisfactory under $20\% < MAPE < 30\%$, i.e., the prediction is quite close to a good level. **Predicting a level of safety performance using the Holt's method** by [20] is carried out by means of exponential smoothing considering a trend.

Values of exponentially smoothed series $K_r^{\pi c}$ are calculated according to the formula

$$K_r^{\pi c} = \alpha K_{r-1}^\phi + (1 - \alpha)(K_{r-1}^{\pi c} - T_{r-1}), \quad (7)$$

where T_{r-1} – the trend value over the previous period.

For the first period, let us assume $K_r^\pi = K_r^\phi$, further, the calculation is conducted considering a trend:

$$T_r = \beta) + (1 - \beta T_{r-1}, \\ K_r^\pi = K_{r-1}^\pi + T_r, \quad (8)$$

where β – the coefficient of trend smoothing, α and β are selected within a range from 0 to 1.

Initially let us assign $\alpha = \beta = 0.5$. Calculation data is summarized in Table 5.

Prediction accuracy can be increased by the function MS Excel “Search for solution”⁴. Optimal fitting of coefficients $\alpha = 0.16$ and $\beta = 0.65$ is provided, which enabled us to minimize a tar-

⁴ Manual on the use of the “Search for solution” MS Excel function. microexcel.ru. Available at: <https://microexcel.ru/funkczija-poisk-resheniya/?ysclid=lqtb1wapdo508027718#poisk-resheniya-exc-1> (accessed: 11.03.2024).

Table 5

Initial prediction by the Holt method. MAPE = 20.64%

	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.
K_r^ϕ	10.97	17.72	11.66	20.87	23.39	16.44	13.10	16.47	14.22	11.74	15.03	17.78
$K_r^{\pi c}$	10.97	14.35	12.16	16.64	18.96	16.59	14.88	16.12	15.08	13.63	14.80	16.23
T_r	0.00	1.69	-0.25	2.12	2.22	-0.08	-0.89	0.17	-0.43	-0.94	0.11	0.77
K_r^π	10.97	10.97	16.03	11.91	18.75	21.17	16.52	13.99	16.30	14.65	12.68	14.92
$K_r^\phi - K_r^\pi$	0.00	6.75	-4.37	8.96	4.64	-4.73	-3.42	2.48	-2.08	-2.91	2.35	2.86
ε_r	0.00	0.38	0.38	0.45	0.20	0.29	0.26	0.15	0.15	0.25	0.16	0.16

Table 6

Prediction by the Holt's method with coefficient optimization. MAPE = 15.29%

	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.
K_r^ϕ	10.97	17.72	11.66	20.87	23.39	16.44	13.10	16.47	14.22	11.74	15.03	17.78
$K_r^{\pi c}$	10.97	12.03	11.39	13.02	13.81	13.50	13.35	13.89	13.67	13.39	13.81	14.26
T_r	0.00	0.69	-0.17	1.00	0.86	0.10	-0.06	0.33	-0.03	-0.19	0.20	0.36
K_r^π	10.97	10.97	12.72	11.22	14.02	14.68	13.60	13.29	14.22	13.64	13.20	14.01
$K_r^\phi - K_r^\pi$	0.00	6.75	-1.06	9.65	9.37	1.76	-0.50	3.18	0.00	-1.90	1.83	3.77
ε_r	0.00	0.38	0.09	0.46	0.40	0.11	0.04	0.19	0.00	0.16	0.12	0.21

get function MAPE and obtain the prediction with MAPE = 15.29% (tab. 6).

Conclusion

The implementation of the controlling principles and philosophy into aviation activity will help enhance management efficiency and, in perspective, to generate an integrated system of production, safety, and quality management.

Calculation and monitoring of quantitative efficiency indicators to provide the SPI, as well as their prediction can be regarded as operative controlling considerations.

Currently, the SPIs applicable in ATS organizations do not reflect objectively a safety factor since:

1. Only aviation events are considered without assessing their severity;

2. Errors and violations of established rules and procedures by personnel, affecting safety performance which have not caused to an aviation event yet are not considered. In order to eradicate the defect, a balanced SPI has been developed relied on the expert survey with the assessment of the consistency of expert opinions.

The advantages of the SPI monitoring are shown by the methods of moving average and cumulative sums compared to direct monitoring.

Drawing on actual data of one of ATS organizations, the potential of short-term predicting the SPI, using the method of exponential smoothing and the Holt's method, was demonstrated. It is shown that while calculating by the Holt's method, minimization of a target function, by fitting optimal coefficients using the function MS Excel "Search for solution", enables us to substantially improve the reliability of the prediction.

The proposed methods of calculation, monitoring and predicting SPI do not require additional software and expert knowledge, therefore, can be implemented in any aviation entity within the framework of its SMS.

References

1. **Gomonko, E.A., Tarasova, T.F.** (2010). Enterprise cost management: Textbook. Moscow: KnoRus, 320 p. (in Russian)
2. **Mann, R., Mayer, E.** (1992). Controlling for beginners. Translation from German. Moscow: Finansy i Statistika, 208 p. (in Russian)
3. **Potylitsina, E.A.** (2011). Genesis of the concept of “controlling”. *Ekonomika, upravleniye i uchet na predpriyatii*, no. 2. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/genezis-ponyatiya-kontrolling?ysclid=lqz2ojj7i210105725> (accessed: 31.09.2023). (in Russian)
4. **Orlov, A.I., Sharov, V.D.** (2014). Detection of deviations in controlling system (for example, monitoring the level of flight safety). *Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*, no. 95, pp. 460–469. Available at: <http://ej.kubagro.ru/2014/01/pdf/08.pdf> (accessed: 31.09.2023). (in Russian)
5. **Karminsky, A.M., Falko, S.G., Zhevaga, A.A.** (2013). Controlling: Textbook. 3rd ed., in Karminsky A.M., Falco S.G. (Ed.). Moscow: INFRA-M, 336 p. (in Russian)
6. **Grishunin, S.V., Mukhanova, N.V., Suloeva, S.B.** (2018). Development of concept of risk controlling for industrial enterprise. *Organizer of Production*, vol. 26, no. 1, pp. 45–56. DOI: 10.25065/1810-1894-2018-26-1-45-56 (in Russian)
7. **Mutalov, S.V., Musina, D.R.** (2014). The industrial safety system formation in oil and gas company. *Elektronnyy nauchnyy zhurnal “Neftegazovoye delo”*, no. 4, pp. 341–352. DOI: 10.17122/ogbus-2014-4-341-352 (accessed: 31.09.2023). (in Russian)
8. **Kalinin, V.V.** (2019). Controlling as a tool for ensuring economic and technological security of high-tech companies of the Russian military-industrial complex. *Vestnik Altayskoy Akademii Ekonomiki i Prava*, no. 2-2, pp. 273–278. (in Russian)
9. **Mordanov, M.A.** (2020). Controlling system as a basis for effective risk management of domestic airlines. *ETAP: Ekonomicheskaya teoriya, analiz, praktika*, no. 6, pp. 150–162. DOI: 10.24411/2071-6435-2020-10059
10. **Ponomareva, E.V.** (2012). Controlling at the enterprise: Tutorial. St. Petersburg: Izdatelstvo Sankt-Peterburgskogo universiteta upravleniya i ekonomiki, 188 p. (in Russian)
11. **Sharov, V.D., Eliseev, B.P., Vorobyov, V.V.** (2019). Analysis of deficiencies in the procedures for the risk management of safety in the ICAO documents. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 22, no. 2, pp. 49–61. DOI: 10.26467/2079-0619-2019-22-2-49-61 (in Russian)
12. **Bolshedvorskaya, L.G., Vorobiev, V.V., Zubkov, B.V. et al.** (2021). Flight safety of civil aircraft: Textbook, in Vorobiev V.V. (Ed.). Moscow: Izdatelskiy Dom Akademii Zhukovskogo, 440 p. (in Russian)
13. **Nisula, J.** (2009). Operational risk assessment. Next generation methodology. *skybrary.aero*. Available at: <https://skybrary.aero/bookshelf/operational-risk-assessment-next-generation-methodology-presentation-jari-nisula-behalf-th> (accessed: 10.12.2023).
14. **Tolstykh, S.A.** (2022). Methodology for managing flight safety in the activities of airfield operators: Cand of Tech. Sc. Thesis. Moscow: MGTU GA, 128 p. (in Russian)
15. **Habibi, A., Sarafrazi, A., Izdyar, S.** (2014). Delphi technique theoretical framework in qualitative research. *The International Journal of Engineering and Science (UES)*, vol. 3, issue 4, pp. 8–13.
16. **Sharov, V.D., Obratsov, R.A., Polyakov, P.M.** (2023). About safety performance indicators, their targets and triggers. *Scientific Bulletin of the State Scientific Research Institute of Civil Aviation (GosNII GA)*, no. 43, pp. 145–155. (in Russian)
17. **Orlova, I.V.** (2008). Economic and mathematical modeling: practical guide to problem solving. Moscow: VZFEI, 142 p. (in Russian)
18. **Guziy, A.G., Lushkin, A.M., Mishin, A.V., Shiryayev, D.A.** (2021). The aircraft

operator's flight safety management system. Airline staff training course, in Guziy A.G. (Ed.). Moscow: Izdatelskiy Dom Akademii Zhukovskogo, 182 p. (in Russian)

19. Orlov, A.I. (2022). Artificial intelligence: statistical methods of data analysis: Textbook. Moscow: Ay Pi Ar Media, 843 p. (in Russian)

20. Butakova, M.M. (2000). Methods of economic forecasting: Tutorial. 2nd ed., ispr. Moscow: CnoRus, 168 p. (in Russian)

21. Kim, S., Kim, H. (2016). A new metric of absolute percentage error for forecasts of intermittent demand. *International Journal of Forecasting*, vol. 32, issue 3, pp. 669–679. DOI: 10.1016/j.ijforecast.2015.12.003

Список литературы

1. Гомонко Э.А., Тарасова Т.Ф. Управление затратами на предприятии: учебник. М.: КНОРУС, 2010. 320 с.

2. Манн Р., Майер Э. Контроллинг для начинающих: пер. с немец. М.: Финансы и статистика, 1992. 208 с.

3. Потылицина Е.А. Генезис понятия «Контроллинг» [Электронный ресурс] // Экономика, управление и учет на предприятии. 2011. № 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/genezis-ponyatiya-kontrolling?ysclid=lqz2ojj7i210105725> (дата обращения: 31.09.2023).

4. Орлов А.И., Шаров В.Д. Выявление отклонений в Контроллинге (на примере мониторинга уровня безопасности полетов) [Электронный ресурс] // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2014. № 95. С. 460–469. URL: <http://ej.kubagro.ru/2014/01/pdf/08.pdf> (дата обращения: 31.09.2023).

5. Карминский А.М., Фалько С.Г., Жевага А.А. Контроллинг: учебник. 3-е изд. / Под ред. А.М. Карминского, С.Г. Фалько. М.: ИНФРА-М, 2013. 336 с.

6. Гришунин С.В., Муханова Н.В., Сулоева С.В. Разработка концепции риск-контроллинга для промышленного предприятия // Организатор производства. 2018. Т. 26,

№ 1. С. 45–56. DOI: 10.25065/1810-4894-2018-26-1-45-56

7. Муталов С.В., Мусина Д.Р. Формирование системы контроллинга промышленной безопасности в нефтегазовой компании [Электронный ресурс] // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2014. № 4. С. 341–352. DOI: 10.17122/ogbus-2014-4-341-352 (дата обращения: 31.09.2023).

8. Калинин В.В. Контроллинг, как инструмент обеспечения экономической и технологической безопасности высокотехнологических компаний оборонно-промышленного комплекса РФ // Вестник Алтайской академии экономики и права. 2019. № 2-2. С. 273–278.

9. Морданов М.А. Система контроллинга как основа эффективного управления рисками деятельности отечественных авиакомпаний // ЭТАП: Экономическая теория, анализ, практика. 2020. № 6. С. 150–162. DOI: 10.24411/2071-6435-2020-10059

10. Пономарева Е.В. Контроллинг на предприятии: учеб. пособие. СПб.: Издательство Санкт-Петербургского университета управления и экономики, 2012. 188 с.

11. Шаров В.Д., Елисеев Б.П., Воробьев В.В. Анализ недостатков в описании процедур управления риском безопасности полетов в документах ИКАО // Научный Вестник МГТУ ГА. 2019. Т. 22, № 2. С. 49–61. DOI: 10.26467/2079-0619-2019-22-2-49-61

12. Большедворская Л.Г., Воробьев В.В., Зубков Б.В. и др. Безопасность полетов гражданских воздушных судов: учебник / Под ред. В.В. Воробьева. М.: ИД Академии Жуковского, 2021. 440 с.

13. Nisula J. Operational risk assessment. Next generation methodology [Электронный ресурс] // skybrary.aero. 2009. URL: <https://skybrary.aero/bookshelf/operational-risk-assessment-next-generation-methodology-presentation-jari-nisula-behalf-th> (дата обращения: 10.12.2023).

14. Толстых С.А. Методика управления безопасностью полетов в деятельности операторов аэродромов: дисс. ... канд. тех. наук. М.: МГТУ ГА, 2022. 128 с.

15. **Habibi A., Sarafrazi A., Izdyar S.** Delphi technique theoretical framework in qualitative research // The International Journal of Engineering and Science (UES). 2014. Vol. 3, iss. 4. Pp. 8–13.

16. **Шаров В.Д., Образцов Р.А., Поляков П.М.** О показателях безопасности полетов, их целевых и пороговых уровнях // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2023. № 43. С. 145–155.

17. **Орлова И.В.** Экономико-математическое моделирование: практ. пособ. по решению задач. М.: ВЗФЭИ, 2008. 142 с.

18. **Гузий А.Г.** Система управления безопасностью полетов эксплуатанта воздушных судов. Курс обучения персонала авиакомпаний

нии / А.Г. Гузий, А.М. Лушкин, А.В. Мишин, Д.А. Ширяев, под ред. А.Г. Гузия. М.: ИД Академии Жуковского, 2021. 182 с.

19. **Орлов А.И.** Искусственный интеллект: статистические методы анализа данных: учебник. М.: Ай Пи Ар Медиа, 2022. 843 с.

20. **Бутакова М.М.** Методы экономического прогнозирования: учеб. пособие. 2-е изд. испр. М.: Клорус, 2000. 168 с.

21. **Kim S., Kim H.** A new metric of absolute percentage error for forecasts of intermittent demand // International Journal of Forecasting. 2016. Vol. 32, iss. 3. Pp. 669–679. DOI: 10.1016/j.ijforecast.2015.12.003

Information about the authors

Roman A. Obraztsov, the Head of the Department for the Organization of the Use of Airspace and Radio Engineering Support of Flights of the Central Interregional Territorial Administration of Air Transport of the Central Areas of the Federal Air Transport Agency, Ministry of Transport of the Russian Federation, obrazcov1311@mail.ru.

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

Сведения об авторах

Образцов Роман Александрович, начальник отдела организации использования воздушного пространства и радиотехнического обеспечения полетов МТУ ЦР ФАВТ Министерства транспорта Российской Федерации, obrazcov1311@mail.ru.

Шаров Валерий Дмитриевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры безопасности полетов и жизнедеятельности Московского государственного технического университета гражданской авиации, v.sharov@mstuca.aero.

Поступила в редакцию	13.03.2024	Received	13.03.2024
Одобрена после рецензирования	10.04.2024	Approved after reviewing	10.04.2024
Принята в печать	23.05.2024	Accepted for publication	23.05.2024

МАШИНОСТРОЕНИЕ

- 2.5.12 – Аэродинамика и процессы теплообмена летательных аппаратов;
- 2.5.13 – Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов;
- 2.5.14 – Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов;
- 2.5.15 – Тепловые электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов;
- 2.5.16 – Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов

УДК 629.7.016:533.68

DOI: 10.26467/2079-0619-2024-27-3-81-91

Вихревая безопасность при полете на заданном эшелоне

А.И. Желанников¹

¹Центральный аэрогидродинамический институт имени проф. Н.Е. Жуковского,
г. Жуковский, Россия

Аннотация: С каждым годом возрастает интенсивность воздушного движения между странами и внутри отдельных стран. Как правило, воздушные трассы для полетов проходят по одним и тем же маршрутам. В результате этого образуются так называемые дороги в небе. А где дороги, там со временем появляются ухабы. В данном случае в виде воздушных ям, восходящих и нисходящих потоков и повышенной турбулентности. Важную роль в обеспечении безопасности полетов воздушных судов по маршрутам оказывает продольное и вертикальное эшелонирование. В настоящее время принят ряд регламентирующих документов, определяющих безопасные дистанции на эшелоне. Так, при наличии турбулентности в вихревом следе продольное эшелонирование основывается на разбивке типов воздушных судов на три категории в соответствии с максимальной сертифицированной взлетной массой. А с ноября 2011 г. в России внедрен западный стандарт вертикального эшелонирования RVSM (Reduced Vertical Separation Minimum). Вертикальное эшелонирование – это расстояние между вертикальными эшелонами полета воздушных судов по маршруту. Ранее это расстояние составляло 600 м (2 000 футов), но в связи с ростом интенсивности воздушного движения было принято решение уменьшить вертикальное эшелонирование до 300 м (1 000 футов). Таким образом, на самом распространенном эшелоне полетов воздушных судов вертикальное эшелонирование составляет 300 м. Возникает вопрос, а обеспечивает ли это расстояние безопасность воздушных перевозок? Дело в том, что высота эшелона совсем необязательно совпадает с реальной высотой полета воздушного судна. Высотомеры в самолетах – по сути калибруемые барометры, то есть высоту они вычисляют по разнице давления на земле и в воздухе. Для вычисления истинной высоты потребовалось бы постоянно вносить в высотомеры данные об атмосферном давлении в каждой точке маршрута и учитывать высоту этих точек над уровнем моря. Поэтому принято пользоваться стандартным давлением. Если на всех воздушных судах будет установлено одинаковое значение давления на альтиметре, то и показания высоты на приборе в заданной точке воздушного пространства будут одинаковыми. Поэтому с определенного момента при наборе высоты (высота перехода) и до определенного момента при снижении (эшелон перехода) высота воздушного судна рассчитывается по стандартному давлению. Значение стандартного давления (QNE) одинаково во всем мире и составляет 760 мм рт. ст. (1013,2 гектопаскаля). Таким образом, полет по маршруту контролируется по альтиметру, барометрическому высотометру, который входит в пилотажно-навигационный комплекс. Анализ точности работы этого прибора показывает, что при резком перепаде атмосферного давления показания альтиметра могут отличаться от истинного показания на ± 100 м. Известно, что за летящим самолетом образуется вихревой след. Со временем вихревой след опускается вниз и может оказаться на другом эшелоне. Может ли это стать причиной воздушных ям на эшелоне? Для ответа на поставленный вопрос в качестве объекта исследования был выбран самолет А-380. Это один из самых больших самолетов в мире. Поэтому исследование вихревого следа за А-380 на эшелоне полета как самом опасном с точки зрения воздействия его вихревого следа на другие самолеты позволит понять, насколько безопасны и обоснованны принятые продольное и вертикальное эшелонирование. Для исследования был использован специальный расчетно-программный комплекс, базирующийся на методе дискретных вихрей. Этот комплекс прошел необходимую апробацию и государственную регистрацию.

Ключевые слова: воздушное движение, воздушные трассы, эшелон полета, воздушное судно, вихревой след.

Для цитирования: Желанников А.И. Вихревая безопасность при полёте на заданном эшелоне // Научный Вестник МГТУ ГА. 2024. Т. 27, № 3. С. 81–91. DOI: 10.26467/2079-0619-2024-27-3-81-91

Vortex safety when flying at an assigned flight level

A.I. Zhelannikov¹

¹Central Aerohydrodynamic Institute, Zhukovsky, Russia

Abstract: Air traffic intensity between countries and within individual countries is increasing year by year. As a rule, airways follow the same routes. As a result, so-called “roads in the sky” are formed. And where there are roads, there are bumps by the time, in the form of CAT, updraughts and downdraughts and increased turbulence. Horizontal and vertical separation plays an important role in ensuring flight safety on route. Currently, a variety of regulatory documents, defining safe separation at the flight level, has been adopted. Thus, provided there is turbulence in the vortex wake, longitudinal separation is based on the arrangement of aircraft types by three categories according to their maximum certified take-off weight. Since November 2011, the Western standard of vertical separation RVSM (Reduced Vertical Separation Minimum) has been introduced in Russia. Vertical separation is the distance between the vertical flight levels on route. Previously, this distance amounted to 600 m (2000 ft), but due to the increasing intensity of air traffic, it was decided to reduce the vertical separation to 300 m (1000 ft). Hence, at the most common flight level, the vertical separation is 300 m. The question arises if this separation ensures the safety of air transportation? The fact is that the altitude of the flight level does not necessarily coincide with the actual aircraft height. Aircraft altimeters are, inherently, calibrated barometers, that calculate the altitude by the difference in pressure on the ground and in the air. To calculate the height above ground, it would be necessary to constantly input atmospheric pressure data to altimeters at each waypoint and take into consideration the waypoint altitude above the sea level. Consequently, it is customary to use standard pressure. If the same pressure values are set on the altimeter on all aircraft, then, altitude readings on the instrument at an assigned point of airspace will be similar. Therefore, from a certain moment during the climb (transition level) to a certain moment during the descent (transition level), the aircraft height is calculated according to the standard pressure. The value of the standard pressure (QNE) is the same all over the world and amounts to 760 mmHg (1013.2 hectopascals). Thus, the flight on route is controlled by an altimeter, a barometric altimeter, which is comprised into the integrated flight and navigation system. An analysis of the instrument accuracy shows that when atmospheric pressure drops, altimeter readings may differ from true reading by ± 100 m. It is known that a trailing vortex forms behind a flying plane. By the time, the trailing vortex descends and may be found at another flight level. May this cause air bump at the flight level? To answer this question, the A-380 aircraft was chosen as the object of research. This is one of the largest aircraft in the world. Therefore, the study of a trailing vortex behind the A-380 at the flight level, as the most dangerous in terms of the impact of its trailing vortex on other aircraft, will allow us to understand how safe and reasonable the accepted vertical and horizontal separation is. For the study, the special computational software system, based on the discrete vortex method, was used. This complex has passed the evaluation test and the state registration.

Key words: air traffic, airways, flight level, aircraft, trailing vortex.

For citation: Zhelannikov, A.I. (2024). Vortex safety when flying at an assigned flight level. Civil Aviation High Technologies, vol. 27, no. 3, pp. 81–91. DOI: 10.26467/2079-0619-2024-27-3-81-91

Введение

Вихревая безопасность при полете на эшелонах остается актуальной проблемой для гражданской авиации¹. В данной статье речь пойдет о безопасности полета на эшелоне. Отметим, что важную роль в обеспечении безопасности полетов ВС по маршрутам оказывает продольное и вертикальное эшелонирование. В приказе Минтранса РФ от 25 ноября 2011 г. № 293 «Об утверждении Федеральных авиационных правил “Организация воздушного движения в Российской Федерации”» с изменениями и дополнениями от

26 апреля 2012 г., 12 мая 2014 г., 21 июля 2016 г. и 14 февраля 2017 г. в п. 3.8. минимумы продольного эшелонирования при наличии турбулентности в следе основываются на разбивке типов воздушных судов (ВС) на три категории в соответствии с максимальной сертифицированной взлетной массой: тяжелые ВС – массой 136 000 кг и более, средние ВС – массой менее 136 000 кг, но более 7 000 кг и легкие – массой 7 000 кг и менее. Продольное эшелонирование – это расстояние между ВС, летящими на одном эшелоне.

С ноября 2011 г. в России внедрен западный стандарт вертикального эшелонирования RVSM (Reduced Vertical Separation Minimum). Вертикальное эшелонирование – это расстояние между вертикальными эшело-

¹ Doc 10004: Global Aviation Safety Plan 2023-2025 // ICAO, 2022. 58 p.

нами полета ВС по маршруту. Ранее это расстояние составляло 600 м (2 000 футов), но в связи с ростом интенсивности воздушного движения было принято решение уменьшить вертикальное эшелонирование до 300 м (1 000 футов). Вертикальное эшелонирование 300 м действует от эшелона 900 м до эшелона 8 100 м. На других эшелонах это расстояние увеличено. Например, на эшелоне выше 8 100 м вертикальное эшелонирование составляет 500 м, а выше 12 100 м – 1 000 м.

Таким образом, на самом распространенном эшелоне полетов ВС вертикальное эшелонирование составляет 300 м. Возникает вопрос, а обеспечивает ли это расстояние безопасность воздушных перевозок? Дело в том, что высота эшелона совсем необязательно совпадает с реальной высотой полета ВС. Высотомеры в самолетах – по сути калибруемые барометры, то есть высоту они вычисляют по разнице давления на земле и в воздухе. Для вычисления истинной высоты потребовалось бы постоянно вносить в высотомеры данные об атмосферном давлении в каждой точке маршрута и учитывать высоту этих точек над уровнем моря. Поэтому принято пользоваться стандартным давлением. Если на всех ВС будет установлено одинаковое значение давления на альтиметре, то и показания высоты на приборе в заданной точке воздушного пространства будут одинаковыми. Поэтому с определенного момента при наборе высоты (высота перехода) и до определенного момента при снижении (эшелон перехода) высота ВС рассчитывается по стандартному давлению. Значение стандартного давления (QNE) одинаково во всем мире и составляет 760 мм рт. ст. (1013,2 гектопаскаля). Таким образом, полет по маршруту контролируется по альтиметру, барометрическому высотомеру, который входит в пилотажно-навигационный комплекс. Анализ точности работы этого прибора показывает, что при резком перепаде атмосферного давления показания альтиметра могут отличаться от истинного показания на ± 100 м.

Актуальность данного исследования связана еще с тем, что с каждым годом возрастает интенсивность воздушного движения

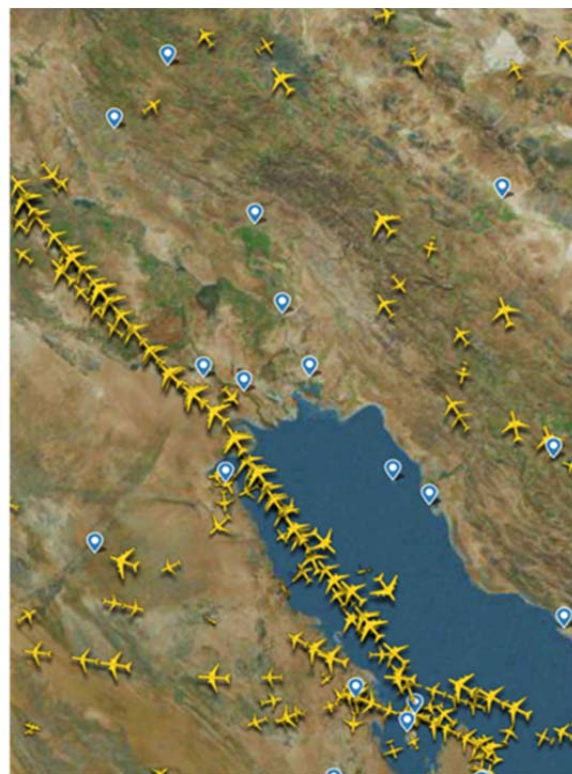


Рис. 1. «Дорога в небе» над Аравийским полуостровом

Fig. 1. "The road in the sky" over the Arabian Peninsula

между странами и внутри отдельных стран. Как правило, воздушные трассы для полетов проходят по одним и тем же маршрутам. В результате этого образуются так называемые дороги в небе. В качестве примера на рис. 1 показана такая дорога над Аравийским полуостровом. Фото взято с сайта Flighadar24. А где дороги, там со временем появляются ухабы. В данном случае в виде воздушных ям, крупномасштабных вихрей, а также восходящих и нисходящих воздушных потоков. Возникает вопрос, а не сами ли самолеты на эшелонах портят свою дорогу? В данной статье делается попытка ответить на этот вопрос.

Воздушное движение управляется диспетчерами, которые следят за тем, чтобы ВС, летящие на одном эшелоне, не сближались друг с другом менее чем на 5 км. Обычно это расстояние составляет 10–15 км. Хотя в приказе Минтранса РФ от 17.07.2008 № 108 (ред. от 23.06.2009) «Об утверждении Федеральных авиационных правил "Подготовка и вы-

полнение полетов в гражданской авиации Российской Федерации» в п. 10.10.1 минимальные интервалы продольного эшелонирования при полетах ВС по одному маршруту и на одном эшелоне при наличии радиолокационного контроля устанавливаются не менее 20 км.

Известно, что за летящим самолетом образуется вихревой след² [1]. Заметим, что вихревой след – это область возмущенного воздушного потока за самолетом, образующаяся в результате его движения. Со временем вихревой след опускается вниз и может оказаться на другом эшелоне. Кроме того, вихревой след при определенных условиях может остаться и на данном эшелоне. В настоящей статье на основании исследования вихревого следа за самолетом А-380 при полете на эшелоне делается попытка понять, насколько обоснованно и безопасно принятое на сегодня продольное и вертикальное эшелонирование. Самолет А-380 выбран в качестве объекта исследования не случайно. Это один из самых больших самолетов в мире и самый опасный с точки зрения воздействия его вихревого следа на другие самолеты. На сегодняшний день известно, что всего в мире построен 251 самолет этого класса. Поэтому А-380 в настоящее время активно эксплуатируется многими мировыми авиационными компаниями. Заметим, что самолет А-380 может перевозить до 850 пассажиров, а его полетная масса достигает 560 т.

Для исследования был использован специальный расчетно-программный комплекс [2], базирующийся на методе дискретных вихрей². В нем при расчете характеристик вихревого следа учитываются полетный вес, скорость и высота полета самолета, его полетная конфигурация, атмосферные условия, осевая скорость в ядре вихря и некоторые другие факторы. Этот комплекс прошел необходимую апробацию и государственную регистрацию. Был выполнен ряд мероприятий по валидации и верификации разработанного комплекса, подтверждающих рабо-

тоспособность программ, входящих в него, и достоверность получаемых результатов. Получены результаты, анализ которых позволяет понять, может ли вихревой след за А-380, летящим на заданном эшелоне быть причиной повышенной турбулентности и воздушных ям на своем и других эшелонах полета. В настоящее время известны многочисленные работы по безопасности полетов ВС [3–9], а также работы [10–14], в которых исследуется вихревой след за воздушными судами, но практически отсутствуют работы по исследованию вихревого следа на эшелоне полета.

Методика исследования

Исследование характеристик вихревого следа за самолетом А-380 проводилось с помощью расчетно-программного комплекса [2], основные положения и идеи которого описаны в монографиях² [15–17] и статьях [18–20]. Известны работы [19–26], в которых вихревой след исследуется альтернативными методами. Основу расчетно-программного комплекса составляет математическая модель дальнего вихревого следа², в которой возмущенные воздушным судном скорости получены на основе точного решения уравнения Гельмгольца [16]. Это позволило учесть диссипацию и диффузию вихрей, моделирующих вихревой след. Эти явления сопровождают естественный процесс затухания вихрей в реальной атмосфере. Для оценки состояния атмосферы в математической модели дальнего вихревого следа расчетно-программного комплекса использовалось число Ричардсона Ri^2 .

Учет влияния осевой скорости в ядре вихря на характеристики дальнего вихревого следа в реальном полете сводится к появлению дополнительного разряжения в ядре и дополнительных скоростей к центру вихрей. В разработанной математической модели дальнего вихревого следа распределение осевой скорости V_x в вихревом жгуте считается известным. Также считается, что в ядре вихря это распределение осесимметрично.

² Doc 10004: Global Aviation Safety Plan 2023-2025 // ICAO, 2022. 58 p.

$$V_x = V_x(x, r'), \quad r' = |\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|.$$

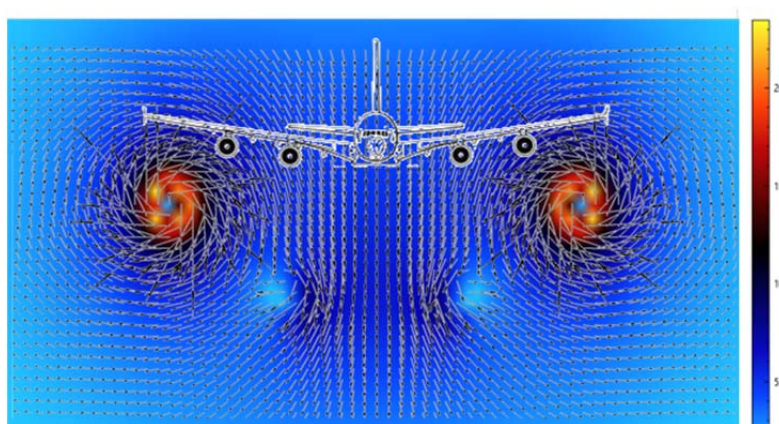


Рис. 2. Поле возмущенных скоростей за А-380, X = 1 км
Fig. 2. Field of perturbed velocities behind A-380, X = 1 km

Здесь r – координата произвольной точки, r_0 – координата вихря. Так как рассматривается модель несжимаемой жидкости [17], то $\text{div } \mathbf{V} = 0$. Если ввести систему координат, связанную с самолетом, то справедливы следующие рассуждения. Если осевая скорость непостоянна вдоль оси OX , то

$$\frac{\partial}{\partial y} V_y + \frac{\partial}{\partial z} V_z = -\frac{\partial}{\partial x} V_x \neq 0.$$

В двумерной постановке в плоскости YOZ это соответствует наличию источников (стоков) с плотностью $q = -\frac{\partial}{\partial x} V_x$. Эти источники индуцируют скорость

$$\mathbf{V}_q(\mathbf{r}) = \frac{1}{2\pi} \int \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}_q}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_q|^2} q(y_q, z_q) ds.$$

При осесимметричном распределении источников имеем

$$\mathbf{V}_q(\mathbf{r}) = \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}_0}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|^2} Q(r), \quad Q(r) = \int_0^r r' \frac{\partial}{\partial x} V_x(r') dr'.$$

Таким образом, зная значение и закон распределения осевой скорости в ядре вихря, определяем интенсивность источника (стока) $Q(r)$. Через $Q(r)$ определяем дополнительную скорость в произвольной точке [3].

Результаты исследования

В качестве объекта исследования был выбран самолет А-380 как один из самых опасных с точки зрения воздействия вихревого следа на другие самолеты. В расчетах высота полета составляла $H = 8000$ м, скорость полета $V = 850$ км/ч, расстояние за самолетом, до которого рассчитывался вихревой след, составляло 30 км. Полетный вес самолета А-380 в расчетах составлял 560 т. При этом состояние атмосферы в расчетах вводилось как нейтральное, что соответствовало числу Ричардсона $0,01 \geq Ri \geq -0,01$ [1]. На нижеприведенных графиках все линейные размеры для удобства восприятия выполнены в одном масштабе. На рис. 2 показаны поля возмущенных скоростей за самолетом А-380 на удалении $X = 1$ км в виде тангенциальной скорости W_t , посчитанной по формуле

$$W_t = \sqrt{W_z^2 + W_y^2}.$$

Здесь W_z и W_y – составляющие возмущенной скорости по осям oZ и oY связанной с самолетом системы координат. Величину тангенциальной скорости W_t в м/с можно оценить по шкале справа от рисунка, а ее направление по направлению стрелки. Хорошо видны вихри, сошедшие с крыла и стабилизатора. Контур самолета А-380 на рис. 2 позволяет

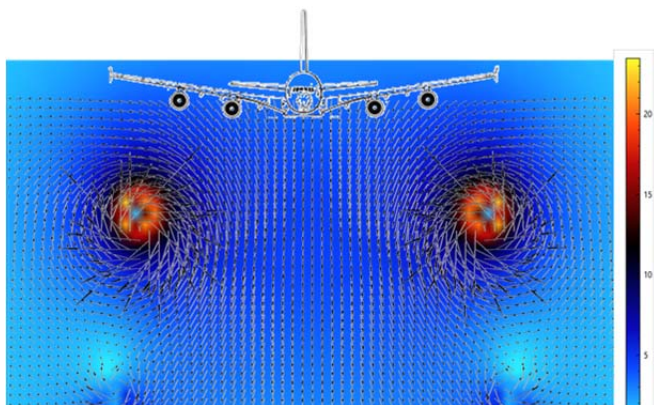


Рис. 3. $X = 5$ км
Fig. 3. $X = 5$ km

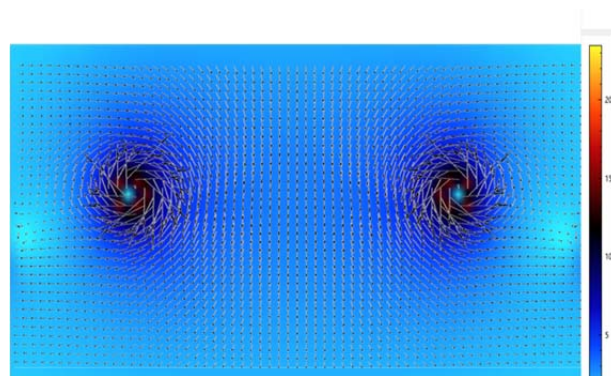


Рис. 4. $X = 10$ км
Fig. 4. $X = 10$ km

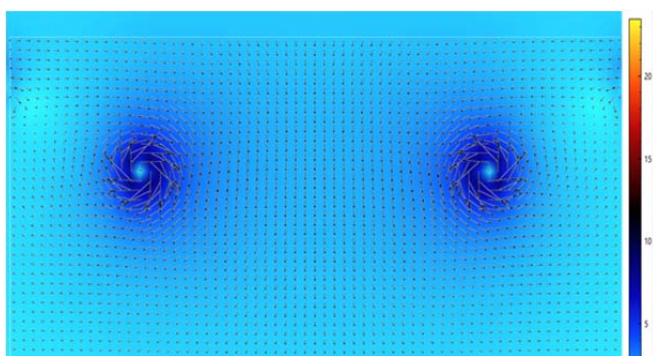


Рис. 5. $X = 15$ км
Fig. 5. $X = 15$ km

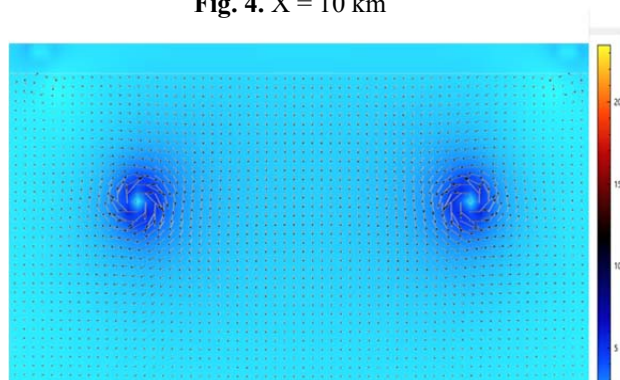


Рис. 6. $X = 20$ км
Fig. 6. $X = 20$ km

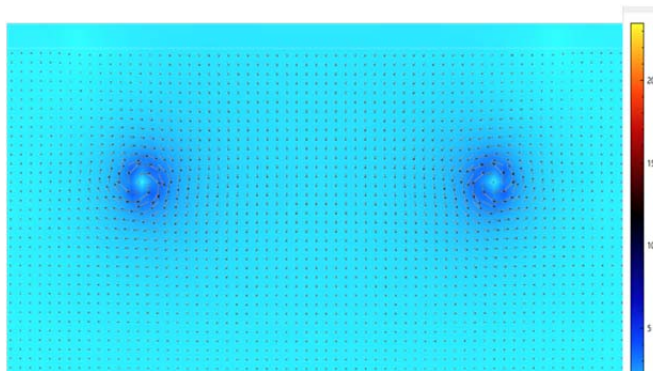


Рис. 7. $X = 25$ км
Fig. 7. $X = 25$ km

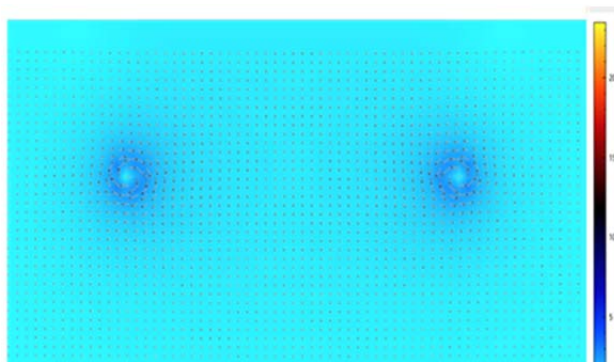


Рис. 8. $X = 30$ км
Fig. 8. $X = 30$ km

оценить положение вихрей относительно самолета на данном удалении.

На рис. 3 показаны поля возмущенных скоростей за самолетом А-380 на удалении 5 км. Видим, что на удалении 5 км возмущенные скорости достигают 25 м/с и более. На рис. 4–8 показаны поля возмущенных скоростей за самолетом А-380 на удалении 10, 15, 20, 25 и 30 км. Видим, что при увеличении удаления X от самолета интенсивность вихревого следа уменьшается. Но даже на

удалении $X = 25$ км от самолета возмущенные скорости достигают 5–7 м/с. На этих рисунках контур самолета А-380 отсутствует, так как он находится выше границ рисунка.

На рис. 9 показано положение центров крылевых вихревых жгутов за А-380 в зависимости от удаления до самолета X , полученное расчетом. Видим, что при заданных условиях полета на удалении 30 км вихревой след опустился более чем на 60 м. Заметим, что на рис. 9 показано положение только

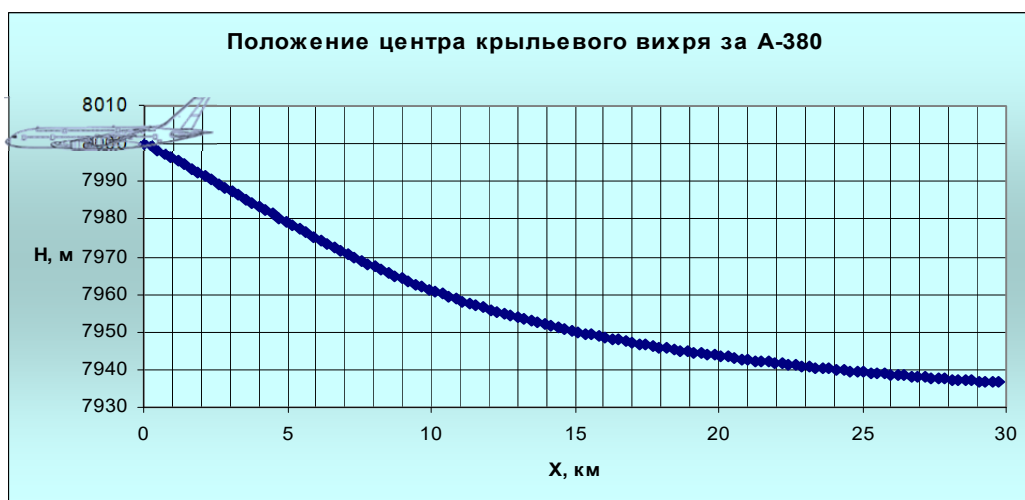


Рис. 9. Положение центра крыльевого вихря за самолетом А-380
Fig. 9. The position of the wing vortex center behind the A380 aircraft

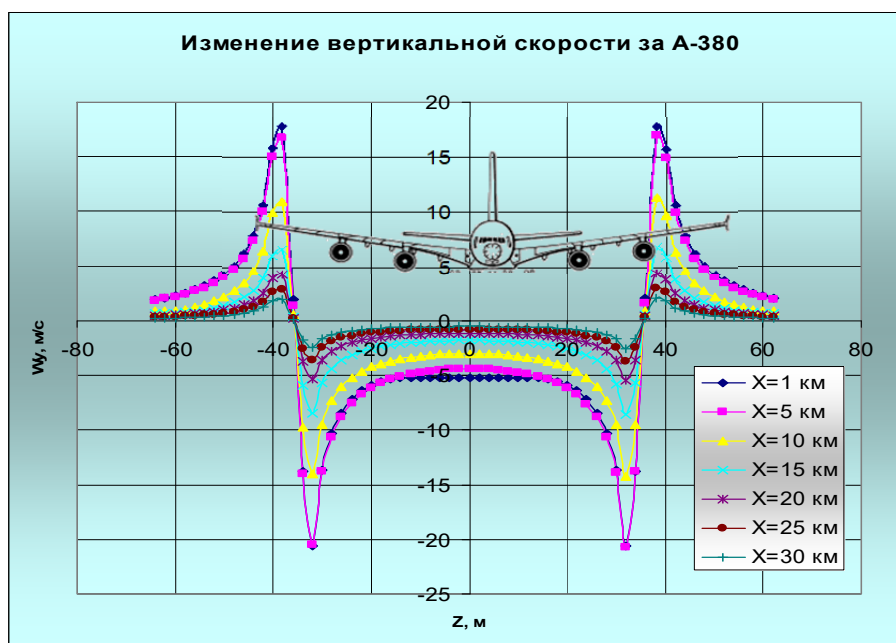


Рис. 10. Изменение вертикальной скорости за А-380
Fig. 10. Change of vertical speed behind the A380 aircraft

центров вихрей. Сам вихрь имеет свои размеры. В момент схода вихря с планера самолета диаметр его более 20 м. С увеличением удаления до самолета, за счет диссипации и диффузии, интенсивность вихревого следа уменьшается, но диаметр вихря остается заметным.

Важной характеристикой вихревого следа являются вертикальные скорости. Именно они могут быть причиной воздушных ям на эшелоне. На рис. 10 показано полученное расчетом изменение вертикальной скорости

за самолетом А-380 на удалении $X = 1, 5, 10, 15, 20, 25$ и 30 км. Видим, что на удалении $X = 10\text{--}15$ км вертикальные скорости составляют $10\text{--}15$ м/с.

Выводы

Расчеты показали, что вихревой след за одним из самых больших самолетов в мире А-380 при полете на эшелоне может представлять опасность для других самолетов. Вихревой след за А-380 на удалении

$X = 10\text{--}15$ км опускается на $40\text{--}50$ м, а тангенциальные скорости в нем достигают более 15 м/с. Вертикальные скорости при этом составляют $10\text{--}15$ м/с. Учитывая то, что рекомендуемые дистанции на эшелоне полета составляют $10\text{--}15$ км, а показания альтиметра (барометрического высотомера) при резком перепаде атмосферного давления могут отличаться от истинного показания на ± 100 м, вполне возможно попадание другого самолета в вихревой след от А-380. Таким образом, при полете на одном эшелоне летящий следом за А-380 самолет на дистанции $10\text{--}15$ км может с большой вероятностью оказаться в зоне повышенной турбулентности, созданной летящим впереди ВС. Поэтому с появлением воздушных судов массой более 500 т и пока нет новых норм по минимумам эшелонирования при наличии турбулентности в следе, следует увеличить продольное эшелонирование за такими судами до $25\text{--}30$ км.

Логично предположить, что за другими, более легкими самолетами, вихревой след также представляет опасность. Хотя интенсивность вихревого следа за более легкими самолетами меньше, чем за тяжелым А-380, да и сам вихревой след опускается на меньшую высоту. То есть на удалении $10\text{--}15$ км вихревой след за более легкими самолетами практически остается на высоте эшелона. Это тоже надо учитывать при продольном эшелонировании.

Приход вихревого следа на другой эшелон полета маловероятен. Вертикальное эшелонирование в 300 м обоснованно и вполне безопасно. Даже за А-380 вихревой след ниже 70 м от эшелона полета не опускается.

Список литературы

1. Ginevsky A.S., Zhelannikov A.I. Vortex wakes of aircrafts. Berlin: Springer, Heidelberg, 2009. 154 p. DOI: 10.1007/978-3-642-01760-5
2. Вышинский В.В., Судаков Г.Г. Вихревой след самолета в турбулентной атмосфере // Труды ЦАГИ. 2006. Вып. 2667. 155 с.
3. Желанников А.И., Замятин А.Н. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015614783 «Расчетно-программный комплекс для системы вихревой безопасности», 2015.
4. Бабкин В.И., Белоцерковский А.С., Турчак Л.И. Системы обеспечения вихревой безопасности полетов. М.: Наука, 2008. 373 с.
5. Большедворская Л.Г., Воробьев В.В., Зубков Б.В. и др. Безопасность полетов гражданских воздушных судов. М.: Дашков и К, 2022. 430 с.
6. Ворхлик Ю.А., Молодцова Е.Ю. Обеспечение безопасности на авиационном транспорте: проблемы стандартизации и реализации // Молодой ученый. 2016. № 6-1 (110). С. 19–22.
7. Смунов М.Ю. Управление самолетом на посадке в условиях неопределенности информации о действующих возмущениях // Научный Вестник МГТУ ГА. 2004. № 72. С. 21–25.
8. Зубков Б.В., Прозоров С.Е. Безопасность полетов: учебник / Под ред. Б.В. Зубкова. Ульяновск: УВАУ ГА(И), 2012. 451 с.
9. Стионов Д.А., Князевский Д.А. Обеспечение безопасности полетов при управлении воздушным движением: учеб. пособие. Ульяновск: УВАУ ГА(И), 2010. 67 с.
10. Писаренко В.Н., Коптев А.Н. Метод обеспечения безопасности полетов на современном этапе состояния авиационной транспортной системы России // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2010. Т. 12, № 4. С. 202–205.
11. Вышинский В.В., Стасенко Л.А. Физические модели, численные и экспериментальные исследования аспектов авиационной экологии и безопасности полетов // Труды МФТИ. 2009. Т. 1, № 3. С. 23–39.
12. Вышинский В.В., Судаков Г.Г. Вихревой след самолета и вопросы безопасности полетов // Труды МФТИ. 2009. Т. 1, № 3. С. 73–93.
13. Свириденко Ю.Н. Моделирование полета пассажирского самолета в вихревом следе / Ю.Н. Свириденко, А.С. Щеглов, А.М. Назаров, Н.Б. Попкова, М.О. Алексеев, М.А. Кудров // Труды МФТИ. 2020. Т. 12, № 4. С. 177–184.

14. Gaifullin A.M., Animitsa O.V., Bosnyakov I.S. et al. Modeling of aircraft flight through the wake vortex // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2019. Vol. 60, no. 2. Pp. 314–322. DOI: 10.1134/S0021894419020123

15. Филиппов Р.Н., Титова Е.А. Влияние вихревого спутного следа на взаимную безопасность крылатых летательных аппаратов, следующих по одному маршруту // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2021. № 10 (739). С. 65–73. DOI: 10.18698/0536-1044-2021-10-65-73

16. Белоцерковский С.М., Ништ М.И. Отрывное и безотрывное обтекание тонких крыльев идеальной жидкостью. М.: Наука, 1978. 277 с.

17. Белоцерковский С.М., Гиневский А.С. Моделирование турбулентных струй и следов на основе метода дискретных вихрей. М.: Физматлит, 1995. 368 с.

18. Аубакиров Т.О. Нелинейная теория крыла и ее приложения / Т.О. Аубакиров, С.М. Белоцерковский, А.И. Желанников, М.И. Ништ. Алматы: Гылым, 1997. 448 с.

19. Апарин В.А., Дворак А.В. Метод дискретных вихрей с замкнутыми вихревыми рамками // *Труды ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского*. 1986. Вып. 1313. С. 424–432.

20. Желанников А.И., Замятин А.Н., Чинючин Ю.М. Влияние состояния атмосферы на взаимодействие вихревых и конденсационных следов воздушных судов // *Научный Вестник МГТУ ГА*. 2022. Т. 25, № 2. С. 70–80. DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-2-70-80

21. Сетуха А.В. О лагранжевом описании трехмерных течений вязкой жидкости при больших значениях числа Рейнольдса // *Журнал вычислительной математики и математической физики*. 2020. Т. 60, № 2. С. 297–322. DOI: 10.31857/S004446692002012X

22. Barnes C.J., Visbal M.R., Huang P.G. On the effects of vertical offset and core structure in stream wise oriented vortex–wing interactions // *Journal of Fluid Mechanics*. 2016. Vol. 799. Pp. 128–158. DOI: 10.1017/jfm.2016.320

23. McKenna C., Bross M., Rockwell D. Structure of a stream wise oriented vortex inci-

dent upon a wing // *Journal of Fluid Mechanics*. 2017. Vol. 816. Pp. 306–330. DOI: 10.1017/jfm.2017.87

24. Unterstrasser S., Stephan A. Far field wake vortex evolution of two aircraft formation flight and implications on young contrails // *The Aeronautical Journal*. 2020. Vol. 124, iss. 1275. Pp. 667–702. DOI: 10.1017/aer.2020.3

25. Stephan A., Schräll J., Holzäpfel F. Numerical optimization of plate-line design for enhanced wake-vortex decay // *Journal Aircraft*. 2017. Vol. 54, no. 3. Pp. 995–1010. DOI: 10.2514/1.C033973

26. Stephan A. Effects of detailed aircraft geometry on wake vortex dynamics during landing / A. Stephan, D. Rohlmann, F. Holzäpfel, R. Rudnik // *Journal of Aircraft*. 2019. Vol. 56, no. 3. Pp. 974–989. DOI: 10.2514/1.C034961

References

1. Ginevsky, A.S., Zhelannikov, A.I. (2009). *Vortex traces of aircraft*. Springer Berlin, Heidelberg, 154 p. DOI: 10.1007/978-3-642-01760-5

2. Vyshinsii, V.V., Sudakov, G.G. (2006). Vortex trace of an airplane in a turbulent atmosphere. *Trudy TsAGI*, issue 2667, 155 p. (in Russian)

3. Zhelannikov, A.I., Zamyatin, A.N. (2015). The certificate of state registration of program for computer № 2015614783 “Design-a software package for the system of vortex-Reva security”.

4. Babkin, V.I., Belotserkovskiy, A.S., Turchak, L.I. (2008). *Vortex flight safety systems*. Moscow: Nauka, 373 p. (in Russian)

5. Bolshedvorskaya, L.G., Vorobyov, V.V., Zubkov, B.V. et al. (2022). *Flight safety of civil aircrafts*. Moscow: Izdatelsko-torgovaya korporatsiya “Dashkov i K”, 430 p. (in Russian)

6. Vorkhlik, Yu.A., Molodtsova, E.Yu. (2016). Ensuring safety in aviation transport: problems of standardization and implementation. *Molodoy uchenyy*, no. 6-1 (110), pp. 19–22. (in Russian)

7. Smurov, M.Yu. (2004). Aircraft control during landing under conditions of uncertain

information about active disturbances. *Nauchnyy Vestnik MGTU GA*, no. 72, pp. 21–25. (in Russian)

8. Zubkov, B.V., Prozorov, S.E. (2012). Flight safety: Textbook, in Zubkov B.V. (Ed.). Ulyanovsk: UVAU GA (I), 451 p. (in Russian)

9. Stionov, D.A., Knyazevsky, D.A. (2010). Ensuring flight safety in air traffic control: Tutorial. Ulyanovsk: UVAU GA (I), 67 p. (in Russian)

10. Pisarenko, V.N., Koptev, A.N. (2010). Method for ensuring a flight safety on the stage support status of Russian aviation transport system. *Izvestiya Samarskogo Nauchnogo Tsentra Rossiyskoy Akademii Nauk*, vol. 12, no. 4, pp. 202–205. (in Russian)

11. Vyshinskii, V.V., Stasenkov, L.A. (2009). Physical models, numerical and experimental studies of aspects of aviation ecology and flight safety. *Trudy MFTI*, vol. 1, no. 3, pp. 23–39. (in Russian)

12. Vyshinskii, V.V., Sudakov, G.G. (2009). The vortex track of the aircraft and flight safety issues. *Trudy MFTI*, vol. 1, no. 3, pp. 73–93. (in Russian)

13. Sviridenko, Yu.N., Shcheglov, A.S., Nazarov, A.M., Popkova, N.B., Alekseev, M.O., Kudrov, M.A. (2020). Simulation of a passenger aircraft flight through the wake vortex. *Proceedings of Moscow Institute of Physics and Technology*, vol. 12, no. 4, pp. 177–184. (in Russian)

14. Gaifullin, A.M., Animitsa, O.V., Bosnyakov, I.S. et al. (2019). Modeling of aircraft flight through the wake vortex. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, vol. 60, no. 2, pp. 314–322. DOI: 10.1134/S0021894419020123

15. Filippov, R.N., Titova, E.A. (2021). Effect of the wake vortex on the mutual safety of winged aircraft following the same route. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, no. 10 (739), pp. 66–73. DOI: 10.18698/0536-1044-2021-10-65-73 (in Russian)

16. Belotserkovsky, S.M., Nisht, M.I. (1978). Separation and non-separation flow of thin wings with an ideal liquid. Moscow: Nauka, 277 p. (in Russian)

17. Belotserkovsky, S.M., Ginevsky, A.S. (1995). Modeling of turbulent jets and traces based on the discrete vortex method. Moscow: Fizmatlit, 368 p. (in Russian)

18. Aubakirov, T.O., Belotserkovsky, S.M., Zhelannikov, A.I., Nisht, M.I. (1997). *Nonlinear theory of the wing and its applications*. Almaty: Gylym, 448 p. (in Russian)

19. Aparinov, V.A., Dvorak, A.V. (1986). The method of discrete vortices with closed vortex frames. *Trudy VVIA im. Prof. N.Ye. Zhukovskogo*, issue 1313, pp. 424–432. (in Russian)

20. Zhelannikov, A.I., Zamyatin, A.N., Chinyuchin, Yu.M. (2022). Impact of the atmosphere state on interaction of aircraft vortex and condensation trails. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 25, no. 2, pp. 70–80. DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-2-70-80

21. Setukha, A.V. (2020). Lagrangian description of three-dimensional viscous flows at large Reynolds numbers. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*, vol. 60, no. 2, pp. 302–326. DOI: 10.1134/S0965542520020116

22. Barnes, C.J., Visbal, M.R., Huang, P.G. (2016). On the effects of vertical offset and core structure in stream wise oriented vortex-wing interactions. *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 799, pp. 128–158. DOI: 10.1017/jfm.2016.320

23. McKenna, C., Bross, M., Rockwell, D. (2017). Structure of a stream wise oriented vortex incident upon a wing. *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 816, pp. 306–330. DOI: 10.1017/jfm.2017.87

24. Unterstrasser, S., Stephan, A. (2020). Far field wake vortex evolution of two aircraft formation flight and implications on young contrails. *The Aeronautical Journal*, vol. 124, issue 1275, pp. 667–702. DOI: 10.1017/aer.2020.3

25. Stephan, A., Schräll, J., Holzäpfel, F. (2017). Numerical optimization of plate-line design for enhanced wake-vortex decay. *Journal Aircraft*, vol. 54, no. 3, pp. 995–1010. DOI: 10.2514/1.C033973

26. Stephan, A., Rohlmann, D., Holzäpfel, F., Rudnik, R. (2019). Effects of detailed geometry on aircraft wake vortex dynamics during landing. *Journal of Aircraft*, vol. 56, no. 3, pp. 974–989. DOI: 10.2514/1.C034961

Сведения об авторе

Желанников Александр Иванович, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник ЦАГИ им. проф. Н.Е. Жуковского, zhelannikov@yandex.ru.

Information about the author

Alexander I. Zhelannikov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher of Central Aerohydrodynamic Institute, zhelannikov@yandex.ru.

Поступила в редакцию	10.12.2023	Received	10.12.2023
Одобрена после рецензирования	10.04.2024	Approved after reviewing	10.04.2024
Принята в печать	23.05.2024	Accepted for publication	23.05.2024

ББК 05
Н 34
Св. план 2024

Научный Вестник МГТУ ГА
Том 27, № 03, 2024
Civil Aviation High TECHNOLOGIES
Vol. 27, No. 03, 2024

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 печать 25.06.2024.

Печать цифровая

Формат 60×90/8

13,0 усл. печ. л.

Заказ № 1037/121

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, 2024